

SISTEM PEMROSESAN SINYAL

SISTEM PEMROSESAN SINYAL

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

BIO DATA PENULIS

Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang dan dari Universitas Kristen Satya Wacana Salatiga (UKSW) Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen dan ilmu sosiologi. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik).

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK.

Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

JL. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-623-6141-90-8 (PDF)



SISTEM PEMROSESAN SINYAL

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

JL. Majapahit No. 605 Semarang

Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

SISTEM PEMROSESAN SINYAL

Penulis :

Dr. Ir. Agus Wibowo, M.Kom., M.Si., MM.

ISBN : 9 786236 141908

Editor :

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

Penyunting :

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

Desain Sampul dan Tata Letak :

Irdha Yuniyanto, S.Ds., M.Kom.

Penebit :

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang
Telp. (024) 6723456
Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :

Universitas STEKOM

Jl. Majapahit no 605 Semarang
Telp. (024) 6723456
Fax. 024-6710144
Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara
apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Keahlian dalam bidang mikroelektronika komputer dan teknologi komunikasi saat ini sangat dibutuhkan dan memiliki potensi pasar masa depan yang sangat baik. Oleh sebab itu buku ini akan memberi wawasan dan keahlian yang berorientasi masa depan. Materi bahasan dalam buku ini berisi ilustrasi seperti osilasi gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik dan kuantum adalah pembawa informasi dalam pertukaran fisik antara pemancar dan penerima.

Teknologi yang ditulis dalam buku ini didefinisikan secara sederhana, sebagai penerapan hukum alam yang diterapkan dalam bidang sinyal, proses dan sistem. Literatur yang ada saat ini menggunakan model matematika untuk menjelaskan fenomena yang terkait dengan sistem sinyal. Buku ini justru menghindari penggunaan model matematika, agar para mahasiswa yang lemah dalam bidang matematika tetap dapat memahami sistem sinyal. Oleh sebab itu pada buku ini banyak menggunakan materi visual yang berkualitas tinggi, simulasi secara interaktif dan penjelasan grafis dalam proses pensinyalan secara visual yang dapat menggantikan peran model matematika, dengan memakai program aplikasi profesional DASYLab Versi 11.

Aplikasi program DASYLab memungkinkan pemrosesan sinyal dan simulasi secara nyata. Perangkat lunak ini menyediakan laboratorium eksperimental yang hampir ideal dan lengkap dengan semua "peralatan" dan instrumen pengukuran yang dapat dibayangkan. Aplikasi DASYLab didistribusikan oleh measx GmbH & Co. KG, Jerman dan dipakai di banyak negara dan bahasa dengan sukses dan digunakan di bidang teknologi pengukuran, kontrol, penyesuaian, dan otomatisasi industri dalam pengukuran dan kontrol otomatis serta teknologi kendali. DASYLab sangat mudah dioperasikan dan menawarkan semua kemungkinan untuk mengembangkan, memodifikasi, mengoptimalkan, membuang, dan mendesain ulang sistem atau aplikasi milik sendiri. Sistem aplikasi DASYLab ini juga hadir dengan versi studi yang memiliki kinerja yang sama dan yang disediakan secara praktis gratis.

Demikian, semoga buku **Sistem Pemrosesan Sinyal** dapat memberi kontribusi untuk memudahkan para mahasiswa untuk belajar proses sinyal tanpa harus pusing dengan model matematika seperti model-model pembelajaran terdahulu.

Semarang, 1 Oktober 2021

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
KATA PENGANTAR	IV
DAFTAR ISI	v
BAB 1 Konsep: Metode – Isi – Tujuan	1
BAB 2 Sinyal Dalam Domain Waktu Dan Frekuensi	25
BAB 3 Prinsip Ketidakpastian	56
BAB 4 Bahasa Sebagai Pembawa Informasi	89
BAB 5 Prinsip Simetri	116
BAB 6 Analisis Sistem	140
BAB 7 Proses Linier Dan Non-Linier	177
BAB 8 Prosedur Modulasi Klasik	218
BAB 9 Digitalisasi	262
BAB 10 Filter Digital	296
BAB 11 Teknologi Transmisi Digital I: Penyandian Sumber	324
BAB 12 Teknologi Transmisi Digital II: Penyandian Saluran	362
BAB 13 Teknik Transmisi Digital III: Modulasi	378
BAB 14 Jaringan Saraf	417
BAB 15 Pemodelan matematis Sinyal – Proses – Sistem	449
DAFTAR PUSTAKA	482

BAB 1

KONSEP: METODE – ISI – TUJUAN

Mikroelektronika sudah menjadi industri utama (lihat Gambar 9:). Dalam pandangan para ahli di bidang ini, teknologi ini telah mengubah hidup kita lebih dari teknologi lainnya dan akan terus begitu. Mungkin tidak mungkin kita membayangkan dampak sosial, politik dan ekonomi dari teknologi ini.

Mobilitas profesional mungkin akan hampir identik dengan aplikasi mikroelektronika yang berkualitas dan bertanggung jawab dalam arti luas. Hal ini kemungkinan akan mempengaruhi pendidikan dan sains secara lebih mendalam dan mengubahnya lebih cepat daripada sebelumnya.

Mikroelektronika telah lama dicirikan oleh keragaman yang membingungkan dan inovasi yang semakin pesat. Pertanyaan tentang konsep untuk program gelar universitas, pelatihan, pendidikan lanjutan dan pelatihan lanjutan di bidang mikroelektronika menjadi semakin mendesak. Mengingat kecenderungan yang muncul dari kerumitan yang tampak ini untuk menganggap "insinyur sebagai pekerja terampil masa depan" (VDI-Nachrichten – buletin berita Asosiasi Insinyur Jerman) pertanyaan yang tak terhindarkan muncul – Apa yang akan terjadi dengan tentara terampil saat ini? pekerja?

<p>Mobil dan transportasi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol lalu lintas udara • Sistem kontrol lalu lintas • Sistem diagnosis otomotif • Sistem anti-pemblokiran • Kontrol jarak radar • Komputer terpasang • Sistem kontrol lampu lalu lintas • Kontrol motor • Sistem penentuan posisi global 	<p>Energi dan lingkungan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teknologi surya • Pompa panas • Kontrol pencahayaan • Kontrol pemanasan • AC • Pengawasan udara/air • Optimalisasi proses pembakaran • Mendaur ulang • Prakiraan Cuaca 	<p>• Perkantoran dan perdagangan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pengolah kata • Keluaran suara • Pengenalan suara • Pemindai kode batang • Pengenalan karakter • Mesin fotokopi • Komputer kantor • Printer • Pengenalan pola secara optik
<p>Hiburan/kenyamanan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alat-alat musik • Permainan • Radio/hifi • Kamera • Kamera perekam • Komputer pribadi • Video digital 	<p>Aplikasi mikroelektronika</p>	<p>Industri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol alat mesin • Alat pengukur • Kontrol proses • CAD/CAM/CIM • Robot • Peralatan keselamatan • Instalasi transportasi

Konsumsi rumah tangga/ swasta	Komunikasi	Aplikasi medis
<ul style="list-style-type: none"> • Kompor/kompor • Jam dan jam tangan • Pencuci piring • Mesin cuci • Kalkulator saku • Sistem alarm • Sistem untuk membagi biaya pemanasan 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistem telepon • Jaringan data • Komunikasi satelit • Komunikasi pita lebar • Telemonitoring/lokasi • Encoding dan decoding • Telepon seluler • Notebook/PDA 	<ul style="list-style-type: none"> • Pemantauan pasien • Alat bantu optik • Pembuat kecepatan • Instrumen laboratorium • Peralatan anestesi • Alat bantu Dengar • Prostesis • Sonografi • Tomografi NMR

Gambar 9: Mikroelektronika industri utama
(Sumber: ZVEI -Asosiasi industri elektronik Jerman)

Saat ini sudah ada seluruh sistem yang terintegrasi dalam satu chip yang terdiri dari jutaan transistor. Pertanyaannya adalah apa yang harus diajarkan dan bagaimana itu harus disajikan untuk memberikan akses kepada generasi muda akademis dan non-akademik ke teknologi yang menarik dan tidak dapat diubah ini yang sangat penting bagi kita semua.

Pertama-tama, ini adalah pertanyaan yang harus dijawab oleh spesialis mikroelektronika itu sendiri. Lagi pula, bidang yang terampil hanya dinaikkan ke peringkat disiplin akademik spesialis jika memungkinkan untuk menunjukkan kejelasan dan transparansi (struktur) yang mendasari keragaman tak terbatas melalui strategi intelektual yang tepat – yaitu konsep yang dipikirkan dengan matang.

Semuanya Di Bawah Satu Atap

Oleh karena itu, ada alasan bagus untuk membuat subjek ini dapat diakses oleh sebanyak mungkin orang. Dan tampaknya ada kunci utama yang membuat akses lebih mudah. Semua contoh dalam Gambar 9: menunjukkan bahwa yang terlibat adalah pemrosesan sinyal, misalnya mengukur, mengendalikan, mengatur. Hal ini berlaku bahkan untuk mesin cuci (modern) yang bekerja melalui program yang dikontrol secara elektronik yang memantau ketinggian air dan suhu. Semua yang terjadi di komputer adalah pemrosesan sinyal, meskipun dalam konteks ini biasanya disebut sebagai pemrosesan data.

Seluruh bidang mikroelektronika tidak melakukan apa pun selain pemrosesan sinyal

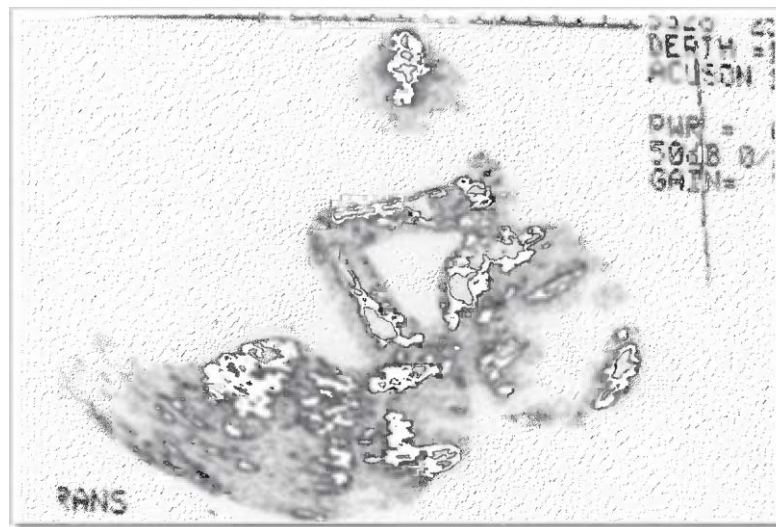
Pernyataan kunci ini memungkinkan untuk memasukkan hampir semua bidang mikroelektronika di bawah satu atap. Atas dasar ide ini, mikroelektronika mungkin paling mudah direpresentasikan sebagai tiga serangkai yang terdiri dari tiga kolom Perangkat Keras, Perangkat Lunak, dan "teori sinyal, proses, dan sistem". Sedangkan perangkat keras dan perangkat lunak masa kini akan menjadi usang dalam waktu yang relatif singkat, ini tidak berlaku untuk kolom ketiga, "Teori sinyal, proses dan sistem". Praktis tidak lekang oleh waktu karena didasarkan pada hukum alam!

Tiga kolom mikroelektronika harus diperiksa lebih dekat di bawah aspek pengembangan masa depan.

Perangkat Keras: Sistem Pada Sebuah Chip

Saat ini dimungkinkan melalui komputer untuk melakukan hampir semua jenis pemrosesan sinyal, -analisis atau -visualisasi. Komputer adalah sejenis perangkat keras universal untuk sinyal atau data. Perangkat keras PC sudah dapat dipasang di area seukuran kartu chip telepon. Sebagai hasil dari kemajuan yang dibuat di bidang sirkuit terpadu skala besar – saat ini hingga 4 miliar transistor dapat diintegrasikan pada satu chip – tidak masuk akal untuk memprediksi bahwa di masa mendatang perangkat keras PC lengkap termasuk memori, grafis, suara, antarmuka, codec video dll akan terintegrasi pada satu chip.

Untuk semua masalah yang tidak dapat diselesaikan melalui chip-PC universal ini, akan segera ada juga chip yang dapat diprogram secara bebas yang sangat kompleks baik untuk sirkuit analog maupun digital. Mereka akan diprogram di komputer; dengan satu sentuhan tombol, desain sirkuit akan "dibakar" ke dalam chip. Namun, kompetensi yang diperlukan untuk ini termasuk dalam bidang sinyal – proses – sistem!



Gambar 10: Sonografi

Ini juga menerapkan pemrosesan sinyal – sonogram melalui sonografi ultra-suara pada minggu ke-22 kehamilan. Anak yang belum lahir sedang mengisap ibu jarinya (Sumber: Geo Wissen No., 2/91, h.107). Apakah keterampilan pemrograman dan perangkat keras kelas satu dan kompetensi matematika cukup untuk mengembangkan mesin pemindai semacam ini? Dengan kata lain, informasi apa yang diperlukan untuk dapat mengembangkan instrumen yang sedemikian kompleks dalam mikroelektronika dan teknologi komputer di masa depan?

Alih-alih variasi yang membingungkan lebih dari 100.000 IC (Integrated Circuits) yang berbeda, trennya jelas menuju "PC Standar IC" atau IC yang dapat diprogram secara bebas. Sirkuit terpadu khusus aplikasi (ASIC) yang dioptimalkan untuk fungsi dan biaya mungkin akan digunakan dengan sebaik-baiknya. dalam produksi massal. Apa konsekuensinya? Fokus mikro-elektronik akan semakin bergeser ke arah perangkat lunak di masa depan. Algoritma bukan perangkat keras!

Perangkat Lunak Adalah Instrumennya

Moto dari perusahaan National Instruments yang berbasis di AS ini tampaknya dapat dibenarkan. Tetapi jenis perangkat lunak dan pemrograman perangkat lunak apa yang akan menang? Pertanyaan ini sangat penting mengingat tingginya tingkat efektivitas pembelajaran dan penggunaan waktu secara ekonomis dalam proses pembelajaran yang kita tuju. Oleh karena itu akan dibahas lebih rinci pada tahap selanjutnya. Bukankah luar biasa untuk membuat program dalam waktu singkat yang sebelumnya dibutuhkan tanpa harus menggunakan bahasa pemrograman yang samar dan algoritme yang melibatkan matematika tingkat tinggi? Kami memikirkan program yang konten dan strukturnya dapat dirancang dan dipahami oleh siswa muda, pekerja terampil, teknisi, dan insinyur tanpa mengambil program gelar dalam matematika.

PC adalah "kalkulator" yang dapat diprogram. Karakteristik sebenarnya dari sistem dihasilkan dari perangkat lunak. Sampai batas tertentu mereka adalah sistem virtual karena "tidak berwujud".

Dari mana pengguna akan mendapatkan perangkat lunaknya di masa depan? Dari internet tentunya. Apa yang dia butuhkan untuk memilih program yang sesuai untuk setiap bentuk sinyal atau pemrosesan data tertentu? Di atas semua kompetensi dalam teknologi sinyal. Pada titik ini kolom ketiga, teori Sistem Pemrosesan Sinyal menjadi terlibat.

Sebuah Kasus Untuk Pendidikan Terkini

Sinyal – proses – sistem triad identik dengan komunikasi, konsep kunci dalam masyarakat kita, bahkan keberadaan kita.

Komunikasi hampir merupakan definisi hidup. Jika sel-sel otak tidak lagi berkomunikasi satu sama lain, individu tersebut mati secara klinis. Saat ini sesuatu dari perubahan paradigma sedang terjadi dalam kedokteran. Sementara itu sampai sekarang dianggap sebagai ilmu empiris berdasarkan pengalaman, biologi molekuler dan genetika sekarang menawarkan instrumen yang kuat untuk mengungkap dan memahami rantai kausal yang mengarah ke penyakit. Penyakit semakin terlihat sebagai gangguan komunikasi antar sel! Kemungkinan yang dihasilkan dari organisasi, pencegahan dan pengobatan tidak hanya menantang batas-batas etika dan moralitas tetapi juga kemampuan kita untuk membiayai sistem sosial.

Tanpa komunikasi tidak akan ada masyarakat, negara bagian, industri, ekonomi, sekolah dan keluarga. Dan apa yang diperlukan untuk keefektifan seorang guru – komunikasi!

Singkatnya, dalam semua bidang kehidupan sehari-hari, kehidupan profesional dan akademis, tak terhitung banyaknya pertanyaan yang muncul, yang pada analisis terakhirnya terkait erat dengan komunikasi atau dapat dijawab dengan mengacu padanya. Tidak ada korelasi yang memadai tentang hal ini dalam pendidikan dan di banyak bidang ilmu

pengetahuan. Pada awal milenium baru ada diskusi tentang mata pelajaran apa yang diperlukan untuk memperbarui kurikulum sekolah menengah, yaitu untuk menyesuakannya secara lebih efektif dengan kebutuhan dunia nyata. Kemungkinan mata pelajaran seperti Ekonomi dan Teknologi dibahas dan pada saat yang sama ditolak keras. "Komunikasi" hampir tidak pernah disebutkan!

Tentang kesatuan teori dan praktik

Yang diperlukan adalah mode penjelasan universal yang relevan untuk pemahaman intelektual berbagai fenomena komunikatif dari teori dan praktik ilmiah dan yang memungkinkan terciptanya keteraturan, struktur, dan transparansi dalam suatu spesialisasi. Ini adalah indikasi pertama dari apa yang kita maksud dengan teori.

Pengajaran dan pembelajaran menunjukkan satu kelompok tertentu dari fenomena komunikatif, teknologi komunikasi dan teori sinyal-proses-sistem yang lain. Fisiologi tubuh kita adalah kelompok lebih lanjut dari fenomena komunikatif. Apakah mungkin untuk melihat mereka sebagai milik di bawah satu atap?

Pembelajaran Multimedia Dan Interaktif

Komunikasi multimedia dan interaktif dalam proses pembelajaran berarti berkomunikasi dengan semua indera!

Sampai saat ini bahasa mendominasi komunikasi pendidikan dan budaya. Terlepas dari kenyataan bahwa bahasa sangat terfragmentasi dan berlebihan, bandwidth fisik 3 kHz cukup untuk aliran informasi akustik seperti dalam kasus telepon.

Untuk mengirimkan aliran gambar dengan kualitas yang sama yang sesuai dengan gambar stereoskopik mata kita diperlukan sekitar 300 MHz. Dengan demikian, kita menyerap hingga 100.000 kali lebih banyak informasi dengan mata per unit waktu dibandingkan dengan bahasa!

Selain itu, indera pendengaran adalah indera terakhir yang diperoleh selama evolusi. Oleh karena itu, kita mungkin menduga bahwa otak kita sebagian besar terstruktur untuk memproses informasi dalam gambar. Siapa pun yang membaca novel membuat filmnya sendiri pada saat yang sama.

Semua temuan penelitian otak modern – lihat BURDA ACADEMY OF THE THIRD MILLENNIUM („Membayangkan Pengetahuan“) – menunjukkan pergeseran paradigma dalam berpikir – dari pengajaran pengetahuan yang saat ini didominasi oleh tulisan dan bahasa ke pemrosesan pengetahuan berbasis citra ("giliran bergambar").

Bayangkan seseorang ingin belajar menerbangkan pesawat. Dia membeli buku yang sesuai. Setelah mempelajarinya dengan seksama, ia menyambut penumpang di gang pesawat dengan kata-kata: "Jangan takut, saya telah mempelajari buku itu dengan sangat hati-hati". Apakah Anda akan naik ke pesawat? Ini menggambarkan secara kasar situasi tradisional di sekolah dan universitas (perkuliahan). Sebaliknya, simulator penerbangan mewakili lompatan kuantum pendidikan dalam hal ini mengatasi semua indera dan memungkinkan pembelajaran eksplorasi mandiri tanpa siswa harus menanggung konsekuensi dari kesalahan mereka. Sekitar 70% dari pelatihan pilot sekarang berlangsung di simulator penerbangan.

Banyak guru dari semua jenis masih lupa bahwa teknologi berbasis komputer seperti ini untuk membuat model, simulasi dan visualisasi misalnya dalam pengembangan dan pengujian sistem teknis baru – chip, mobil, pesawat, kapal – menghemat miliaran dolar. Mereka tidak menerima bahwa adalah mungkin untuk belajar, merencanakan dan mengembangkan jauh lebih efektif dan dengan penggunaan waktu yang jauh lebih ekonomis

(katakanlah, dengan faktor 5). Jika tidak ada yang dilakukan media baru dapat kehilangan pengakuan ini sebagai akibat dari sikap tradisional universitas dan sekolah.

Sistem pembelajaran yang disajikan di sini berusaha sejauh mungkin untuk menerapkan wawasan tersebut.

Sains dan Matematika

Pernyataan ini dimaksudkan untuk mencapai hal-hal berikut:

- Untuk menjelaskan kepada dosen universitas mengapa dia tidak menemukan matematika dalam buku ini selain dari empat operasi aritmatika dasar.
- Untuk menjelaskan dengan jelas kepada siswa baik di sekolah maupun universitas nilai dan kekuatan matematika sehingga dapat dilihat lebih sebagai peluang dan inspirasi daripada sebagai sumber siksaan.
- Untuk menjelaskan secara singkat kepada semua orang apa yang sebenarnya dilakukan matematika dan mengapa matematika sangat diperlukan untuk ilmu pengetahuan (alam).

Tampaknya tidak ada yang mungkin dalam ilmu eksakta tanpa matematika. Setiap mahasiswa teknik elektro, teknologi informasi atau fisika mengetahui hal ini dengan biayanya sendiri. Mereka menghabiskan sebagian besar program gelar mereka pada "matematika murni dan terapan". Bagi pekerja terampil dan teknisi yang berorientasi praktis, matematika merupakan penghalang yang tidak dapat diatasi. Terlalu sering hasil dari desakan yang berlebihan pada sifat ilmiah dari subjek ini adalah:

Hal-hal penting yang penting hilang di semak-semak kusut dari hutan matematika.

Di sisi lain bagi banyak orang – termasuk penulis saat ini – matematika merupakan pencapaian intelektual terbesar yang pernah dicapai manusia. Tapi peran apa yang dimainkannya secara konkret? Jawaban singkat untuk pertanyaan kompleks ini tidak akan lengkap.

Namun, proposisi berikut dapat membantu memperjelas masalah ini secara umum:

- Dalam contoh pertama, matematika hanyalah alat intelektual yang kuat. Pada pemeriksaan lebih dekat itu merupakan satu-satunya metode - berbeda dengan bahasa - yang dapat digunakan untuk menjamin presisi, kurangnya ambiguitas, penyederhanaan, komunikabilitas, verifiability, prediktabilitas dan kurangnya redundansi dalam deskripsi hubungan.
- Ini juga merupakan metode paling brilian untuk menyajikan informasi dalam bentuk yang terkonsentrasi. Jadi dalam fisika persamaan matematika tunggal - persamaan Schroedinger yang terkenal - untuk sebagian besar menggambarkan kosmos, yaitu dunia atom, ikatan kimia, fisika keadaan padat dll.
- Semua kesimpulan yang diperoleh dengan matematika juga benar pada tingkat akal sehat karena semua premis dan langkah telah terbukti benar.

Berbicara agak metaforis, matematika menawarkan kemungkinan bergerak dari dataran berkerut konsep linguistik yang tidak tepat, jumlah membingungkan dari pengaruh eksternal dalam proses nyata, kontradiksi, redundansi, dan naik ke bidang virtual di mana

semua kemungkinan strategi mental yang koheren dan logis dapat dicoba dengan sejumlah variabel dan nilai awal dan periferal. Referensi ke realitas dapat dibuat dengan mengalokasikan kuantitas yang bermakna dan dapat diverifikasi secara eksperimental ke variabel dan konstanta matematis yang dalam hal teknologi informasi bersifat fisik.

Jelas bahwa para ilmuwan lebih memilih "surga" ini untuk penerapan strategi berpikir yang baru. Namun, "surga" ini hanya dapat diakses melalui gelar sains. Di sisi lain, matematika melingkupi kehidupan kita sehari-hari. Kami menghitung jalur bintang dan satelit, stabilitas bangunan dan pesawat terbang, mensimulasikan perilaku proses dinamis dan menggunakan matematika untuk membuat prediksi. Bahkan dunia permainan komputer hanya terdiri dari analisis akhir matematika.

Untuk alasan ini matematika adalah metode yang paling umum untuk menciptakan model untuk teori sinyal, proses dan sistem di universitas.

Model matematis hambatan konduktor listrik R

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

l : = panjang konduktor (dalam m);

A := penampang (dalam mm²);

ρ := resistansi spesifik material (dalam mm²/m)

Catatan: model dibatasi pada tiga variabel (ρ , l , A). Jadi pengaruh minimal suhu konduktor pada hambatan listrik R tidak diperhitungkan. Model ini berlaku untuk 20°.

Modelnya menjamin...

- Presisi : kombinasi nilai spesifik untuk ρ , l dan A menghasilkan hasil eksak yang hanya bergantung pada akurasi pengukuran besaran yang diberikan .
- Kurangnya ambiguitas : kombinasi angka ρ , l dan A menggambarkan situasi fisik diskrit dan menghasilkan hasil tunggal untuk R .
- Penyederhanaan: model matematika menjelaskan metode perhitungan hambatan listrik konduktor untuk berbagai tak terbatas bahan yang berbeda, panjang dan penampang.
- Keterkomunikasian: model matematika valid terlepas dari bahasa atau hambatan lain, yaitu di seluruh dunia
- Verifiability: model matematika dapat diverifikasi secara eksperimental. Pengukuran yang tak terhitung banyaknya dengan bahan yang paling bervariasi, panjang dan penampang mengkonfirmasi tanpa kecuali validitas model.
- Prediktabilitas: resistansi konduktor untuk bahan tertentu, panjang dan penampang dapat diprediksi. Dalam kasus hubung singkat dimungkinkan dengan mengukur resistansi konduktor dalam kabel untuk memprediksi di mana letak cacat asalkan bahan dan penampang diketahui dan konduktor memiliki struktur yang homogen.
- Kurangnya redundansi: model matematika tidak mengandung "padding",

Gambar 11: Fitur model matematika ditunjukkan melalui contoh sederhana.

Ratusan buku memberikan penjelasan yang cukup kuat tentang jenis ini dan setiap dosen universitas menggunakannya untuk merancang program kuliahnya sendiri. Tidak ada gunanya menulis buku lain semacam ini. Sistem studi yang disajikan di sini memungkinkan untuk mendemonstrasikan secara langsung apa yang ada di balik matematika dan

bagaimana reaksinya terhadap sinyal nyata – tambahan yang ideal untuk kursus kuliah tradisional. Biarkan kami mencoba meyakinkan Anda!

Mencari "Alat" Lainnya

"Teori sinyal, proses dan sistem" dipahami sebagai penciptaan model matematis dari proses teknologi sinyal berdasarkan fenomena osilasi fisik dan gelombang dan fisika kuantum (masih belum sepenuhnya dipahami). Ini berlaku dengan latar belakang bahwa tidak ada yang berhasil dalam teknologi yang bertentangan dengan hukum alam. Oleh karena itu, semua kondisi kerangka kerja dan model penjelas dalam teknologi pasti berasal dari hukum alam, dan lebih khusus lagi dari fisika.

Wiener-Khinchine Theorem
For a well behaved stationary random process the power spectrum is equal to the Fourier transform of the autocorrelation function.

$$S_x(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_x(k)e^{-j\omega k}$$

Sloppy proof:

$$\begin{aligned} S_x(e^{j\omega}) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} E[|X_N(e^{j\omega})|^2] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} E \left[\left(\sum_{n=-N}^N x(n)e^{-j\omega n} \right) \left(\sum_{k=-N}^N x(k)e^{-j\omega k} \right)^* \right] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} E \left[\sum_{n=-N}^N \sum_{k=-N}^N x(n)x(k)e^{-j\omega(n-k)} \right] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \sum_{k=-N}^N E[x(n)x(k)]e^{-j\omega(n-k)} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \sum_{k=-N}^N R_x(n-k)e^{-j\omega(n-k)} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \sum_{k=-M}^M R_x(n-k)e^{-j\omega(n-k)} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{k=-M}^M R_x(n-k)e^{-j\omega(n-k)} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} R_x(k)e^{-j\omega k} \right) \\ &= \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} R_x(k)e^{-j\omega k} \right) \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N 1 \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_x(k)e^{-j\omega k} \end{aligned}$$

Gambar 12: Matematika sebagai penghalang

Sebuah "sampel" dari sumber pada pemrosesan sinyal. Ini berisi pernyataan penting tentang hubungan antara domain waktu dan frekuensi (teorema WIENER-KHINTCHINE). Sampai sekarang upaya untuk menunjukkan dengan jelas hubungan seperti itu tanpa matematika belum berhasil. Rumus tersebut menunjukkan dominasi matematika; fisika hampir seluruhnya tenggelam. Hanya istilah seperti transformasi FOURIER dan spektrum daya yang mengarah ke basis fisik. (Sumber: <http://ece.www.purdue.edu/>).

Pendekatan ini tidak diakui oleh semua ilmuwan yang bekerja dengan teori sinyal, proses dan sistem. Ada buku-buku spesialis yang cukup beralasan di mana kata-kata "fisika" atau "hukum alam" bahkan tidak muncul. Teori Informasi Claude SHANNON – yang sangat penting bagi semua sistem Komunikasi modern – selain itu disajikan sebagai teori matematika murni yang hanya didasarkan pada statistik dan kalkulus probabilitas dan tampaknya tidak ada hubungannya dengan fisika. Pendekatan ini tampaknya berasal dari fakta bahwa konsep informasi belum berlabuh dengan benar dalam fisika.

Adapun alasan yang dijelaskan di atas, "teori Pemrosesan & Sistem Sinyal" yang menghindari kemungkinan paradisiakal (matematis) harus dapat diakses dan dipahami, tak pelak pertanyaan tentang "alat" lain muncul. Apakah kata-kata dan teks memadai, misalnya? Apakah bahasa memiliki kemungkinan untuk menyampaikan informasi yang dianggap berasal dari sastra?

Dalam konteks saat ini tampaknya ada alternatif yang lebih baik. Jika jelas dan grafis berarti bahwa "gambar mengungkapkan lebih dari seribu kata" ini tampaknya berarti bagi teknologi komunikasi bahwa gambar yang mirip dengan matematika mampu mengekspresikan informasi dengan cara yang ringkas dan relatif berbeda. Otak kita muncul secara umum – sadar atau tidak sadar – untuk mengubah teks menjadi gambar. Seperti yang telah disebutkan, siapa pun yang membaca buku membuat "film"-nya sendiri.

Untuk menghindari sebanyak mungkin "proses transformasi" yang rumit ini, penulis saat ini melihatnya sebagai tantangan yang menarik untuk mendasarkan seluruh kompleks sinyal, proses, dan sistem pada gambar.

Ini dilakukan dengan dua cara:

- (1) Lingkungan pengembangan profesional DASYLab yang bekerja di latar belakang sistem pembelajaran memungkinkan pemrograman grafis yang hampir tidak terbatas dari aplikasi yang dapat dijalankan dalam pengukuran, teknik kontrol otomatis, dan teknologi otomasi.
- (2) Pada setiap titik dalam sistem, dimungkinkan untuk memvisualisasikan sinyal. Dengan membandingkan sinyal input dan sinyal keluaran dari setiap modul atau sistem, dimungkinkan untuk menganalisis dan memahami perilaku teknis suatu sinyal.

Pemrograman grafis sistem virtual dan nyata akan menjadi kartu truf masa depan baik dalam sains maupun metode pengajaran berbasis ilmiah.

Itu memungkinkan, tanpa banyak pengeluaran dalam hal waktu dan uang dan dengan cara yang ramah lingkungan, untuk menghasilkan, membuat parameter, mensimulasikan, mengoptimalkan sistem komunikasi apa pun sebagai diagram blok di layar dan membawa kontak dengan dunia luar secara nyata melalui perangkat keras khusus (seperti kartu suara). Dengan menghubungkan blok bangunan (proses) di layar untuk membentuk diagram blok, sistem virtual dibuat di "latar belakang" di mana algoritma komunikasi yang sesuai untuk seluruh proses dihubungkan bersama (dengan penambahan sub-program penting, misalnya untuk matematika dan grafik).

Akibatnya, bahasa pemrograman tradisional dan seluruh instrumen matematika menjadi kurang penting, penghalang antara masalah seperti itu dan solusinya berkurang

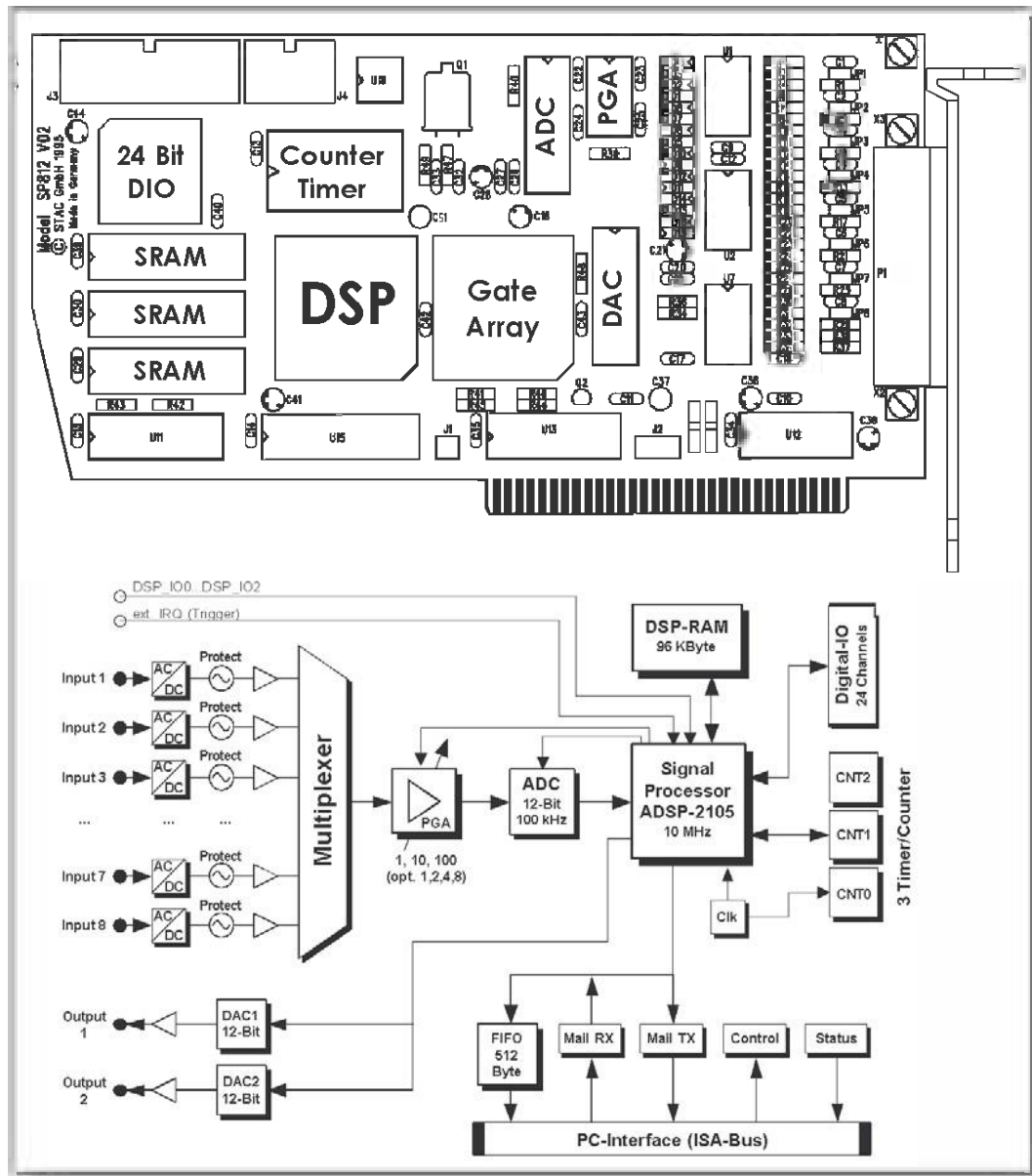
secara drastis. Bahasa pemrograman dan matematika dengan demikian tidak lagi mengalihkan perhatian dari konten dan masalah komunikasi yang sebenarnya.

Kesenjangan intelektual antara insinyur "teoretis" dan teknisi "praktis" sebagian besar dapat dihilangkan dengan cara ini. Pengetahuan faktual yang segera menjadi usang pada saat ini disebabkan oleh keragaman mikroelektronika yang sangat besar – sebagai bagian penting dari program pendidikan dan pelatihan dapat dikurangi seminimal mungkin dengan menggunakan teknologi dan metode progresif. Akibatnya biaya pendidikan dan program pelatihan dapat dikurangi dan mobilitas pekerjaan di sektor ini dapat meningkat secara dramatis.

Pemrograman grafis sistem sinyal menyiratkan bahwa teori dan praktik membentuk satu kesatuan.

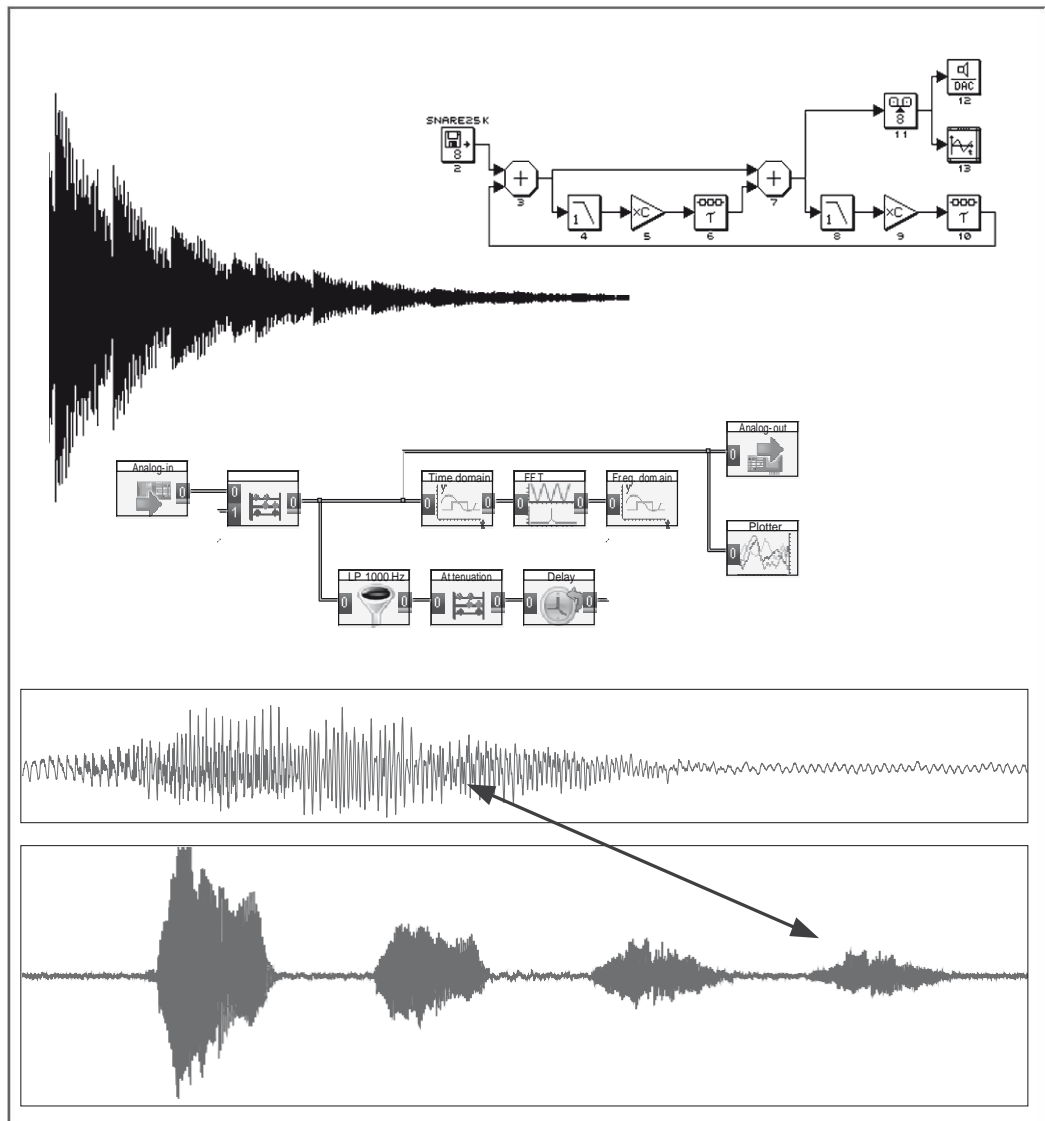
Gambar papan multi-fungsi PC dengan prosesor sinyal (DSP) ini menggambarkan dominasi teknologi digital. Satu-satunya IC analog adalah penguat yang dapat diprogram (PGA) dan multiplekser. Tetapi bahkan di sini pengaturannya murni digital. Papan multi-fungsi ini dapat membaca dan mengeluarkan sinyal digital dan analog, seperti menghubungkan PC dengan dunia luar. Sinyal dapat diproses dengan sangat cepat di papan melalui prosesor sinyal. Ini mengurangi beban kerja PC yang sebenarnya. Gambaran nyata dari papan multifungsi ini hanya memberikan kesan struktur perangkat keras.

Diagram blok perangkat keras (diagram blok H) di bawah ini memberikan informasi lebih lanjut. Setidaknya itu jelas menunjukkan struktur komponen perangkat keras dan cara mereka bekerja sama untuk menerima atau mengirim sinyal. Papan multifungsi semacam ini disusun sedemikian rupa sehingga memiliki aplikasi universal dalam kerangka pengukuran dan rekayasa kontrol otomatis.



Gambar 13: Gambaran nyata sistem sinyal dan diagram blok H

Kerugian dari diagram blok H adalah bahwa struktur perangkat keras terlihat tetapi tidak proses sinyal yang dilakukan oleh prosesor sinyal. Sebenarnya, ini sangat penting karena program memutuskan pemrosesan sinyal.



Gambar 14: Diagram S-frame dan blok sinyal dalam domain waktu

Di atas mengGambarkan sistem echo-hall gabungan untuk rentang frekuensi rendah. Diagram blok ini juga dikompilasi di layar dari komponen standar – dipanggil dari perpustakaan – dan dihubungkan bersama.

Parameter tertentu harus diatur dengan klik mouse untuk beberapa komponen, misalnya filter lowpass (4 dan/atau 8), frekuensi cut-off dan urutan filter. Sinyal input langsung menuju ke "osiloskop" (13) (lihat layar di bawah kiri) dan ke speaker PC (12). Seajar dengan ini sinyal input disaring lowpass (4), melemah (5) dan akhirnya dengan waktu tunda (6) ditambahkan ke sinyal input (7) ("gema").Jumlah kedua sinyal diumpankan kembali ke inlet, setelah operasi yang dijelaskan di atas telah dilakukan (8), (9), (10), (3) ("reverb") Program dengan algoritma terkait berjalan di latar belakang dan melakukan echo- efek hall pada tingkat nyata.

Perangkat gema yang dihasilkan oleh DASyLab dijelaskan di bawah ini. Produksi gema juga merupakan cabang dari fenomena umpan balik yang berisi tiga "komponen" penyaringan lowpass, penundaan, redaman (perkalian dengan angka yang lebih kecil dari 1).

Nyalakan mikrofon dan pengeras suara PC Anda. Klik pada gambar dan laboratorium eksperimental DASYLab segera terbuka. Mulai eksperimen dan terus bereksperimen sepuasnya.

Fisika Sebagai Titik Tolak

Deskripsi berorientasi sains dari keseluruhan kompleks "sistem pemrosesan sinyal" menyiratkan kepatuhan dengan kriteria berikut yang berlaku untuk sains (persis):

Sebuah struktur dapat dibuat atas dasar sejumlah kecil fenomena dasar atau aksioma yang memungkinkan sejumlah tak terhingga "kasus individual" untuk dikategorikan dan dijelaskan. Secara kurang abstrak ini berarti bahwa semua kasus individu dapat dikaitkan dengan fenomena dasar yang sama menurut skema terpadu. Hanya dengan cara ini adalah mungkin untuk mempertahankan gambaran dari suatu spesialisasi mengingat ledakan pengetahuan saat ini – penggandaan pengetahuan dalam interval yang semakin pendek.

Fenomena dasar ini dalam konteks ini harus bersifat fisik seperti fisika, yaitu alam secara unik menentukan kerangka apa yang layak secara teknologi. Fisika demikian titik tolak, kerangka dan kondisi marginal dari teori sinyal, proses dan sistem. Model penjelas utama dapat ditemukan tidak dalam matematika tetapi dalam osilasi, gelombang dan fisika kuantum. Untuk itu harus dimungkinkan untuk menyampaikan, menjelaskan dan membentuk suatu model proses teknologi komunikasi dengan mengacu pada bidang ini.

Adalah penting bahwa harus ada konsep alternatif, yang sebagian besar bebas dari matematika, untuk menggambarkan "sinyal - proses - sistem" yang kompleks dengan cara ilmiah, yaitu berdasarkan sejumlah kecil fenomena fisik dasar. Jadi, misalnya, Gambar "sonografi" menunjukkan kedekatan yang dekat dengan fisika osilasi dan gelombang. Di atas segalanya, penting untuk memahami dalam hal konten berdasarkan sejumlah fenomena fisik apa yang mempengaruhi berbagai proses sinyal.

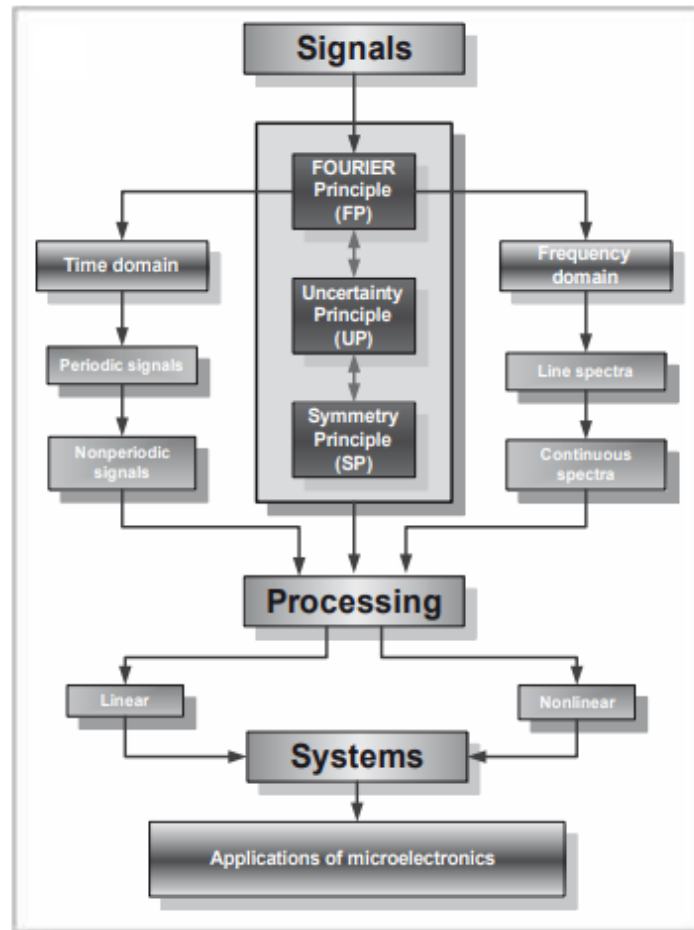
Titik tolaknya pada saat ini hanyalah tiga fenomena fisik, di mana yang kedua secara tegas hanya merupakan konsekuensi dari yang pertama:

- Prinsip EMPAT (FP)
- Prinsip Ketidakpastian (UP) dan
- Prinsip Simetri (SP).

Semua sinyal, proses, dan sistem harus dijelaskan dengan mengacu pada fenomena ini! Konsep ini tidak pernah digunakan dan muncul dengan sendirinya di sini sebagai prinsip didaktik sentral untuk pertama kalinya.

Mungkin Anda akan memperhatikan bahwa informasi yang terkandung dalam sinyal tidak disertakan sebagai elemen penataan di sini. Alasannya – ada banyak teori dalam fisika tetapi sampai sekarang tidak ada "teori informasi". Ilmuwan seperti Dennis GABOR, R. HARTLEY, K. KÜPF-MÜLLER dll. telah mencoba dengan sia-sia untuk meletakkan teori komunikasi di atas basis fisik. "Pemenang" yang jelas sejauh ini adalah matematikawan Amerika Claude SHANNON.

Bayangkan saja disiplin ilmu dan spesialis bidang teknologi komunikasi sebagai pohon dengan akar, batang, cabang dan daun. Setiap daun di pohon setara dengan satu masalah teknologi komunikasi. Pohon itu memiliki tiga akar utama – tiga prinsip FP, UP dan SP. Setiap daun, yaitu hampir semua masalah teknologi komunikasi dapat dicapai melalui akar, batang, dan cabang ini.



Gambar 15: Struktur untuk konsep "Sinyal – Pemrosesan – Sistem" ini

Untuk membuat berbagai proses sinyal yang membingungkan dapat dikelola dan transparan, kami akan terus merujuk kembali ke struktur yang dijelaskan di sini. Namun, itu tidak membuat klaim apa pun untuk menjadi lengkap dan akan ditambahkan dan diperpanjang jika diperlukan.

Mungkin Anda akan memperhatikan bahwa informasi yang terkandung dalam sinyal tidak disertakan sebagai elemen penataan di sini. Alasannya – ada banyak teori dalam fisika tetapi sampai sekarang tidak ada (lengkap) "teori informasi".

Klarifikasi Tujuan

Sampai sekarang, kami telah menjelaskan metode yang akan digunakan dalam kursus pengantar ini. Sekarang saatnya untuk fokus pada konten. Di sini juga, semacam pratinjau akan menunjukkan kepada pembaca apa yang menantinya dan memungkinkan dia untuk memahami posisinya.

Untuk menggunakan gambar lain: bayangkan konten sebagai semacam platform yang didukung dan dipagari. Railing digambarkan oleh kondisi kerangka teknis yang ada saat ini.

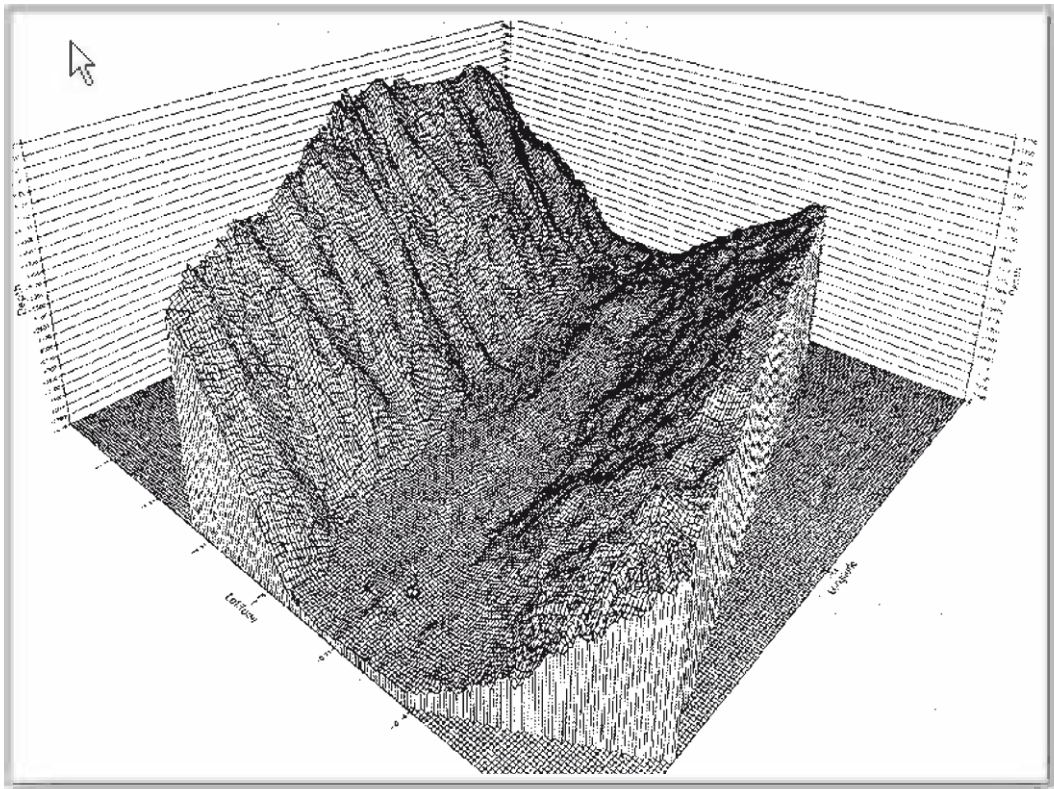
Fenomena dasar dan konsep dasar serta definisinya membentuk dukungan platform. Di luar pagar, cakrawala bisa terlihat lebih atau kurang jelas. Ini meluas ke batas-batas yang ditentukan oleh hukum alam - yaitu oleh fisika.

Platformnya kira-kira sebagai berikut:

- Sinyal dapat didefinisikan sebagai osilasi atau gelombang (fisik) yang merupakan pembawa informasi.
- Informasi ada dalam bentuk pola-pola yang disepakati yang merupakan makna yang harus diketahui dan dikenali oleh penerima. Data adalah pola yang informatif. Tugas penting teknologi komunikasi atau teknologi sinyal adalah pengenalan pola.
- Semua sinyal terukur dari dunia fisik nyata – bahkan jika itu adalah pola bit – hadir dalam bentuk kontinu analog. Mereka biasanya diubah menjadi sinyal listrik oleh sensor (konverter) dan hadir di titik pengukuran biasanya dalam bentuk tegangan AC.
- Osiloskop (Penyimpanan) adalah instrumen yang dapat menampilkan kronologis tegangan AC dalam bentuk grafik di layar.
- Setiap proses teknologi sinyal (misalnya penyaringan, modulasi dan demodulasi) secara umum dapat dijelaskan dalam istilah matematika (teori!) dan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan algoritma atau program yang sesuai pada tingkat aritmatika murni. Jadi, dari sudut pandang teoretis, sistem analog – yang dibuat dengan kombinasi beberapa sirkuit/proses/algoritme individual – mewakili komputer analog yang bekerja melalui urutan algoritme secara real time. Aspek ini sering diabaikan. Misalnya, ini juga berlaku untuk penerima radio konvensional.
- Pemrosesan sinyal waktu nyata (pita frekuensi terbatas) dipahami sebagai kapasitas untuk merekam aliran informasi yang diinginkan tanpa celah atau untuk mengambilnya dari sinyal.
- Komponen analog di atas semua resistor, spool, kapasitor dan, tentu saja, dioda, transistor, dll. Kerugian mendasarnya adalah ketidakakuratan (toleransi), fitur noise, kurangnya konsistensi jangka panjang (penuaan), ketergantungan suhu, non-linearitas (di mana diinginkan) dan di atas semua perilaku gabungan mereka. Dengan demikian, kumpulan nyata berperilaku seperti kombinasi induktansi (ideal) L dan resistansi R . Sebuah resistansi nyata memiliki rangkaian ekuivalen yang sama, ketika arus mengalir melalui medan magnet di sekitarnya dan oleh karena itu ada induktansi selain resistansi. Setiap dioda tidak hanya penyearah, tetapi juga mendistorsi secara nonlinier dengan cara yang tidak diinginkan. Perilaku gabungan ini adalah alasan mengapa tidak mungkin untuk menganggap hanya satu operasi sinyal ke komponen; itu selalu mewujudkan beberapa operasi sinyal. Karena sirkuit biasanya terdiri dari banyak komponen, perilaku sebenarnya dari sirkuit dapat sangat berbeda dari perilaku yang direncanakan. Setiap jalur konduktor motherboard juga memiliki resistansi ohmik R dan induktansi L sebagai akibat dari medan magnet yang muncul ketika listrik mengalir melaluinya. Medan listrik ada di antara dua jalur konduktor paralel; mereka dengan demikian membentuk kapasitansi. Karakteristik motherboard

ini jarang diperhitungkan dalam desain sirkuit (kecuali di area frekuensi tinggi dan maksimum).

- Sebagai akibat dari pengaruh atau efek interferensi yang tercantum di sini, teknologi analog memiliki keterbatasan terutama di mana presisi terbesar dalam pelaksanaan perilaku yang diinginkan (misalnya penyaringan) diperlukan. Ini berarti bahwa sirkuit analog tidak dapat diproduksi dalam praktik dengan kualitas atau karakteristik yang secara teoritis dimungkinkan.
- Namun, ada cara untuk melampaui apa yang mungkin dilakukan dengan teknologi analog dan memasuki bidang yang batas absolutnya ditentukan oleh fisika: pemrosesan sinyal melalui komputer digital. Karena presisi komputasinya – tidak seperti komputer analog dan sirkuit yang diwakilinya – dapat ditingkatkan tanpa batas, ada kemungkinan untuk melakukan operasi sinyal dengan tingkat presisi yang diinginkan yang sebelumnya tidak dapat dilakukan.
- Sistem komunikasi juga dapat diwakili oleh program yang menghubungkan sejumlah algoritma operasi sinyal. Dalam hubungannya dengan komputer atau sistem mikroprosesor (perangkat keras) ini menghasilkan sistem untuk pemrosesan sinyal digital. Program memutuskan apa yang dapat dilakukan sistem.
- Batasan teknologi ini dengan komputer digital (mikroprosesor) di area yang ditentukan oleh fisika saat ini ditentukan oleh kecepatan komputasi dan masalah yang muncul dalam konversi dan konversi ulang sinyal (konversi A/D dan D/A) yang diperlukan untuk perhitungan. Mereka terus-menerus dipindahkan ke luar. Tujuan dari pengembangan ini adalah pemrosesan sinyal secara real-time, yaitu pemrosesan sinyal secara aritmatika dengan kecepatan tinggi sehingga tidak terjadi kehilangan informasi yang tidak diinginkan.
- Sudah jelas: proses teknologi pengukuran dan kontrol yang dijalankan melalui sirkuit mikroprosesor pada dasarnya lebih unggul daripada proses analog tradisional. Jadi misalnya tidak mungkin dengan teknologi tradisional untuk menyimpan data secara tepat untuk jangka waktu yang lebih lama sebelum digunakan kembali, bahkan penundaan waktu jangka pendek yang tepat dari sinyal analog menyebabkan kesulitan yang cukup besar.
- Teknologi analog didorong lebih dan lebih ke pinggiran mikroelektronika, ke sumber dan penguras sinyal, dan jalur transmisi aktual yang dalam retrospeksi dapat dilihat sebagai "penopang" yang memungkinkan untuk dilakukan proses sinyal dengan cara yang sangat tidak memadai dan salah yang rentan terhadap gangguan. Oleh karena itu, trennya adalah untuk mengurangi bagian analog dari suatu sistem seminimal mungkin dengan menggunakan konverter A/D untuk mencapai angka secepat mungkin yang memungkinkan untuk dihitung (Sampel&Tahan, kuantisasi dan penyandian). Ketepatan konverter A/D dan D/A sekarang secara praktis hanya bergantung pada faktor-faktor seperti tinggi dan konstanta referensi frekuensi kuarsa dan/atau keteguhan sumber arus konstan atau tegangan referensi. Setiap multimeter digital modern didasarkan pada teknologi ini.

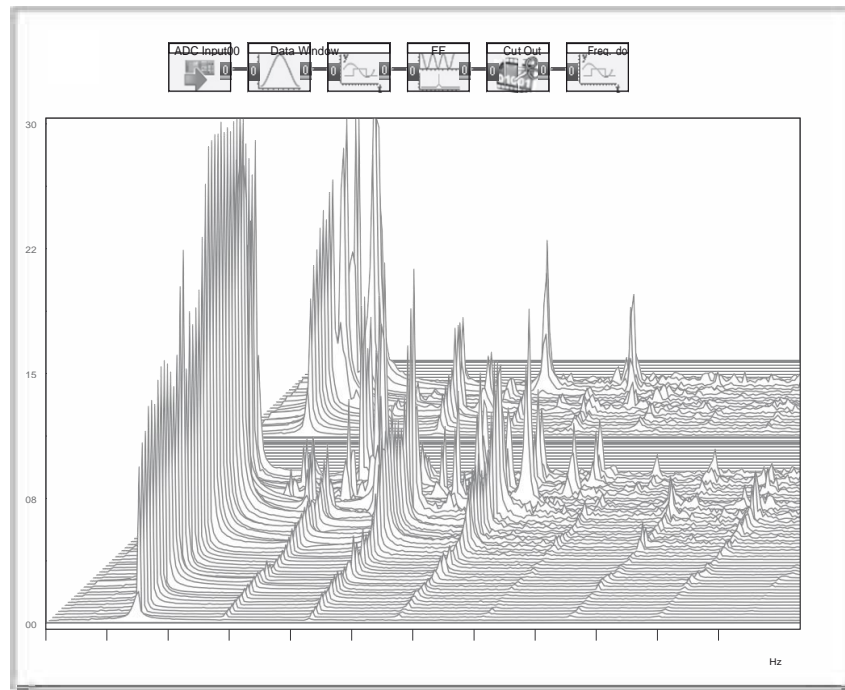


Gambar 16: Analisis data untuk representasi grafis dari data pengukuran

Bunyi gema laut dalam, misalnya, memberikan jumlah yang sangat besar dari data pengukuran yang paling beragam, yang setelah ditafsirkan secara fisik (yaitu mengalami berbagai proses matematis dan fisik) akhirnya harus tersedia dalam presentasi yang teratur, di sini sebagai peta relief dari celah laut dalam. Interpretasi data pengukuran dari berbagai jenis, pemrosesan dan penyajiannya dalam bentuk terstruktur semakin menjadi kualifikasi kejuruan yang penting. (Sumber: Krupp-Atlas Elektronik)

- Teknologi komunikasi semakin identik dengan pemrosesan sinyal dengan bantuan komputer. Pemroses sinyal digital yang dioptimalkan untuk operasi semacam itu semakin banyak digunakan dan saat ini memungkinkan pemrosesan waktu nyata dari sinyal dua dan multi-dimensi – yaitu gambar.
- Seperti saat ini dan terlebih lagi di masa depan sistem komunikasi dapat diwakili oleh program algoritma terkait. Sekarang ada kemungkinan menempatkan komponen individual dari sistem sebagai komponen "virtual" di layar dengan mengklik mouse dan dengan menggabungkan komponen-komponen ini untuk membentuk diagram blok dan dengan demikian menghasilkan sistem virtual (VS). Pada saat yang sama algoritma yang sesuai dihubungkan di latar belakang, yaitu dengan menambahkan sub-program penting (untuk matematika dan grafik) mereka dihubungkan bersama untuk keseluruhan proses.
- Sistem virtual memberikan hasil nyata melalui perangkat keras (komputer, periferal) dan program yang membentuk sistem virtual. Tidak mungkin untuk mengetahui dari

luar apakah pemrosesan sinyal dilakukan murni perangkat keras atau dengan menggunakan sistem virtual yaitu sebuah program.



Gambar 17: Lanskap frekuensi-waktu dari urutan nada

Frekuensi-waktu-lanskap digunakan antara lain untuk analisis suara atau dalam penyelidikan proses transien tertentu. Cara di mana sinyal berubah dari waktu ke waktu diwakili. Sumbu frekuensi horizontal dan sumbu waktu mundur miring. Sumbu vertikal memberikan tingkat.

Hanya beberapa tahun yang lalu alat ukur semacam ini sangat mahal (sampai Rp 375.000.000). Dalam hal ini alat ukur ini disatukan dengan menggunakan DASYLab hanya dengan menggunakan 6 modul dan dari dua modul ini berlebihan (modul "domain waktu" dan "cut out") dalam aplikasi ini.

Diperlukan waktu berminggu-minggu atau berbulan-bulan untuk memprogram alat ukur kompleks semacam ini dengan cara tradisional. Menggunakan DASYLab dibutuhkan beberapa menit termasuk semua pengaturan dan percobaan. Apakah perlu untuk mengatakan lebih banyak tentang manfaat dan keuntungan dari pemrograman grafis sistem sinyal teknis? Anda hanya perlu mencolokkan mikrofon ke kartu suara dan mengklik gambar di dokumen PDF elektronik). Selamat bereksperimen.

- Bidang khusus yang penting dari analisis sinyal berbantuan komputer adalah analisis data. Di sini hal yang penting adalah menyajikan sejumlah besar data (tersimpan) – misalnya, sejumlah besar pengukuran – dengan cara yang teratur dan terstruktur yang memungkinkan untuk menafsirkannya. Dalam Gambar 16:, misalnya, ini adalah grafik, representasi tiga dimensi dari kontur celah laut dalam yang dihasilkan dari jutaan pengukuran ekolokasi. "Pengukuran" ini dapat, misalnya, juga harga saham di bursa saham dan tujuan analisis data dan peningkatan estimasi atau prediksi tren

bursa. Dalam konteks ini teknologi yang sama sekali baru digunakan yang dapat "belajar" atau yang dapat dioptimalkan dengan pelatihan: logika fuzzy dan jaringan saraf atau kombinasi keduanya – neuro-fuzzy.

Kesimpulan Awal: Konsep Mengambil Kontur Yang Lebih Jelas

Semua fakta, proposisi, dan argumen yang diajukan sejauh ini tidak akan berguna jika tidak mungkin untuk memperkirakan konsep yang jelas dan terkini yang akan berlaku di masa depan – sebuah konsep yang akan berlaku bertahun-tahun dari sekarang dan yang akan berlaku. meyakinkan dalam kesederhanaannya. Seperti tesis yang dirumuskan di halaman pertama: mikroelektronika tidak melakukan apa pun selain pemrosesan sinyal!

- Sejumlah besar sirkuit analog diskrit di masa depan tidak lagi canggih dan karena itu tidak dibahas di sini. Dengan demikian papan multi-fungsi yang direpresentasikan dalam Gambar 13: menunjukkan bahwa teknologi analog paling banyak akan tetap ada pada awal (sumber) dan akhir (penguras) suatu sistem komunikasi. "Inti" dari sistem ini murni digital. Ada pengecualian hanya di bidang frekuensi tinggi dan maksimum, misalnya, pada jalur transmisi yang sebenarnya.
- Seluruh perangkat keras (digital) – seperti contoh papan multifungsi pada Gambar 13: sekali lagi menunjukkan – hanya terdiri dari sejumlah kecil chip (konversi A/D, D/A, multiplexer, timer, memori dll dan di atas semua prosesor). Di masa depan, semakin banyak komponen ini akan terintegrasi dalam satu chip. Ini sudah terjadi dengan banyak mikrokontroler, bahkan dengan seluruh sistem. Oleh karena itu, manuskrip ini tidak dapat menjadi tujuan untuk membahas secara rinci jumlah yang tak terbatas atau bahkan sejumlah besar chip IC yang berbeda. Di masa depan mereka tidak akan ada lagi. Oleh karena itu, perangkat keras berikut akan selalu disajikan sebagai diagram blok (lihat Gambar 13:). Diagram blok ini terdiri dari komponen/sirkuit standar yang dihubungkan satu sama lain. Kami akan mengacu pada diagram blok semacam ini sebagai diagram blok perangkat keras (diagram blok H).
- Perangkat keras (digital) memiliki tugas menyediakan prosesor (komputer) dengan data pengukuran atau sinyal dalam bentuk yang sesuai. Program ini berisi proses sinyal dalam bentuk algoritmik. Apa yang dilakukan prosesor dengan data ditentukan oleh program. "Kecerdasan" dari keseluruhan sistem terletak pada perangkat lunak. Seperti yang ditunjukkan perkembangan terakhir, perangkat lunak sebagian besar dapat menggantikan perangkat keras. Algoritma bukan sirkuit! Jadi hanya beberapa komponen standar yang tersisa bahkan untuk perangkat keras digital.
- Program untuk pemrosesan sinyal mungkin tidak lagi direpresentasikan sebagai "kode samar" tetapi juga sebagai diagram blok. Ini menunjukkan urutan dan hubungan proses yang akan dilakukan. Diagram blok dapat diprogram secara grafis di layar dan menghasilkan kode sumber di latar belakang dalam bahasa program tertentu (misalnya C++).
- Kita akan mengacu pada diagram blok semacam ini sebagai diagram blok sinyal (diagram blok S). Hampir semua sistem sinyal yang digambarkan dalam buku ini

adalah diagram blok S, di mana sistem virtual disembunyikan. Mereka terutama dihasilkan melalui DASYLab.

- Proses sinyal yang sebenarnya harus dipahami melalui perbandingan gambar dari sinyal input dan output (dalam domain waktu dan frekuensi). Dengan cara ini adalah mungkin untuk melihat bagaimana proses telah mengubah sinyal.

Bentuk-bentuk penting dari representasi yang digunakan dalam buku ini sekarang telah dijelaskan. Mereka bersifat visual dan sesuai dengan kapasitas manusia untuk berpikir dalam gambar.

Mereka adalah sebagai berikut:

- diagram blok H
- Diagram blok S (sebagai representasi diagram visual dari proses sinyal) dan
- perkembangan sinyal (dalam domain waktu dan frekuensi)

Dengan demikian, banyak hambatan intelektual dan psikologis telah dihilangkan sejak awal. Untuk memahami "teori sistem pemrosesan sinyal", Anda tidak perlu

- telah menguasai satu atau beberapa bahasa program
- pernah belajar matematika
- memiliki pengetahuan rinci tentang ratusan chip IC yang sangat berbeda

Titik awalnya hanyalah tiga fenomena fisik:

- Prinsip EMPAT (FP)
- Prinsip Ketidakpastian (UP) dan
- Prinsip Simetri (SP)

Hal penting pertama adalah memiliki pemahaman yang baik tentang prinsip-prinsip dasar ini. Justru inilah tujuan dari bab-bab berikut.

Latihan Bab 1 :

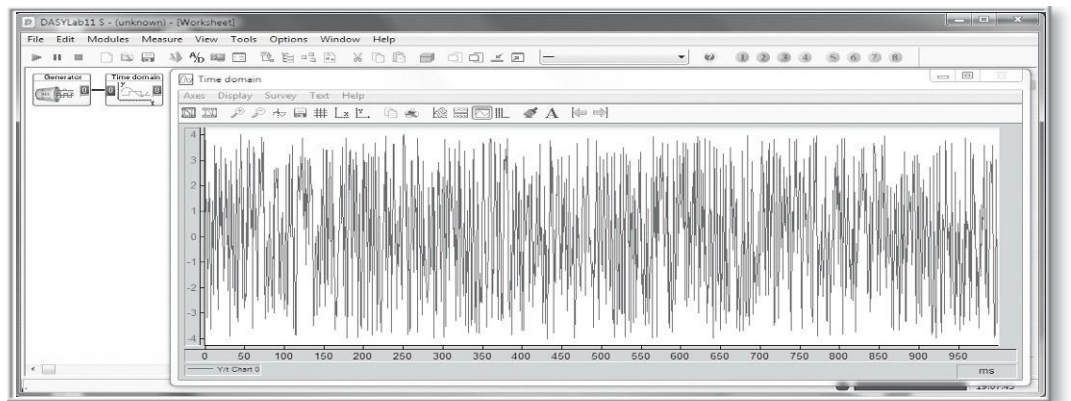
Program DASYLab akan menemani kita mulai sekarang. Ini adalah platform kerja yang luar biasa, laboratorium yang lengkap untuk pengukuran dan pengembangan yang dengannya hampir semua sistem pengukuran dan kontrol dapat dibangun.

Versi sekolah sepenuhnya berfungsi dan dapat memasukkan dan mengeluarkan sinyal analog dan digital nyata (melalui kartu suara atau antarmuka paralel).

Keterampilan umum dalam penggunaan Microsoft Windows penting untuk menangani program.

Latihan 1:

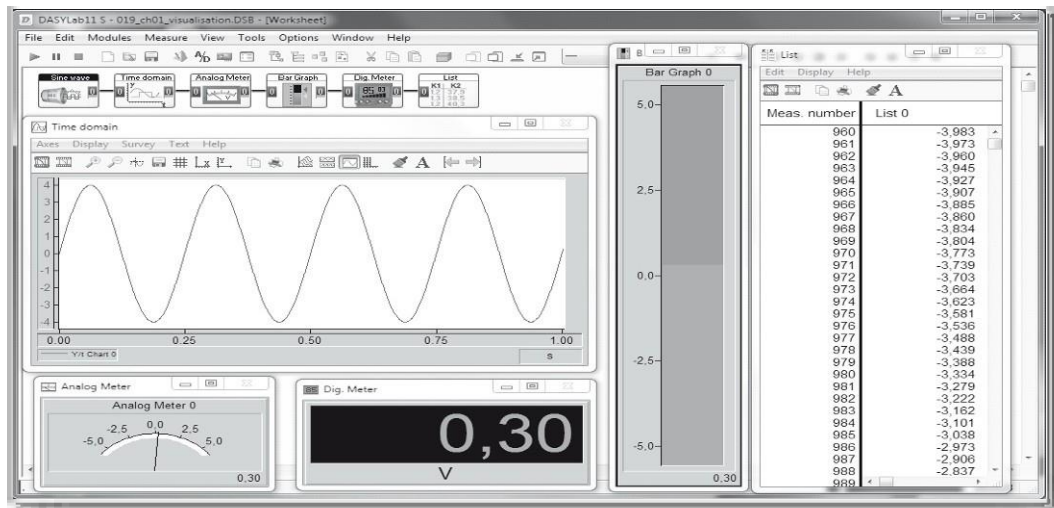
Biasakan diri Anda dengan saksama dengan fungsi dasar DASyLab. Setiap pertanyaan akan dijelaskan secara menyeluruh di bawah opsi menu Bantuan dan semua komponen (modul) dijelaskan secara rinci.



Gambar 18: Latihan pertama dengan DASyLab

- Batasi diri Anda dalam contoh pertama untuk dua modul (peralatan laboratorium) di atas generator dan "osiloskop" (layar). Coba seperti di atas untuk menghasilkan sinyal noise dan membuatnya terlihat.
- Letakkan sinyal lain di layar dengan mengatur generator sinyal secara tepat (bentuk sinyal, amplitudo, frekuensi, fase) dengan mengklik dua kali pada komponen. Lakukan sedikit eksperimen untuk membiasakan diri Anda dengan kemungkinan pengaturan.
- Coba melalui menu layar untuk "memperbesar" kutipan dengan menggunakan lensa pembesar (zoom). Kemudian balikkan representasi ini.
- Mengaktifkan kursor. Anda akan melihat dua garis vertikal di layar. Pada saat yang sama jendela tampilan lebih lanjut terbuka di mana posisi kronologis dari dua garis diberikan dalam gambar. Sekarang pindahkan garis kursor, ukur nilai sesaat, interval waktu di antara mereka, dll.
- Letakkan layar dengan interval waktu sinyal ke dalam clipboard Windows dan cetak gambar sebagai dokumen.

Latihan 2 :



Gambar 19: Visualisasi data pengukuran

Visualisasi data pengukuran dan proses sinyal adalah bantuan paling penting dalam naskah ini untuk memahami proses sinyal. DASyLab menyediakan banyak metode visualisasi yang berbeda untuk data pengukuran dan proses sinyal. Pertama buat sirkuit yang digambarkan melalui berbagai komponen visualisasi (lihat di atas). Cobalah untuk merancang ukuran dan posisi tampilan seperti pada layar. Pilih sinyal sinusoidal dengan frekuensi $f = 2$ Hz.

- Sekarang jalankan sistem di kiri atas dan perhatikan semua tampilan untuk beberapa lama. Coba cari tahu data pengukuran mana yang mengacu pada instrumen analog, instrumen digital, atau diagram batang.
- Coba lihat korelasi antara perkembangan sinyal pada layar plotter dan data pengukuran pada daftar ($f = 0,2$ Hz). Pada interval berapa pengukuran titik sinyal dipastikan atau disimpan. Seberapa tinggi yang disebut laju sampel dengan "sampel" arah sinyal yang diambil?
- Untuk jenis pengukuran apa analog, instrumen digital dan grafik batang cocok? Pengukuran apa dari seluruh blok urutan pengukuran yang mereka hasilkan?
- Manakah dari "alat peraga" yang paling jelas memberikan pembacaan yang kemudian dapat diproses oleh komputer?
- Cari tahu cara mengatur format blok dan frekuensi sampel di menu (A/D). Apa sebenarnya yang ditunjukkan oleh kedua besaran ini?
- Tetapkan format blok 1024 dan frekuensi sampel 1024 untuk semua eksperimen lebih lanjut. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk merekam urutan pengukuran (blok) dan terdiri dari berapa banyak bacaan?

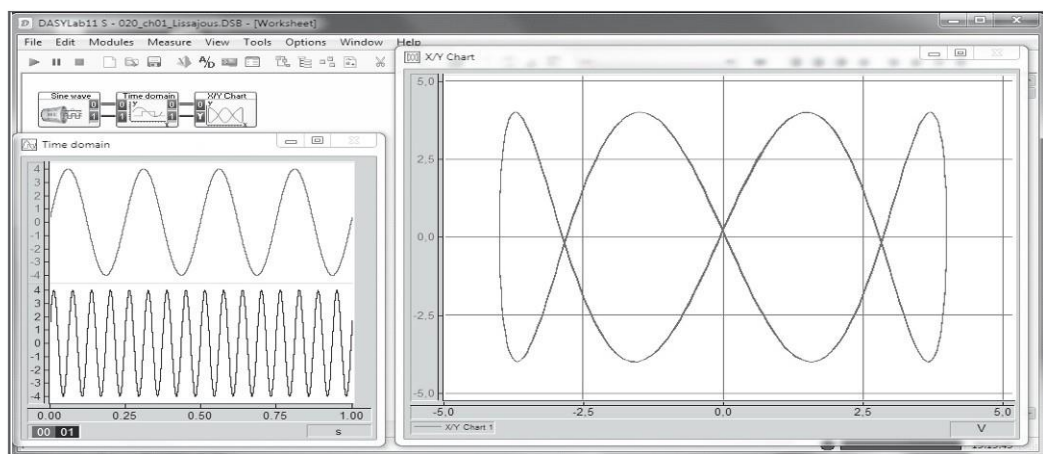
Latihan 3:

Anda akan menemukan "komponen" (proses) Anda baik di "kabinet" di sisi kiri (cukup klik pada simbol dan letakkan di layar) atau di menu di bawah modul.

Bekerja sama dengan proses paling sederhana yang dipetakan di sana. Rancang sirkuit yang sangat sederhana menggunakan opsi Bantuan di menu DASYLab.

- Mulailah dengan rangkaian sederhana yang pada interval 1s menyalakan dan mematikan "lampu".
- Hubungkan dua sinyal yang berbeda melalui komponen matematika – misalnya, penjumlahan atau perkalian – dan lihat ketiga sinyal satu di bawah yang lain pada layar yang sama.
- Periksa contoh untuk "tindakan" dan "pesan" dalam versi S DASYLab. Coba rancang sendiri sirkuit semacam itu.
- Periksa "komponen kotak hitam" dan pertimbangkan kapan dan untuk tujuan apa komponen itu akan digunakan.

Latihan 4:



Gambar 20: Angka LISSAJOUS

Cobalah untuk membuat sirkuit yang digambarkan yang mewakili apa yang disebut figur LISSAJOUS.

Gunakan sinyal sinusoidal dalam setiap kasus.

- Pada frekuensi berapa Anda mendapatkan gambar diam dan pada frekuensi berapa gambar "berputar" lebih lambat atau lebih cepat?
- Cobalah melalui eksperimen khusus untuk mencari tahu untuk apa "peralatan" atau alat ukur ini dapat digunakan.

BAB 2

SINYAL DALAM DOMAIN WAKTU DAN FREKUENSI

Dari sudut pandang fisik, sinyal adalah osilasi atau gelombang. Mereka dicetak dengan informasi tertentu dengan mengubah menurut pola tertentu.

Hanya sinyal listrik atau elektromagnetik yang digunakan dalam teknologi informasi. Mereka memiliki keunggulan yang tak tertandingi dibandingkan dengan bentuk sinyal lainnya – mis. sinyal akustik.

Sinyal listrik....

- menyebar pada (hampir) kecepatan cahaya,
- dapat diarahkan melalui kabel ke tempat yang dibutuhkan,
- dapat ditransmisikan ke seluruh dunia dan bahkan ke luar angkasa melalui antena melalui atmosfer dan vakum tanpa kabel,
- tidak tertandingi dalam hal penerimaan, pemrosesan, dan transmisi secara akurat dan tahan interferensi,
- hampir tidak menggunakan energi apa pun dibandingkan dengan sistem listrik dan mekanik lainnya,
- diproses oleh chip terkecil yang semuanya dapat diproduksi dengan sangat murah (produksi otomatis penuh dalam seri besar),
- bila digunakan dengan benar tidak mencemari lingkungan dan tidak membahayakan kesehatan.

Jika sebuah sinyal mengandung informasi maka harus ada jumlah sinyal yang berbeda yang tak terbatas karena ada berbagai informasi yang tak terbatas.

Jika seseorang ingin mengetahui segala sesuatu tentang semua sinyal dan bagaimana mereka bereaksi terhadap proses atau sistem, kursus studi pasti akan cenderung sangat panjang juga. Karena ini tidak mungkin, maka perlu dicari cara untuk menggambarkan semua sinyal menurut pola terpadu.

Prinsip FOURIER

Prinsip FOURIER memungkinkan untuk menganggap semua sinyal terdiri dari "komponen" terpadu yang sama. Eksperimen sederhana dengan DASYLab atau dengan generator sinyal ("generator fungsi"), osiloskop, pengeras suara dengan amplifier built-in dan – yang paling penting ! – indra pendengaran Anda, mengarah pada wawasan yang ditemukan oleh matematikawan Prancis, ilmuwan alam, dan penasihat Napoleon secara matematis hampir dua ratus tahun yang lalu.



Gambar 21: Jean Baptiste FOURIER (1768-1830)

Fourier dianggap sebagai salah satu pendiri fisika matematika. Dia mengembangkan dasar-dasar teori matematika konduksi panas dan memberikan kontribusi penting pada teori persamaan diferensial parsial. Dia tidak dapat memimpikan pentingnya transformasi FOURIER "miliknya" dalam ilmu pengetahuan alam dan teknologi.

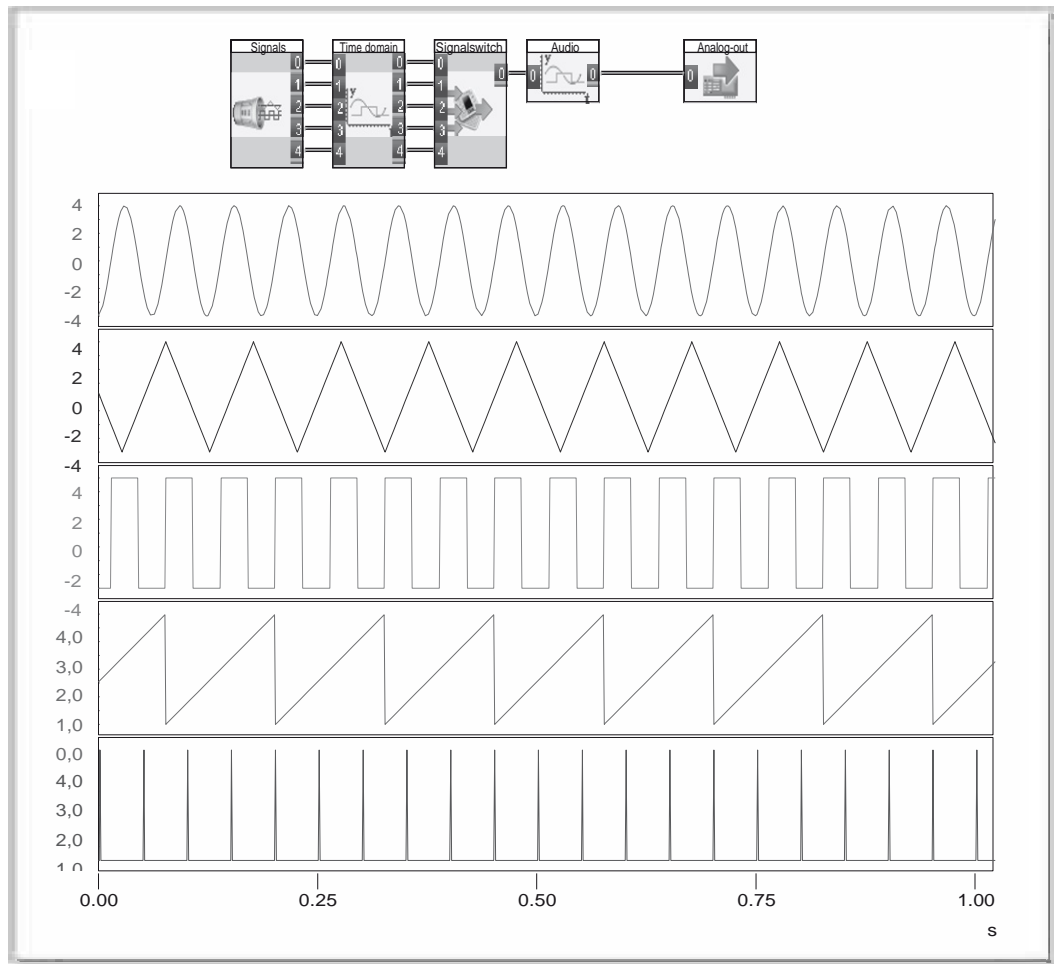
Osilasi Periodik

Eksperimen ini harus dilakukan dengan berbagai osilasi periodik.

Osilasi periodik adalah osilasi yang berulang-ulang dengan cara yang sama setelah panjang periode tertentu T . Secara teoritis – yaitu dilihat dengan cara yang diidealkan – mereka bertahan untuk periode waktu yang tidak terbatas di masa lalu, sekarang dan masa depan. Dalam istilah praktis ini tidak pernah terjadi tetapi menyederhanakan pendekatan.

Dalam kasus banyak aplikasi praktis – misalnya, dalam jam kuarsa dan generator pulsa clock lainnya ("pengatur waktu") atau dalam kasus tegangan AC jaringan, panjang sinyal sangat besar sehingga hampir sesuai dengan "panjang tak terhingga" yang ideal. . Ketepatan pengukuran waktu sangat tergantung pada seberapa tepat periodik tegangan referensi itu dan seberapa periodik itu tetap.

Meskipun sangat penting untuk banyak aplikasi, osilasi periodik bukanlah sinyal yang khas. Mereka hampir tidak memberikan informasi baru karena masa depan mereka dapat diprediksi dengan tepat. Semakin besar ketidakpastian tentang perkembangan sinyal pada saat berikutnya, semakin besar informasi yang terkandung di dalamnya. Semakin kita tahu pesan apa yang akan disampaikan oleh sumber, semakin sedikit ketidakpastian dan nilai informasinya. Informasi sering tampak lebih terkait dengan pengetahuan daripada dengan gagasan ketidakpastian.



Gambar 22: Sinyal periodik penting

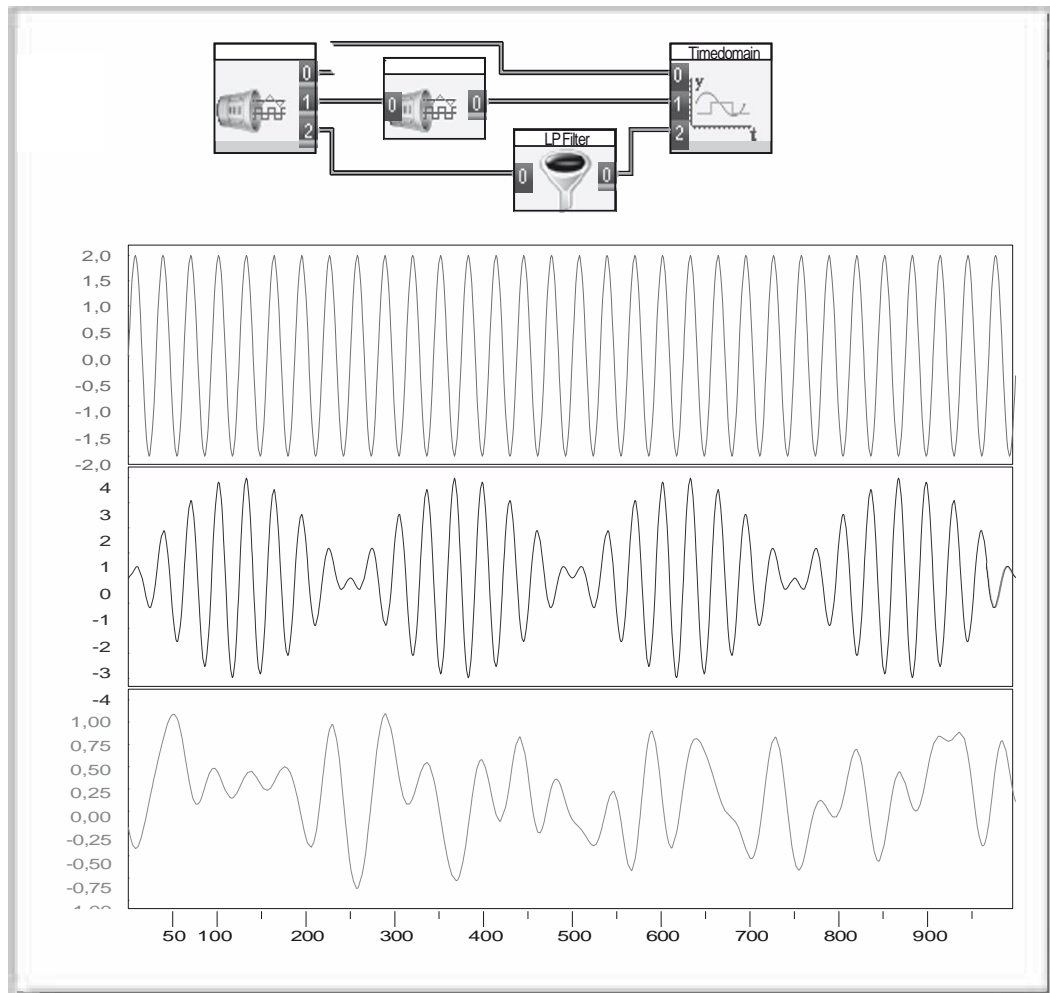
Di sini Anda melihat lima bentuk penting dari sinyal periodik, dari atas ke bawah: sinus, segitiga, persegi panjang, gigi gergaji, dan pulsa (sangat pendek!). Dari sudut pandang teoretis, sinyal periodik memiliki durasi yang tak terbatas, yaitu, mereka meluas jauh ke masa lalu dan masa depan di luar segmen yang digambarkan. Cobalah untuk menentukan panjang periode dan frekuensi sinyal individu.

Namun yang mengejutkan, kita harus mengatakan bahwa bahasa dan musik tidak dapat dibayangkan tanpa osilasi "hampir periodik" terlepas dari apa yang baru saja dikatakan. Osilasi periodik lebih mudah dijelaskan dalam perilakunya dan itulah sebabnya kita membahasnya di awal buku ini.

Telinga kami sebagai FOURIER-analyzer

Melalui eksperimen yang sangat sederhana, dimungkinkan untuk menetapkan fitur umum mendasar dari osilasi dan bentuk sinyal yang berbeda. Instrumen sederhana yang dapat ditemukan di hampir semua koleksi alat peraga sudah memadai untuk tujuan ini.

Generator fungsi mampu menghasilkan tegangan AC periodik yang berbeda. Ini mewakili sumber sinyal. Sinyal dapat didengar melalui loudspeaker dan dapat dilihat pada layar osiloskop atau komputer.



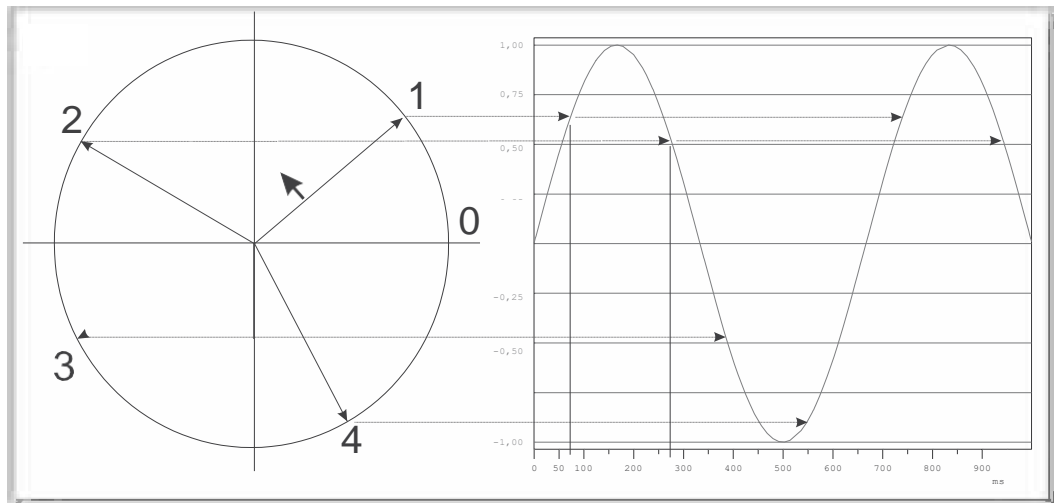
Gambar 23: Sinyal dan informasi

Sebuah modul generator pada contoh pertama menghasilkan tiga sinyal berbeda, dua sinyal yang lebih rendah kemudian "dimanipulasi". Nilai informasi dari sinyal di atas meningkat dari atas ke bawah. Sinyal di atas adalah sinus yang arahnya dapat diprediksi dengan tepat. Karena itu setelah beberapa waktu tidak ada informasi baru. Sinyal tengah adalah sinyal sinus termodulasi, amplitudo mengikuti pola sinusoidal tertentu. Akhirnya sinyal kanan bawah memiliki jalur yang agak "acak" (itu adalah noise yang disaring). Ini dapat diprediksi dengan paling tidak baik tetapi berisi, misalnya, semua informasi tentang karakteristik khusus filter.

Sebagai contoh pertama pilih tegangan gigi gergaji periodik dengan panjang periode $T = 10 \text{ ms}$ (Frekuensi $f = 200\text{Hz}$). Jika seseorang mendengarkan dengan seksama, beberapa nada dengan frekuensi yang berbeda dapat didengar. Semakin tinggi nadanya, semakin lemah tampaknya dalam kasus ini. Jika seseorang mendengarkan lebih lama, ia menemukan bahwa nada terendah kedua tepat satu oktaf lebih tinggi dari nada terendah, yaitu dua kali lebih tinggi dari nada dasar.

Dalam hal semua bentuk sinyal periodik lainnya, ada beberapa nada yang dapat didengar secara bersamaan. Sinyal segitiga dalam Gambar 22 terdengar lembut dan bulat, sangat mirip dengan nada perekam. "Gigi gergaji" terdengar jauh lebih tajam, lebih mirip

nada biola. Dalam sinyal ini ada nada tinggi yang lebih kuat (nada tambahan) daripada di "segitiga". Rupanya overtone berkontribusi pada ketajaman nada.



Gambar 24: Model geometrik untuk cara munculnya sinyal sinusoidal

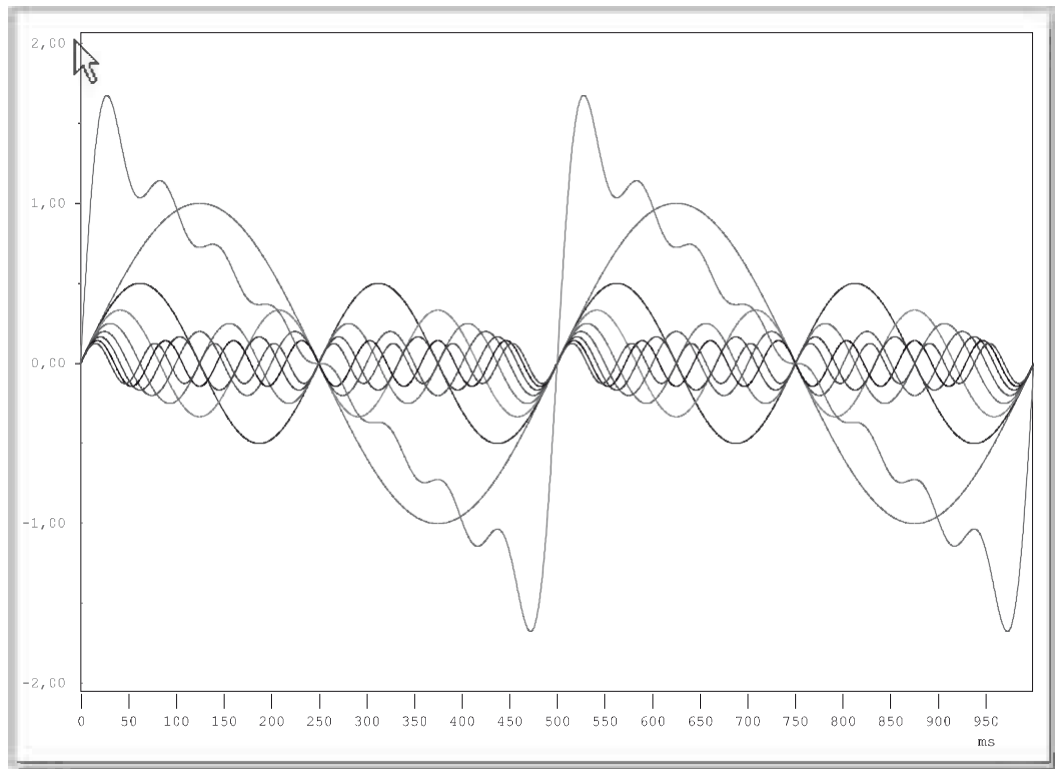
Biarkan penunjuk berputar secara merata berlawanan arah jarum jam, dimulai pada diagram pada 0. Ketika misalnya angka menyatakan nilai waktu dalam ms penunjuk berada di posisi 1 setelah 70 ms, setelah 550ms di posisi 4 dst. Panjang periode (dari 0 hingga 6,28) adalah $T = 666\text{ms}$, yaitu penunjuk berputar 1,5 kali per detik.

Hanya proyeksi penunjuk ke sumbu vertikal yang dapat diukur secara fisik. Jalur sinus yang terlihat/terukur dihasilkan dari proyeksi penunjuk pada saat tertentu. Perlu dicatat bahwa sinyal sinusoidal (periodik) ada sebelum 0 dan terus ada setelah 1000 ms karena berlangsung selama waktu yang tak terbatas dalam teori! Hanya segmen waktu kecil yang dapat direpresentasikan, di sini sedikit lebih banyak daripada panjang periode T .

Ada satu bentuk tegangan AC yang hanya memiliki satu nada yang dapat didengar: sinyal sinusoidal! Dalam eksperimen ini hanya masalah waktu sebelum kita mulai merasa curiga. Jadi di "gigi gergaji" 100Hz ada sinus yang dapat didengar 200Hz, 300Hz dll. Ini berarti bahwa jika kita tidak dapat melihat bahwa sinyal gigi gergaji periodik telah dibuat terdengar telinga kita akan membuat kita berpikir bahwa kita secara bersamaan mendengar sinyal sinusoidal 100Hz, 200Hz, 300Hz dll.

Kesimpulan awal:

- (1) Hanya ada satu osilasi tunggal yang hanya berisi satu nada: sinyal sinusoidal (berkala).
- (2) Semua sinyal atau osilasi (periodik) lainnya – misalnya nada dan vokal mengandung beberapa nada.
- (3) Telinga kita memberitahu kita
 - satu nada = satu sinyal sinusoidal
 - ini berarti: beberapa nada = beberapa sinyal sinusoidal
 - Semua sinyal/osilasi periodik selain sinus mengandung beberapa nada



Gambar 25: Penambahan osilasi/sinyal dari komponen seragam

Ini adalah Gambar pertama dari sintesis FOURIER. Dengan menggunakan contoh sinyal gigi gergaji periodik, ditunjukkan bahwa sinyal seperti gigi gergaji muncul dengan menambahkan sinyal sinusoidal yang sesuai. Berikut adalah enam sinyal sinusoidal (secara teoritis) pertama yang diperlukan untuk mendapatkan sinyal gigi gergaji linier sempurna dengan perubahan mendadak. Contoh ini akan diselidiki lebih lanjut dalam beberapa Gambar berikutnya.

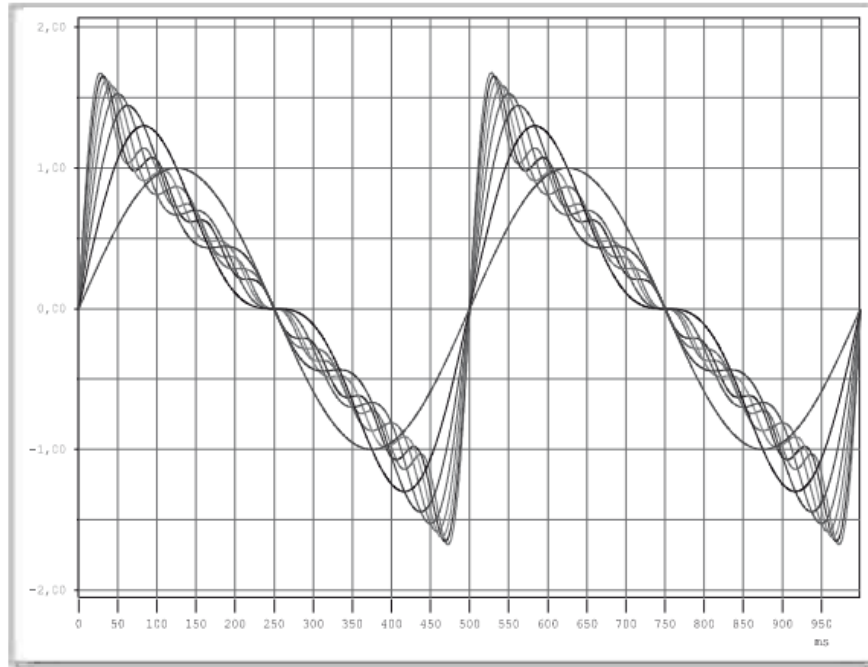
Berikut ini dapat dilihat dengan jelas: (a) di beberapa tempat (ada lima yang terlihat di sini) semua fungsi sinusoidal bernilai nol: pada titik-titik tersebut "gigi gergaji" atau penjumlahan bernilai nol. (b) di dekat "posisi lompat nol" semua sinyal sinusoidal di kiri dan kanan menunjuk ke arah yang sama, oleh karena itu jumlahnya harus terbesar di sini. Sebaliknya, semua sinyal sinusoidal hampir sepenuhnya menghilangkan satu sama lain di dekat "posisi nol sayap", sehingga jumlahnya sangat kecil.

Dari sini dihasilkan Prinsip EMPAT yang mendasar untuk tujuan kita.

Semua osilasi/sinyal dapat dipahami sebagai hanya terdiri dari sinyal sinusoidal dengan frekuensi dan amplitudo yang berbeda.

Ini memiliki konsekuensi yang luas untuk ilmu alam – fisika osilasi dan gelombang –, teknologi dan matematika. Seperti yang akan ditunjukkan, Prinsip FOURIER berlaku untuk semua sinyal, yaitu juga untuk sinyal non-periodik dan satu kali.

Pentingnya prinsip ini untuk teknologi sinyal dan komunikasi didasarkan pada pembalikannya.



Gambar 26: Sintesis FOURIER dari osilasi gigi gergaji

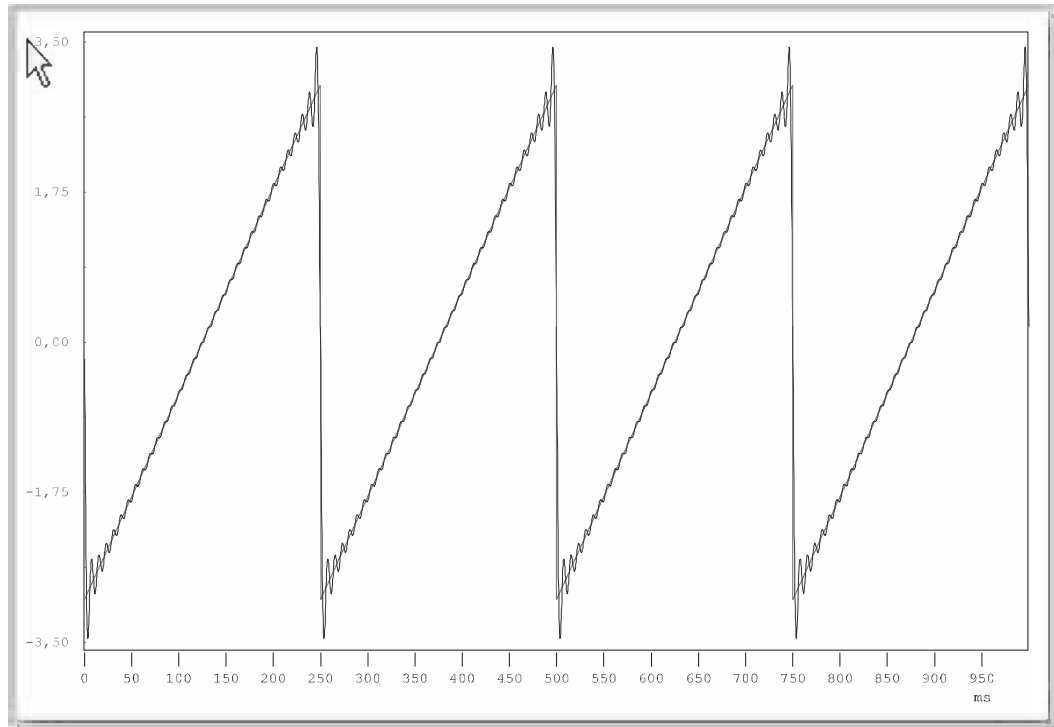
Sebaiknya perhatikan gambar ini dengan sangat hati-hati. Ini menunjukkan semua kurva kumulatif yang dimulai dengan osilasi sinusoidal ($N = 1$) dan diakhiri dengan $N = 8$. Delapan osilasi sinusoidal yang sesuai dapat "memodelkan" osilasi gigi gergaji jauh lebih akurat daripada contoh tiga ($N = 3$.) Harap dicatat – penyimpangan dari sinyal gigi gergaji yang ideal tampaknya paling besar di mana osilasi ini berubah paling cepat. Pertama cari kurva kumulatif untuk $N = 6$.

Jika diketahui bagaimana sistem tertentu bereaksi terhadap sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda, juga jelas bagaimana reaksinya terhadap semua sinyal lain karena semua sinyal lain tidak terdiri dari apa pun kecuali osilasi sinusoidal.

Tiba-tiba seluruh bidang teknik komunikasi tampak lebih mudah dipahami karena cukup untuk melihat lebih dekat reaksi proses dan sistem rekayasa komunikasi terhadap sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda.

Oleh karena itu penting bagi kita untuk mengetahui segala sesuatu tentang sinyal sinusoidal. Seperti dapat dilihat dari Gambar 24, nilai frekuensi f dihasilkan dari kecepatan sudut $= \omega / t$ dari penunjuk yang berputar. Jika nilai sudut penuh (setara dengan 360°) diberikan dalam rad, $= 2\pi / T$ atau $= 2\pi f$ berlaku.

Secara total sinyal sinusoidal memiliki tiga sifat. Properti yang paling penting adalah frekuensi yang pasti. Ini menentukan ketinggian nada secara akustik.



Gambar 27: Sintesis EMPAT: semakin banyak semakin baik!

Di sini $N = 32$ sinyal sinusoidal pertama ditambahkan dari mana sinyal gigi gergaji disusun. Pada posisi lompatan "gigi gergaji" penyimpangan terbesar. Fungsi kumulatif tidak pernah dapat berubah lebih cepat daripada sinyal sinusoidal dengan frekuensi terbesar (secara praktis terlihat sebagai "konten riak"). Karena "gigi gergaji" pada posisi lompatan secara teoritis dapat "berubah sangat cepat", deviasi hanya dapat menghilang ketika fungsi kumulatif juga berisi sinyal sinusoidal "berubah tak terhingga" (yaitu f). Karena itu tidak ada, sinyal gigi gergaji yang sempurna juga tidak ada. Di alam setiap perubahan membutuhkan waktu!

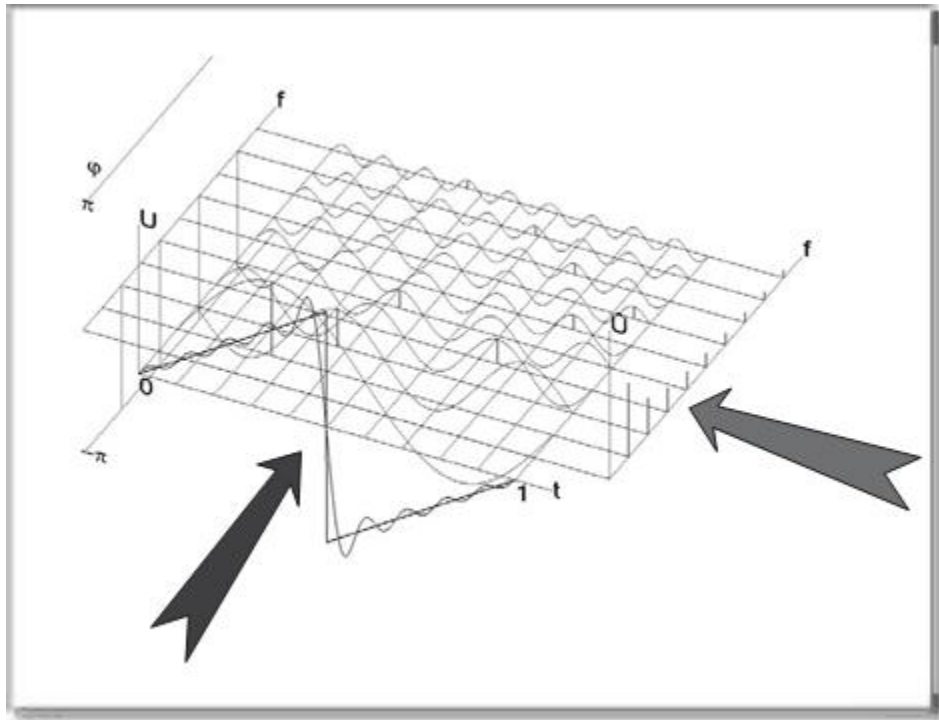
Istilah seperti "rentang frekuensi" atau "respons frekuensi" sudah dikenal luas. Kedua konsep tersebut hanya bermakna dalam konteks sinyal sinusoidal:

- Rentang frekuensi: rentang frekuensi yang dapat didengar oleh manusia terletak pada kisaran kira-kira 30 hingga 20.000 Hz (20 kHz). Ini berarti bahwa telinga kita (bersama dengan otak) hanya mendengar sinyal sinusoidal akustik antara 30 dan 20.000 Hz
- Respon frekuensi: jika respons frekuensi untuk penguat suara bass diberikan sebagai 20 hingga 2500 Hz, ini berarti penguat suara hanya dapat mengirimkan gelombang akustik yang mengandung gelombang sinusoidal antara 20 dan 2500 Hz.

Catatan: Berbeda dengan istilah rentang frekuensi, istilah respons frekuensi hanya digunakan dalam kaitannya dengan sistem yang mampu beresonansi.

Dua lainnya - juga sifat penting - dari sinyal sinusoidal adalah:

- amplitudo dan
- sudut fase



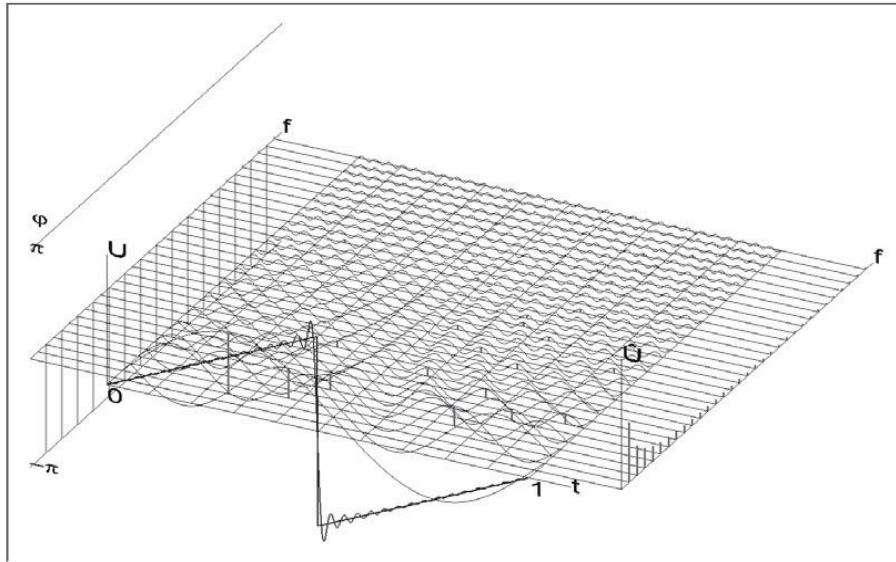
Gambar 28: Transformasi FOURIER berbantuan gambar

Gambar menunjukkan dengan cara yang sangat grafis untuk sinyal periodik ($T = 1$) bagaimana jalur ke dalam rentang frekuensi – transformasi FOURIER – muncul. Domain waktu dan frekuensi adalah dua perspektif sinyal yang berbeda. Sebuah "lapangan bermain" untuk sinyal sinusoidal (esensial) yang terdiri dari sinyal "gigi gergaji" periodik yang disajikan di sini berfungsi sebagai "transformasi" bergambar antara dua area. Domain waktu dihasilkan dari penambahan semua komponen sinus (harmonik).

Domain frekuensi berisi data sinyal sinusoidal (amplitudo dan fase) yang diplot melalui frekuensi f . Spektrum frekuensi meliputi spektrum amplitudo (di sebelah kanan) dan spektrum fase (di sebelah kiri); keduanya dapat dibaca langsung di "lapangan bermain". Selain itu, "kurva kumulatif" dari delapan sinyal sinusoidal pertama yang disajikan di sini juga dimasukkan. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 26 dan Gambar 27: semakin banyak sinyal sinusoidal yang terkandung dalam spektrum yang ditambahkan, semakin kecil deviasi antara kurva kumulatif dan "gigi gergaji".

Amplitudo – jumlah nilai maksimum sinyal sinusoidal (setara dengan panjang penunjuk yang berputar berlawanan arah jarum jam dalam Gambar 24) – misalnya dalam akustik merupakan ukuran volume, dalam fisika (tradisional) dan rekayasa cukup umum ukuran energi rata-rata yang terkandung dalam sinyal sinusoidal.

Sudut fase dari sinyal sinusoidal dalam analisis akhir hanyalah ukuran perpindahan dalam waktu sinyal sinusoidal dibandingkan dengan sinyal sinusoidal lain atau titik referensi waktu (misalnya $t = 0$ s). Sebagai pengingat: Sudut fase dari penunjuk yang berputar tidak diberikan dalam derajat tetapi dalam "rad" (dari pancaran: busur lingkaran satuan ($r = 1$), yang termasuk dalam sudut ini).



Gambar 29: "Lapangan permainan" dari sinyal gigi gergaji dengan 32 harmonik pertama

Perbedaan antara sinyal gigi gergaji dan kurva penjumlahan jelas lebih kecil dari pada Gambar 28. Lihat Gambar 27.

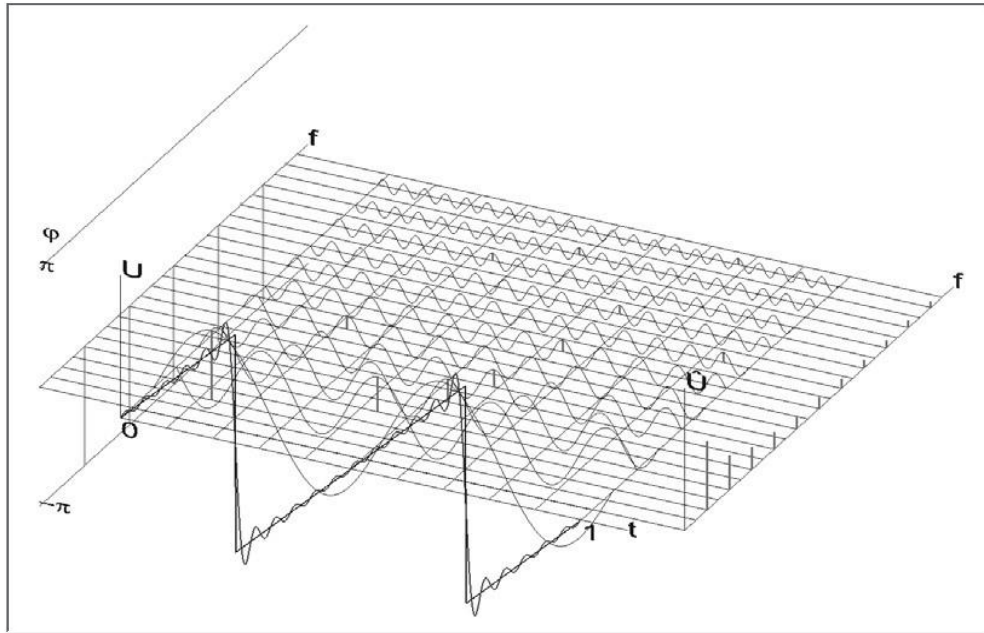
- Keliling lingkaran satuan = $2 \cdot \pi \cdot 1 = 2\pi$ rad
- 360 derajat setara dengan 2π rad
- 180 derajat setara dengan π rad
- 1 derajat setara dengan $\pi/180 = 0,01745$ rad
- x derajat setara dengan $x \cdot 0,01745$ rad
- misalnya, 57,3 derajat setara dengan 1 rad

FOURIER -Transformasi: Dari Domain Waktu Ke Domain Frekuensi Dan Kembali

Sebagai hasil dari Prinsip FOURIER semua osilasi atau sinyal dilihat dari dua perspektif, yaitu :

domain waktu dan domain frekuensi

Dalam domain waktu, informasi diberikan tentang nilai-nilai sinyal pada waktu tertentu dalam periode waktu tertentu (perkembangan waktu dari nilai-nilai pada saat tertentu). Dalam domain frekuensi sinyal dijelaskan oleh sinyal sinusoidal yang terdiri.



Gambar 30: Menggandakan frekuensi

Di sini panjang periode sinyal gigi gergaji adalah $T = 0,5s$ (atau misalnya $0,5 \text{ ms}$). Frekuensi sinyal gigi gergaji sesuai dengan 2 Hz (atau 2 kHz). Jarak antara garis dalam spektrum amplitudo dan fasa adalah 2 Hz (atau 2 kHz). Perhatikan spektrum fasa yang berubah. Meskipun ini merupakan penyederhanaan yang berlebihan, dapat dikatakan: mata kita melihat sinyal dalam domain waktu di layar osilografi tetapi telinga kita jelas berada di sisi domain frekuensi.

Seperti yang akan kita lihat dalam kasus banyak masalah praktis, terkadang lebih berguna untuk mempertimbangkan sinyal terkadang dalam domain waktu dan terkadang dalam domain frekuensi.

Kedua cara penyajian ini sama-sama valid, yaitu sama-sama mengandung semua informasi. Namun, informasi dari domain waktu terjadi dalam bentuk transformasi dalam domain frekuensi dan dibutuhkan sejumlah latihan untuk mengenalinya.

Terlepas dari teknik pengukuran "analisis harmonik" yang sangat rumit (analog), sekarang ada prosedur penghitungan (algoritma) untuk menghitung cara penyajian berbasis frekuensi – spektrum – dari domain waktu sinyal dan sebaliknya. Metode ini disebut transformasi FOURIER.

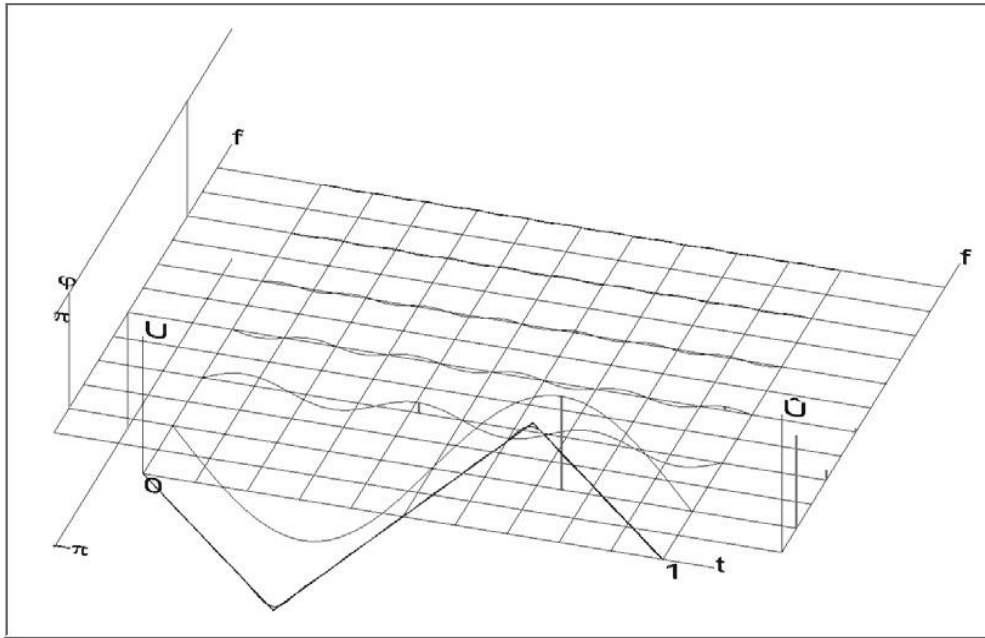
Ini adalah salah satu proses sinyal yang paling penting dalam fisika dan teknologi.

- Transformasi FOURIER (FT)

Metode penghitungan spektrum (frekuensi) sinyal dari perkembangan waktu.

- Transformasi FOURIER Terbalik (IFT)

Metode menghitung perkembangan sinyal dalam waktu dari spektrum.



Gambar 31: Sinyal segitiga periodik

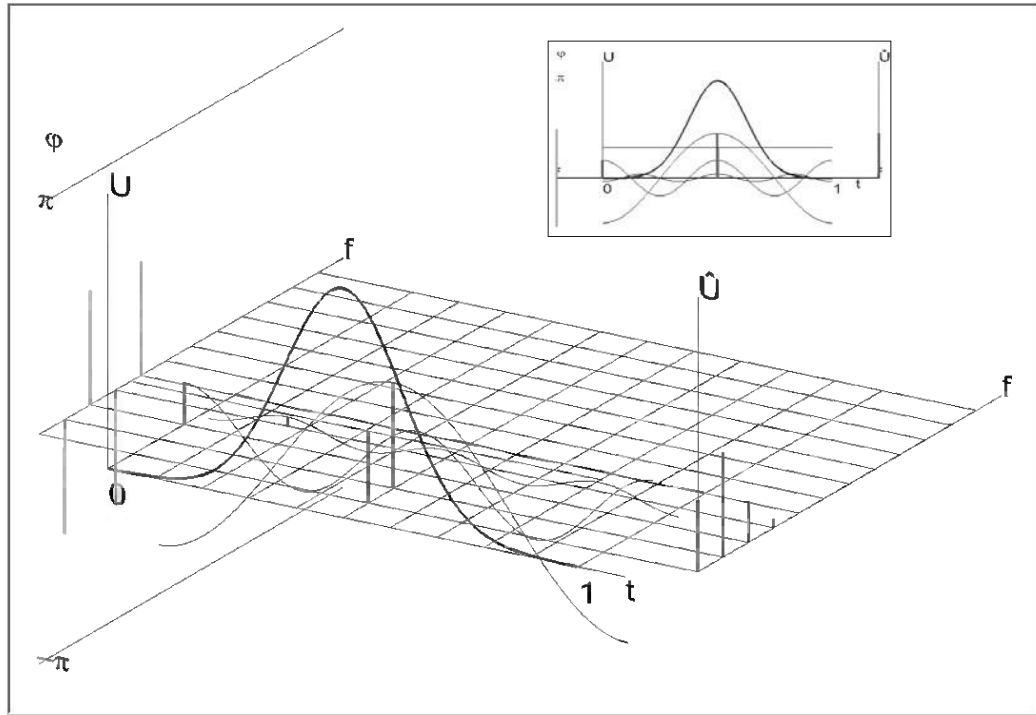
Spektrum tampaknya pada dasarnya terdiri dari satu sinyal sinusoidal. Ini tidak mengherankan karena sinyal segitiga mirip dengan sinyal sinusoidal. Harmonik tambahan bertanggung jawab atas perbedaan halus (lihat kurva jumlah). Untuk alasan simetri, harmonik genap sama sekali tidak ada.

Komputer dapat mengerjakan FT dan IFT untuk kita. Kami di sini hanya tertarik pada hasil yang disajikan secara grafis. Untuk kepentingan Gambar yang jelas, sebuah presentasi telah dipilih di mana domain waktu dan frekuensi disajikan bersama dalam Gambar tiga dimensi.

Prinsip FOURIER digambarkan dengan sangat baik dalam bentuk representasi ini karena osilasi sinusoidal esensial yang membentuk sinyal semuanya didistribusikan bersama satu sama lain. Dengan cara ini FT secara praktis digambarkan secara grafis. Dapat dilihat dengan jelas bagaimana seseorang dapat berubah dari domain waktu ke spektrum dan sebaliknya. Ini membuatnya sangat mudah untuk mengekstrapolasi aturan transformasi penting.

Selain sinyal gigi gergaji, kurva kumulatif dari 8, 16 atau 32 sinyal sinusoidal (harmonik) pertama disertakan. Ada perbedaan antara gigi gergaji yang ideal dan kurva kumulatif dari 8 atau 32 harmonik pertama, yaitu spektrum tidak menunjukkan semua sinyal sinusoidal yang terdiri dari sinyal gigi gergaji (berkala).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25, berikut ini berlaku untuk semua sinyal periodik: *Semua osilasi/sinyal periodik mengandung komponen sinusoidal semua kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar karena hanya ini yang sesuai dengan kerangka waktu dari panjang periode T. Dalam kasus sinyal periodik, semua sinyal sinusoidal yang terkandung di dalamnya harus diulang setelah panjang periode T dengan cara yang sama!*



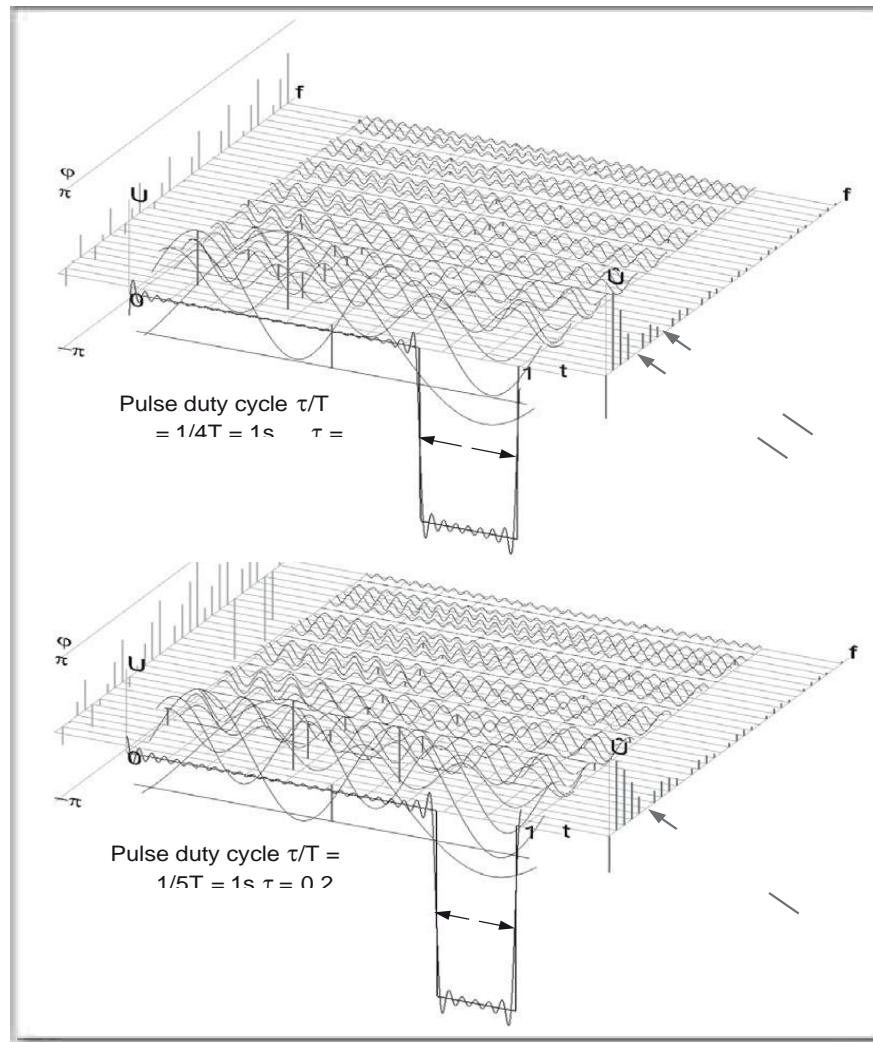
Gambar 32: Bentuk pulsa tanpa transisi cepat

Dalam urutan (periodik) pulsa GAUSSian setiap pulsa dimulai dan diakhiri dengan lembut. Untuk alasan ini spektrum tidak dapat berisi frekuensi tinggi. Karakteristik ini membuat pulsa GAUSSian sangat menarik untuk banyak aplikasi modern. Bentuk pulsa ini akan sering kita jumpai. Contoh: gigi gergaji periodik 100Hz hanya berisi komponen sinusoidal 100 Hz, 200 Hz, 300Hz dll.

Spektrum osilasi/sinyal periodik karenanya selalu terdiri dari garis-garis pada jarak yang sama satu sama lain. Sinyal periodik memiliki spektrum garis!

Sinyal gigi gergaji dan gelombang persegi berisi langkah-langkah dalam "ruang waktu yang sangat singkat" dari, misalnya 1 ke -1 atau dari 0 ke 1. Agar dapat memodelkan "transisi cepat tak terhingga" melalui sinyal sinusoidal, sinyal sinusoidal sinyal frekuensi tinggi tak terhingga harus hadir. Oleh karena itu berikut:

Osilasi/sinyal dengan fungsi langkah (transisi dalam periode waktu yang sangat singkat) mengandung (secara teoritis) sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang sangat tinggi.



Gambar 33: Sinyal gelombang persegi periodik dengan faktor tugas pulsa yang berbeda

Gambar ini menunjukkan bagaimana informasi dari domain waktu dapat ditemukan dalam domain frekuensi. Panjang periode T dapat ditemukan dalam jarak $1/T$ dari garis-garis spektrum frekuensi. Seperti pada Gambar ini $T = 1\text{s}$ hasil jarak garis 1Hz . Durasi pulsa adalah $1/4$ di representasi atas dan di bawah $1/5$ dari panjang periode T . Sangat mencolok bahwa setiap harmonik keempat di atas (4 Hz , 8Hz dll, dan setiap harmonik kelima di bawah (5 Hz , 10 Hz dll) memiliki nilai 0. Posisi nol dalam setiap kasus pada titik l . Juga dimungkinkan untuk menentukan panjang periode T dan durasi pulsa dalam domain frekuensi.

Dari sudut pandang fisik, tidak ada sinyal sinusoidal "dengan frekuensi tinggi tak terhingga", di alam tidak mungkin ada sinyal dengan "transisi cepat tak terhingga".

Di alam setiap perubahan, termasuk langkah dan transisi, membutuhkan waktu karena sinyal/osilasi terbatas sejauh menyangkut frekuensi.

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 26 dan Gambar 27, perbedaan antara gigi gergaji (periodik) yang ideal dan kurva kumulatif paling besar jika terdapat transisi atau langkah cepat.

Sinyal sinusoidal frekuensi tinggi yang terkandung dalam spektrum berfungsi sebagai aturan untuk memodelkan transisi cepat.

Dengan demikian, juga mengikuti bahwa

Sinyal yang tidak menunjukkan transisi cepat juga tidak mengandung frekuensi tinggi.

Osilasi/Sinyal Periodik Yang Penting

Sebagai hasil dari Prinsip FOURIER dapat diambil sebagai hal yang biasa bahwa osilasi sinusoidal adalah "sinyal" periodik yang paling penting.

Sinyal segitiga dan gigi gergaji adalah dua contoh penting lainnya karena keduanya berubah dalam waktu secara linier. Sinyal tersebut digunakan dalam teknologi pengukuran dan kontrol (misalnya, untuk defleksi horizontal berkas elektron dalam tabung gambar).

Mereka mudah diproduksi. Misalnya, kapasitor yang diubah menjadi sumber arus konstan diisi secara linier.

Spektrum mereka menunjukkan perbedaan yang menarik. Pertama-tama bagian frekuensi tinggi dari spektrum sinyal segitiga jauh lebih kecil, karena – berbeda dengan sinyal gigi gergaji – tidak ada langkah cepat yang terjadi. Sementara dalam kasus "gigi gergaji" (berkala) semua harmonik bernomor genap terkandung dalam spektrum, spektrum "segitiga" (berkala) hanya menunjukkan harmonik bernomor ganjil (misalnya 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz dll.). Dengan kata lain, amplitudo harmonik genap sama dengan nol.

Mengapa harmonik genap tidak diperlukan di sini?

Jawabannya terletak pada simetri yang lebih besar dari sinyal segitiga. Pada awalnya, sinyal sinusoidal terlihat sangat mirip. Inilah sebabnya mengapa spektrum hanya menunjukkan "penyesuaian kecil". Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 31, hanya sinyal sinusoidal yang dapat digunakan sebagai komponen yang menunjukkan simetri ini dalam panjang periode T dan itu adalah harmonik bernomor ganjil.

Perbandingan Sinyal Dalam Domain Waktu Dan Frekuensi

Sebagai hasil dari teknologi digital, tetapi juga ditentukan oleh proses modulasi tertentu, gelombang persegi (periodik) atau pulsa persegi memiliki kepentingan khusus. Jika mereka melayani tujuan sinkronisasi atau pengukuran waktu mereka tepat disebut sinyal jam. Sinyal digital tipikal bagaimanapun tidak periodik. Karena mereka adalah pembawa informasi (terus berubah), mereka tidak periodik atau hanya "sementara".

Apa yang disebut faktor tugas pulsa, hasil bagi dari durasi pulsa dan panjang periode T menentukan spektrum frekuensi pulsa persegi panjang (periodik). Dalam kasus sinyal persegi panjang simetris $= 1/2 = 0,5$. Dalam hal ini ada simetri seperti dalam kasus sinyal segitiga (reguler) dan spektrumnya karena itu hanya berisi harmonik bernomor ganjil. (lihat Gambar 34).

Kita dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang hubungan ini dengan pemeriksaan dekat domain waktu dan frekuensi dalam kasus faktor tugas pulsa yang berbeda $/T$ (lihat Gambar 33). Dalam kasus faktor tugas pulsa $1/4$ justru harmonik ke-4, ke-8, ke-12, dll yang hilang, dalam kasus faktor tugas pulsa $1/5$ tanggal 5, tanggal 10, 15 dst, di kasus faktor tugas pulsa $1/10$ harmonik ke-10, ke-20, ke-30 (lihat Gambar 35).

"Kesenjangan" ini disebut "posisi nol dari spektrum" karena amplitudo secara formal memiliki nilai nol pada posisi ini. Akibatnya, semua harmonik bernomor genap kurang dalam kasus sinyal persegi panjang simetris dengan faktor tugas pulsa $\frac{1}{2}$

Sekarang dapat dilihat bahwa nilai inti dari domain waktu "tersembunyi" di domain frekuensi: Rasio terbalik dari panjang periode T setara dengan jarak antara garis spektral dalam spektrum. Sehubungan dengan hal tersebut, mohon perhatikan kembali Gambar 30. Jarak garis frekuensi ($f = 1/T$ sama dengan frekuensi dasar f_1 (harmonik ke-1).

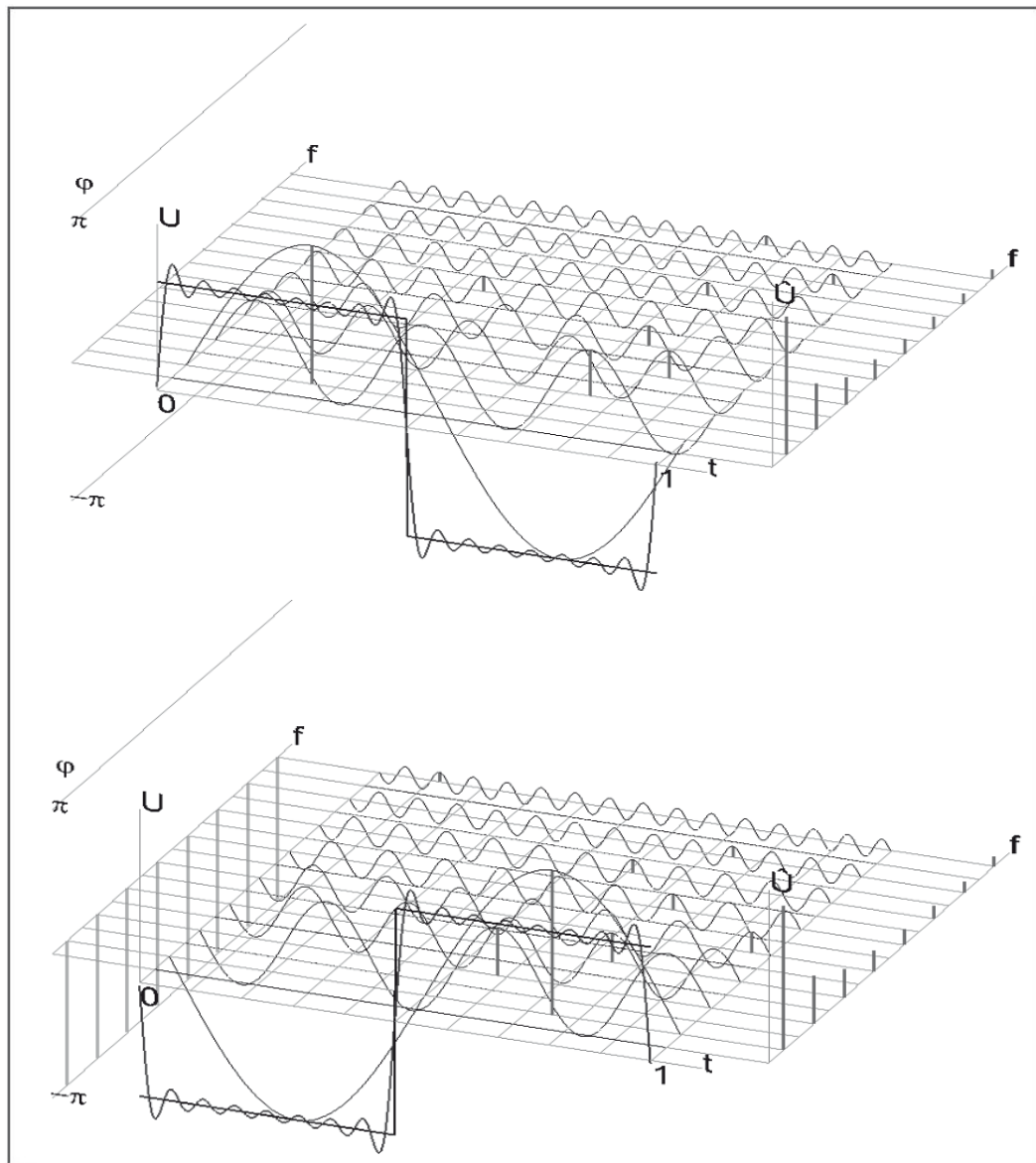
Contoh:

$T = 20$ ns menghasilkan frekuensi dasar atau jarak garis frekuensi 50 MHz.

Rasio terbalik dari durasi pulsa setara dengan jarak F_0 antara posisi nol dalam spektrum:

Jarak posisi nol $F_0 = 1$

Hal ini memungkinkan seseorang untuk menarik kesimpulan tentang hubungan mendasar dan sangat penting antara domain waktu dan domain frekuensi.



Gambar 34: Rangkaian pulsa segi empat simetris dengan titik acuan waktu yang bervariasi
 $t = 0$

Dalam kedua representasi itu adalah sinyal yang sama. Yang lebih rendah terhuyung-huyung dibandingkan dengan yang atas dengan $T/2$. Kedua representasi memiliki titik acuan waktu yang berbeda $t = 0$ s. Perpindahan waktu $T/2$ persis sama dengan perpindahan fase. Ini menjelaskan spektrum fase yang berbeda. Karena $T = 1/2$ semua harmonik bilangan genap tidak ada (yaitu posisi nol dari spektrum adalah 2 Hz, 4Hz, dll).

Semua nilai waktu karakteristik besar tampak kecil dalam domain frekuensi, semua nilai waktu karakteristik kecil tampak besar dalam domain frekuensi. Contoh: Bandingkan panjang periode T dan durasi pulsa.

Spektrum Fase Yang Membingungkan

Hal ini juga memungkinkan untuk menarik kesimpulan penting berkaitan dengan spektrum fase. Seperti yang ditunjukkan Gambar 34, sinyal yang sama dapat memiliki spektrum fase yang berbeda. Spektrum fase tergantung pada titik referensi waktu $t = 0$.

Sebaliknya, spektrum amplitudo tidak terpengaruh oleh perpindahan waktu. Untuk alasan ini spektrum fase lebih membingungkan dan kurang mengungkapkan daripada spektrum amplitudo. Oleh karena itu dalam bab-bab berikut biasanya hanya spektrum amplitudo yang akan ditunjukkan dalam domain frekuensi.

Catatan:

- Meskipun demikian, hanya dua representasi spektral yang bersama-sama memberikan semua informasi tentang perkembangan sinyal/osilasi dalam domain waktu. Transformasi FOURIER terbalik IFT membutuhkan spektrum amplitudo dan fase untuk menghitung arah sinyal dalam domain waktu.
- Sifat telinga kita (penganalisis FOURIER!) yang hampir tidak merasakan perubahan dalam spektrum fase sinyal adalah fenomena yang sangat menarik. Setiap perubahan penting dalam spektrum amplitudo segera diperhatikan. Dalam hubungan ini Anda harus melakukan eksperimen akustik dengan DASYLab.

Gangguan: Tidak Ada Yang Terlihat Meskipun Semuanya Ada Di Sana.

Pulsa persegi panjang (berkala) dalam Gambar 33 memiliki nilai konstan (positif atau negatif) selama durasi pulsa, tetapi di antara pulsa nilainya nol. Jika kita hanya mempertimbangkan periode waktu T – ini, kita mungkin dengan mudah berpikir bahwa "tidak mungkin ada apa pun di sana ketika nilainya nol", yaitu tidak ada sinyal sinusoidal juga.

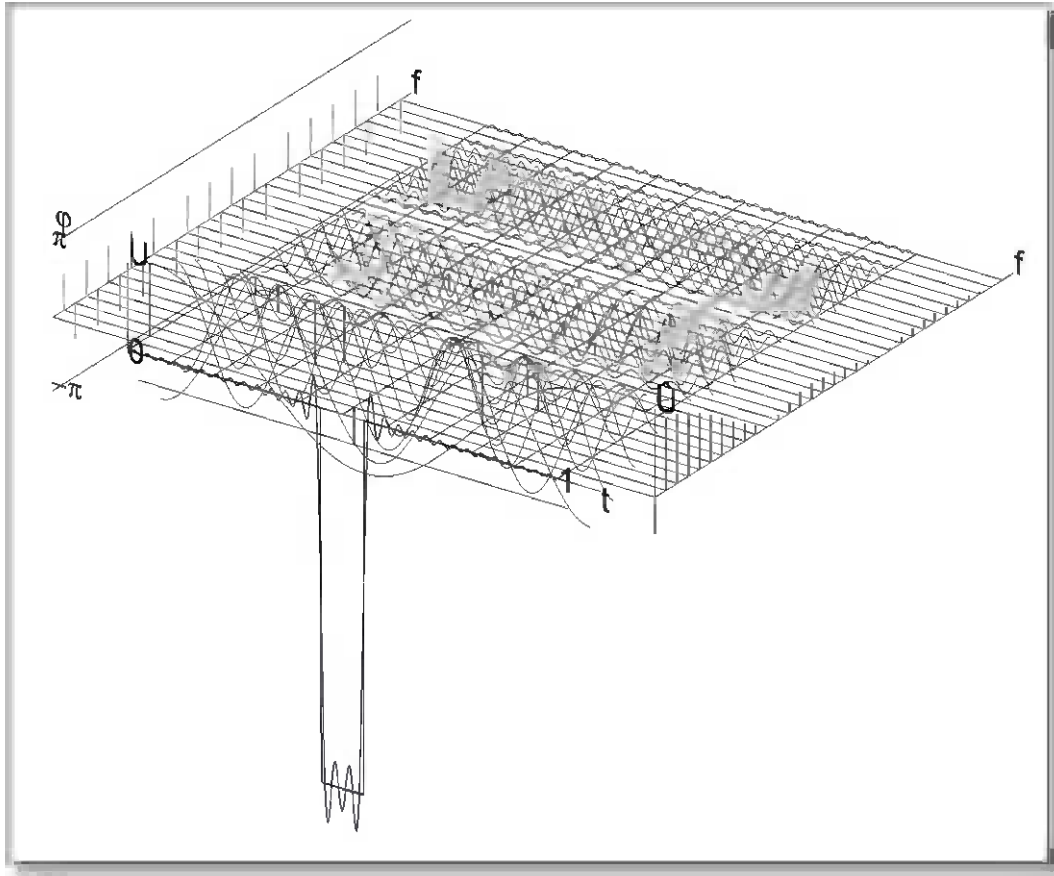
Ini pada dasarnya akan keliru dan ini dapat ditunjukkan secara eksperimental. Selain itu, Prinsip FOURIER akan salah (mengapa?). Salah satu prinsip terpenting fisika osilasi dan gelombang terlibat di sini:

Osilasi dan gelombang (sinusoidal) dapat memadamkan atau memperkuat satu sama lain sementara dan secara lokal (gelombang) dengan penambahan.

Dalam fisika gelombang prinsip ini disebut interferensi. Pentingnya untuk fisika osilasi dan teori sinyal terlalu jarang ditunjukkan.

Mari kita pertama-tama melihat Gambar 33 lagi. Kurva kumulatif dari 16 harmonik pertama telah - sengaja - disertakan. Kita melihat bahwa jumlah dari 16 harmonik pertama

antara pulsa sama dengan nol hanya di beberapa tempat (zero crossing), jika tidak mereka menyimpang sedikit dari nol. Hanya jumlah harmonik tak terhingga yang dapat menghasilkan nol. Pada "lapangan bermain" sinusoidal kita melihat bahwa semua sinyal sinusoidal dari spektrum tetap tidak berubah selama seluruh panjang periode T .



Gambar 35: Analisis hubungan yang tepat.

Dalam Gambar ini hubungan-hubungan penting harus diringkas sekali lagi dan penambahan-penambahan dibuat:

- Faktor tugas pulsa dari rangkaian pulsa persegi (berkala) adalah $1/10$. Posisi nol pertama dari spektrum terletak pada harmonik ke-10. 10 harmonik pertama terletak pada posisi $t = 0,5$ s dalam fase sehingga di tengah semua "amplitudo" bertambah ke bawah. Pada posisi nol pertama dan selanjutnya, langkah fase rad terjadi. Ini dapat dengan mudah dikenali baik dalam spektrum fase itu sendiri maupun di "lapangan bermain". Di tengah semua amplitudo tumpang tindih satu sama lain di atas dan sesudahnya – dari harmonik ke-20 hingga ke-30 menuju ke bawah lagi, dll.
- Semakin sempit pulsa, semakin besar deviasi antara jumlah harmonik pertama (di sini $N = 32$) dan pulsa persegi panjang muncul. Perbedaan antara yang terakhir dan osilasi kumulatif paling besar di mana sinyal berubah paling cepat, misalnya pada atau di dekat sisi pulsa.
- Dimana sinyal sesaat setara dengan nol – ke kanan dan kiri pulsa – semua (jumlah tak terbatas) sinyal sinusoidal menambahkan hingga nol; mereka hadir tetapi dihilangkan oleh gangguan. Jika satu "menyaring" keluar N pertama = 32 harmonik dari semua

yang lain, ini menghasilkan osilasi kumulatif "putaran" seperti yang ditunjukkan; itu tidak lagi setara dengan nol di sebelah kanan dan kiri pulsa. Isi riak dari osilasi kumulatif sama dengan frekuensi tertinggi yang terkandung.

Bahkan ketika nilai sinyal sama dengan nol selama domain waktu t , mereka tetap mengandung osilasi sinusoidal selama waktu ini. Sebenarnya, frekuensi tinggi "tak terhingga" juga harus ditampung karena jika tidak, hanya progresi sinyal "bulat" yang akan dihasilkan. "Efek menghaluskan" adalah hasil dari frekuensi tinggi dan sangat tinggi.

Dalam Gambar 35 kita melihat nilai („offset“) dalam spektrum amplitudo pada posisi $f = 0$. Pada "lapangan permainan" nilai ini dimasukkan sebagai fungsi konstan ("frekuensi nol"). Jika kita menghapus nilai ini - U misalnya dengan menggunakan kapasitor medan nol sebelumnya tidak lagi menjadi nol tetapi $+U$. Dengan demikian berikut ini berlaku:

Jika sinyal mengandung bagian konstan selama periode waktu t spektrum secara teoritis harus mengandung frekuensi "tinggi tak terhingga".

Pada Gambar 35 terdapat pulsa persegi panjang (berkala) dengan faktor tugas pulsa $1/10$ dalam domain waktu dan frekuensi. Oleh karena itu, posisi nol (pertama) dalam spektrum berada pada harmonik ke-10.

Posisi nol pertama dari spektrum dipindahkan lebih jauh dan lebih jauh ke kanan dalam Gambar 36, semakin kecil faktor tugas pulsa yang dipilih (misalnya $1/100$). Jika faktor tugas pulsa mendekati nol, kami memiliki urutan pulsa delta (berkala) dimana durasi pulsa mendekati nol.

Lawan Yang Memiliki Banyak Kesamaan: Sinus Dan Pulsa

Pulsa jarum seperti itu disebut -pulsa (delta-pulsa) dalam literatur teoretis khusus. Setelah sinyal sinusoidal, -pulsa adalah bentuk osilasi atau fungsi waktu yang paling penting.

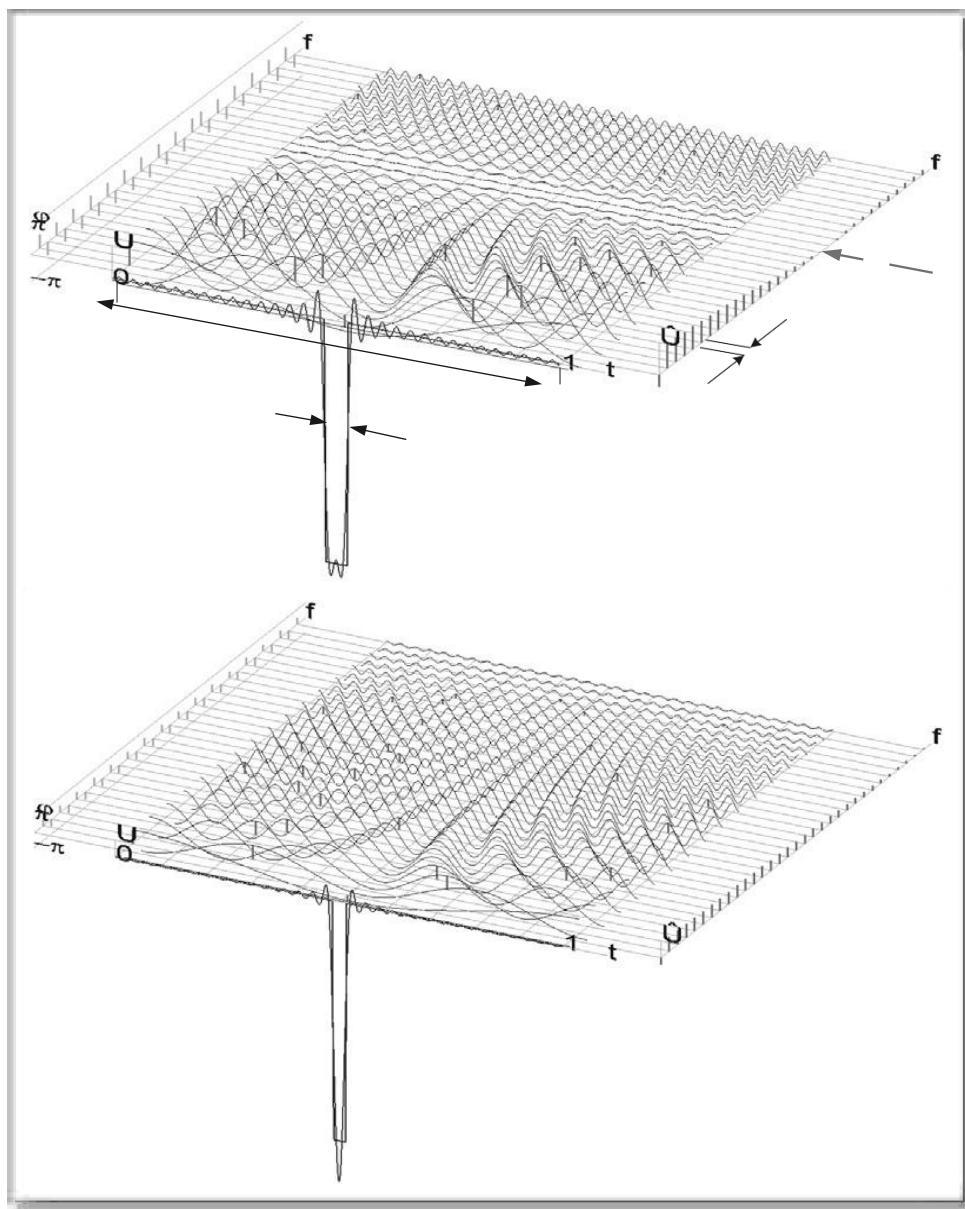
Faktor-faktor berikut mendukung hal ini:

- Dalam pemrosesan sinyal digital (DSP) nomor-string diproses pada interval waktu yang teratur (frekuensi pulsa clock). String ini secara gambar mewakili urutan pulsa dengan besaran tertentu. Angka 17 misalnya bisa setara dengan besarnya pulsa jarum 17. Rincian lebih lanjut akan diberikan nanti dalam bab tentang pemrosesan sinyal digital.
- Setiap sinyal secara teoritis dapat dipahami sebagai terdiri dari sebagai urutan kontinu pulsa dengan besaran tertentu yang mengikuti satu sama lain. Lihat Gambar 37 dalam hubungan ini.
- Sinyal sinusoidal dalam domain waktu menghasilkan "fungsi jarum" (-fungsi²) dalam domain frekuensi (spektrum garis). Terlebih lagi – semua osilasi/sinyal periodik menghasilkan spektrum garis yang berjarak sama (muncul di interval yang sama) fungsi delta dalam domain frekuensi.
- Dari sudut pandang teoretis, -pulsa adalah sinyal uji yang ideal untuk semua sistem. Jika pulsa- dihubungkan ke input sistem, sistem diuji pada waktu yang sama dengan semua frekuensi dan, sebagai tambahan, dengan amplitudo yang sama. Lihat halaman berikut, khususnya Gambar 36.

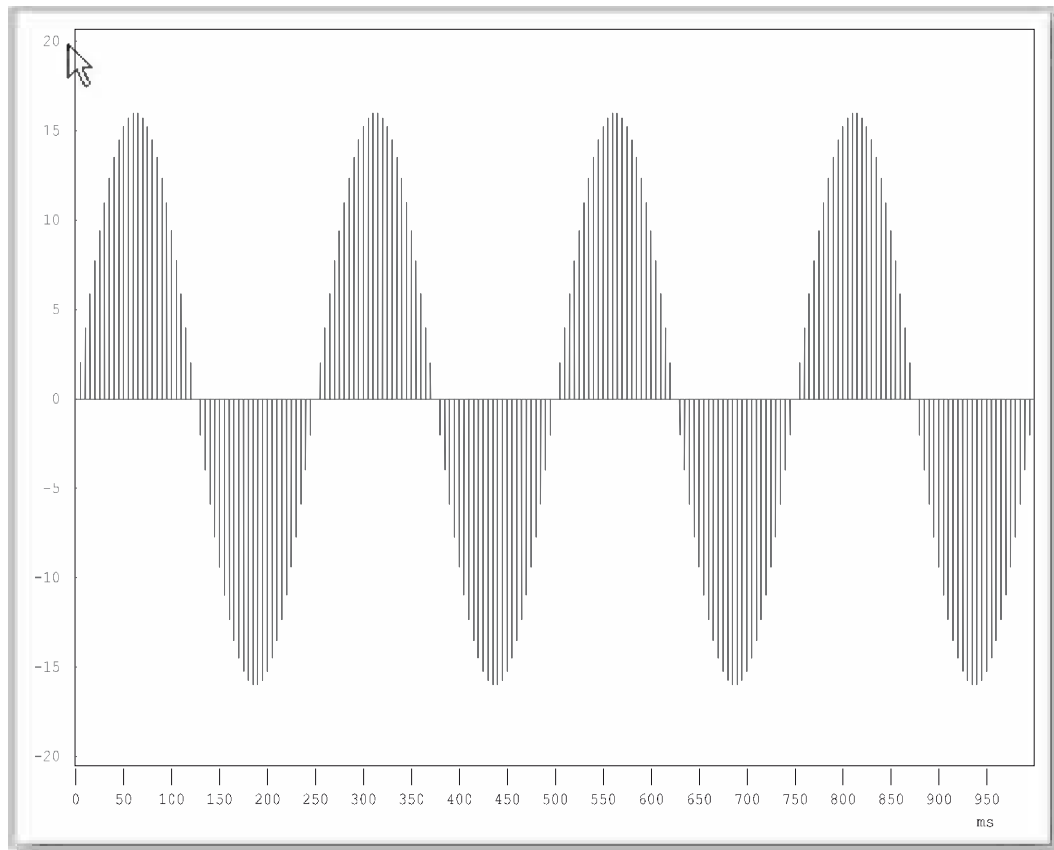
- Pulsa (berkala) berisi dalam interval $f = 1/T$ semua frekuensi (kelipatan bilangan bulat) dari nol hingga tak terhingga selalu dengan amplitudo yang sama.

Faktor tugas pulsa di atas kira-kira $1/16$ di atas dan $1/32$ di bawah. Dengan demikian, posisi nol pertama di atas adalah pada $N = 16$, dan di bawah pada $N = 32$. Posisi nol "bergerak" ke arah kanan dengan frekuensi yang lebih tinggi jika pulsa menjadi lebih sempit. Di bawah, garis-garis spektrum yang diwakili tampaknya memiliki amplitudo yang hampir sama besar.

Dalam kasus pulsa "jarum" atau pulsa , lebar pulsa cenderung menuju nol, sehingga posisi spektrum nol (pertama) cenderung menuju tak terhingga. Oleh karena itu, -pulsa memiliki "spektrum frekuensi yang sangat luas"; selain itu, semua amplitudonya sama.



Gambar 36: Langkah-langkah dalam arah pulsa



Gambar 37: Sintesis sinyal melalui -pulsa

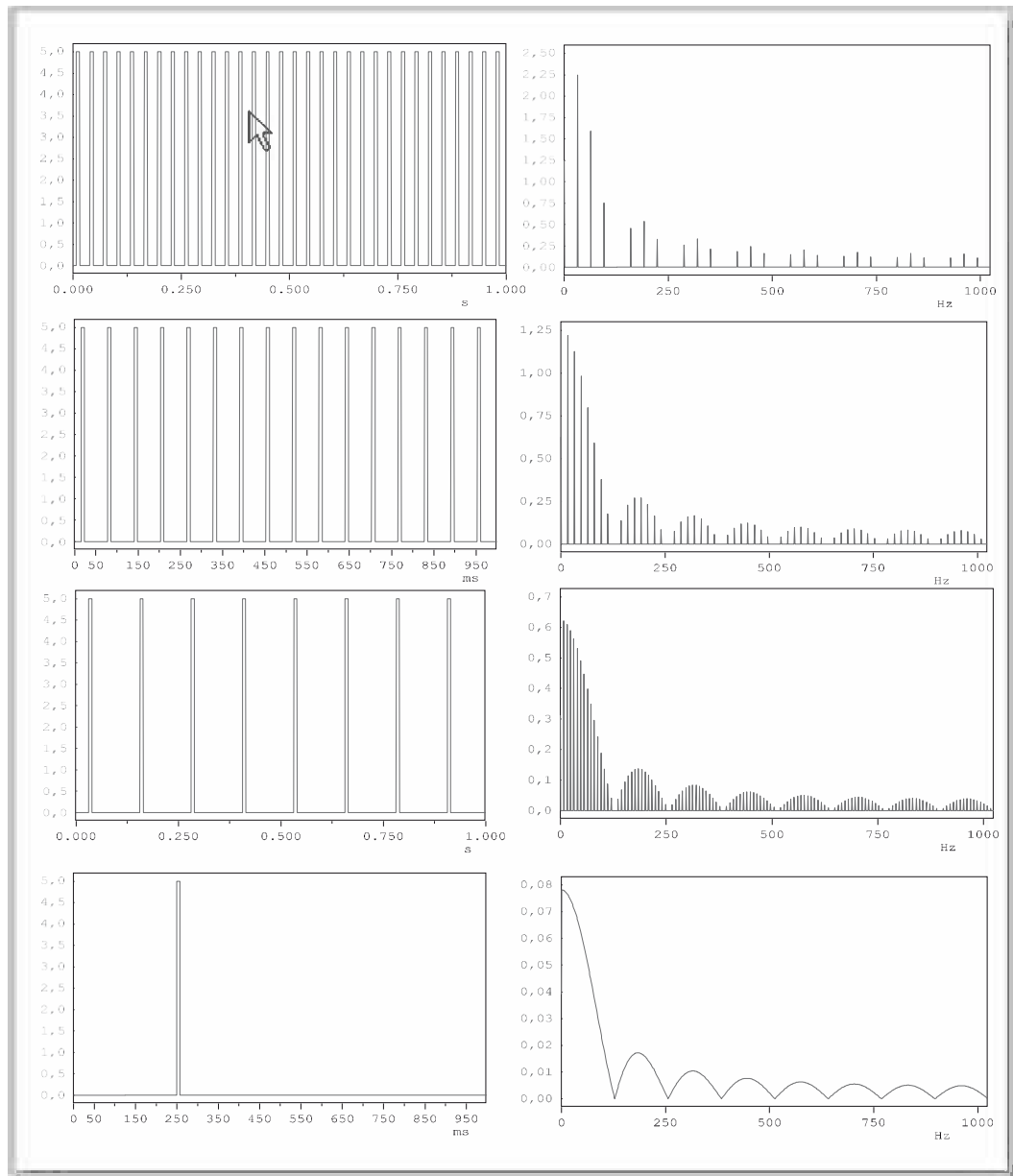
Di sini gelombang sinus "dirakit" dari -pulsa dengan besaran yang sesuai mengikuti satu sama lain. Ini persis sama dengan prosedur dalam "pemrosesan sinyal digital" (DSP). Sinyal mereka setara dengan "string angka" yang, dilihat dari sudut pandang fisik, setara dengan urutan cepat pengukuran sinyal analog; setiap angka memberikan nilai "tertimbang" dari -pulsa pada titik waktu t tertentu.

Hubungan aneh antara fungsi sinusoidal dan jarum (Prinsip Ketidakpastian) ini akan dilihat lebih dekat dan dievaluasi pada bab berikutnya.

Catatan:

Kehalusan matematika tertentu menghasilkan -pulsa yang secara teoritis diberi amplitudo yang cenderung tak terhingga. Secara fisik ini juga masuk akal. Sebuah pulsa jarum "sangat pendek" tidak dapat memiliki energi kecuali jika "sangat tinggi". Ini juga ditunjukkan oleh spektrum pulsa persegi panjang periodik yang sempit dan spektrum pulsa-. Amplitudo sinyal sinusoidal individu sangat kecil dan hampir tidak terlihat dalam Gambar, kecuali jika kita meningkatkan amplitudo pulsa (untuk melampaui layar PC).

Untuk keperluan Gambar, kita biasanya memilih pulsa-pulsa dengan magnitudo "1" dalam buku ini.



Gambar 38: Dari sinyal periodik dengan spektrum garis ke sinyal non-periodik dengan spektrum kontinu.

Di sebelah kiri dalam domain waktu Anda melihat urutan pulsa persegi panjang periodik dari atas ke bawah. Frekuensi pulsa dibagi dua dalam setiap kasus tetapi lebar pulsa tetap konstan. Dengan demikian jarak antara garis spektral menjadi lebih kecil dan lebih kecil ($T = 1/f$), tetapi posisi posisi nol tidak berubah sebagai akibat dari durasi pulsa yang konstan. Akhirnya, dalam urutan yang lebih rendah, pulsa persegi panjang satu kali digambarkan. Secara teoritis memiliki panjang periode T . Garis spektral terletak "dekat tak terhingga" satu sama lain, spektrumnya kontinu dan digambarkan sebagai fungsi kontinu. Kita sekarang telah beralih ke representasi biasa (dua dimensi) dari domain waktu dan frekuensi. Ini menghasilkan gambar yang jauh lebih akurat dibandingkan dengan "taman bermain" untuk sinyal sinusoidal yang digunakan hingga sekarang.

Sinyal Non-Periodik Dan Sekali Pakai

Pada kenyataannya, osilasi periodik tidak dapat direpresentasikan dalam domain waktu di layar. Untuk benar-benar yakin akan periodisitasnya, perilakunya di masa lalu, masa kini, dan masa depan harus diamati. Sinyal periodik (ideal) berulang, berulang dan akan berulang dengan cara yang sama. Dalam domain waktu hanya satu atau beberapa periode yang ditampilkan di layar.

Ini adalah masalah yang sangat berbeda dalam domain frekuensi. Jika spektrum terdiri dari garis-garis pada interval spasi teratur, ini segera menandakan osilasi periodik. Untuk menggarisbawahi hal ini sekali lagi – saat ini hanya ada satu sinyal (periodik) yang spektrumnya mengandung tepat satu garis – sinyal sinusoidal.

Sekarang kita akan melihat sinyal non-periodik yang lebih menarik dari sudut pandang teknologi komunikasi. Sebagai pengingat: semua osilasi (sinyal) pembawa informasi mungkin memiliki nilai informasi yang lebih besar jika arah masa depan mereka semakin tidak pasti (lihat Gambar 23).

Dalam hal sinyal periodik, arah masa depan mereka sangat jelas.

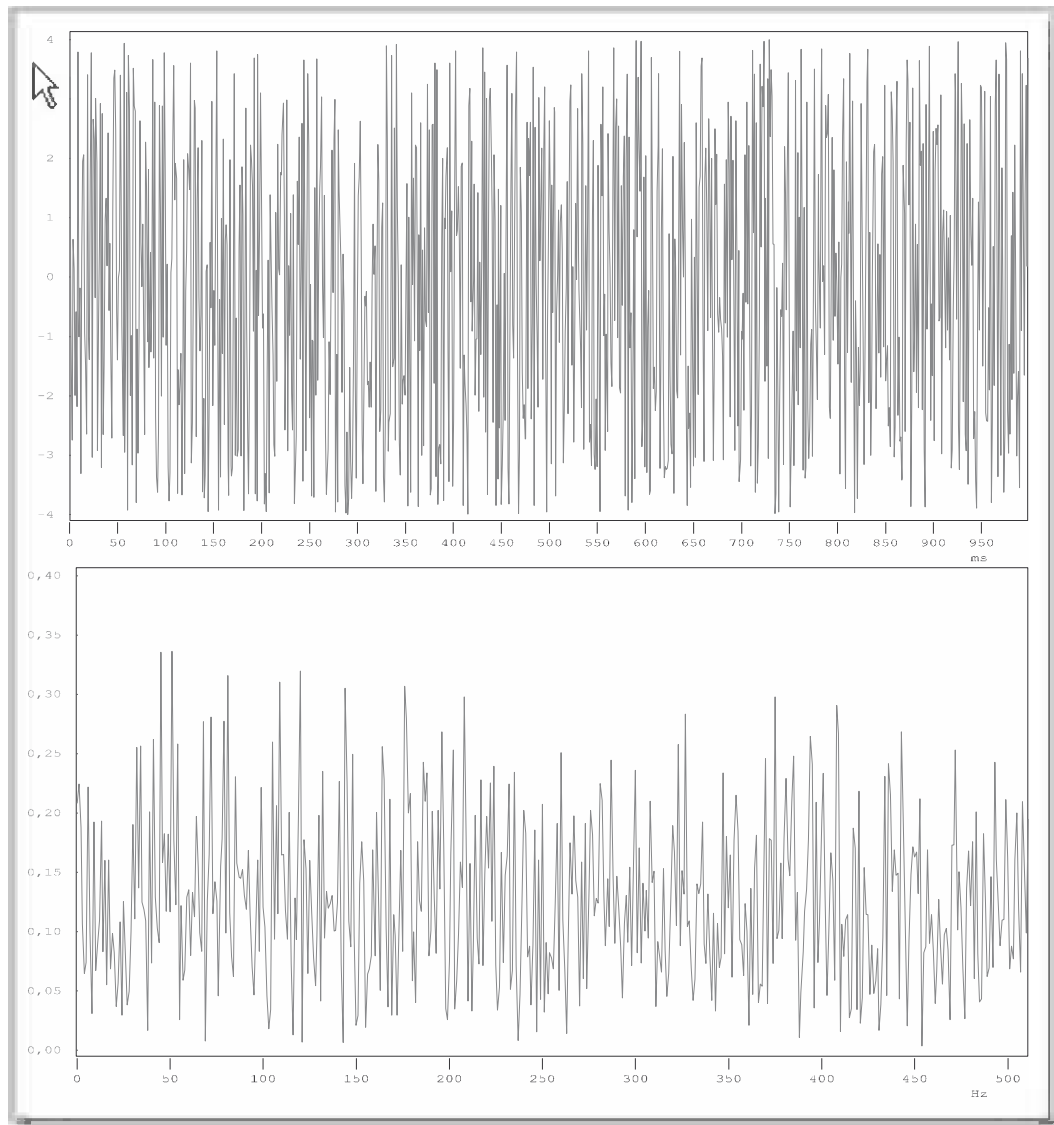
Untuk memahami spektrum sinyal non-periodik, kami menggunakan dalih mental kecil. Non-periodik berarti bahwa sinyal tidak berulang "di masa mendatang". Dalam Gambar 36 kita terus-menerus meningkatkan panjang periode T dari sebuah pulsa persegi panjang tanpa mengubah durasi pulsanya sampai akhirnya cenderung "menuju tak terhingga". Ini bermuara pada ide yang masuk akal untuk tidak menghubungkan panjang periode ("T cenderung menuju tak terhingga") untuk semua sinyal non-periodik atau satu kali.

Namun jika panjang periode menjadi lebih besar dan lebih besar jarak ($f = 1/T$ antara garis-garis dalam spektrum menjadi lebih kecil dan lebih kecil sampai mereka "sekering". Amplitudo ("titik akhir garis") tidak lagi membentuk urutan diskrit dari garis pada interval reguler tetapi sekarang membentuk fungsi kontinu (lihat Gambar 38).

Osilasi/sinyal periodik memiliki spektrum garis diskrit sedangkan osilasi/sinyal non-periodik memiliki spektrum kontinu.

Pandangan sekilas pada spektrum sudah cukup untuk melihat jenis osilasi apa yang ada – periodik atau non-periodik. Seperti yang sering terjadi, garis pemisah antara periodik dan non-periodik tidak sepenuhnya tanpa masalah. Itu ditempati oleh kelas sinyal penting yang disebut hampir-periodik. Ini termasuk bahasa dan musik, misalnya.

Sinyal satu kali adalah, seperti kata kata, non-periodik. Namun, sinyal non-periodik yang hanya berubah dalam periode waktu yang dipertimbangkan, misalnya ledakan atau penghentian glottal, juga disebut non-periodik.



Gambar 39: Kebisingan stokastik

Gambar atas menunjukkan derau stokastik dalam domain waktu (untuk 1s) dan di bawah ini spektrum amplitudo dari derau di atas. Karena domain waktu berkembang secara acak, keteraturan spektrum frekuensi dalam periode waktu yang dipertimbangkan tidak diharapkan (jika tidak, sinyal tidak akan menjadi stokastik). Terlepas dari banyak "garis tidak beraturan" itu bukan spektrum garis yang khas karena jika tidak, domain waktu harus periodik!

Keacakan Murni: Kebisingan Stokastik

Kebisingan adalah contoh khas dan sangat penting dari osilasi non-periodik. Ini memiliki penyebab yang sangat menarik, yaitu urutan cepat dari peristiwa individu yang tidak dapat diprediksi.

Dalam deru air terjun, miliaran tetesan menghantam permukaan air dalam urutan yang benar-benar tidak beraturan. Setiap tetesan berbunyi "ping" tetapi efek keseluruhannya adalah kebisingan. Tepuk tangan dari audiens yang besar mungkin juga

terdengar seperti kebisingan, kecuali mereka bertepuk tangan secara berirama untuk menuntut encore (yang hanya mewakili urutan, keteraturan, atau periodisitas tertentu!) Arus listrik dalam keadaan padat menyiratkan pergerakan elektron dalam kisi kristal logam. Pergerakan elektron individu dari atom ke atom tetangga berlangsung cukup acak.

Meskipun pergerakan elektron terutama menunjuk ke arah arus fisik, proses ini memiliki komponen stokastik - murni acak, tidak dapat diprediksi. Itu membuat dirinya terdengar melalui kebisingan. Oleh karena itu tidak ada arus searah murni DC; selalu disertai dengan kebisingan. Setiap komponen elektronik menghasilkan noise, yaitu hambatan atau kawat. Kebisingan meningkat dengan suhu.

Kebisingan Dan Informasi

Kebisingan stokastik berarti sesuatu seperti kekacauan mutlak. Ini tidak mengandung "pola yang telah diatur sebelumnya dan bermakna" - yaitu tidak ada informasi.

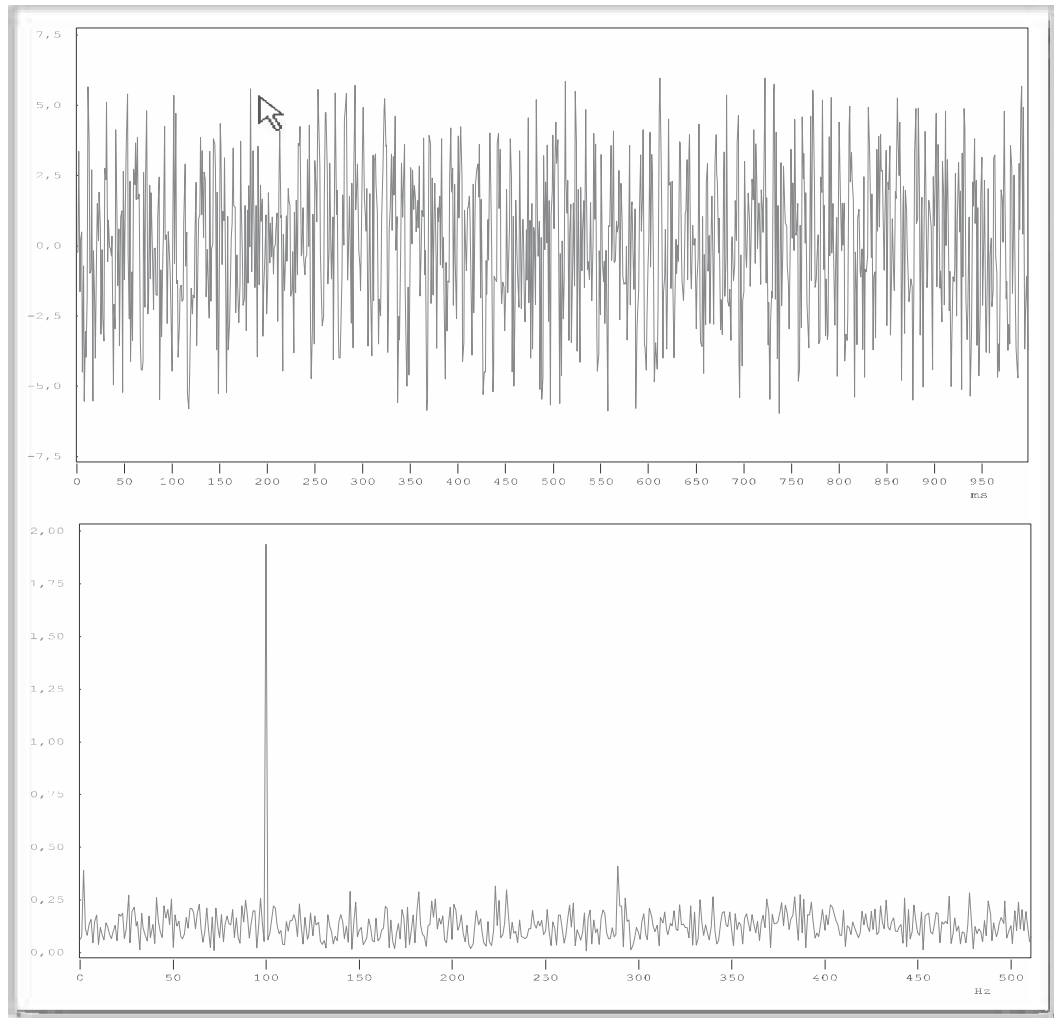
Kebisingan stokastik tampaknya tidak memiliki "kecenderungan konservasi", yaitu tidak ada dalam segmen waktu tertentu B yang mengingatkan salah satu segmen waktu sebelumnya A. Dalam kasus sinyal, nilai berikutnya dapat diprediksi setidaknya dengan tingkat probabilitas tertentu. . Jika misalnya Anda memikirkan teks seperti ini, di mana huruf berikutnya akan menjadi "e" dengan tingkat probabilitas tertentu.

Oleh karena itu, kebisingan stokastik bukanlah "sinyal" dalam arti yang sebenarnya, karena tampaknya tidak mengandung pola bantalan informasi - yaitu tidak ada informasi.

Segala sesuatu tentang kebisingan stokastik dalam segmen waktu tertentu adalah acak dan tidak dapat diprediksi, yaitu perkembangannya dalam waktu dan spektrumnya. Kebisingan stokastik adalah sinyal yang "paling tidak periodik" dari semua sinyal! Semua sinyal untuk alasan yang dijelaskan selalu (kadang-kadang lebih atau kurang atau terlalu banyak) disertai dengan kebisingan. Tetapi sinyal yang disertai dengan banyak noise berbeda dari noise stokastik murni karena mereka menampilkan kecenderungan konservasi tertentu. Ini dicirikan oleh pola yang berisi informasi.

Kebisingan adalah musuh terbesar teknologi komunikasi karena secara harfiah "mengubur" informasi dari sebuah sinyal.

Oleh karena itu, salah satu masalah terpenting dari teknologi komunikasi adalah membebaskan sinyal sejauh mungkin dari kebisingan yang menyertainya atau untuk melindungi atau memodulasi dan mengkodekan sinyal dari awal sedemikian rupa sehingga informasi dapat diambil kembali tanpa kesalahan meskipun ada noise. di penerima.



Gambar 40: Melestarikan kecenderungan sinyal yang bising

Kedua Gambar – domain waktu di atas, spektrum amplitudo di bawah – menggambarkan sinyal derau, yang bukan derau stokastik murni, yang menampilkan kecenderungan konservasi (dipengaruhi oleh sinyal).

Hal ini ditunjukkan oleh spektrum amplitudo di bawah ini. Garis yang menonjol dari spektrum kontinu tidak beraturan pada 100 Hz dapat dilihat dengan jelas. Penyebabnya hanya bisa berupa sinyal sinusoidal (berkala) 100 Hz yang tersembunyi di dalam noise.

Ini membentuk fitur yang melestarikan kecenderungan meskipun hanya terlihat samar-samar dalam domain waktu. Itu bisa "dipancing" dari kebisingan melalui filter bandpass berkualitas tinggi.

Ini sebenarnya adalah tema sentral dari "teori informasi". Karena ia menampilkan dirinya sebagai teori yang dirumuskan dalam istilah matematika murni, kita tidak akan membahasnya secara sistematis dalam buku ini.

Di sisi lain, informasi adalah istilah inti dari teknologi informasi dan komunikasi. Karena alasan inilah temuan-temuan penting dari teori informasi muncul di banyak tempat dalam buku ini.

Dalam buku ini, dasar pemrosesan sinyal adalah fisik (lihat Bab 1: "Dalam teknologi tidak ada pekerjaan yang bertentangan dengan hukum alam"). Tetapi fisika masih belum

cukup berhasil mengintegrasikan konsep informasi ke dalam prinsip-prinsip dasar alam. Tidak ada "Prinsip Informasi" dalam fisika. Berikut ini berlaku:

Sinyal secara teratur merupakan sinyal non-periodik. Semakin sedikit perkembangan masa depan mereka yang dapat diprediksi, semakin besar nilai informasi mereka. Setiap sinyal memiliki "kecenderungan konservasi" yang ditentukan oleh pola pembawa informasi.

Kebisingan stokastik sebaliknya benar-benar acak, tidak memiliki "kecenderungan melestarikan" dan karena itu bukan sinyal dalam arti sebenarnya. Kursus masa depan tidak dapat diprediksi.

Namun, ini tampaknya merupakan kontradiksi dengan pernyataan di atas!?

Sinyal yang tampak bising, meskipun polanya hampir tidak dapat diprediksi, oleh karena itu dapat berisi banyak informasi, meskipun tren konservasi sangat sulit dideteksi. Dari sudut pandang teoretis, kebisingan murni adalah nilai batas di mana kecenderungan konservasi tidak lagi dapat dikenali.

Catatan: Pembahasan kandungan informasi noise sangat sulit dilakukan dan bahkan pembahasan ilmiah merambah ke ranah filosofis. Pada tingkat saat ini, pertanyaan-pertanyaan berikut mungkin muncul:

- Jika tren konservasi merupakan karakteristik dari informasi yang ada, bagaimana kita bisa memutuskan apakah bagian sinyal menunjukkan tren konservasi atau tidak? Jelas, istilah ini sudah mencakup tingkat "ketidaktajaman" karena tidak didefinisikan secara tepat secara matematis. Dan bagaimana kita dapat membandingkan kecenderungan konservasi dalam domain waktu dan frekuensi?
- Setiap informasi dapat direpresentasikan sebagai pola bit. Berapa panjang atau pendeknya, untuk membedakan antara kecenderungan konservasi dan keacakan murni?
- Dan selanjutnya: kriptografi adalah ilmu menyembunyikan kecenderungan pelestarian informasi yang dapat dikenali, yaitu berpura-pura bahwa ada sesuatu yang benar-benar acak! Apakah ada informasi tambahan?
- Apa itu filter kebisingan? Bagaimana apa yang disaring secara acak? Dalam hal ini, apakah filter kebisingan bukan "filter tren konservasi"? Apakah ini juga terjadi pada kompresi data, atau apakah redundansi hanya dikurangi?

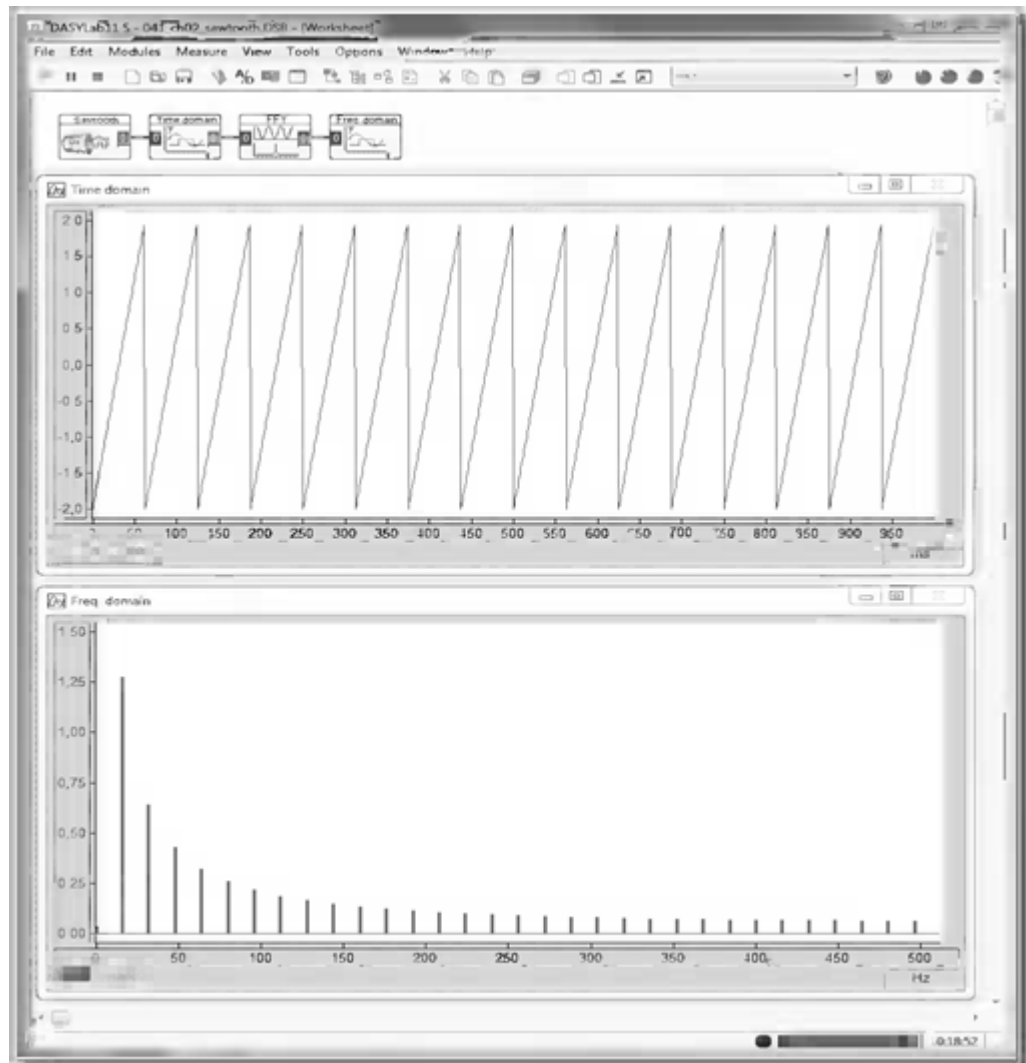
Diskusi tentang masalah ini akan muncul dalam buku ini di berbagai titik berulang-ulang tanpa mencapai kejelasan yang pasti. Lihat juga teks di sebelah gambar SHANON di awal buku.

Kebisingan stokastik tidak boleh dianggap jahat. Karena memiliki sifat ekstrim dan mewujudkan keacakan murni, ini sangat menarik. Seperti yang akan kita lihat, ini sangat penting sebagai sinyal uji untuk sistem (linier).

Catatan: Noise yang dihasilkan komputer secara signifikan berbeda dari noise alami yang ideal. Antara lain, waktu setiap acara disinkronkan dengan jam PC!

Latihan untuk Bab 2:

Latihan 1:



G

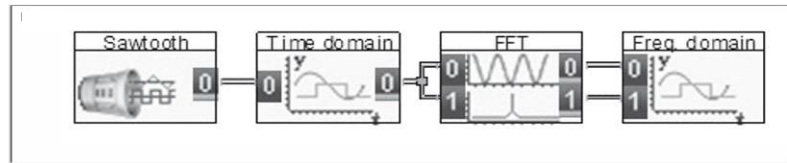
ambar 41: Gigi gergaji dalam domain waktu dan frekuensi

Di sini Anda melihat seluruh jendela DASYLab ditampilkan. Sejauh ini sirkuit yang paling penting untuk analisis dan representasi sinyal dalam domain waktu dan frekuensi dapat ditemukan di bagian atas gambar.

- Buat sirkuit ini dan visualisasikan – seperti di atas – gigi gergaji periodik tanpa offset tegangan langsung dalam domain waktu dan frekuensi.
- Ukur spektrum amplitudo dengan menggunakan kursor. Menurut aturan sederhana apa amplitudo berkurang?
- Ukur jarak antara "garis" dalam spektrum amplitudo dengan cara yang sama. Dengan cara apa hal ini bergantung pada panjang periode gigi gergaji?
- Perluas sirkuit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 22 dan tampilkan spektrum amplitudo dari sinyal periodik yang berbeda satu di bawah yang lain pada "layar".

Latihan 2:

- Buat sistem menggunakan DASYLab yang menghasilkan sintesis FOURIER dari gigi gergaji seperti pada Gambar 25
- Buat sistem menggunakan DASYLab yang memberikan jumlah n sinyal sinusoidal pertama ($n = 1, 2, 3, \dots, 9$) seperti pada Gambar 27



Gambar 42: Diagram blok: Amplitudo dan spektrum fasa

Latihan 3:

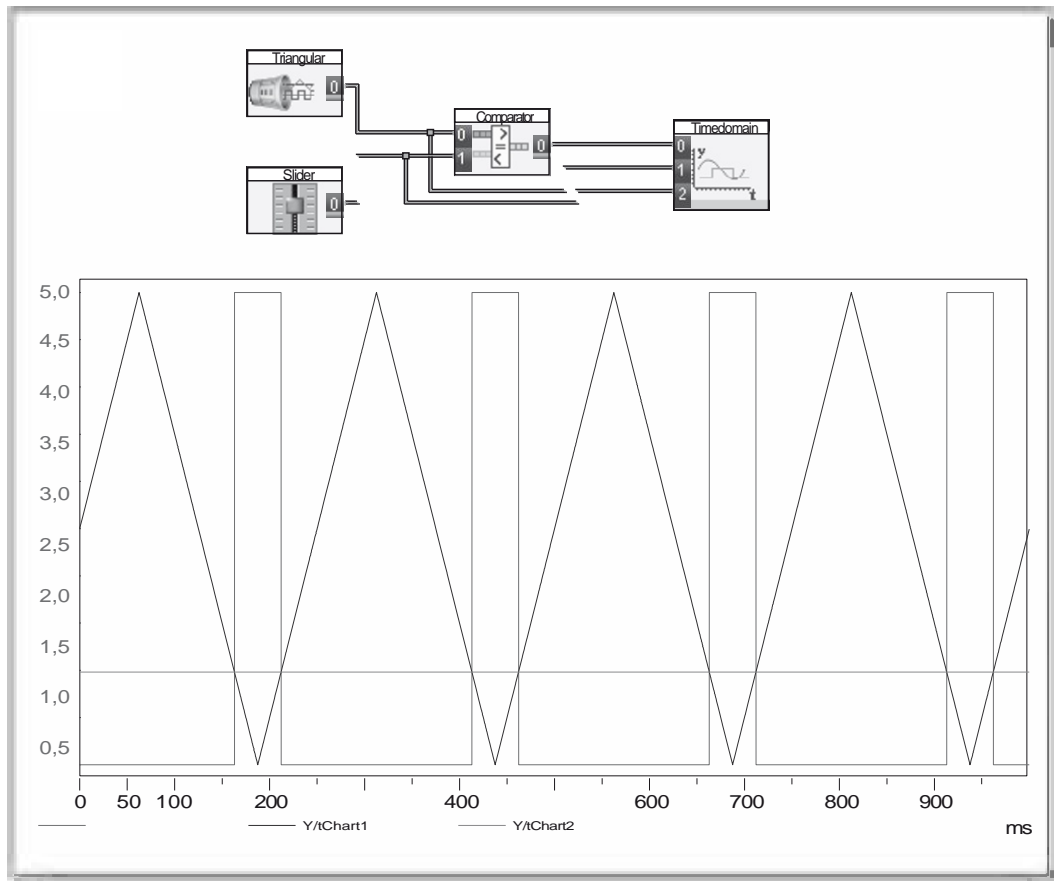
- Cobalah untuk mewakili spektrum amplitudo dan spektrum fase gigi gergaji yang satu langsung di bawah yang lain seperti pada Latihan 1. Pilih spektrum amplitudo pada saluran 0 dalam menu modul "domain frekuensi" dan "spektrum fase" pada saluran 1. Pilih "pengaturan standar" (laju pengambilan sampel dan panjang blok = 1024 = 210 pada tombol A/D pada bilah kontrol atas) dan frekuensi rendah ($f = 1; 2; 4; 8$ Hz. Apa yang Anda temukan jika Anda memilih frekuensi yang nilainya tidak dapat diberikan sebagai kekuatan dua?
- Pilih modifikasi fasa yang berbeda (1800), /2 (900), /3 (600) dan /4 (450) untuk gigi gergaji dalam menu modul generator dan amati perubahan fasa spektrum dalam setiap kasus.
- Apakah spektrum fase dari Latihan 2 sesuai dengan representasi 3D pada Gambar 28 dst.? Catat penyimpangan dan coba cari penjelasan untuk kemungkinan perhitungan spektrum fase yang salah.
- Bereksperimenlah dengan berbagai pengaturan untuk laju sampel dan panjang blok (tombol A/D pada bilah kontrol atas, tetapi pilih kedua nilai dalam ukuran yang sama, misalnya 32, 256, 1024!)

Latihan 4:

Kebisingan merupakan sinyal stokastik murni dan oleh karena itu "benar-benar non-periodik".

- Periksa amplitudo dan spektrum fasa kebisingan. Apakah spektrumnya kontinu? Apakah amplitudo dan spektrum fase menunjukkan perilaku stokastik?
- Periksa amplitudo dan spektrum fase derau lowpass filter (misalnya frekuensi cutoff 50 Hz, filter BUTTERWORTH urutan ke-6). Apakah keduanya menunjukkan perilaku stokastik? Apakah noise yang difilter juga "benar-benar non-periodik"?

Latihan 5:



Gambar 43: Generator gelombang persegi dengan faktor tugas pulsa variabel

- Rancanglah generator sinyal gelombang persegi yang dengannya faktor tugas pulsa dan frekuensi sinyal persegi periodik dapat diatur sesuai keinginan. Jika perlu gunakan Gambar terlampir untuk membantu Anda.
- Interkoneksi (seperti di atas) generator sinyal gelombang persegi Anda dengan rangkaian standar kami untuk analisis dan visualisasi sinyal dalam domain waktu dan frekuensi.
- Periksa spektrum amplitudo dengan menjaga frekuensi sinyal gelombang persegi konstan dan membuat durasi pulsa semakin kecil. Amati khususnya perkembangan "posisi nol" dari spektrum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 33 dst.
- Dalam spektrum amplitudo biasanya puncak-puncak kecil tambahan muncul di antara garis-garis spektral yang diharapkan. Eksperimen tentang cara-cara untuk menghindari hal ini secara optik, misalnya dengan pemilihan kecepatan pemindaian dan panjang blok yang sesuai (pengaturan A/D di bilah kontrol atas) dan frekuensi sinyal serta panjang pulsa. Anda akan menemukan penyebabnya di Bab 10 (Digitalisasi).
- Coba kembangkan rangkaian seperti yang digunakan untuk representasi sinyal pada Gambar 38 – transisi dari spektrum garis ke spektrum kontinu. Hanya frekuensi, bukan panjang pulsa yang harus variabel.

Latihan 6:

- (a) Bagaimana seseorang dapat membuktikan dengan menggunakan DASYLab bahwa hampir semua frekuensi – yaitu osilasi sinusoidal – terdapat dalam sinyal noise. Cobalah bereksperimen.
- (b) Bagaimana mungkin untuk memastikan apakah sinyal (berkala) terkandung dalam sinyal yang sangat bising?

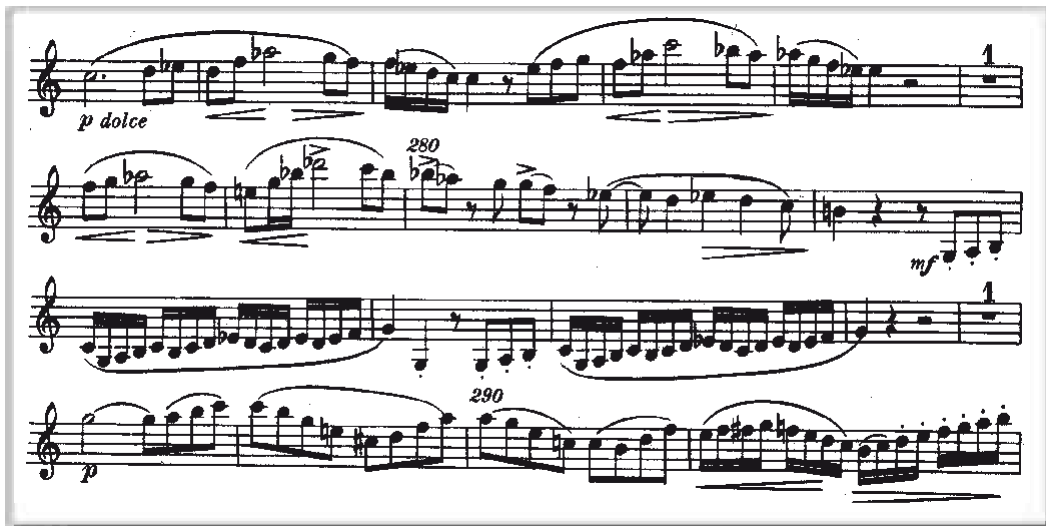
BAB 3

PRINSIP KETIDAKPASTIAN

Catatan musik ada hubungannya dengan presentasi simultan dari domain waktu dan frekuensi seperti yang dapat ditemukan dalam tiga dimensi Gambar 28 dst (Bab 2) dari sinyal periodik. Ketinggian nada pada garis skor memberikan nada nada; yang dalam analisis akhir frekuensi. Bentuk catatan memberikan durasi mereka dalam waktu. Catatan ditulis oleh komposer seolah-olah nada dan panjangnya dapat ditentukan secara independen satu sama lain. Komposer berpengalaman, bagaimanapun, telah lama menyadari fakta bahwa, misalnya, nada rendah organ atau tuba harus bertahan selama waktu tertentu agar dapat dirasakan nyaring. Oleh karena itu, urutan nada rendah seperti itu hanya dapat dimainkan dengan kecepatan yang dikurangi.

Hubungan Aneh Antara Frekuensi Dan Waktu Dan Konsekuensi Praktisnya.

Ini adalah salah satu wawasan terpenting dari osilasi, gelombang, dan fisika kuantum modern bahwa besaran tertentu – seperti frekuensi dan waktu – tidak dapat diukur secara independen satu sama lain. Kuantitas seperti itu disebut komplementer.



Gambar 44: Representasi simultan dari domain waktu dan frekuensi dalam skor musik.

Norbert Wiener, matematikawan terkenal di dunia dan pendiri cybernetics, menulis dalam otobiografinya (Econ-Verlag – penerbit): "Sekarang mari kita lihat apa yang sebenarnya ditunjukkan oleh skor musik. Posisi vertikal sebuah not dalam sistem garis memberikan nada atau frekuensi nada, sedangkan posisi horizontal mengalokasikan nada ke waktu. "Dengan demikian notasi musik pada pandangan pertama muncul sebagai sistem yang sinyalnya dapat dijelaskan dalam dua cara independen, yaitu menurut frekuensi dan durasi".

Namun, " hal-hal yang tidak begitu mudah. Jumlah osilasi per detik yang terdiri dari sebuah catatan adalah sepotong informasi yang mengacu tidak hanya pada frekuensi tetapi juga pada sesuatu yang didistribusikan dalam waktu" "Awal dan akhir sebuah catatan melibatkan perubahan dalam kombinasi frekuensinya, yang mungkin sangat kecil tapi sangat nyata. Sebuah not yang hanya berlangsung untuk jangka waktu terbatas harus dilihat sebagai pita gerak harmonik sederhana yang tidak ada satupun yang dapat dianggap sebagai satu-satunya yang ada dalam gerak harmonik sederhana. Ketepatan dalam waktu menyiratkan ketidaktentuan tertentu dalam nada, sama seperti ketepatan nada melibatkan ketidakjelasan dalam waktu".

Anehnya, aspek yang sangat penting untuk sinyal ini sering diabaikan. Ini adalah batas mutlak alam yang tidak dapat diatasi bahkan dengan peralatan teknis yang paling canggih sekalipun. Frekuensi dan waktu tidak dapat diukur secara akurat pada saat yang bersamaan bahkan dengan metode yang paling canggih sekalipun.

Prinsip Ketidakpastian UP mengikuti dari Prinsip FOURIER FP. Ini mewakili kolom kedua dari platform kami "Sinyal - Pemrosesan - Sistem". Karakteristiknya dapat digambarkan dengan kata-kata.

Semakin lama durasi dalam waktu t dari suatu sinyal dibatasi, semakin lebar pita frekuensinya f secara otomatis. Semakin dibatasi pita frekuensi f dari suatu sinyal (atau suatu sistem), semakin besar durasi dalam waktu t dari sinyal tersebut secara otomatis.

Siapa pun yang mengingat fakta ini akan dengan cepat memahami banyak masalah teknologi sinyal yang rumit. Kami akan kembali ke ini terus-menerus.

Pertama, bagaimanapun, UP harus dibuktikan secara eksperimental dan dinilai implikasinya. Hal ini dilakukan melalui eksperimen yang didokumentasikan dalam Gambar 45 dan Gambar 46. Pertama, gelombang sinus (berkala), misalnya, 200 Hz dibuat terdengar melalui kartu suara atau amplifier dan penguat suara. Seperti yang diharapkan, hanya ada satu nada yang terdengar dan spektrum hanya menunjukkan satu baris. Tetapi ini juga tidak ideal dan menunjukkan sedikit ketidakpastian spektral dalam kasus ini, misalnya, hanya 1 detik yang diukur dan tidak "panjang tak terhingga".

Sekarang, selangkah demi selangkah, kami membatasi panjang "sinyal sinusoidal", yang sebenarnya tidak lagi ideal.

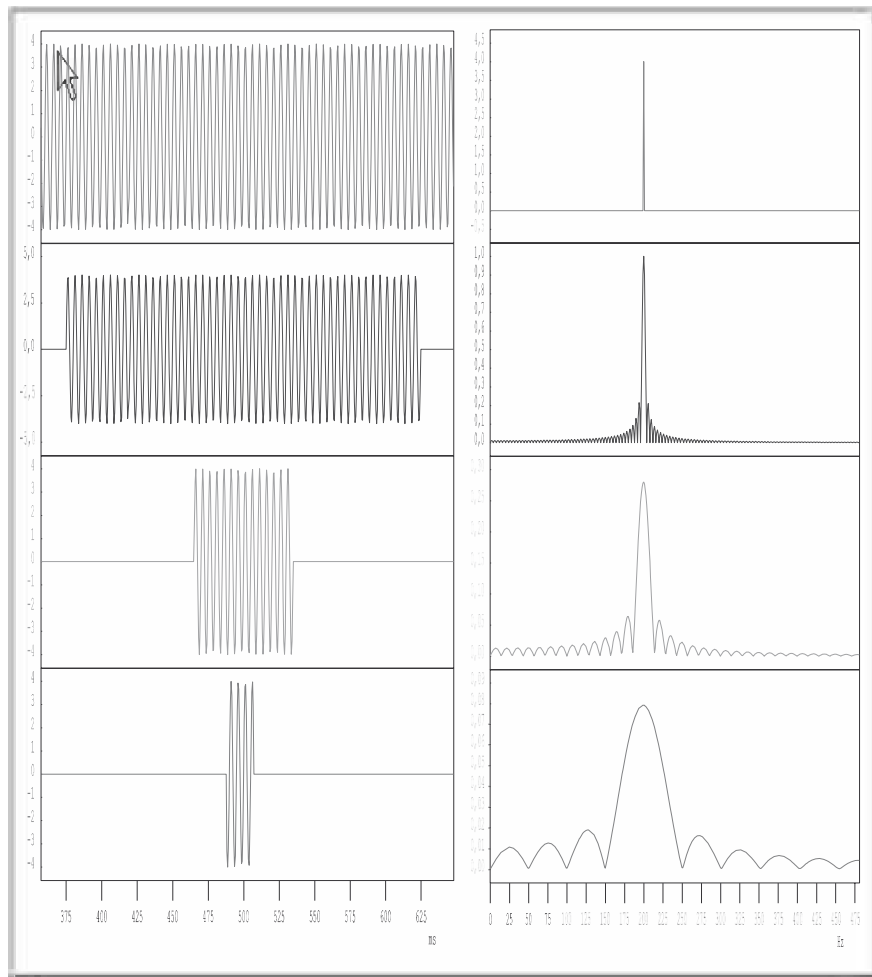
Sinyal yang ditampilkan dapat dihasilkan melalui modul "Potong" dan dapat didengar melalui kartu suara. Semakin banyak bagian waktu yang diperkecil, semakin sulit untuk mendengar nada aslinya.

Definisi:

Pulsa osilasi yang terdiri dari sejumlah periode sinus tertentu disebut sinyal burst. Oleh karena itu, ledakan adalah bagian dari sinyal sinusoidal (berkala).

Dalam kasus sinyal burst yang lebih panjang, banyak nada lain yang dapat terdengar di samping "nada sinusoidal murni". Semakin pendek ledakan semakin nada menjadi kresak. Jika ledakan akhirnya terdiri dari sangat sedikit (misalnya dua) periode sinus (Gambar 45, bawah) nada sinusoidal asli hampir tidak dapat didengar untuk bunyi berderak.

Spektrum di sebelah kanan menunjukkan detail yang lebih spesifik. Semakin pendek durasi waktu dari burst, semakin besar bandwidth dari spektrum. Namun kita harus terlebih dahulu menyepakati apa yang dimaksud dengan bandwidth.



Gambar 45: Pembatasan waktu melibatkan perluasan pita frekuensi

Sebagai berikut dari urutan gambar dari atas ke bawah, tidak mungkin untuk berbicara tentang "sinyal sinusoidal terbatas waktu" dengan satu frekuensi. Pulsa osilasi semacam ini yang disebut "burst" memiliki pita frekuensi yang semakin lebar seiring dengan semakin pendeknya panjang burst. Frekuensi sinyal sinusoidal pada gambar atas adalah 40 Hz, segmen waktu sinyal sinusoidal pada urutan atas yang ditetapkan dengan pengukuran adalah 1 detik (hanya terlihat dalam ekstrak di sini). Untuk alasan ini spektrum di urutan atas tidak terdiri dari garis yang jelas.

Anehnya, dengan bertambahnya lebar pita, spektrum tampaknya menjadi semakin tidak simetris (lihat bagian bawah). Selain itu, titik maksimum semakin banyak bergerak ke kiri. Kami akan membahas alasannya nanti. Kesimpulan: ada banyak alasan untuk berbicara tentang ketidakpastian.

Dalam kasus ini "bandwidth total" tampaknya cenderung menuju tak terhingga karena – pada pemeriksaan lebih dekat – spektrum melampaui domain frekuensi yang terlihat. Namun, amplitudo cenderung sangat cepat menuju nol sehingga bagian pita

frekuensi ini dapat diabaikan. Jika kita mengambil "bandwidth" berarti frekuensi penting, dalam kasus ini setengah lebar rata-rata maksimum utama dapat ditunjuk "bandwidth". Tampaknya mengikuti bahwa jika panjang waktu t dibelah dua, bandwidth f menjadi dua kali lipat. t dan f saling berbanding terbalik. Jadi berikut ini:

$$\Delta t = K \cdot 1/\Delta f \quad \text{or} \quad \Delta f \cdot \Delta t = K$$

Konstanta K dapat ditentukan dari Gambar, meskipun sumbu tidak diskalakan. Asumsikan bahwa gelombang sinus murni memiliki frekuensi 200 Hz. Anda sekarang dapat menghasilkan penskalaan jika Anda ingat bahwa panjang periode adalah $T = 5$ ms di mana $f = 200$ Hz. N periode panjang kemudian mewakili panjang ledakan $t = N \cdot T$ dll. Dalam perkiraan ini kira-kira nilai $K = 1$ hasil. Jadi $f \cdot t = 1$ berikut. Tetapi karena bandwidth f adalah masalah definisi (biasanya tidak sepenuhnya sesuai dengan kita), maka persamaan dirumuskan yang memungkinkan perkiraan. Dan hanya itu yang ingin kami capai.

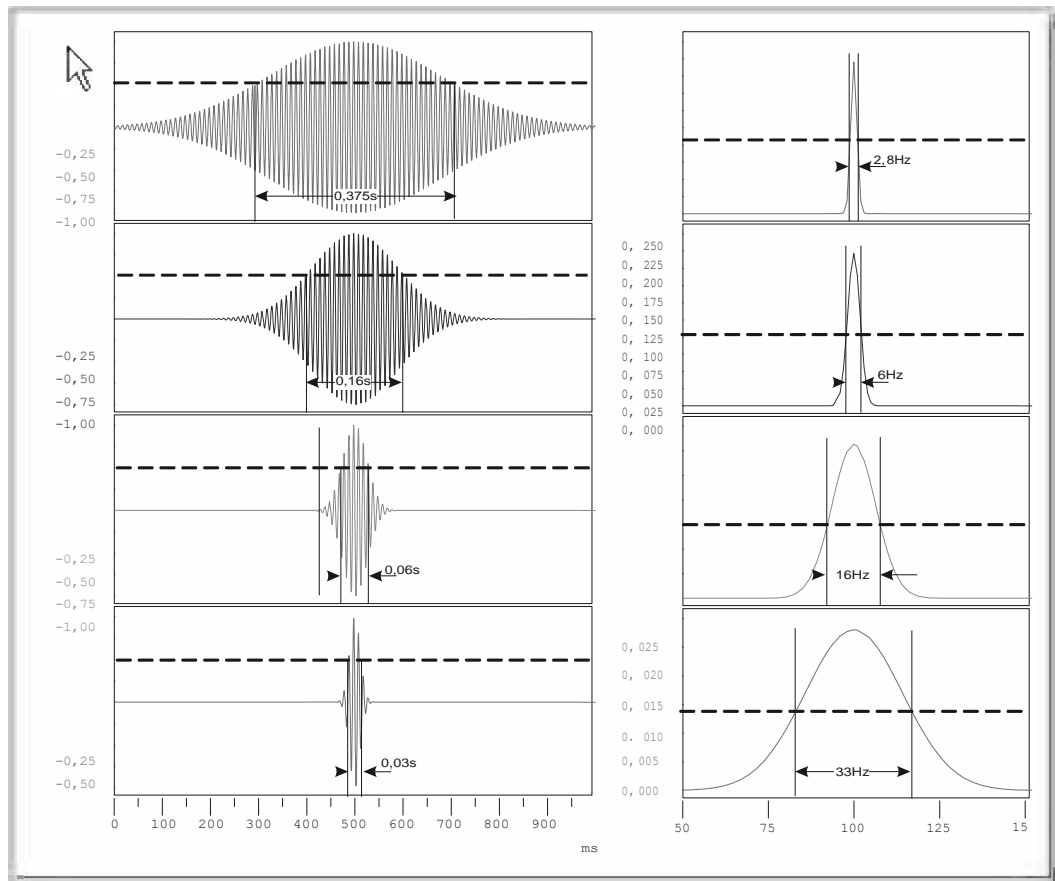
Prinsip Ketidakpastian UP untuk waktu dan frekuensi

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1$$

Pengamat yang waspada akan memperhatikan bahwa spektrum frekuensi maksimum bergerak semakin banyak ke kiri – yaitu, menuju frekuensi yang lebih rendah – semakin pendek panjang ledakan. Untuk alasan ini akan menjadi salah interpretasi untuk mengasumsikan bahwa "frekuensi yang benar" dari ledakan adalah di mana maksimumnya. Ini dikesampingkan oleh UP dan spektrum menunjukkan bahwa tidak mungkin untuk berbicara tentang satu frekuensi dalam kasus ini. Akan dijelaskan di Bab 5 dari mana perpindahan atau asimetri ini berasal.

Catatan: Jangan mencoba mengecoh UP dengan mencoba menafsirkan lebih dari izin UP. Anda tidak akan pernah dapat memberikan informasi yang lebih tepat tentang frekuensi daripada yang diberikan oleh UP $t \cdot f \geq 1$ karena ia mewujudkan batas alami yang mutlak.

Gambar 46 menunjukkan betapa cocoknya memilih pertidaksamaan untuk UP. Pulsa osilasi sinus dipilih yang dimulai dan diakhiri dengan lembut. Kemudian spektrum juga dimulai dan diakhiri dengan cara yang sama. Berapa panjang waktu t dan berapa lebar pita f dari spektrum? Adalah mungkin untuk mendefinisikan secara seragam luas penting dari panjang waktu t dan lebar pita f untuk memulai dan mengakhiri di mana setengah dari nilai maksimum tercapai. Dalam hal ini hasil evaluasi – yang harus Anda ikuti langkah demi langkah – dalam hubungan $f \cdot t = 1$



Gambar 46: Bandwidth f , panjang waktu t dan kasus pembatas UP

Di sini apa yang disebut pulsa osilasi GAUSSI semakin terbatas waktunya. Fungsi GAUSSian sebagai mengungkapkan "sinyal sinusoidal dibatasi dalam waktu" menjamin bahwa pulsa osilasi dimulai dengan lembut dan berakhir dengan lembut tanpa perubahan mendadak. Sebagai hasil dari opsi ini, spektrum yang dipilih juga berkembang menurut fungsi GAUSS; itu juga dimulai dan diakhiri dengan lembut.

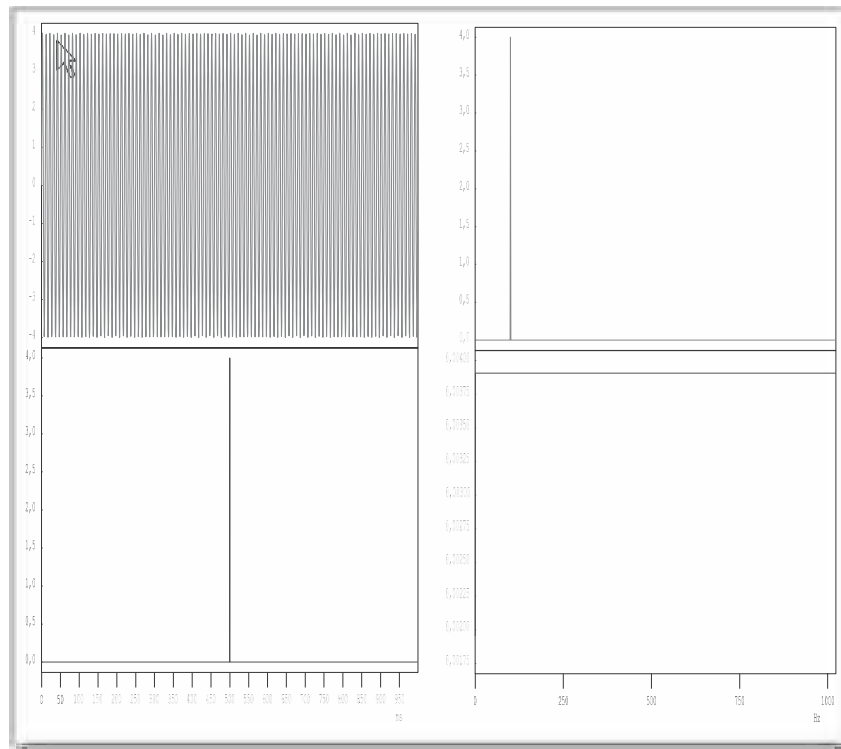
Durasi waktu t dan bandwidth f sekarang harus didefinisikan sebagai pulsa GAUSS juga secara teoritis "panjang tak terhingga". Jika durasi waktu t dan bandwidth f berhubungan dengan dua nilai ambang di mana nilai fungsional maksimum (selubung) telah turun menjadi 50%, produk dari $f \cdot t$ kira-kira 1, yaitu kasus pembatas fisis $f \cdot t = 1$.

Periksa pernyataan ini menggunakan penggaris dan perhitungan menggunakan aturan tiga untuk empat kasus di atas: mis. 100 Hz pada sumbu frekuensi adalah x cm, lebar pita f yang dimasukkan – ditandai dengan panah – adalah y cm. Kemudian pengukuran dan perhitungan yang sama untuk durasi waktu yang sesuai t . Produk $f \cdot t$ seharusnya sekitar 1 dalam keempat kasus.

Sinyal Sinusoidal Dan -Pulsa Sebagai Kasus Pembatas Dari Prinsip Ketidakpastian

Dalam sinyal sinusoidal "ideal" t (misalnya satu miliar) berlaku untuk durasi waktu. Oleh karena itu untuk lebar pita f_0 (misalnya sepersejuta bagian) karena spektrum terdiri dari garis atau garis tipis atau fungsi. Sebaliknya, -pulsa memiliki durasi waktu 0. Berbeda dengan sinus, lebar pita f (dengan amplitudo konstan!) berlaku. Sinus dan fungsi
Sistem Pemrosesan Sinyal (Dr. Agus Wibowo)

memberikan nilai batas 0 dan dalam domain waktu dan frekuensi, terbalik dalam setiap kasus.



Gambar 47: -fungsi dalam domain waktu dan frekuensi

Sebuah pulsa di salah satu dari dua domain (t dan f) selalu menyiratkan perpanjangan tak terbatas dalam domain komplementer (f dan t).

Pada pemeriksaan lebih dekat tampak bahwa garis spektral sinus (kanan atas) bukanlah garis dalam arti sebenarnya (f dan t) tetapi dalam arti tertentu kabur yaitu tidak pasti. Sinus juga dievaluasi hanya dalam segmen yang digambarkan dari $t = 1$ s. Menurut Prinsip Ketidakpastian UP ini menghasilkan $f = 1$, yaitu stroke kabur dengan lebar pita minimal 1 Hz.

A (satu kali) -pulsa menghasilkan bandwidth "tak terbatas" dan f sebagai akibat dari $t = 0$. Ini berisi semua frekuensi dengan amplitudo yang sama; lihat juga Gambar 36. Hal ini membuat pulsa- menjadi sinyal uji yang ideal dari sudut pandang teoretis, karena – lihat Prinsip FOURIER – rangkaian/sistem diuji pada waktu yang sama dengan semua frekuensi (dengan amplitudo yang sama).

Mengapa Filter Ideal Tidak Bisa Ada

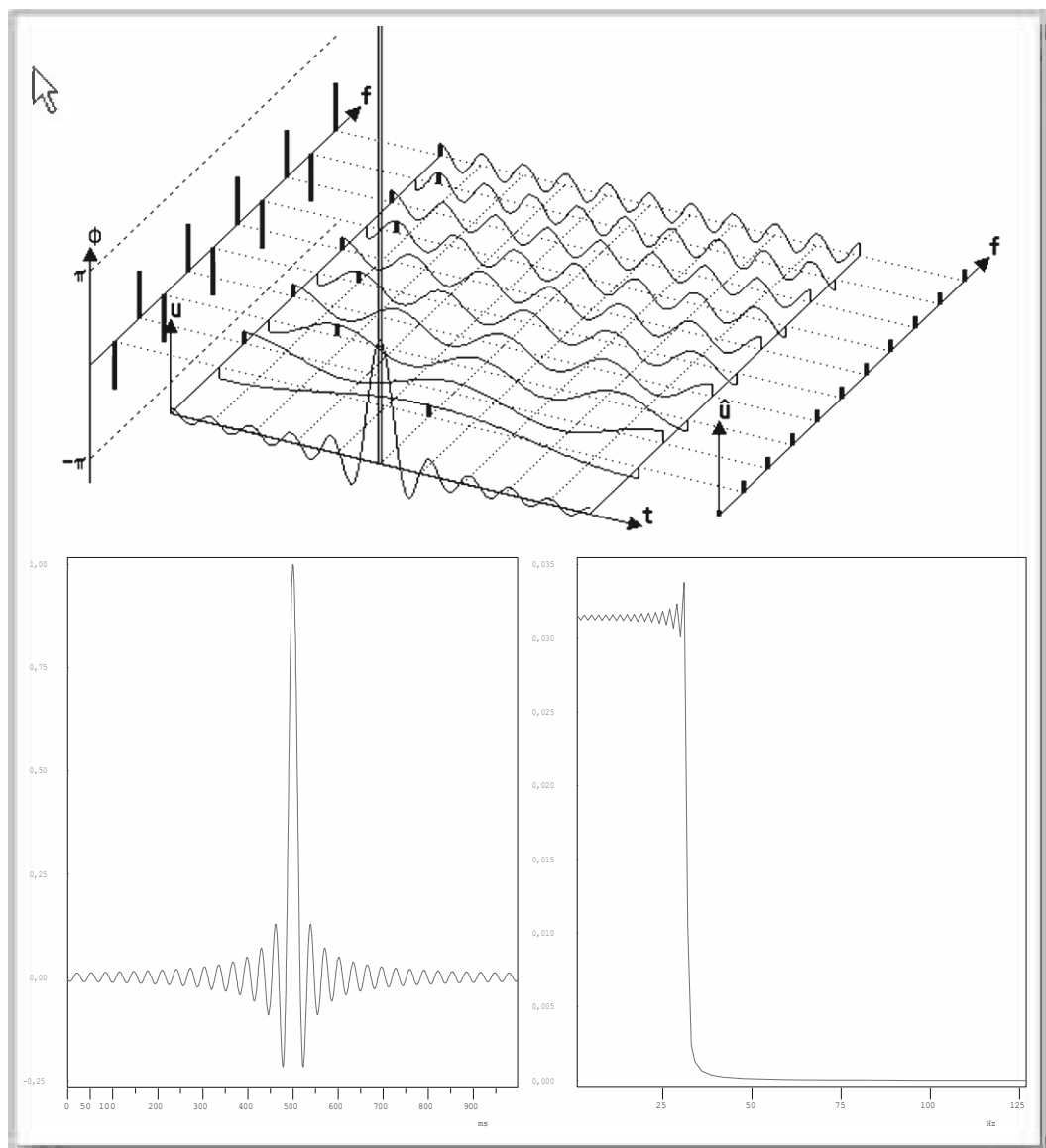
Filter adalah komponen teknologi sinyal yang memungkinkan frekuensi - yaitu sinyal sinusoidal tertentu dalam rentang frekuensi untuk melewati (melakukan wilayah negara) atau memblokirnya (memblokir wilayah negara). Jika hanya frekuensi rendah hingga frekuensi pembatas tertentu yang diizinkan lewat, ini disebut filter lowpass. Seperti yang ingin kami tunjukkan, transisi dari wilayah negara konduktor ke wilayah negara pemblokiran dan sebaliknya harus selalu terjadi dengan ketidakpastian tertentu.

FOURIER atas "lapangan bermain" menunjukkan -pulsa dalam domain waktu dan frekuensi. Jumlah dari 10 sinyal sinusoidal pertama juga dimasukkan dalam domain waktu.

Jika ada filter lowpass "persegi panjang" ideal yang membiarkan (dalam hal ini) sepuluh sinyal sinusoidal pertama dan kemudian memblokir semua sinyal sinusoidal berikutnya, kurva kumulatif ini harus muncul di pintu keluar jika pulsa telah terhubung ke pintu masuk.

Di tengah Gambar ada indikasi bahwa secara tegas kurva kumulatif ini menjangkau jauh ke "masa lalu" dan "masa depan". Ini pada gilirannya berarti bahwa sinyal awal harus dimulai sebelum kedatangan pulsa di pintu masuk filter. Ini bertentangan dengan prinsip kausalitas: pertama sebab kemudian akibat. Oleh karena itu, filter persegi panjang yang ideal tidak dapat ada.

Jika respons-pulsa ini, yang disebut fungsi Si, dibatasi pada segmen 1s yang diwakili di sini dan FFT dilakukan, ini menghasilkan karakteristik lowpass yang membulat atau bergelombang. Semua respons pulsa nyata dibatasi waktu; maka sebagai akibat dari UP tidak dapat ada filter yang ideal dengan wilayah konduktor "persegi panjang".

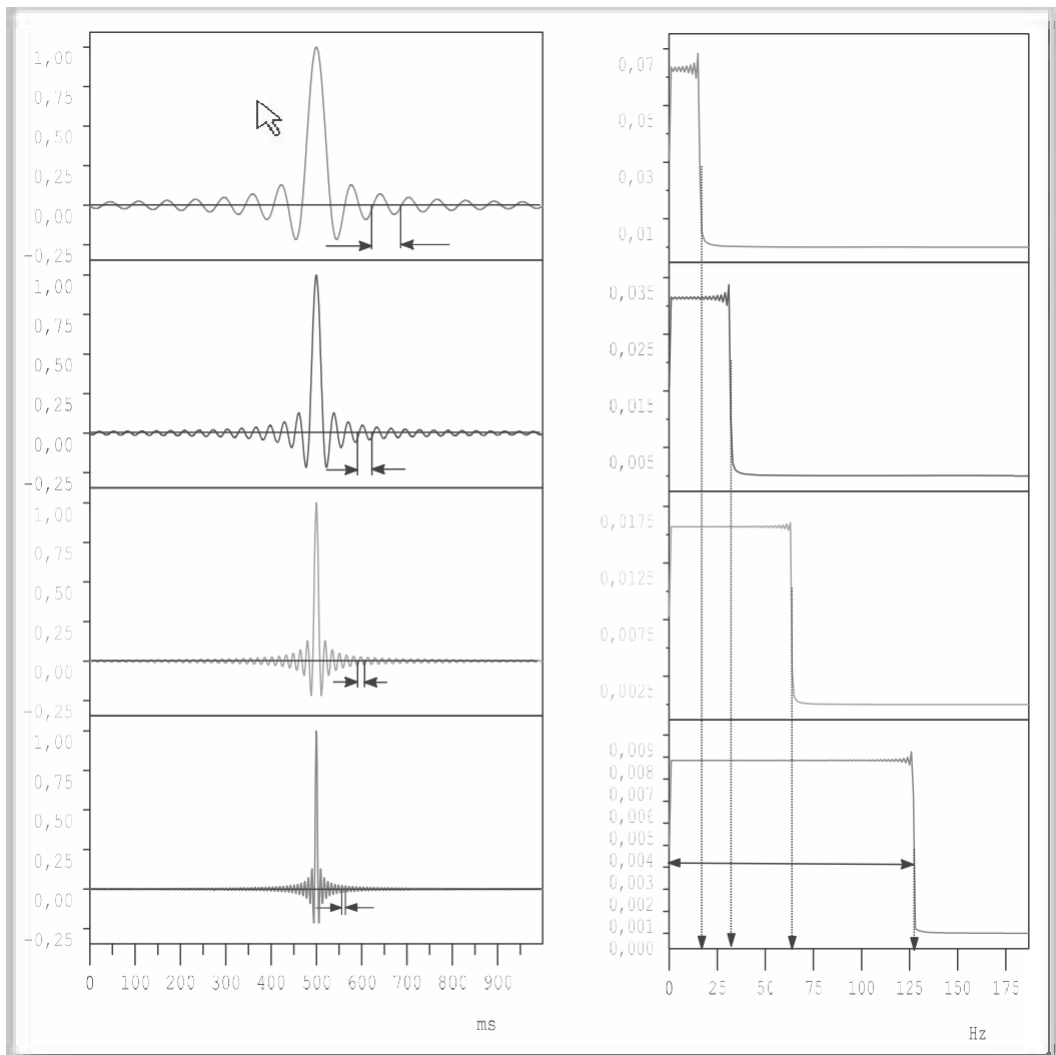


Gambar 48: Respons pulsa dari filter lowpass yang ideal

Catatan:

Filter juga dimungkinkan dalam domain waktu. Sebuah "gerbang" seperti yang digunakan dalam Gambar 45 untuk menghasilkan sinyal burst, juga bisa disebut "filter waktu". Gerbang yang menyaring medan sinyal tertentu dalam domain waktu umumnya disebut jendela. Filter lowpass yang ideal dengan frekuensi pembatas 1 kHz akan memungkinkan semua frekuensi dari 0 hingga 1000 Hz melewati tanpa dilemahkan tetapi akan memblokir frekuensi 1000.0013 sepenuhnya (memblokir wilayah negara bagian). Filter seperti itu tidak ada. Mengapa tidak? Anda mungkin bisa menebak jawabannya. Karena bertentangan dengan UP.

Perhatikan Gambar 48 dengan seksama sehubungan dengan penjelasan berikut. Dengan asumsi kami memberikan -pulsa sebagai sinyal uji ke filter lowpass yang ideal. Seperti apa sinyal awal, yang disebut respons pulsa (yang dimaksud adalah reaksi lowpass ke -pulsa)? Itu harus terlihat seperti kurva kumulatif dalam Gambar 48, karena sinyal ini membentuk jumlah dari 10 harmonik pertama, semua frekuensi lain di atas "frekuensi pembatas" diabaikan seperti dalam kasus filter lowpass.



Gambar 49: Respons pulsa (fungsi Si) dengan bandwidth lowpass yang berbeda

Sinyal ini direproduksi pada skala yang sama sekali berbeda di tengah Gambar 48. Ini adalah respons pulsa dari lowpass ideal ke pulsa satu kali. Pada awalnya simetrinya dapat dikenali dengan jelas. Sangat penting bahwa respons pulsa dari lowpass semacam ini (secara teoritis) sangat lebar; itu memanjang ke kanan dan kiri dari segmen yang digambarkan. Respons pulsa (secara teoritis) harus dimulai di masa lalu ketika pulsa belum diberikan ke pintu masuk. Filter semacam ini tidak kausal ("pertama sebab, lalu akibat"), bertentangan dengan hukum alam dan tidak dapat dibayangkan atau dihasilkan.

Jika kita membatasi respons waktu ini pada segmen yang digambarkan – ini dilakukan pada Gambar 48 – dan melihat frekuensi mana atau spektrum frekuensi mana yang diperlihatkannya, ini menghasilkan karakteristik lowpass "bergelombang" yang bulat dan bukan karakteristik persegi panjang yang ideal.

Oleh karena itu UP dapat didefinisikan lebih tepat. Seperti yang ditunjukkan oleh contoh di atas, ini bukan hanya masalah segmen waktu t dan pita frekuensi f , tetapi lebih tepatnya seberapa cepat sinyal dalam segmen waktu t berubah atau seberapa tiba-tiba spektrum frekuensi atau respon frekuensi (misalnya *lowpass*) berubah dalam pita frekuensi f .

Semakin curam kurva pada segmen waktu t dan dalam pita frekuensi f , semakin luas dan ditandai spektrum frekuensi f dan durasi waktu t . Transisi langkah waktu dan frekuensi selalu menghasilkan transien ekstensif dalam frekuensi komplementer atau domain waktu.

Seperti yang telah disarankan, filter lowpass memiliki (paling baik) progresi persegi panjang. Sampai sekarang kami telah berurusan terutama dengan progresi persegi panjang dalam domain waktu. Sekarang perhatikan lebih dekat fungsi S_i dalam domain waktu dan bandingkan dengan perkembangan spektrum frekuensi pulsa persegi panjang (lihat dalam hubungan ini Gambar 48 bawah).

Anda mungkin telah memperhatikan bahwa dengan fungsi- S_i waktu $T' = 1/f$ dimasukkan yang tampaknya menggambarkan sesuatu seperti panjang periode secara visual. Tetapi tidak mungkin ada panjang periode karena fungsi tersebut tidak diulang tepat setelah waktu T' . Namun, masing-masing fungsi S_i yang diwakili memiliki konten riak yang berbeda: itu tergantung pada lebar pita f dari lowpass. Konten riak ini setara dengan konten riak frekuensi tertinggi yang melewati lowpass. Respons pulsa tidak pernah dapat berubah lebih cepat dari frekuensi tertinggi yang terjadi dalam sinyal. Perkembangan fungsi S_i ditentukan secara tepat oleh frekuensi tertinggi ini.

Respons pulsa dari filter lowpass "persegi panjang" yang ideal (yang – seperti yang telah ditunjukkan secara fisik tidak mungkin) memiliki kepentingan khusus dan disebut fungsi- S_i . Ini seperti sinus yang "dikompresi atau dibundel dalam waktu". Untuk alasan ini tidak dapat hanya terdiri dari satu frekuensi karena UP.

Frekuensi sinus tak terlihat ini – jika didefinisikan secara tepat, ini adalah isi riak dari fungsi S_i – persis sama dengan frekuensi tertinggi yang terjadi dalam spektrum. Frekuensi tertinggi yang terjadi dalam spektrum ini menentukan seberapa cepat sinyal kumulatif dapat berubah. Lihat Gambar 49.

Pengukuran Frekuensi Dalam Kasus Sinyal Non-Periodik.

Sampai sekarang kami telah menghindari sinyal non-periodik dan sinyal dekat-atau kuasi-periodik. Namun, UP adalah alat yang tepat untuk mengatasi sinyal-sinyal ini. Sejauh ini kita tahu:

Sinyal periodik memiliki spektrum garis. Jarak antara garis selalu merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar $f = 1/T$.

Sinyal satu kali non-periodik memiliki spektrum kontinu, yaitu untuk setiap frekuensi ada frekuensi lain di lingkungan terdekat yang paling kecil.

Pertanyaannya sekarang tetap: Bagaimana frekuensi yang terkandung dalam sinyal non-periodik, dengan spektrum kontinunya, dapat diukur seakurat mungkin?

Sebagai hasil dari $t \cdot f \geq 1$ jawaban umumnya jelas: semakin lama kita mengukur, semakin akurat kita dapat menentukan frekuensinya.

Apa posisi dengan sinyal satu kali yaitu non-periodik yang hanya bertahan untuk waktu yang singkat? Dalam hal ini waktu pengukuran akan lebih besar dari panjang sinyal hanya untuk dapat menangkap lebih baik seluruh proses.

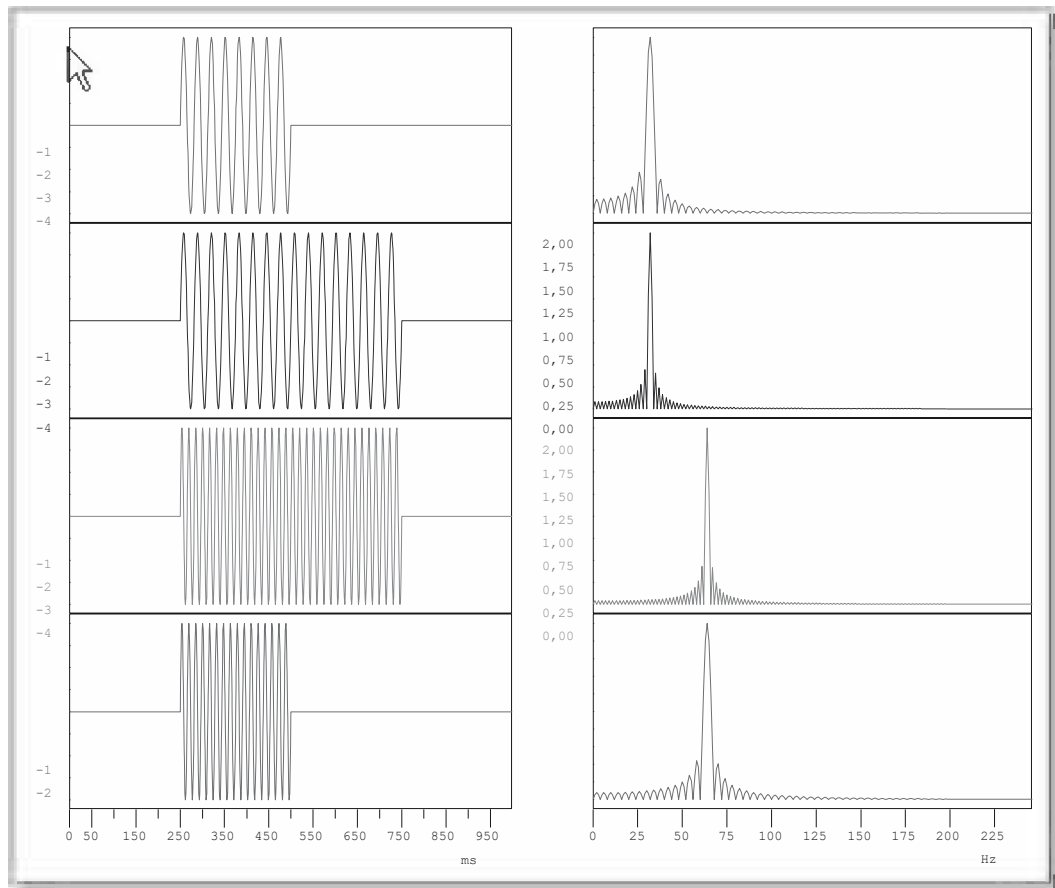
Apa yang menentukan keakuratan pengukuran dan resolusi frekuensi: panjang pengukuran atau panjang sinyal?

Eksperimen terkait didokumentasikan dalam Gambar 50. Jika Anda menginterpretasikan pengukuran skala untuk domain waktu dan frekuensi, Anda akan mendapatkan hasil berikut:

Jika dalam kasus sinyal satu kali, panjang pengukuran lebih besar dari durasi sinyal, durasi sinyal saja yang menentukan resolusi frekuensi.

Dalam kasus sinyal non-periodik yang bertahan lama – seperti bahasa atau musik – hanya mungkin untuk alasan teknis atau alasan lain untuk menganalisis segmen waktu. Tidak masuk akal jika seluruh spektrum dari keseluruhan konser ditampilkan. Analisis spektral harus berubah secepat suara karena inilah yang dilakukan telinga kita!

Dengan demikian, satu-satunya kemungkinan adalah menganalisis sinyal non-periodik yang tahan lama dalam segmen. Tapi bagaimana caranya? Bisakah kita memotong sinyal menjadi beberapa bagian yang sama seolah-olah kita menggunakan gunting. Atau apakah metode yang lebih cerdas diperlukan dalam kasus ini untuk menganalisis segmen demi segmen?



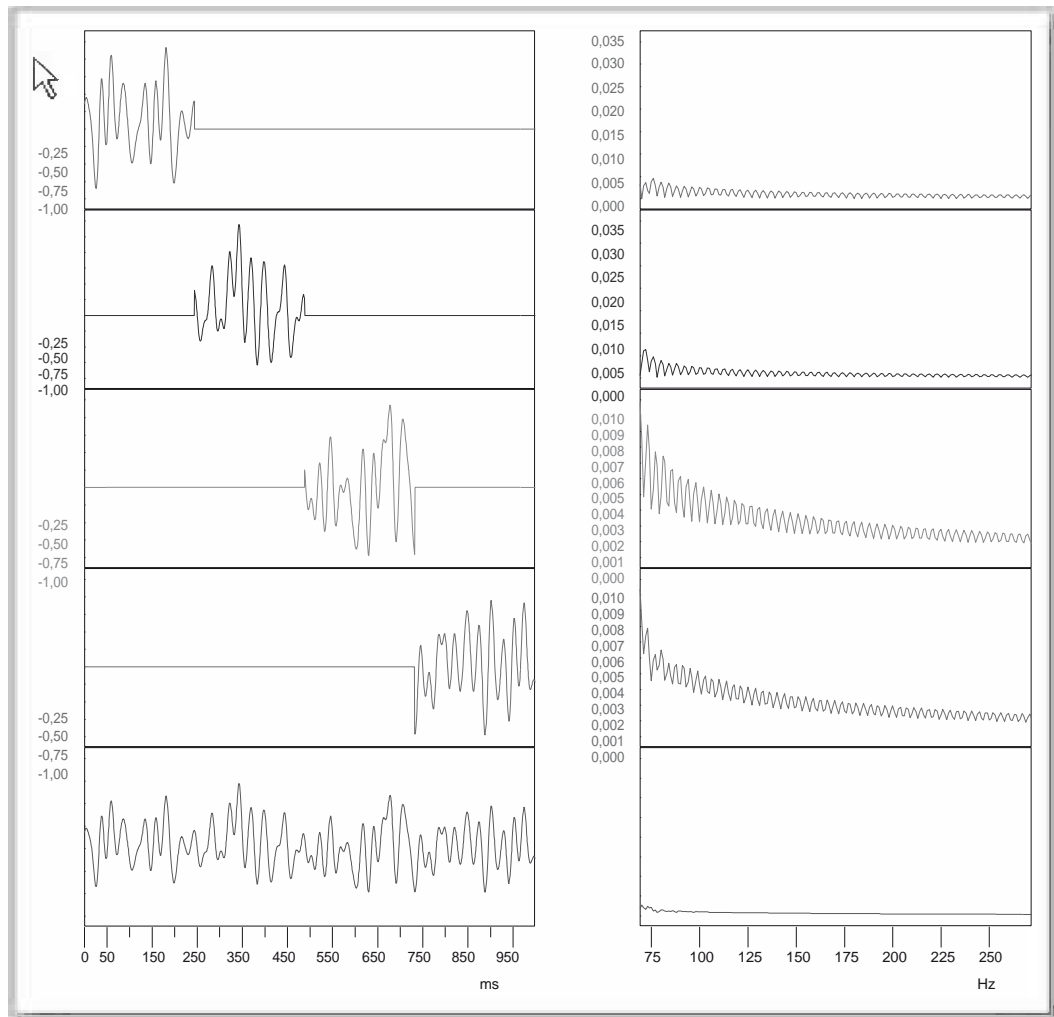
Gambar 50: Apakah resolusi frekuensi bergantung pada panjang pengukuran atau panjang sinyal?

Berikut adalah empat sinyal burst satu kali yang berbeda. Dua sinyal burst memiliki panjang yang sama, dua sinyal burst memiliki frekuensi medium yang sama. Panjang pengukuran dan dengan demikian panjang analisis dalam keempat kasus 1s. Hasilnya cukup jelas. Semakin pendek panjang sinyal semakin tidak pasti frekuensi menengah dari pulsa meledak! Ketidakpastian tidak tergantung pada periode pengukuran, itu hanya tergantung pada panjang sinyal. Hal ini diharapkan karena seluruh informasi hanya terkandung dalam sinyal, dan tidak dalam panjang pengukuran yang dapat divariasikan sesuka hati.

Mari kita lakukan eksperimen yang sesuai. Dalam Gambar 51 kami menggunakan sinyal bising yang difilter lowpass sebagai sinyal uji yang secara fisik menunjukkan kesamaan dengan produksi bicara di rongga tenggorokan. Aliran udara setara dengan kebisingan, rongga tenggorokan membentuk resonator/filter. Pada semua peristiwa itu tidak berkala dan berlangsung untuk waktu yang tidak terbatas. Dalam hal ini sebuah lowpass dengan kualitas superior (urutan ke-10) dipilih yang memfilter hampir semua frekuensi di atas 100 Hz.

Sinyal pertama dianalisis secara keseluruhan (seri paling bawah). Di atas ini empat segmen individu dianalisis. Hasilnya aneh. Keempat segmen berisi frekuensi yang lebih tinggi daripada sinyal keseluruhan yang difilter lowpass. Alasannya mudah dikenali. Segmen vertikal telah menciptakan transisi curam yang tidak ada hubungannya dengan sinyal asli.

Namun, menurut Prinsip Ketidakpastian, transisi yang curam menghasilkan pita frekuensi yang luas.



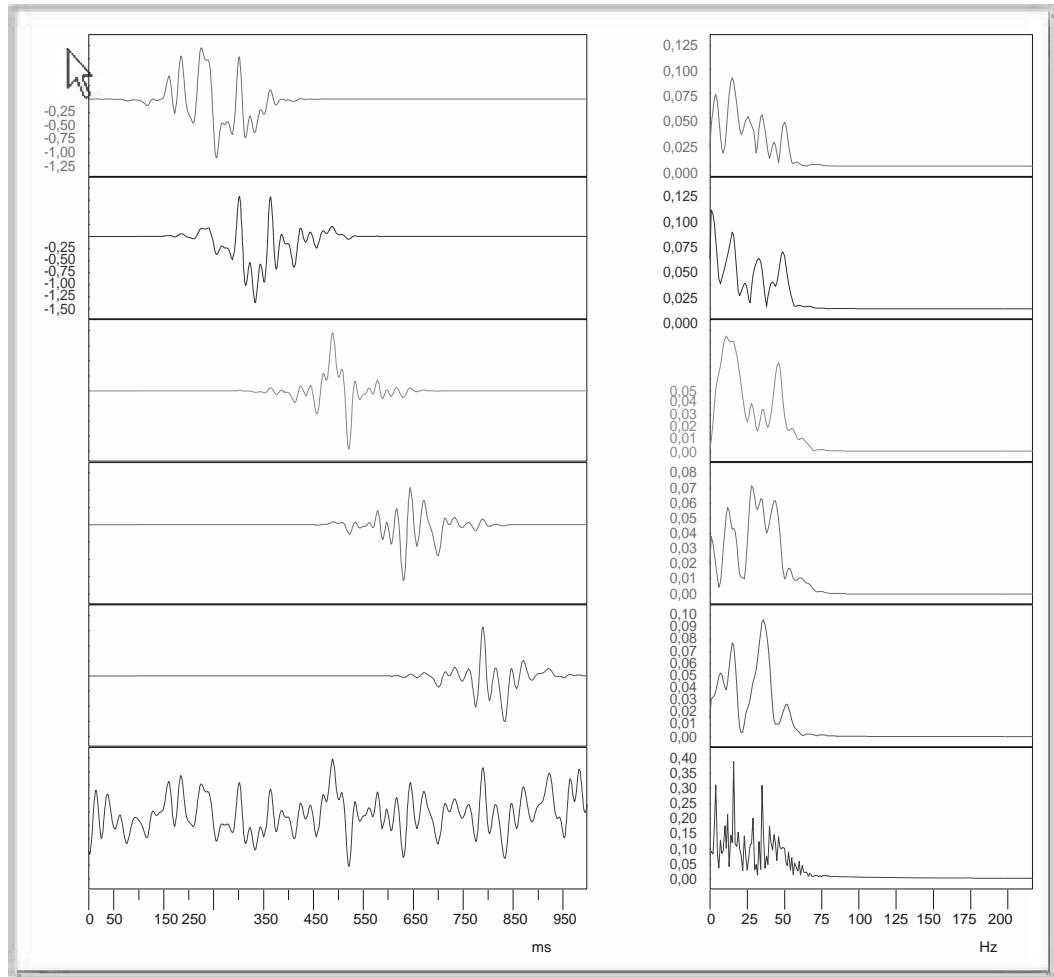
Gambar 51: Analisis sinyal non-periodik yang tahan lama

Non-periodisitas dicapai di sini dengan menggunakan sinyal yang bising. Sinyal bising ini sekarang difilter melalui lowpass berkualitas tinggi (dengan tepi curam) dengan frekuensi cut-off 50 Hz. Ini tidak berarti bahwa filter ini tidak membiarkan apa pun melalui di atas 50 Hz. Frekuensi ini teredam ke tingkat yang lebih besar atau lebih kecil tergantung pada kualitas filter.

Di sini kita melihat "wilayah negara pemblokiran" di atas 50 Hz, mulai dari 70 Hz. Empat segmen sinyal atas mengandung lebih banyak atau lebih tepatnya pembagian frekuensi "lebih kuat" di area ini daripada sinyal keseluruhan (bawah). Dengan demikian, segmen parsial "memotong" menghasilkan frekuensi yang tidak terkandung dalam sinyal asli! Dan – semakin pendek segmen waktu, semakin tidak pasti pita frekuensinya. Ini dapat dilihat dengan jelas dengan membandingkan spektrum segmen sinyal terakhir kecuali satu – yang bertahan lebih lama – dengan empat segmen sinyal atas. Kebetulan, di sini juga sinyal keseluruhan dianalisis melalui panjang sinyal (= panjang pengukuran) 1s.

Selain itu "tautan" antara segmen individu dari sinyal yang telah dipisahkan secara sewenang-wenang hilang. Ini mungkin berarti bahwa informasi telah dipotong. Informasi

terdiri dari pola-pola tertentu yang "disepakati" – lihat Bab I – dan oleh karena itu berlangsung dalam waktu tertentu. Untuk menangkap informasi ini secara keseluruhan, segmen sinyal sebagai tindakan pencegahan harus tumpang tindih.



Gambar 52: Analisis sinyal non-periodik yang tahan lama melalui jendela GAUSSI

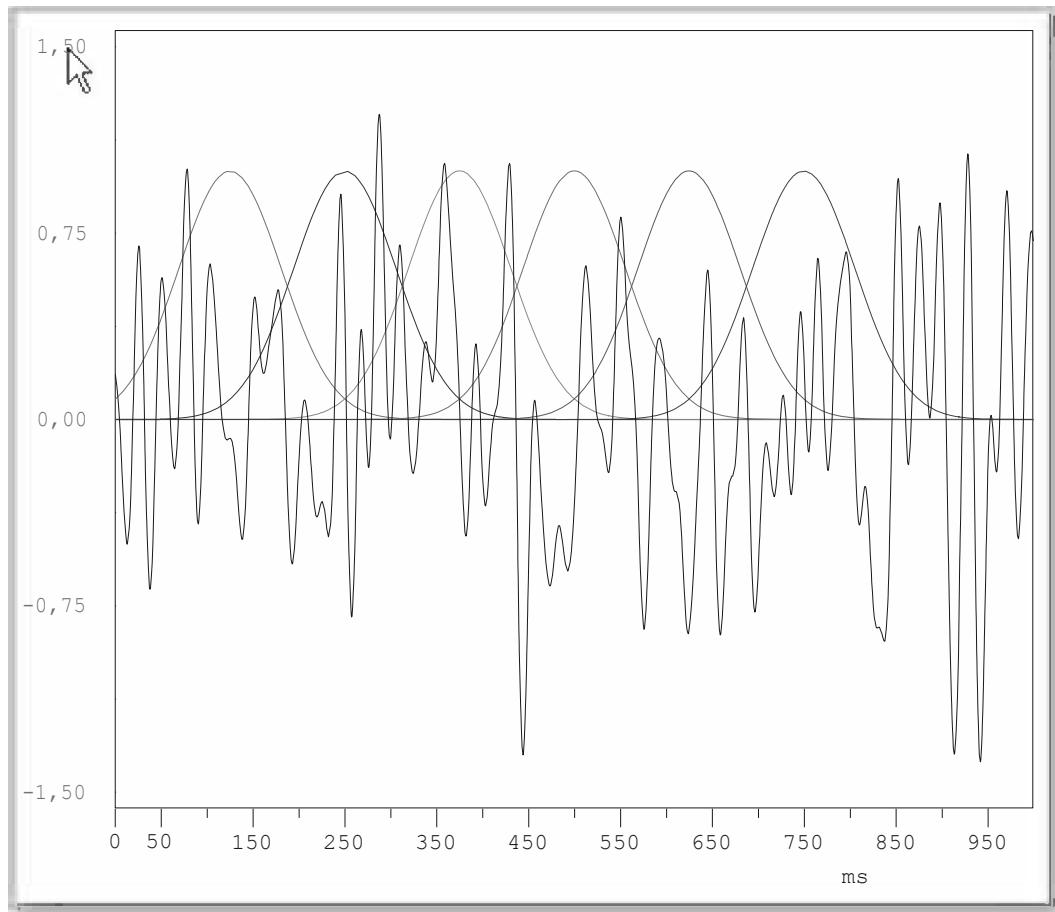
Seperti pada Gambar 51, sinyal non-periodik panjang di sini juga dibagi menjadi segmen waktu individu. Apa yang disebut windowing ini dilakukan dengan menggunakan jendela GAUSSian waktu terhuyung-huyung. Segmen parsial dimulai dan diakhiri dengan lembut. Berbeda dengan Gambar 51, domain frekuensi segmen waktu tidak lebih besar dari domain frekuensi sinyal secara keseluruhan.

Proses teknologi sinyal penting ini disebut "windowing". Ini dimaksudkan untuk membedakan "pemotongan" dari "penyaringan" dalam domain frekuensi.

Dari Gambar 46 Anda sudah mengetahui trik bagaimana membuat segmen sinyal dimulai dan diakhiri dengan lembut menggunakan fungsi GAUSS. Dengan "pembobotan waktu" ini, area pusat segmen sinyal dianalisis secara tepat dan area perifer dianalisis secara kurang tepat atau tidak sama sekali.

Gambar 52 menunjukkan seperti apa solusi ini yang dalam arti relatif terlihat paling baik. Segmen dimulai dan diakhiri dengan lembut, sehingga menghindari transisi yang curam. Selain itu, segmen tumpang tindih dalam domain waktu. Ini mengurangi bahaya

kehilangan informasi. Di sisi lain, sinyalnya sangat "terdistorsi" sehingga hanya bagian tengah yang ditampilkan sepenuhnya dan diberi bobot yang kuat.



Gambar 53: Membuat jendela GAUSS dari Gambar 52 terlihat

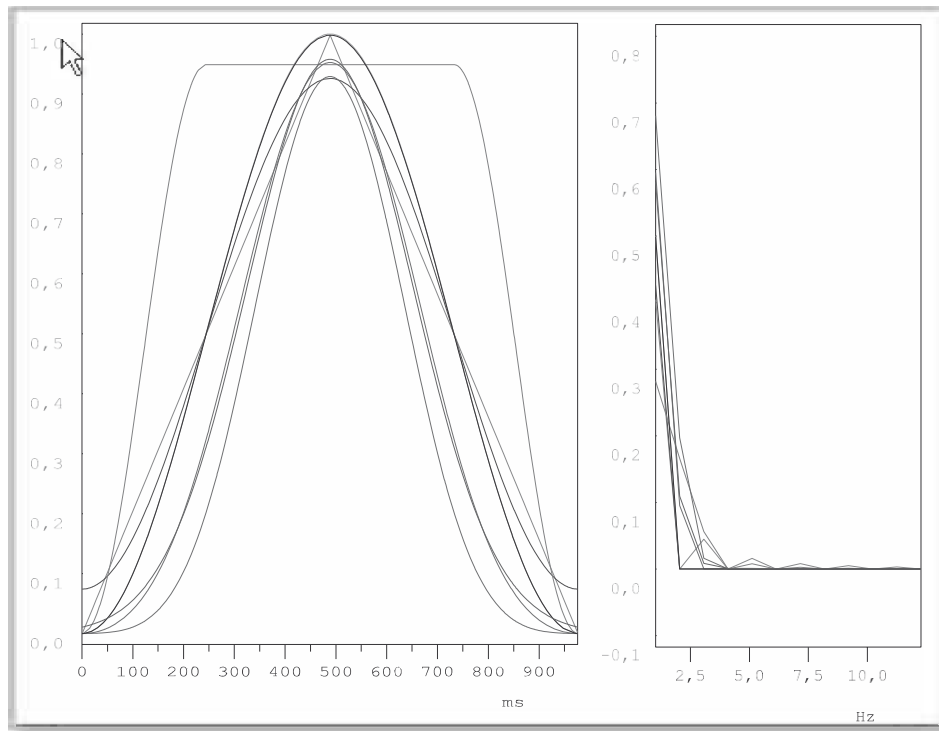
Gambar ini dengan tepat menunjukkan 5 jendela GAUSS yang digunakan dalam Gambar 52 untuk membagi sinyal menjadi segmen-segmen yang berarti. Semua jendela GAUSS memiliki bentuk yang sama; jendela berturut-turut dipindahkan ke kanan dengan nilai konstan 75ms. Memotong segmen parsial secara matematis setara dengan perkalian sinyal dengan setiap fungsi jendela. Sinyal keseluruhan yang digambarkan di sini tidak identik dengan Gambar 52.

Sebagai akibat dari Prinsip Ketidakpastian, tidak ada solusi ideal, hanya kompromi yang masuk akal. Anda tidak boleh berasumsi bahwa ini hanya masalah teknis. Masalah yang sama terjadi, tentu saja, dalam produksi dan persepsi bicara manusia. Kami hanya terbiasa berurusan dengan mereka! Bagaimanapun, Prinsip Ketidakpastian adalah hukum alam!

Telinga dan otak kita menganalisis secara real time. Apakah sinyal yang tahan lama – misalnya, sepotong musik – dianalisis secara konstan dan simultan – dengan "windowing" dalam domain waktu?

Tidak, telinga kita adalah penganalisis FOURIER, berfungsi dalam domain frekuensi. Ia bekerja seperti sejumlah besar filter pita yang sangat sempit yang terletak berdampingan satu sama lain dari segi frekuensi. Akibat dari Uncertainty Principle UP waktu reaksi (build-up

time) semakin besar semakin sempit pita filter. Rincian lebih lanjut akan diberikan dalam bab berikutnya.



Gambar 54: Tinjauan tentang "jenis jendela" yang paling penting

Di sini Anda melihat contoh paling penting dari jenis jendela. Dengan pengecualian tipe segitiga dan "jendela persegi panjang bulat" mereka semua terlihat sangat mirip dan spektrumnya hampir tidak berbeda. Dengan durasi sekitar 1 detik mereka menghasilkan ketidakpastian frekuensi hanya sekitar 1 Hz. "Kurva bergelombang" dalam domain frekuensi berasal dari jendela terburuk – segitiga dan "persegi panjang bulat".

"Windowing" selalu melibatkan kompromi. Karena ini adalah proses yang sangat penting, banyak pemikiran telah diberikan pada bentuk ideal dari jendela waktu. Pada prinsipnya mereka semua melakukan hal yang sama dan dengan sedikit pengecualian menyerupai fungsi GAUSS. Mereka mulai dengan lembut dan berakhir dengan lembut. Jenis jendela yang paling penting disajikan dalam Gambar 54 dan efek berbasis frekuensinya dibandingkan satu sama lain. Yang terburuk adalah jendela segitiga, tentu saja, karena menampilkan fluktuasi di awal, di tengah dan di akhir. Jendela lainnya hampir tidak berbeda satu sama lain sehingga kita akan terus menggunakan jendela GAUSSI.

Dalam analisis berbasis frekuensi dari sinyal non-periodik yang tahan lama – mis. pidato - ini dibagi menjadi beberapa segmen. Analisis berbasis frekuensi kemudian dilakukan untuk setiap segmen individu.

Segmen-segmen ini harus dimulai dengan lembut dan diakhiri dengan lembut dan tumpang tindih untuk kehilangan sesedikit mungkin informasi yang terkandung dalam sinyal. Semakin besar durasi waktu t dari jendela waktu yang dipilih, semakin tepat frekuensi dapat ditetapkan atau semakin besar resolusi berbasis frekuensi.

Proses ini disebut "windowing". Diseksi segmen demi segmen ini setara dari sudut pandang matematis dengan perkalian sinyal asli (non-periodik panjang) dengan fungsi jendela (misalnya fungsi GAUSS).

Pada akhirnya, sinyal non-periodik yang tahan lama dibagi menjadi beberapa kejadian individu dan dianalisis. Hubungan antara peristiwa individu tidak boleh hilang. Oleh karena itu mereka harus tumpang tindih.

Dalam kasus satu kali, peristiwa singkat yang dimulai tiba-tiba dari nol dan juga berakhir di sana (misalnya, dengan ledakan) jendela persegi panjang harus selalu dipilih, membatasi peristiwa aktual dalam waktu. Dengan demikian distorsi dihindari yang pasti terjadi dengan semua jenis jendela "lembut".

Sinyal Periode Dekat

Sinyal-sinyal periode-dekat membentuk daerah batas yang tidak jelas antara sinyal-sinyal periodik – yang sebenarnya tidak ada – dan sinyal-sinyal non-periodik.

Sinyal hampir-periodik diulang selama periode waktu tertentu dengan cara yang sama atau serupa.

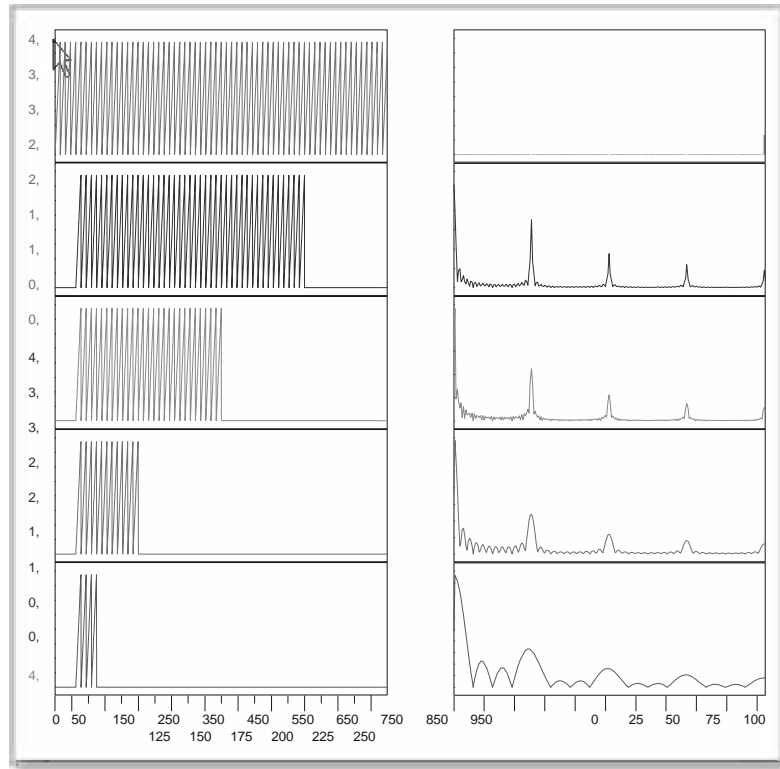
Sebuah gigi gergaji dipilih sebagai contoh sinyal hampir-periodik yang diulangi dengan cara yang sama selama berbagai periode waktu yang berbeda (Gambar 55). Efeknya sama seperti pada Gambar 50. Dalam kasus ledakan, gelombang sinus diulang dengan cara yang sama. Dalam setiap kasus perbandingan domain waktu dan frekuensi dengan pertimbangan Prinsip Ketidakpastian menghasilkan hasil sebagai berikut.

Sinyal hampir-periodik memiliki lebih atau kurang seperti spektrum linier (garis buram atau kabur) yang hanya mencakup kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar. Semakin pendek panjang keseluruhan, semakin kabur garisnya. Ini berlaku untuk lebar garis:

$$\Delta f \geq 1/\Delta t \text{ (UP)}$$

Sinyal real, mendekati periode atau fase mendekati periode dari sinyal adalah – seperti yang ditunjukkan oleh Gambar berikut – tidak selalu dikenali sebagai mendekati periode dalam domain waktu. Ini berhasil pada upaya pertama dalam domain frekuensi.

Semua sinyal yang memiliki spektrum kontinu "seperti linier" dan di mana garis-garis kabur ini dapat ditafsirkan sebagai kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar didefinisikan di sini sebagai hampir-periodik.



Gambar 55: Pada spektrum sinyal gigi gergaji hampir-periodik

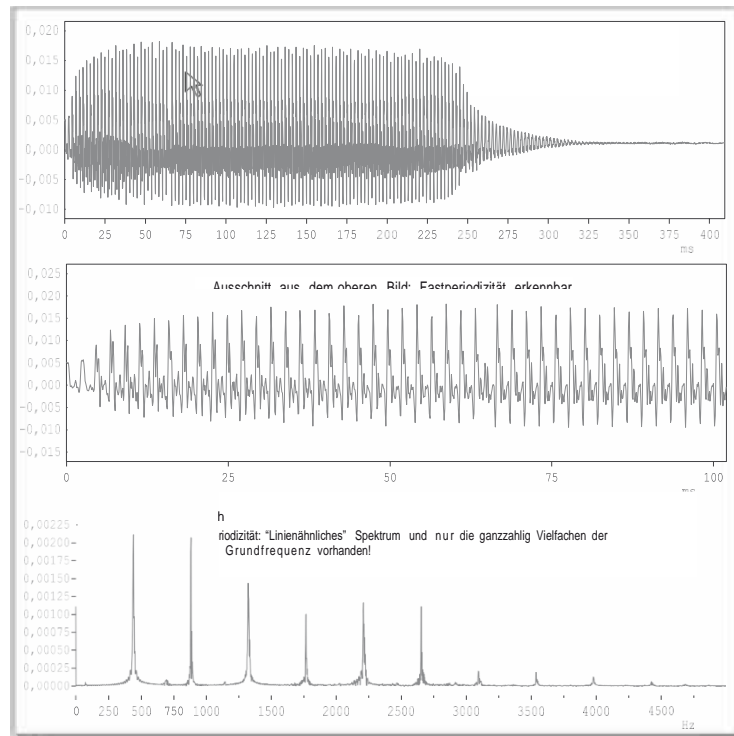
Rangkaian sinyal gigi gergaji ini menggambarkan dengan sangat jelas seberapa sering sinyal harus diulang agar dianggap mendekati periodik. Seri atas juga mengandung sinyal mendekati periodik, karena gigi gergaji ini hanya direkam selama 1 detik. Kedua seri bawah termasuk transisi ke sinyal non-periodik.

Dalam prakteknya ada sinyal yang memiliki spektrum seperti linier yang garis "kabur" tidak dapat sebagian ditafsirkan sebagai kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar. Mereka didefinisikan di sini sebagai kuasi-periodik. Alasan mengapa mereka ada akan dijelaskan di bagian selanjutnya.

Nada, Suara, Dan Musik

Sampai sekarang kami telah memeriksa sinyal yang dihasilkan secara artifisial seperti persegi panjang, gigi gergaji dan bahkan sinyal bising. Kami sekarang sampai pada sinyal yang benar-benar bermakna; yang penting dalam arti eksistensial karena mereka menimpa organ-organ indera kita.

Anehnya, di semua buku teoretis tentang Sinyal-Proses-Sistem, mereka sebagian besar dibenci atau diabaikan. Mereka tidak selalu cocok dengan pola sederhana, mereka bukan hanya satu hal tetapi juga memiliki karakteristik yang lain. Kita berbicara di sini tentang nada, suara, dan lagu, tetapi terutama tentang bahasa.



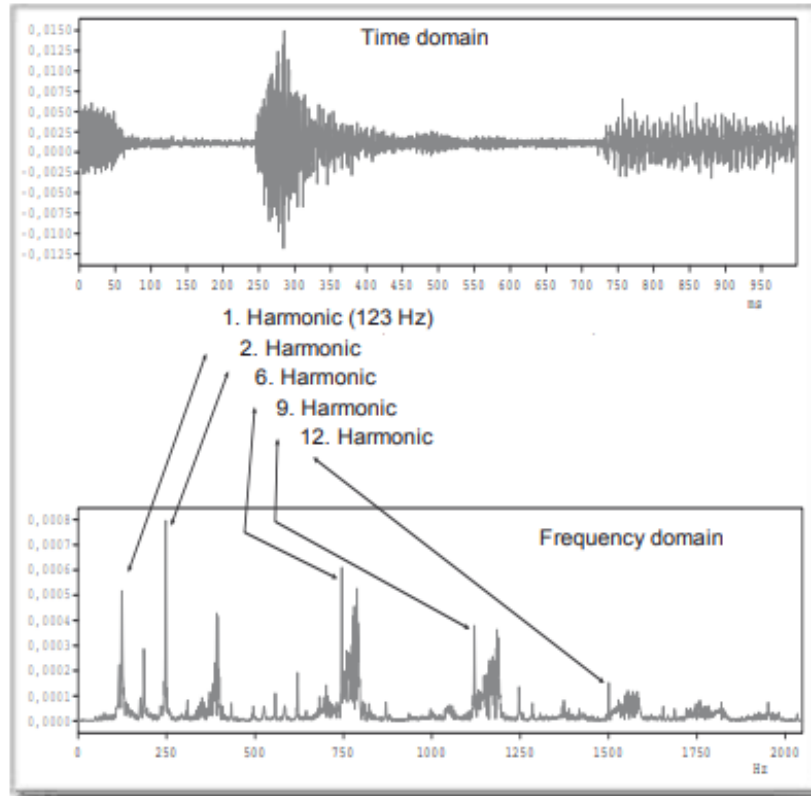
Gambar 56: Nada, nada dan suara

Hampir-periodisitas semua nada diGambarkan melalui nada klarinet pendek (440 Hz = nada konser "A"). Dalam domain waktu adalah mungkin untuk melihat "peristiwa serupa" pada jarak T yang sama satu sama lain. Gunakan penggaris untuk mengukur $10 T$ (mengapa tidak T saja?), tentukan T dan hitung nilai kebalikannya $1/T = f_A$.

Hasilnya seharusnya menjadi frekuensi dasar $f_A = 440$ Hz. Karena telinga kita adalah penganalisis FOURIER – lihat Bab 2 kita dapat mengenali nada (dasar). Jika Anda tidak sepenuhnya tidak bermusik, Anda juga dapat menyanyikan nada ini setelah dimainkan.

"Lapangan konser" klarinet terdengar berbeda dari biola, yaitu setiap instrumen memiliki timbre sendiri. Kedua nada ini berbeda dalam amplitudo nada dan bukan nada dasar ($= f_A$). Karena biola terdengar "lebih tajam" daripada klarinet, ada lebih banyak nada daripada dalam spektrum klarinet.

Nada/bunyi pendek sengaja dipilih karena menunjukkan "cacat" kecil pada segmen hampir-periodik. Nada sebenarnya berlangsung kira-kira 250 ms dan menghasilkan spektrum hampir-periodik. Dengan demikian, seseorang sampai pada aturan praktis berikut: setiap nada/bunyi seragam yang berlangsung setidaknya 1 detik menghasilkan spektrum periodik yang praktis!



Gambar 57: Suara sebagai superimposisi dari berbagai nada yang berbeda

Ekstrak dari rekaman jazz (Rolf Ericson Quartet). Saat ini terompet dan piano sedang dimainkan. Sementara domain waktu menunjukkan sedikit karakter musik yang mendekati periode, situasinya sangat berbeda dalam kasus domain frekuensi. Garis berbicara dalam bahasa yang tidak ambigu. Namun, garis mana yang dimiliki bersama? Selain itu spektrum tidak mengandung informasi tentang kapan nada/bunyi tertentu dalam periode waktu yang dipertimbangkan hadir. Namun, dari "lebar" garis, kesimpulan dapat ditarik sejauh menyangkut panjang nada/bunyi ini (NAIK!). Sehubungan dengan itu perhatikan sekali lagi Gambar 45 dan Gambar 55.

Kami sekarang dapat melanjutkan dengan eksperimen sederhana menggunakan metode kami yang telah terbukti. Jadi, sekarang kita menggunakan mikrofon sebagai "sensor" – sebagai sumber sinyal listrik.

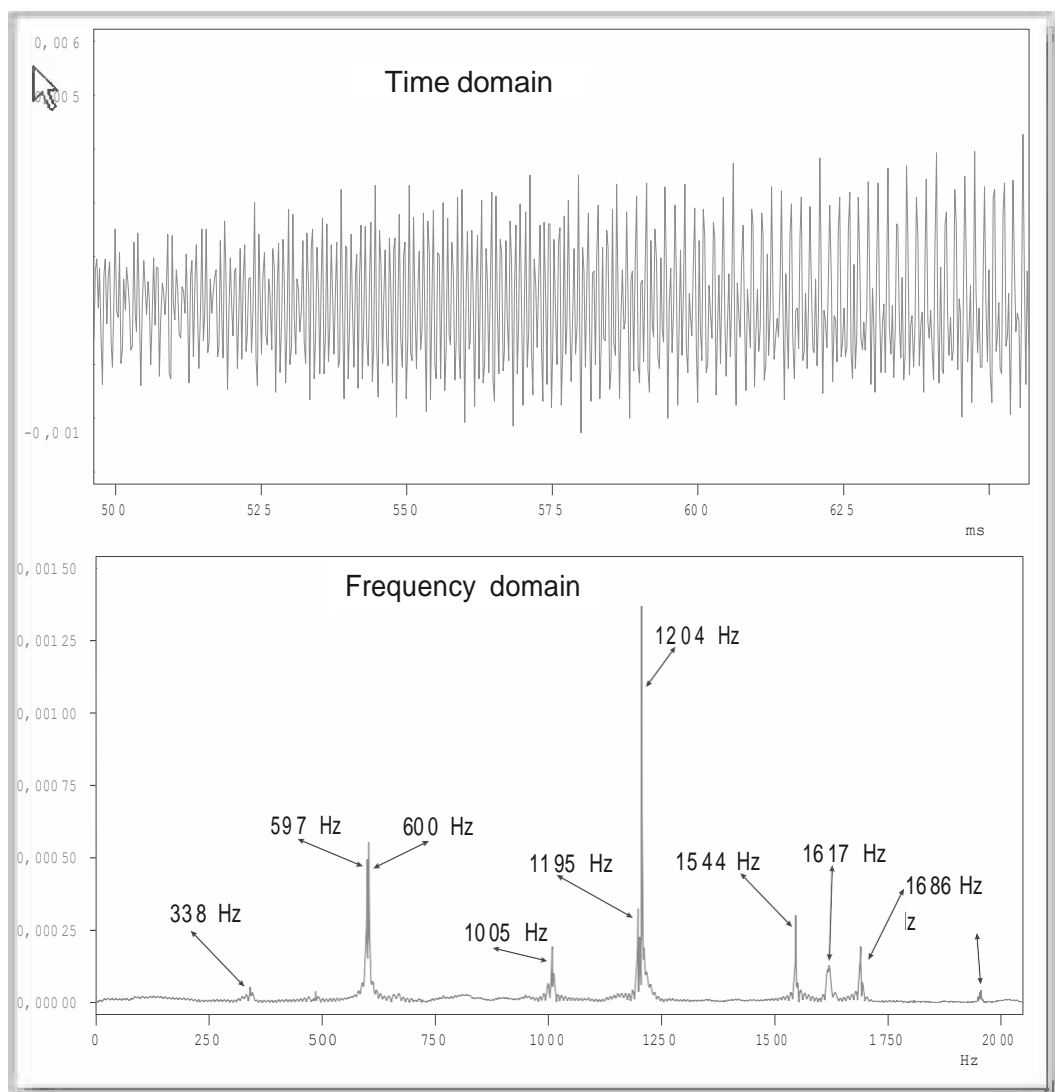
Telinga manusia mempersepsikan sinyal akustik sebagai nada atau suara jika ia berhasil mengalokasikannya kurang lebih dengan jelas ke frekuensi tertentu. Selain itu, sinyal dirasakan harmonis jika semua frekuensi berada dalam hubungan tertentu satu sama lain (berjarak sama satu sama lain). Sebagai hasil dari UP, alokasi frekuensi yang jelas ini hanya mungkin jika sinyal diulang dengan cara yang sama selama periode waktu yang lebih lama dalam segmen waktu yang diamati.

Dalam domain waktu sangat sulit untuk mendeteksi periodisitas. Sinyal tampaknya berubah terus-menerus. Hanya jarak antara nilai maksimum di bagian kanan yang tampaknya hampir konstan.

Di sisi lain, domain frekuensi menampilkan garis yang jelas. Frekuensi diukur pada layar menggunakan kursor. Seperti yang akan Anda buat dengan mudah, tidak semua garis adalah kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar. Oleh karena itu, sinyal tidak mendekati periodik. Kami menyebut jenis sinyal kuasi-periodik ini. Penyebab fisik sinyal kuasi-periodik adalah osilasi membran misalnya. Gelas anggur adalah sejenis membran cacat. Gelombang, yang disebut mode osilasi dengan panjang gelombang atau frekuensi tertentu, terbentuk pada membran tergantung pada ukuran dan bentuknya. Frekuensi ini kemudian muncul dalam spektrum.

Analisis semacam ini dapat digunakan, misalnya, dalam teknologi otomasi dalam pembuatan kaca atau genteng untuk menemukan benda yang cacat, misalnya yang retak. Spektrum mereka sangat berbeda dari kaca utuh atau genteng.

Oleh karena itu, nada atau suara harus bertahan untuk jangka waktu yang lebih lama agar dapat dikenali. Untuk alasan ini nada/bunyi mendekati periodik atau kuasi-periodik!



Gambar 58: Suara gelas anggur sebagai sinyal kuasi-periodik

Aturan praktis berikut ini dihasilkan dari analisis yang disajikan pada Gambar 55.

Setiap nada/bunyi seragam yang berlangsung setidaknya 1 detik menghasilkan spektrum periodik yang praktis. Setiap spektrum periodik yang praktis sesuai secara akustik dengan nada/bunyi yang berlangsung setidaknya 1 detik dan yang dapat diidentifikasi dengan jelas sejauh menyangkut nada.

Catatan: dalam bahasa biasa (dan bahkan di antara para ahli) istilah "nada" dan "suara" tidak dibedakan dengan jelas. Orang-orang berbicara tentang suara biola, tetapi mereka juga mengatakan bahwa biola memiliki nada yang indah. Kami akan mendefinisikan dan menggunakan istilah dengan cara berikut:

Pitch dapat didefinisikan secara tepat dalam kasus nada. Dengan demikian variasi sinusoidal dalam tekanan yang dirasakan oleh telinga.

- Dalam hal nada, titinada dapat ditentukan dengan tepat. Nada biola berisi beberapa frekuensi yang dapat didengar; frekuensi terendah yang terlihat adalah nada dasar dan menentukan nada. Yang lain disebut nada tambahan dan, dalam kasus sinyal akustik mendekati-periodik, adalah kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar.
- Suara – misalnya akord piano – umumnya terdiri dari beberapa nada. Dalam hal ini tidak mungkin untuk mengidentifikasi satu nada atau bahkan nada yang jelas.
- Setiap instrumen dan setiap pembicara memiliki timbre tertentu. Hal ini ditandai dengan nada yang terkandung dalam nada yang ditumpangkan.

Sebuah perbedaan yang jelas dari istilah "nada" dan "suara" hampir tidak mungkin karena mereka telah digunakan sehari-hari jauh lebih lama daripada istilah fisik "nada" dan "suara" dalam akustik.

Nada, suara, dan musik adalah rangsangan mental yang tak tertandingi bagi manusia. Hanya tayangan optik yang dapat bersaing. Dalam evolusi manusia, sensibilitas tertentu untuk superimposisi sinyal-sinyal yang hampir-periodik – nada, suara, musik – tampaknya telah berlaku.

Meskipun jumlah informasi harus dibatasi karena mendekati periodisitas, musiklah yang menurut kami sangat menarik. Pidato juga termasuk dalam kategori ini. Ini sangat berkaitan dengan nada dan suara. Di sisi lain, ia berfungsi hampir secara eksklusif untuk menyampaikan informasi. Oleh karena itu, bab berikutnya akan membahas kompleks ini dalam sebuah studi kasus.

Membatasi Ketidakpastian: FFT Dan Wavelet Waktu Singkat

Prinsip Ketidakpastian UP merupakan "pembatasan" fisik yang mutlak tetapi masih sangat misterius pada pemrosesan sinyal apa pun. Hal ini juga ditunjukkan oleh upaya kompleks dari banyak ilmuwan dan insinyur dalam beberapa dekade terakhir untuk memeras kuantum terakhir informasi dari transformasi FOURIER.

Apa sebenarnya "kerugian" misterius dari transformasi FORIER?

Di satu sisi, alam tampaknya menggunakan prinsip ini: dalam kasus prisma, misalnya, sinar matahari dipecah menjadi komponen spektral dan sinusoidalnya dan bahkan telinga kita berfungsi sebagai penganalisis FOURIER dan hanya dapat mendengar sinyal sinusoidal. Di sisi lain, komponen struktural dari semua sinyal adalah sinyal sinusoidal yang menurut

definisi panjangnya tak terhingga. Tapi bagaimana telinga kita bisa merasakan sinyal waktu singkat, jika masing-masing sinyal yang terdengar memiliki durasi yang tak terbatas!? Di sebuah konser kita mendengar musik tanpa interupsi dan tidak hanya setelah sinyal atau konser berakhir.

Pada tahun 1946 fisikawan Dennis GABOR (penemu holografi) adalah orang pertama yang mencoba menangani teka-teki ini secara eksperimental dengan membedah sinyal yang lebih panjang dalam jendela waktu GAUSSian yang tumpang tindih (lihat Gambar 52 hingga Gambar 54) kemudian melakukan proses sinyal yang dikenal dalam ilmu pengetahuan. literatur sebagai STFFT (Short Time Fast FOURIER Transformation).

Gambar 45 dan Gambar 46 pada prinsipnya menunjukkan apa yang terjadi dalam kasus ini. Sebuah "sinus waktu singkat" (meledak) menciptakan dalam domain frekuensi garis "tidak pasti", yaitu pita frekuensi "sangat banyak" atau sinyal sinusoidal yang terletak berdekatan satu sama lain. Tumpang tindih (interferensi) dari "sinyal sinusoidal yang panjangnya tak terhingga" ini tampaknya menghasilkan cara yang benar secara matematis dan fisik dalam jumlah sinyal dengan durasi terbatas untuk periode waktu di mana sinyal tersebut dapat didengar dan saling memadamkan sinyal sinusoidal ini sebelum dan setelah periode waktu ini. Dalam kasus penghentian glottal, durasinya sangat pendek yang secara otomatis mengarah ke pita frekuensi yang luas.

Oleh karena itu, jika jendela waktu singkat dipilih, dimungkinkan untuk menentukan secara relatif akurat pada titik waktu mana pita frekuensi tetangga yang relatif luas terdengar dalam kenyataan dan tidak saling memadamkan satu sama lain oleh interferensi.

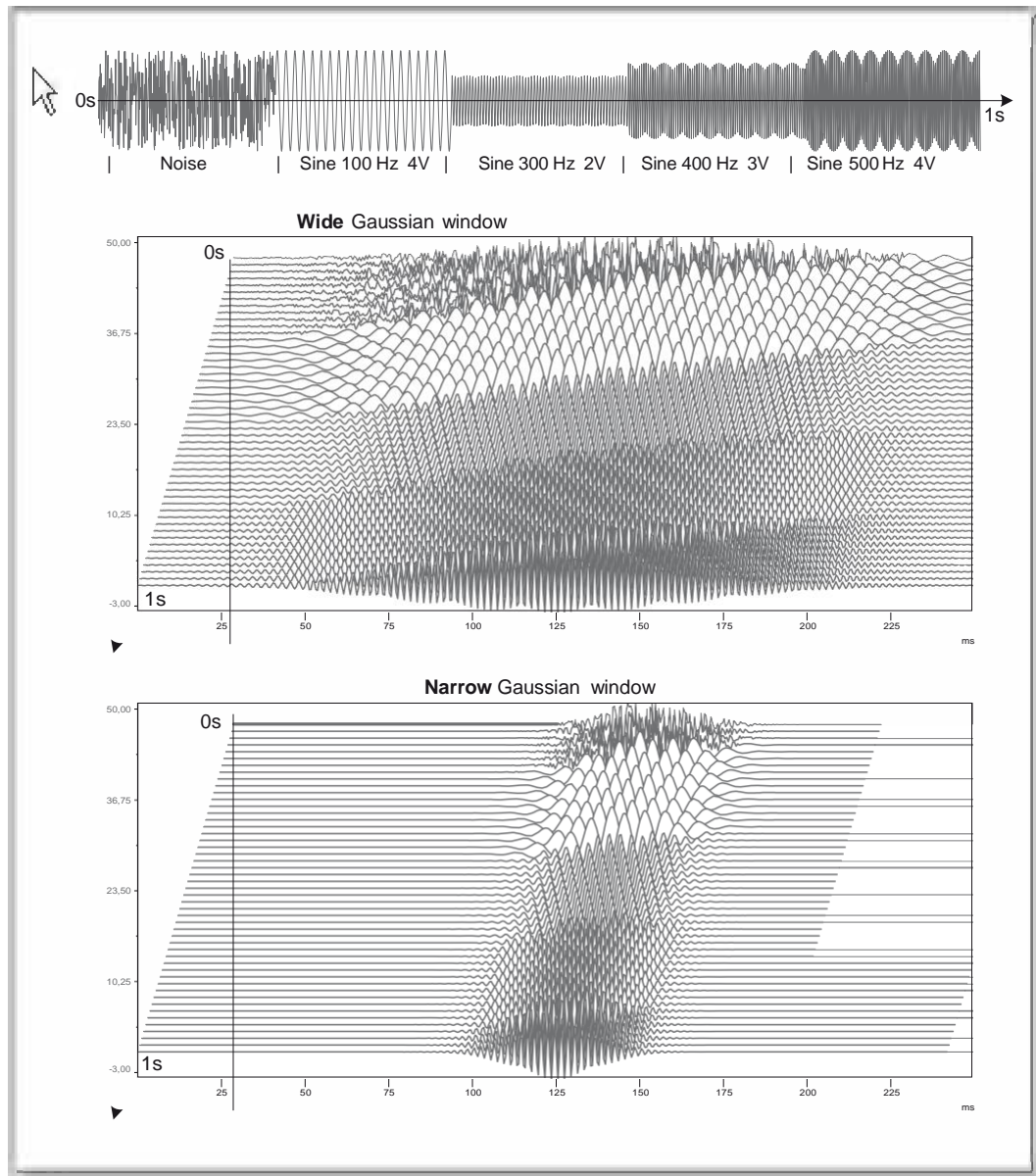
Jika, berbeda dengan ini, jendela waktu yang lebih lama dipilih, dimungkinkan untuk menentukan secara relatif tidak tepat ketika pita frekuensi tetangga yang relatif sempit terdengar secara nyata dan tidak saling memadamkan oleh interferensi.

Gambar 59 menunjukkan hal ini dengan menggunakan contoh "sinyal buatan" yang terdiri dari lima sampel derau dengan panjang yang sama dan empat sinyal sinusoidal dengan frekuensi berbeda. Di sini apa yang disebut "representasi kaskade" dari DASYLab digunakan di mana cara segmen sinyal individu berubah "dari waktu ke waktu" ditampilkan secara tiga dimensi dalam domain waktu.

Dalam Gambar 60, domain frekuensi dari banyak jendela GAUSSian waktu terhuyung-huyung ini juga diatur secara tiga dimensi. Ini disebut sebagai lanskap frekuensi-waktu. Perbedaan disolusi frekuensi antara jendela sinyal waktu pendek dan waktu lebih lama dapat dikenali dengan jelas. Informasi lebih lanjut dapat ditemukan dalam teks keterangan.

Teknik ini digunakan secara praktis dalam Bab berikutnya "Bahasa sebagai Pembawa Informasi". Ini adalah seni dalam semua bentuk pengenalan suara.

Short Time FFT (STFFT) telah digunakan selama kurang lebih tiga puluh tahun untuk membuat jendela "slide" pada segmen frekuensi dan waktu yang berbeda.



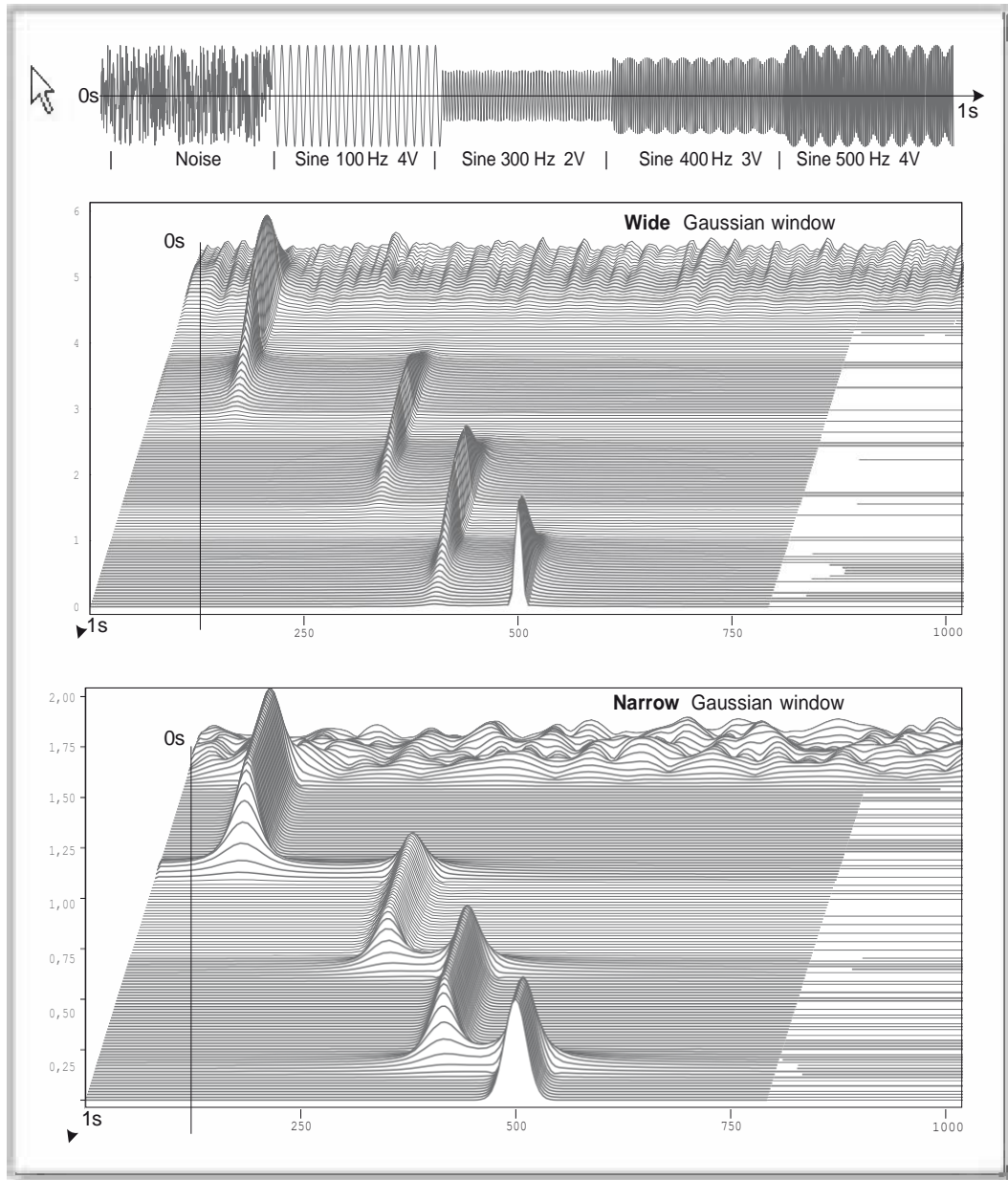
Gambar 59: Representasi kaskade segmen sinyal berjendela

Seluruh sinyal uji dengan durasi $t = 1\text{s}$ dapat dilihat di atas. Ini berisi lima segmen berbeda yang masing-masing berdurasi 0,2 detik. Jendela GAUSSian (panjang vektor 512, tumpang tindih 450 pembacaan atau sampel) ditumpangkkan pada sinyal ini. Pada selang waktu c. 30ms jendela ini memotong segmen.

Di atas jendela GAUSSian yang lebar (parameter 3) digunakan dan di bawah jendela GAUSSian yang sempit (parameter 10) digunakan. Setelah kebisingan, bidang dari 4 frekuensi berbeda dalam "lanskap waktu" ini dapat dikenali dengan jelas.

Segmen sinyal berjendela harus jelas tumpang tindih karena jika tidak, informasi dapat hilang. Informasi adalah pola-pola bermakna dengan durasi tertentu yang tidak boleh "dibeda-bedakan". Seberapa jauh tumpang tindih ini dapat berlangsung tergantung pada frekuensi tertinggi yang terkandung dalam sinyal. Ini menunjukkan kecepatan maksimum di

mana sinyal – dan karena itu informasinya – dapat berubah. Ini akan dibahas lagi di Bab 9 (“Digitalisasi”).



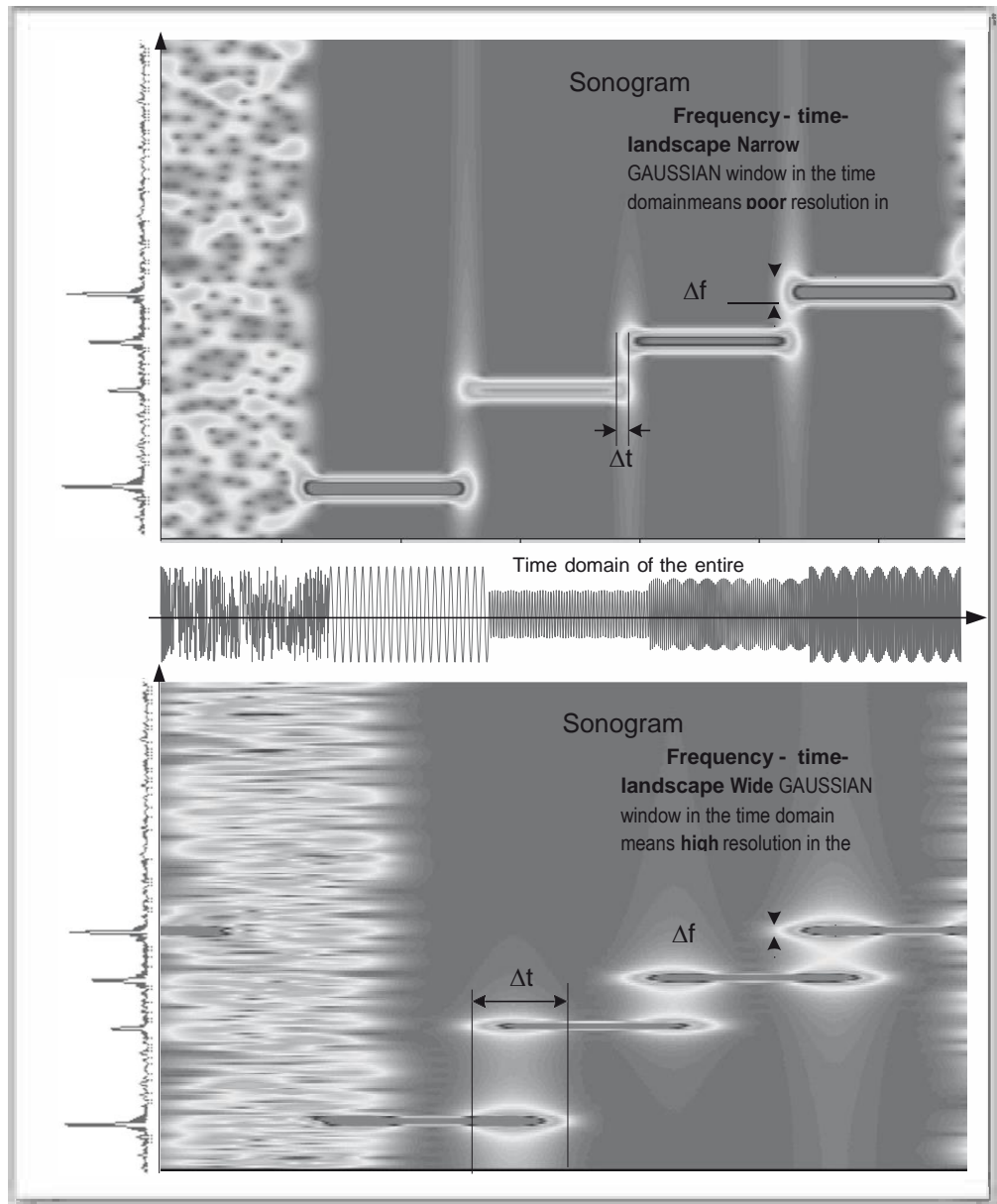
Gambar 60: Waktu-Frekuensi-Lanskap dengan dua jendela GAUSSian dengan lebar berbeda

Prinsip Ketidakpastian tidak dapat digambarkan dengan lebih baik daripada di Gambar 59 dan Gambar 60. Dapat dilihat dengan jelas bagaimana lebar jendela mempengaruhi resolusi frekuensi.

Metode representasi ini hanya memberikan gambaran kasar tentang seberapa jauh spektrum frekuensi dari segmen sinyal yang berdekatan saling tumpang tindih.

Setiap segmen dari 4 sinyal sinusoidal yang berbeda muncul di pita frekuensi bukan sebagai "garis" tetapi sebagai keseluruhan bundel frekuensi tetangga, yaitu sebagai pita frekuensi. Semakin lebar segmen sinyal waktu, semakin sempit atau lebih “terfokus” pita frekuensi dan resolusi frekuensi dan sebaliknya.

Hal ini dapat dilihat dengan sangat jelas dalam spektrum segmen kebisingan di atas Gambar. Kebisingan mengandung hampir semua frekuensi; di gambar atas definisi yang lebih baik antara frekuensi tetangga dapat dilihat sebagai hasil dari jendela waktu yang lebih luas.

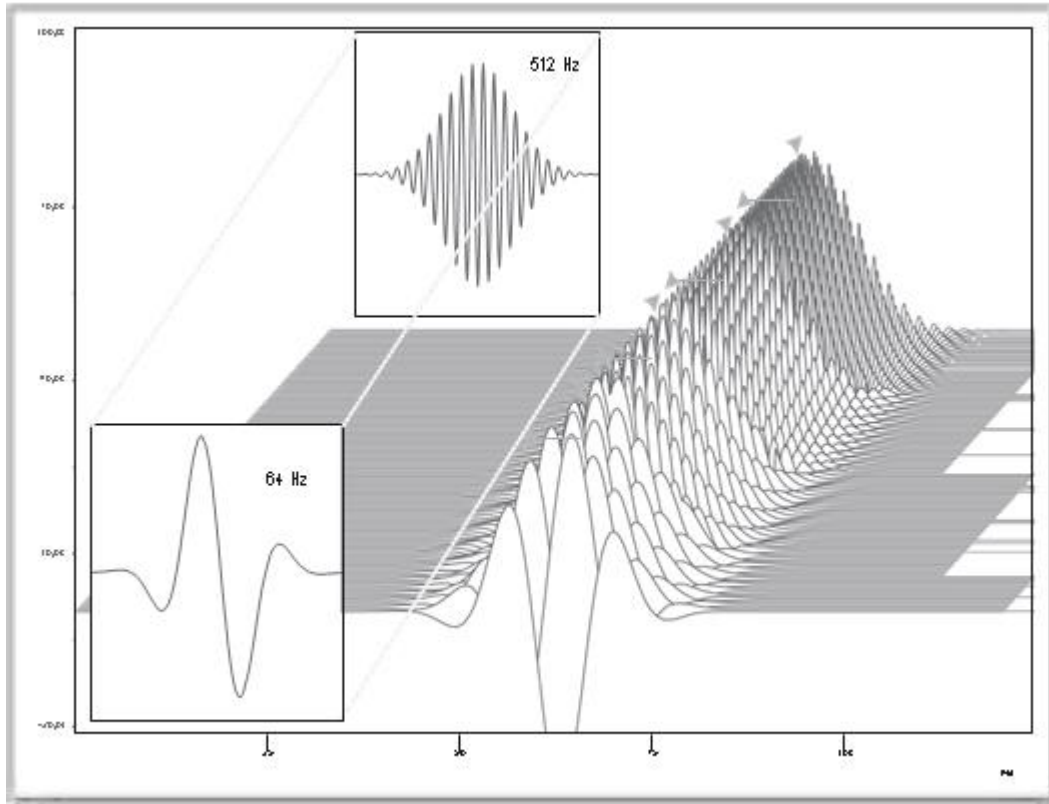


Gambar 61: Sonogram: "Gambar satelit" dari lanskap frekuensi-waktu

Sonogram yang ditampilkan di sini sesuai dengan lanskap frekuensi-waktu dari Gambar 60. Di sini warna yang berbeda digunakan untuk menyoroti "dimensi ketiga" – tingkat amplitudo. Sumbu horizontal adalah sumbu waktu, sumbu vertikal adalah sumbu frekuensi.

Sonogram digunakan dalam teknologi dan sains sebagai "sidik jari akustik". Apakah masalahnya adalah untuk mengidentifikasi nyanyian burung atau suara penjahat, sonogram memberikan gambaran kompleks yang tidak salah lagi, penuh dengan informasi dalam lanskap waktu frekuensi.

Dalam kasus ini, waktu yang relatif baik dan resolusi frekuensi yang relatif buruk dengan jendela waktu pendek yang sempit dapat dilihat pada gambar atas dan pada gambar bawah dengan jendela yang lebih lebar. Apa yang sangat mencolok di gambar bawah adalah waktu yang tumpang tindih – itulah ketidakpastian waktu! – dari segmen sinyal individu. “pita kebisingan” di sebelah kiri jauh lebih lebar dan menonjol ke bidang segmen sinyal 100Hz.



Gambar 62: Kerugian waktu singkat Transformasi FOURIER STFT: resolusi tidak merata

Semakin sering pola sinyal diulang dengan cara yang sama atau serupa, semakin dapat disebut sebagai "hampir periodik" dan semakin memiliki spektrum seperti garis. Dengan jendela sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda dengan jendela lebar konstan sinyal hampir periodik lebih tinggi daripada yang lebih rendah muncul. Pada Gambar kiri bawah, hal ini dapat dilihat dengan sangat jelas dalam kasus sinyal sinusoidal berjendela 64 Hz. Sinyal ini dapat didefinisikan sebagai non-periodik atau satu kali.

Dengan demikian harus ada ketidakpastian relatif yang dalam windowing harus sama besar untuk semua frekuensi. Selain itu, lebar jendela harus berbanding terbalik dengan frekuensi. Oleh karena itu: jendela lebar dalam kasus frekuensi yang lebih rendah dan jendela sempit dalam kasus frekuensi yang lebih tinggi.

Short Time FFT (STFFT) telah digunakan selama kurang lebih tiga puluh tahun untuk membuat jendela “slide” pada segmen frekuensi dan waktu yang berbeda.

Tujuan STFFT adalah untuk mendapatkan informasi lebih lanjut tentang pita frekuensi apa untuk segmen waktu apa yang ada.

STFFT selalu bekerja dengan resolusi konstan – ukuran jendela yang sama – baik dengan frekuensi tinggi maupun rendah. Jendela lebar memberikan definisi frekuensi yang baik tetapi definisi waktu yang buruk dan sebaliknya.

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 62, frekuensi tinggi dapat lebih mudah diukur sebagai "hampir periodik" dan dengan demikian frekuensi sebagai "garis kabur" daripada frekuensi rendah yang hanya beberapa periode yang masuk ke dalam jendela dan yang hampir tidak periodik sama sekali.

Ini juga merupakan karakteristik dari sinyal nyata bahwa segmen frekuensi yang lebih tinggi sering dalam bentuk semburan waktu singkat (lihat Gambar 45 dan Gambar 46). Sebaliknya frekuensi yang lebih rendah secara alami harus bertahan lebih lama dan lebih konstan.

"Kecacatan" ini dari sudut pandang historis mengarah pada apa yang disebut Transformasi Wavelet, yang titik tolaknya akan dijelaskan berikut ini.

"Gelombang" yang berarti bentuk gelombang waktu singkat dapat memberikan deskripsi yang lebih tepat tentang hubungan antara frekuensi dan waktu. Hampir semua sinyal nyata tidak stasioner, yaitu spektrumnya berubah seiring waktu.

Seperti dapat dilihat dari Gambar 60 dan Gambar 61, bagian terpenting dari sinyalnya - kandungan informasinya - tersembunyi dalam tanda tangan frekuensi waktu. Di sini tidak penting apakah itu analisis segmen waktu EKG oleh ahli jantung atau identifikasi paus oleh ahli biologi kelautan melalui nyanyiannya.

Pada awal tahun 80-an, ahli geofisika Jean MORLET mengembangkan alternatif untuk FOURIER Transformation STFFT, yang mengambil persis ide yang disarankan di sini. Dia ingin menganalisis data seismografi, yang memiliki sifat dengan frekuensi yang sangat berbeda pada posisi yang berbeda dalam domain waktu, untuk menemukan ladang minyak baru lebih tepat daripada yang diizinkan STFFT.

Untuk tujuan ini ia menggunakan fungsi jendela yang dapat disesuaikan, yang dapat ia padatkan dan regangkan. Dia menggeser ini ke seluruh "sinyal" untuk setiap lebar jendela.

Tujuan dari prosedur ini adalah ketidakpastian relatif konstan, sebuah proses di mana produk dari frekuensi yang akan dianalisis dan ketidakpastian frekuensi dari jendela yang digunakan adalah konstan. Sederhananya, ini berarti:

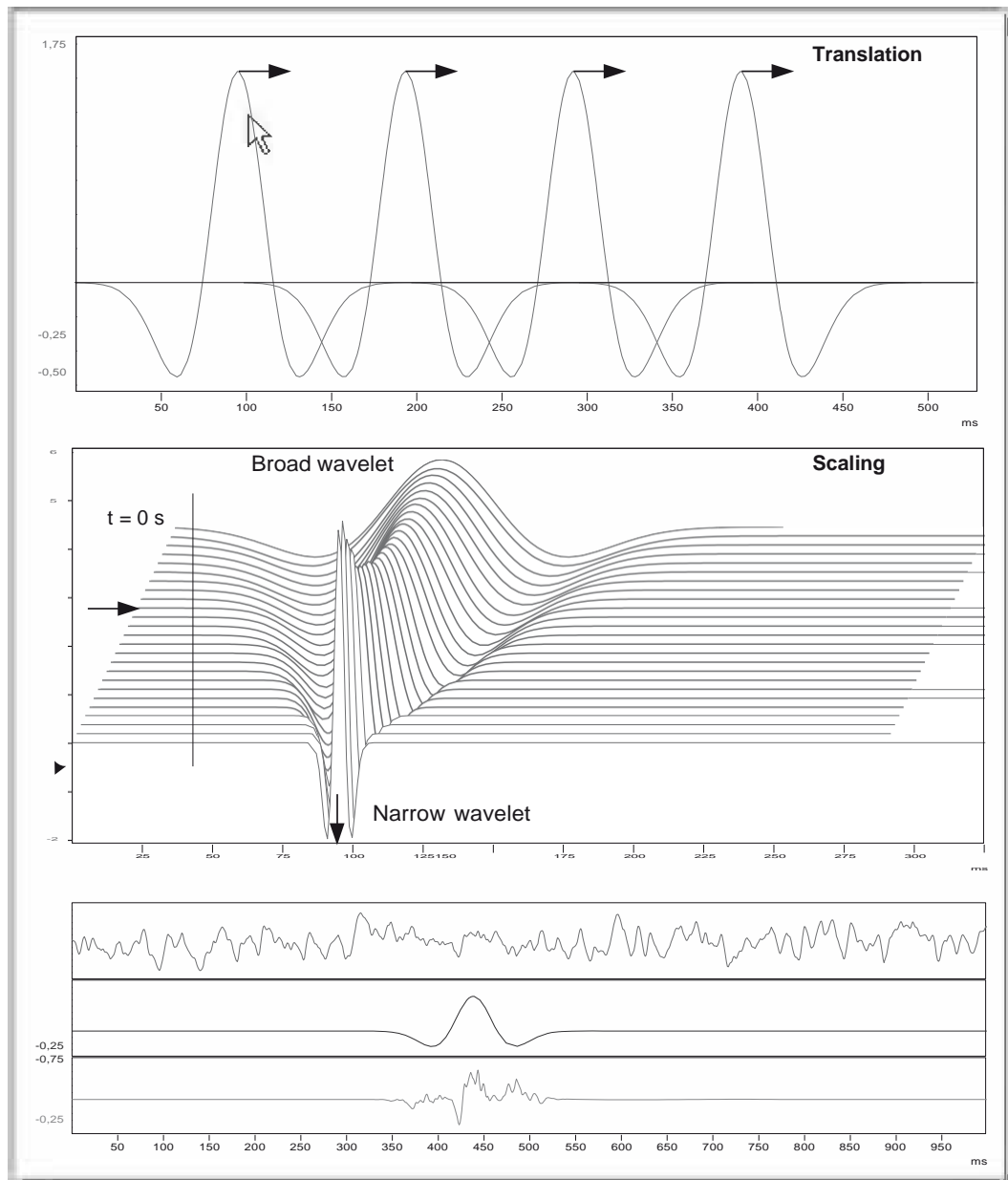
Untuk semua frekuensi yang akan dianalisis, jendela dibuat cukup lebar dengan penskalaan sehingga dalam setiap kasus jumlah periode yang sama mengisi jendela.

Lebih sederhana lagi: jendela lebar dalam kasus frekuensi rendah dan jendela sempit dengan frekuensi tinggi sehingga sinyal mendekati periode dengan ketidakpastian yang sebanding selalu dianalisis dalam domain waktu dan frekuensi.

Dalam hubungan ini kata "wavelet" muncul untuk pertama kalinya karena jendela tampak seperti gelombang pendek yang dimulai dengan lembut dan langsung berakhir dengan lembut. MORLET berhubungan dengan fisikawan teoretis Alex GROSSMAN dan kemudian dengan matematikawan Yves MEYER. MEYER menunjukkan antara lain bahwa banyak solusi matematika untuk masalah pengenalan pola dan pengurangan pola kompleks menjadi pola dasar sederhana sudah ada.

Pengembangan formal dari wawasan ini mengarah pada Transformasi Wavelet yang memungkinkan cara terpadu untuk melihat pengenalan pola dari banyak perkembangan individu di bidang analisis sinyal, kompresi sinyal, dan transmisi sinyal.

Dalam perkembangan ini pola dasar lainnya ("mother-wavelet"), yang dapat "membedah" sinyal kompleks – mis. gambar – lebih efisien, digunakan sebagai pengganti pola dasar sinusoidal. Ini hanya harus memenuhi kriteria matematika tertentu yang, bagaimanapun, berlaku kurang lebih baik untuk semua bentuk gelombang.



Gambar 63: Terjemahan, penskalaan wavelet "topi Meksiko" dan rata-rata geser

Gambar Atas: Sebuah wavelet dengan skala konstan meluncur pada skala waktu dari kiri ke kanan "sepanjang sinyal". Wavelet "topi Meksiko" ini memiliki kemiripan tertentu dengan "sinus yang sangat pendek".

Gambar Tengah: Dengan $t = 0$ s pada skala waktu belakang, wavelet (“ibu”) yang luas dapat dilihat; pada tahap berikutnya wavelet sedikit dikompresi tetapi tetap tidak berubah dalam terjemahan ini. Di sini wavelet terkompresi untuk seluruh rangkaian tahapan harus dilihat masing-masing dengan terjemahan c. 95ms.

Gambar Bawah: CWT. Sinyal – dari sudut pandang matematika – dikalikan dengan sinyal. Ini menghasilkan segmen sinyal bawah. Karena wavelet memiliki nilai negatif di tepi, sinyal bagian ini muncul dengan tanda yang berlawanan dengan sinyal aslinya: segmen sinyal berubah dalam "ritme" wavelet! Jika "kesepakatan berirama" antara wavelet dan sinyal besar, rata-rata berikutnya juga secara otomatis besar.

Dengan demikian, transformasi wavelet digunakan tidak hanya untuk analisis frekuensi tetapi juga untuk analisis pola yang serba guna. Transformasi wavelet tidak secara langsung merupakan analisis “multi-frekuensi” (analisis FOURIER) melainkan analisis multi-skala. Seluruh transformasi wavelet dapat terjadi seluruhnya dalam domain waktu tetapi kemudian akan membutuhkan banyak komputasi.

Titik tolaknya adalah “mother wavelet”, pola dasar yang sebenarnya. Ini sekarang dikompresi (atau diregangkan) oleh fungsi penskalaan. Dalam kasus nilai skala tinggi, jendela waktu yang lebar hadir di mana wavelet berubah dalam ritme yang lambat. "Kemiripan berirama" antara sinyal dan wavelet harus ditentukan dengan perkalian. Jika nilai median sesaat ("nilai median geser") dari jendela sinyal ini besar, wavelet dan sinyal setuju secara berirama dalam domain waktu ini! Semakin kecil nilai penskalaan, semakin banyak jendela yang dikompresi dan semakin cepat (frekuensi tinggi) perubahan ritmik dicatat.

Penskalaan bekerja seperti lensa zoom yang dapat diubah hampir seperti kontrol geser dari lensa sudut lebar ke lensa telefoto. Dengan demikian, penskalaan berbanding terbalik dengan frekuensi. Nilai skala kecil dengan demikian menyiratkan "frekuensi tinggi". Alih-alih sumbu frekuensi dalam transformasi FOURIER, dalam transformasi wavelet digunakan sumbu penskalaan. Biasanya nilai penskalaan dimasukkan pada sumbu secara logaritmik, yaitu nilai kecil tampak tidak proporsional besar. Hal ini ditunjukkan dengan sangat jelas oleh Gambar 64 berbeda dengan Gambar 65.

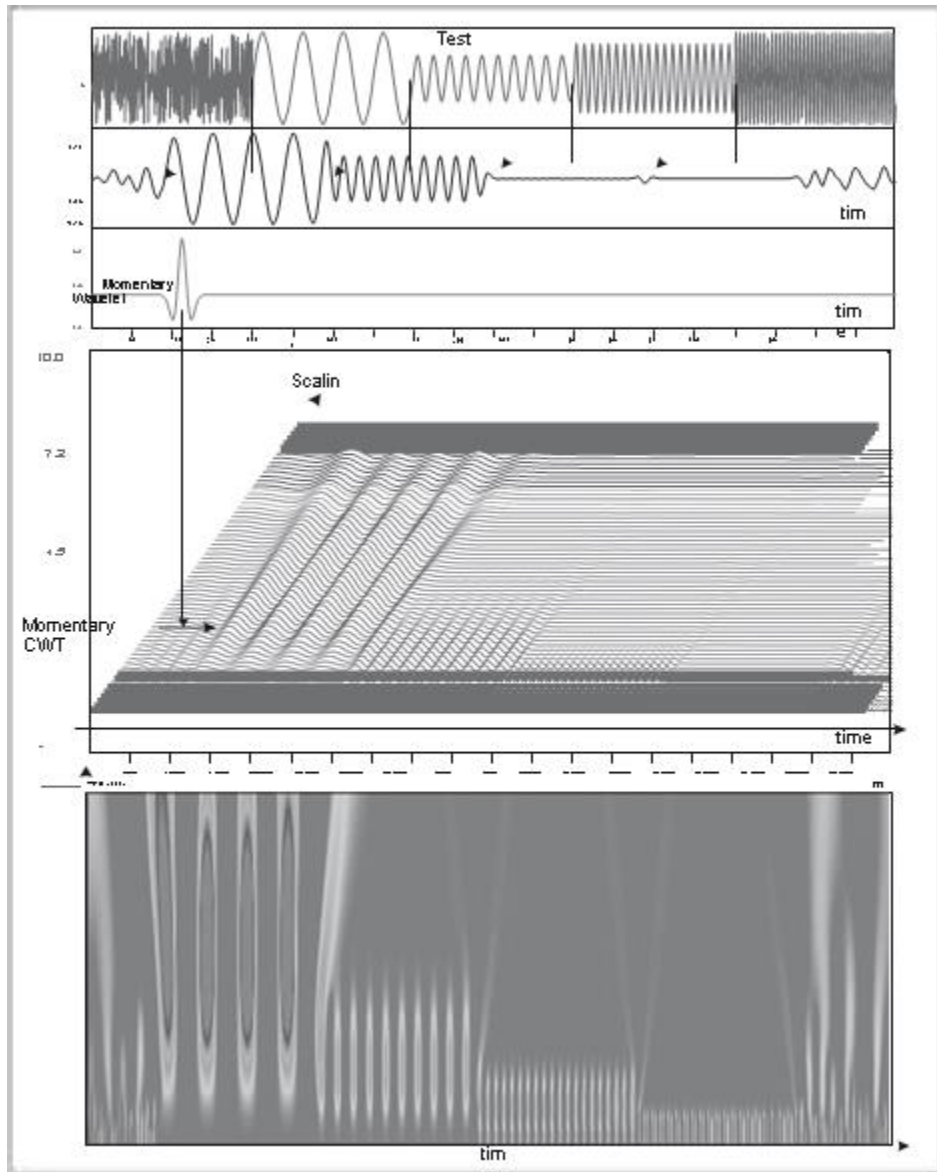
Melalui Transformasi Wavelet dimungkinkan untuk memperluas fenomena ketidakpastian tidak hanya ke masalah waktu-frekuensi tetapi juga ke pola lain yang terkandung dalam wavelet induk, mis. lompatan dan diskontinuitas. Ini mengkhususkan diri dalam menganalisis, menyaring, dan menyimpan sejumlah jenis perubahan secara lebih efisien.

Prinsip Ketidakpastian juga dapat diterapkan tanpa modifikasi pada transformasi wavelet. Pilihan pola yang cocok untuk wavelet induk dan penskalaan yang terampil memungkinkan analisis pengukuran yang lebih tepat, ketika atau di mana pita frekuensi tertentu - yang selalu menunjukkan perubahan temporal atau lokal (misalnya dalam kasus gambar) - hadir dalam sinyal.

Transformasi wavelet jauh lebih efisien dalam banyak aplikasi praktis daripada transformasi FORIER. Hal ini dapat dijelaskan dengan cara yang sangat lugas dalam kasus perubahan sinyal yang tiba-tiba: dalam perubahan mendadak seperti itu, transformasi FOURIER menghasilkan "jumlah tak terbatas" frekuensi ("koefisien FOURIER"). Gambar 27

hingga Gambar 29 menunjukkan dengan paling jelas betapa sulitnya untuk “mereproduksi” perubahan mendadak bahkan dengan sejumlah besar frekuensi.

Perubahan mendadak semacam ini dapat direproduksi menggunakan koefisien wavelet yang jauh lebih sedikit dengan pilihan wavelet dengan skala yang sangat kecil – yaitu jendela waktu yang singkat. Transformasi wavelet memungkinkan untuk menghilangkan informasi yang berlebihan (kompresi sinyal), yaitu mengurangi volume data. Proses yang paling efisien saat ini untuk kompresi gambar karena itu didasarkan pada transformasi wavelet.

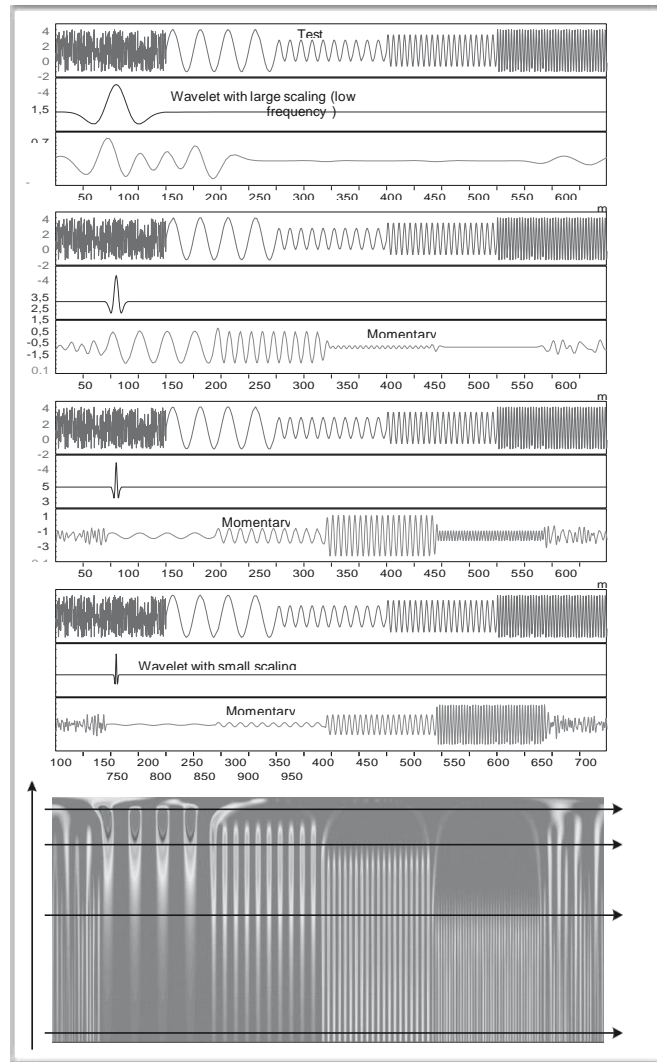


Gambar 64: Transformasi Wavelet Berkelanjutan sebagai "Lanskap 3D" dan sonogram

Gambar atas: Wavelet sesaat yang “meluncur sepanjang sinyal” menghasilkan transformasi wavelet kontinu sesaat CWT. Untuk alasan fisik, sumbu waktu CWT sesaat agak tergeser dibandingkan dengan sumbu waktu sinyal. Untuk alasan ini awal sinyal noise muncul di akhir CWT.

Gambar tengah: Seluruh CWT ditampilkan di sini dalam representasi 3D ("lanskap waktu penskalaan") dengan penskalaan linier. Resolusi waktu yang ditingkatkan yang menyertai penskalaan yang lebih kecil antara segmen sinyal individu dapat dilihat dengan sangat jelas.

Gambar Bawah: resolusi waktu yang baik dari frekuensi tinggi yang terkandung dalam sinyal dan yang relatif buruk dalam kasus frekuensi rendah dapat dilihat dengan sempurna di sonogram dengan representasi isometriknya. Corong berbentuk V di kiri dan kanan teks, yang sulit dikenali secara tepat, menunjukkan peningkatan linier dalam resolusi waktu dengan frekuensi yang lebih tinggi.



Gambar 65: Representasi detail dan CWT dengan penskalaan logaritmik

Di atas lima titik waktu yang berbeda dalam transformasi wavelet dengan lima skala jendela yang berbeda dengan setiap CWT sesaat direproduksi. Kelima representasi ini ditandai di bawah ini dalam sonogram dengan huruf. Ini harus membuat interpretasi lebih jelas.

Sebagai hasil dari representasi biasa dengan penskalaan logaritmik, area frekuensi yang lebih tinggi diregangkan. Hasilnya, corong berbentuk V dari Gambar 64 menjadi lengkungan bulat.

Latihan pada Bab 3

Latihan 1

Rancang sirkuit yang dapat Anda gunakan untuk mereproduksi eksperimen dalam Gambar 45. Anda akan memperoleh sinyal burst, menggunakan modul "Cut out", dengan memotong sinyal sinusoidal periodik dalam domain waktu menggunakan modul ini.

Latihan 2

Dalam modul "filter" filter lowpass dan filter highpass dari berbagai jenis dan pesanan dapat diatur.

- a) Arahkan pulsa ke filter lowpass dan periksa bagaimana durasi respons pulsa $h(t)$ bergantung pada bandwidth filter lowpass.
- b) Ubah kualitas (kecuraman) filter lowpass (melalui m) dan periksa pengaruhnya terhadap respons pulsa $h(t)$.
- c) Letakkan -pulse dan respons pulsa pada layar dan pastikan bahwa respons pulsa hanya dapat dimulai setelah -pulsa diarahkan ke input.

Latihan 3

Yang disebut fungsi Si adalah respons pulsa dari filter "persegi panjang" yang ideal. Ini juga merupakan sinyal LF terbatas pita ideal yang praktis yang berisi semua amplitudo hingga frekuensi cut-off pada (hampir) kekuatan yang sama.

- (a) Nyalakan DASYLab dan pilih rangkaian pada Gambar 48. Fungsi Si dihasilkan dan spektrumnya ditampilkan. Menggunakan komponen rumus, ubah bentuk fungsi Si dan efeknya pada spektrum dengan bereksperimen.
- (b) Pastikan bahwa isi riak dari fungsi Si identik dengan frekuensi tertinggi dari spektrum.
- (c) Anda ingin mengukur properti filter lolos rendah berkualitas tinggi tetapi Anda hanya memiliki osiloskop normal untuk mengamati respons pulsa mirip Si. Bagaimana Anda bisa menyimpulkan fitur filter dari ini?

Latihan 4

Hasilkan sinyal seperti ucapan untuk eksperimen Anda dengan memfilter sinyal yang bising. Di mana ada "generator kebisingan" dan "filter lowpass" di rongga mulut dan tenggorokan?

Latihan 5

Mengapa sinyal-sinyal mendekati-periodik terlihat "mendekati-periodik" sedangkan sinyal-sinyal kuasi-periodik (lihat Gambar 58) tidak terlihat sama sekali "mendekati-periodik" meskipun mereka memiliki spektrum garis?

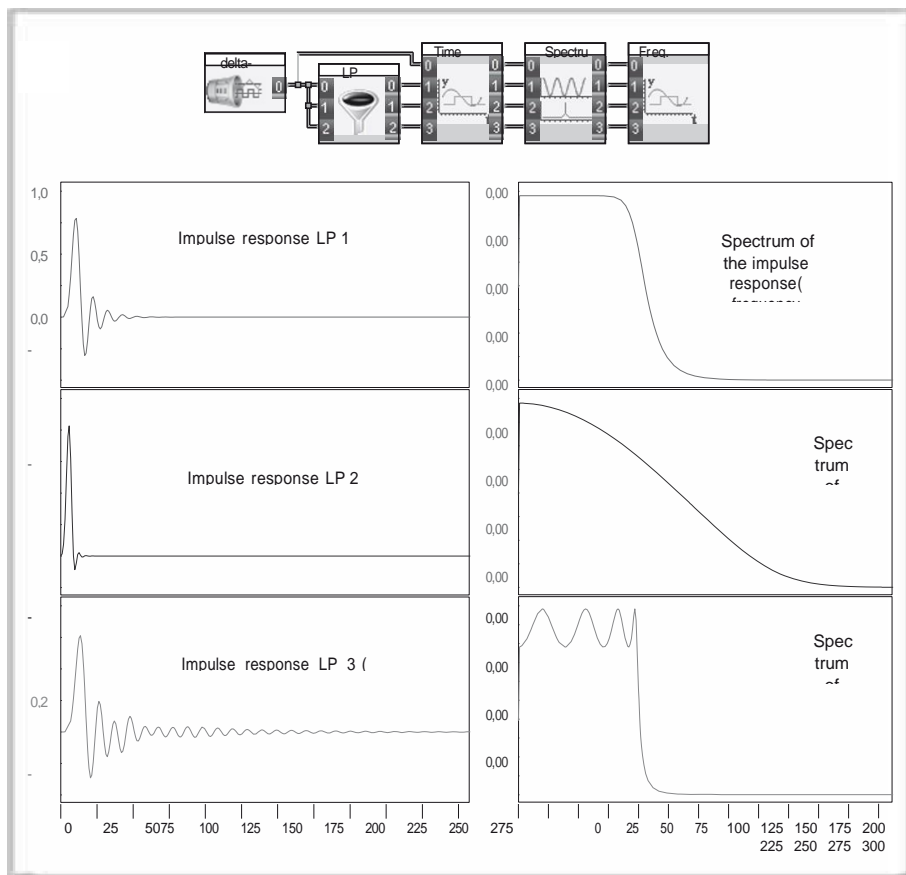
Latihan 6

- (a) Kembangkan sirkuit yang dengannya Anda dapat mewakili jenis jendela waktu dari modul "Jendela Data" secara grafis seperti pada Gambar 54
- (b) Bandingkan kurva frekuensi dari berbagai jendela waktu yang berbeda ini seperti pada Gambar 54 di sebelah kanan.

- (c) Ambil sinyal derau panjang yang disaring dan coba seperti pada Gambar 52 untuk melakukan "windowing" dengan menggunakan jendela GAUSSian tumpang tindih yang terhuyung-huyung.
- (d) Sajikan spektrum segmen sinyal ini dalam lanskap frekuensi waktu.

Latihan 7

Periksa respon pulsa $h(t)$ dari berbagai filter low-pass yang berbeda dalam domain waktu dan frekuensi.



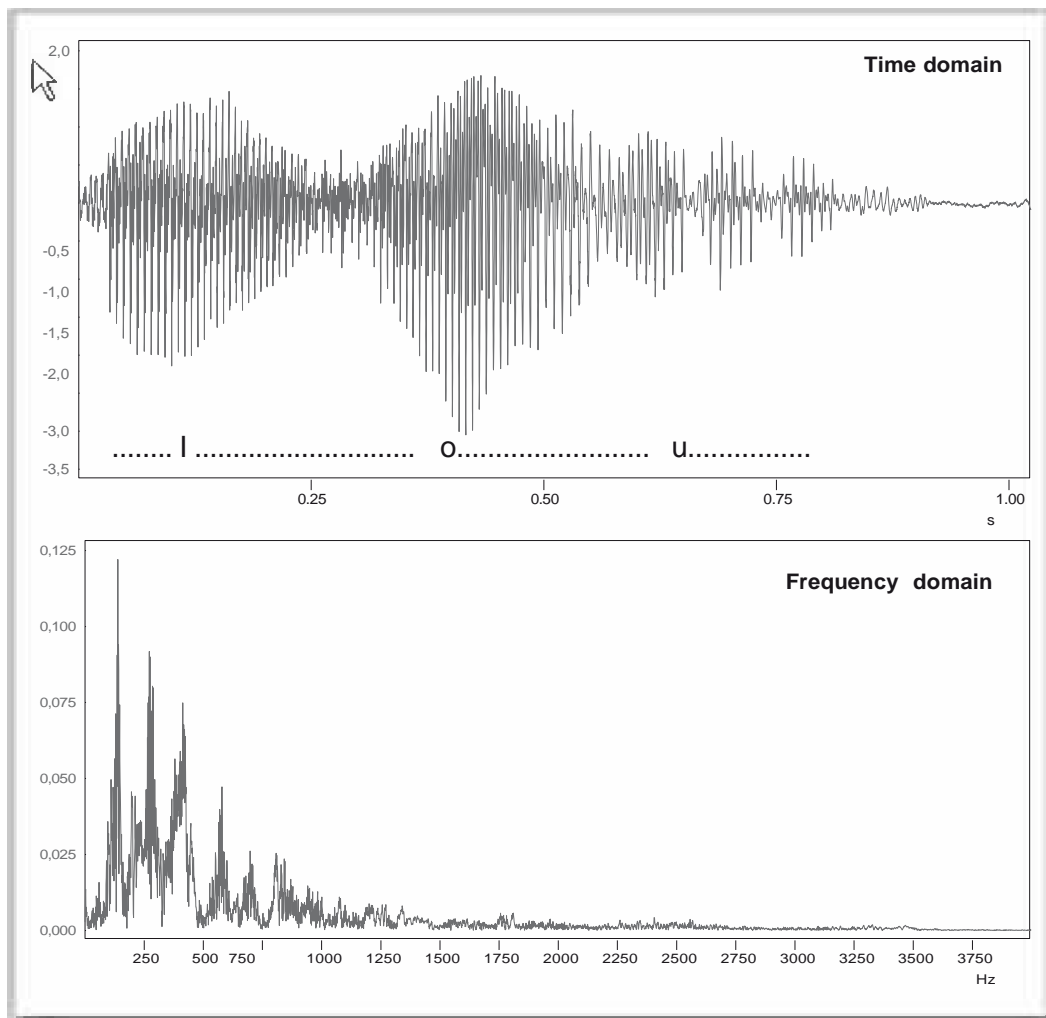
Gambar 66: Respons pulsa dan fungsi transfer

Sebuah pulsa diarahkan pada tiga jenis low-pass yang berbeda dengan frekuensi cut-off yang sama (100 Hz) dan urutan ke-10. Ingatlah bahwa pulsa satu kali berisi semua frekuensi dari 0 hingga dengan amplitudo yang sama.

- (a) Berapa frekuensi yang hanya dapat ditampung oleh respons pulsa? Fitur filter apa yang dapat Anda simpulkan dari respons pulsa yang berbeda $h(t)$?
- (b) Domain frekuensi respons pulsa ternyata memberikan "kurva filter" dan respons frekuensi filter. Mengapa?
- (c) Mengapa panjang respons pulsa yang lebih rendah jauh lebih besar daripada respons pulsa lainnya? Apa artinya ini dari sudut pandang UP?
- (d) Rancang rangkaian ini menggunakan DASYLab dan lakukan eksperimen.

BAB 4 BAHASA SEBAGAI PEMBAWA INFORMASI

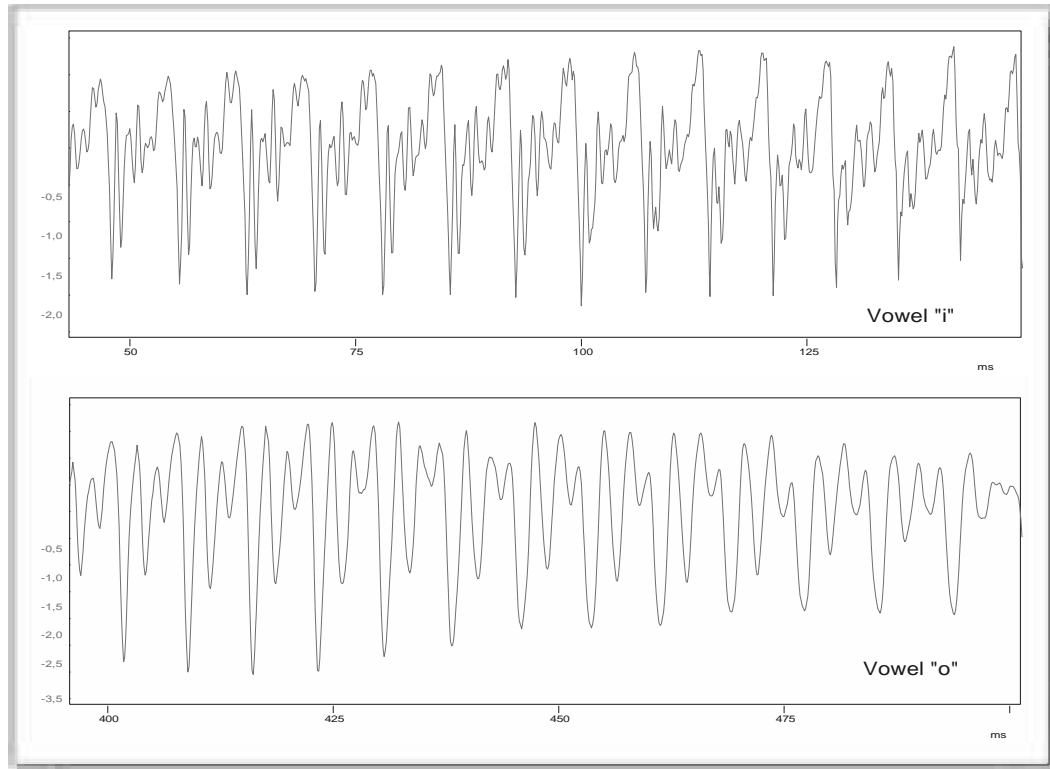
Itu selalu menarik untuk melihat betapa singkatnya langkah itu dari prinsip-prinsip dasar fisika ke aplikasi praktisnya. Pengetahuan tentang prinsip-prinsip dasar sangat penting. Dalam konteks ini, bagaimanapun, kata "teori" bagi banyak orang memiliki asosiasi yang tidak menyenangkan, mungkin karena sebagian besar dijelaskan melalui model matematika abstrak. Hal ini tidak terjadi dalam buku ini.



Gambar 67: Urutan "Saya berhutang padamu" (IOU) sebagai sinyal satu kali dalam domain waktu dan frekuensi

Bahkan urutan pendek seperti "Aku berhutang padamu" memiliki struktur yang sangat rumit baik dalam domain waktu maupun frekuensi. Dalam domain waktu 5 fase dikenali. Awal "i", fase transisi dari "i" ke "o", fase "o", fase transisi dari "o" ke "u", dan fase akhir "u" yang sedikit lebih panjang. Fase transien awal dan fase penutup akhir dapat ditambahkan. Spektrum frekuensi menunjukkan kepada kita bahwa tidak masuk akal untuk

menentukan frekuensi di seluruh panjang kata. Banyak pola frekuensi yang saling terkait. Jelas lebih masuk akal – seperti yang ditunjukkan pada Gambar 51 – Gambar 49 – untuk menganalisis setiap bagian kata secara terpisah. Teknik khusus telah dikembangkan untuk tujuan ini ("Analisis air terjun", lihat Gambar 68).



Gambar 68: Sifat vokal mendekati periodik

Ini adalah segmen domain waktu dari vokal "i" dan "o" dari Gambar 67 yang menjelaskan ungkapan "hampir-periodik" lebih baik daripada kata-kata. Segmen dengan jelas menunjukkan dalam bentuk apa sinyal dapat berulang dengan cara yang sama.

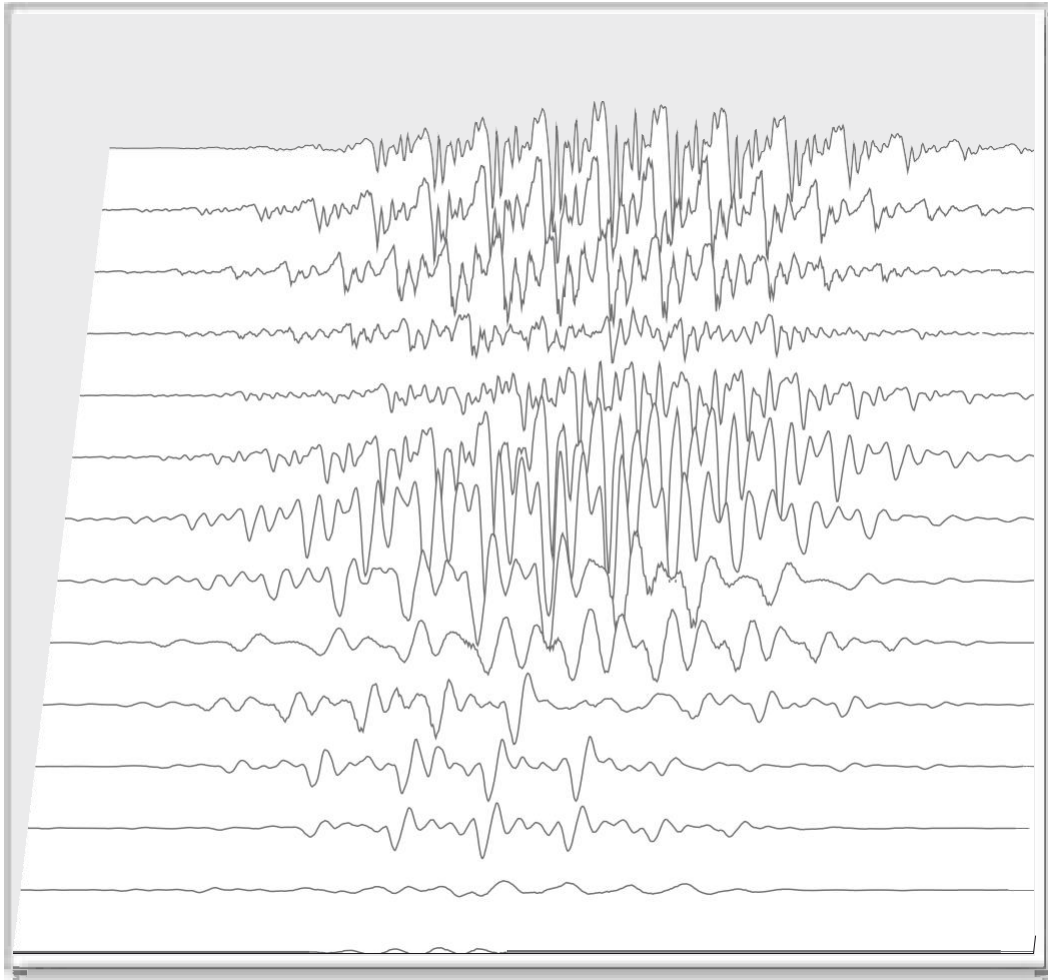
Sebelum kita melihat lebih dekat bagaimana bahasa sebenarnya dihasilkan dan terutama bagaimana persepsinya, kita harus menganalisisnya dalam kaitannya dengan domain waktu dan frekuensinya.

Dua kata cukup sebagai contoh untuk dapat menarik kesimpulan umum tentang kemungkinan dan kecepatan penyampaian informasi melalui bahasa.

Urutan pertama, "Aku berhutang padamu" (IOU), dikenal dalam kehidupan sehari-hari. Ini terutama terdiri dari 3 vokal. Jika urutan ini diucapkan perlahan, lima fase yang berbeda dapat dilihat: vokal "i" - transisi dari "i" ke "o" - vokal "o" - transisi dari "o" ke "u" - vokal "u".

Gambar 67 menyajikan keseluruhan peristiwa sebagai sinyal satu kali dalam domain waktu dan frekuensi. Jika kita melihat peristiwa melalui kelas pembesar, seperti pada Gambar 68, segmen sinyal hampir periodik dapat dideteksi. Ini jelas merupakan vokal (Gambar 69). Spektrum pada Gambar 67 juga menunjukkan sejumlah "garis" yang mengisyaratkan unsur-unsur yang hampir periodik. Seperti yang telah saya tunjukkan, bagaimanapun, tidak mungkin untuk mendeteksi urutan sektor-sektor hampir-periodik ini

dalam domain spektrum/frekuensi. Dengan demikian kemungkinan yang jelas untuk menganalisis segmen sinyal dengan segmen melalui windowing dan untuk memeriksa frekuensinya.



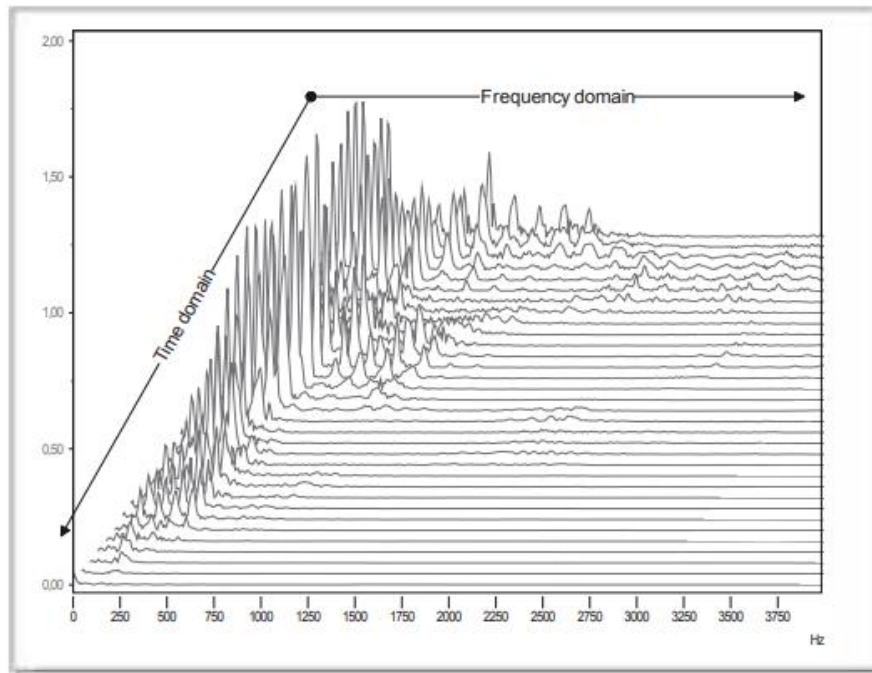
Gambar 69: "Air Terjun"-representasi dari rangkaian "Aku berhutang padamu"

Seluruh urutan telah dibagi menjadi beberapa bagian yang memiliki, seperti pada Gambar 52, awal dan akhir yang lembut (pembobotan dengan jendela GAUSSI). Kata dimulai di baris paling atas dan berakhir di bawah. Fase-fase "i", fase "o" dan fase-fase transisi di antara mereka dapat dilihat dengan jelas. Spektrum frekuensi setiap bagian dihitung (Gambar 70).

Hal ini dilakukan dalam Gambar 70 di mana teknik yang sangat mengesankan – "analisis air terjun" – digunakan yang menyajikan gambar tiga dimensi seperti lanskap dari lanskap frekuensi-waktu dari kata ini. Jika jendela tumpang tindih – seperti yang telah saya tunjukkan pada Gambar 51 dan Gambar 52, yang terjadi di sini – lanskap 3D harus berisi semua informasi dari sinyal keseluruhan "Saya berhutang budi kepada Anda" karena koneksi antara individu segmen tidak terganggu. Oleh karena itu, hasil penting pertama adalah:

Sebuah vokal dapat dicirikan sebagai segmen hampir-periodik dari "sinyal kata". Dengan kata lain, ia juga memiliki spektrum "seperti garis". Semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mengucapkan, semakin jelas dapat diidentifikasi. Semakin pendek periode

pengucapan, semakin kurang jelas dapat diidentifikasi (UP!). Vokal yang sangat pendek hanya akan seperti retakan.



Gambar 70: Analisis air terjun: lanskap frekuensi-waktu dari urutan Aku berhutang padamu“

Ini adalah Gambar yang sesuai dengan Gambar 68 dalam domain frekuensi. Di atas ada spektrum awal kata, di bawah spektrum akhir kata. Spektrum "i" di bagian atas dan spektrum "u" di bagian bawah dapat diidentifikasi dengan jelas. Di tengah ada spektrum "o" dengan frekuensi lebih tinggi dari spektrum "u" dan spektrum transisi kabur.

Lanskap frekuensi-waktu yang ideal akan sedikit berbeda dari yang disajikan di sini. Itu akan terdiri dari beberapa puncak berbentuk cakram paralel yang membentang dari latar depan ke latar belakang dengan jurang yang dalam di antara puncaknya. Lanskap frekuensi-waktu yang sempurna ini akan menyajikan secara ideal hubungan antara panjang waktu dan bandwidth dan dengan demikian UP untuk acara ini. Lihat juga Gambar 73.

Cara dosen dan pembicara yang berpengalaman menekankan kata tertentu berkontribusi pada kejelasannya. Mereka menekankan vokal.

Mereka yang tahu bagaimana menekankan kata-kata dengan baik seharusnya secara teori menjadi penyanyi yang baik juga karena kata yang ditekankan pada dasarnya adalah kata yang dinyanyikan dengan nada yang jelas.

Seperti yang Anda ketahui, bahasa terdiri dari rangkaian vokal dan konsonan. Vokal mendekati periodik. Tapi ini tidak berlaku untuk konsonan. Mereka seperti suara-suara, beberapa di antaranya menggunakan suara aliran udara (coba dan ucapkan "s" yang sangat panjang) beberapa seperti ledakan kecil, seperti "b", "p", "k", "d"., "T". Konsonan-konsonan ini memiliki spektrum kontinu tanpa elemen-elemen mendekati-periodik.

Contoh kedua adalah kata bahasa Inggris "history" karena terdiri lebih jelas dari urutan vocal dan konsonan bergantian.

Urutan ini membatasi kecepatan bicara manusia dan dengan demikian kecepatan informasi. Bahasa adalah suksesi vokal dan konsonan yang cepat. Semakin pendek vokal, semakin tidak mudah dipahami (dan ucapan secara umum).

Ada orang yang – untuk menunjukkan seberapa cepat mereka dapat berpikir atau seberapa cerdas mereka – berbicara begitu cepat sehingga sangat sulit untuk mengikuti mereka. Namun, ini tidak sulit karena mereka berpikir begitu cepat tetapi karena otak kita harus bekerja sangat keras untuk menetapkan unsur-unsur linguistik ke vokal individu. Seringkali seluruh konteks diperlukan jika seseorang ingin mendapatkan pesan. Dan itu adalah bisnis yang sangat menegangkan.

Biarkan saya sekarang menunjukkan hasil yang paling penting sejauh ini: karena fakta bahwa telinga manusia hanya dapat mendengar sinyal sinusoidal – saya akan kembali ke poin ini nanti – pernyataan berikut dapat dibuat:

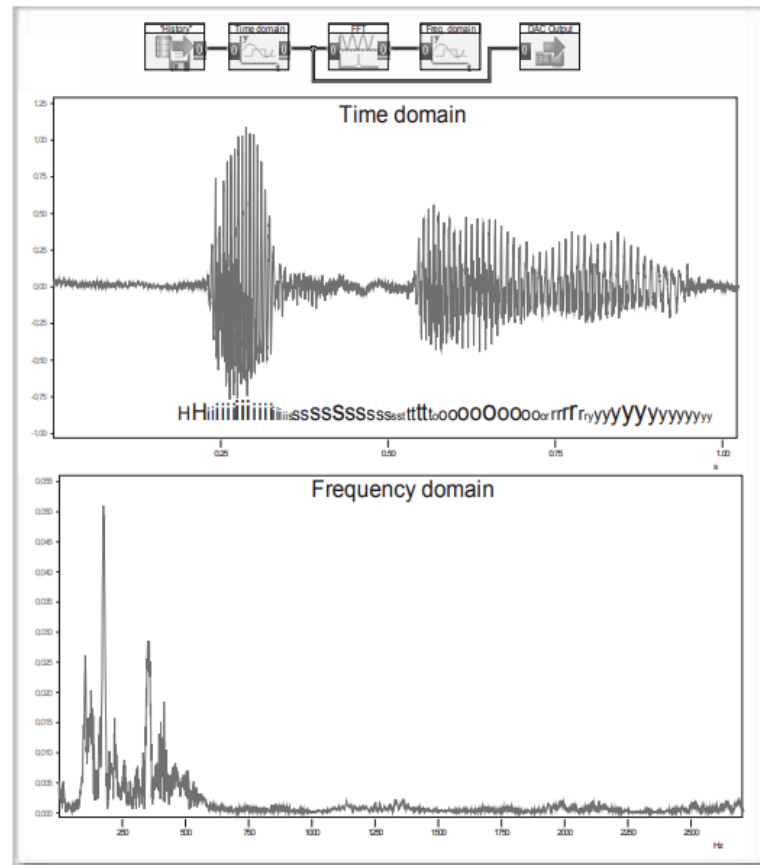
Setiap nada, suara, dan vokal memiliki beberapa frekuensi karakteristik yang – seperti sidik jari – hampir tidak salah lagi.

Pengenalan akustik pola melalui telinga kita terjadi dalam domain frekuensi karena gelas, koin, dan benda padat lainnya menghasilkan suara tertentu ketika didentingkan, yaitu mereka memancarkan – setelah fase transien – sinyal dekat atau kuasi-periodik. Hal yang sama berlaku untuk vokal. Spektrum suara ini hampir secara eksklusif dicirikan oleh hanya beberapa frekuensi tertentu – garis – dan dengan demikian menghasilkan pola yang sangat sederhana yang berfungsi sebagai "tanda identitas".

Pengenalan akustik pola di alam dan teknologi terjadi terutama di domain frekuensi.

Pola frekuensi sinyal dekat-periodik dan kuasi-periodik – misalnya vokal – sangat sederhana karena hanya terdiri dari beberapa puncak kabur dengan ketinggian berbeda. Lanskap frekuensi-waktu suara dan vokal menyerupai hamparan paku dengan paku dengan ketinggian berbeda.

Sistem akustik manusia – telinga dan otak – berfungsi dengan cara yang hampir sama seperti yang disajikan dan dijelaskan di sini dalam Gambar. Otak manusia tidak menunggu sebuah musik berakhir sebelum memulai analisis frekuensinya, tetapi menganalisis musik secara terus-menerus. Kalau tidak, kita tidak akan bisa mendengar suara terus menerus. Seperti yang telah saya tunjukkan di bab terakhir, operasi waktu nyata ini tidak dilakukan melalui banyak jendela waktu yang berurutan (jendela) tetapi pada dasarnya di telinga melalui banyak jendela frekuensi paralel (filter, filter bandpass). Telinga manusia adalah penganalisis FOURIER, yaitu sistem, yang diatur berdasarkan frekuensi. Gambar 79 menjelaskan struktur rantai filter ini dan lokasinya.



Gambar 71: Kata "sejarah" sebagai urutan vokal dan konsonan

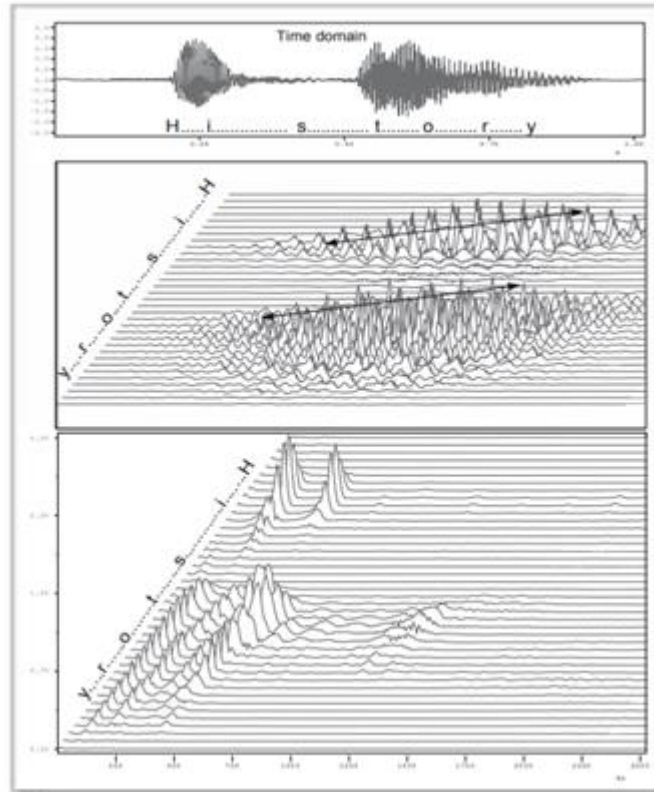
Selain itu, otak manusia harus memiliki sesuatu seperti perpustakaan atau database di mana banyak "tempat tidur paku" disimpan sebagai referensi. Bagaimana lagi kita bisa mengenali suara atau musik tertentu?

Proses akustik di telinga manusia jauh lebih kompleks daripada yang dijelaskan di sini. Sejauh ini, sebagian besar tidak diketahui bagaimana sinyal diproses di otak. Sudah diketahui area mana dari otak manusia yang bertanggung jawab untuk fungsi-fungsi tertentu, tetapi model yang tepat dari fungsi-fungsi ini belum dielaborasi.

Dalam domain waktu, vokal dan konsonan dapat dibedakan dengan mudah. Bentuk plosif (konsonan) dapat dikenali dengan jelas.

Namun, domain frekuensi dari kata lengkap "sejarah", tidak memberikan informasi yang relevan. Sekali lagi, representasi air terjun atau lanskap frekuensi-waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 72 dan Gambar 73 diperlukan.

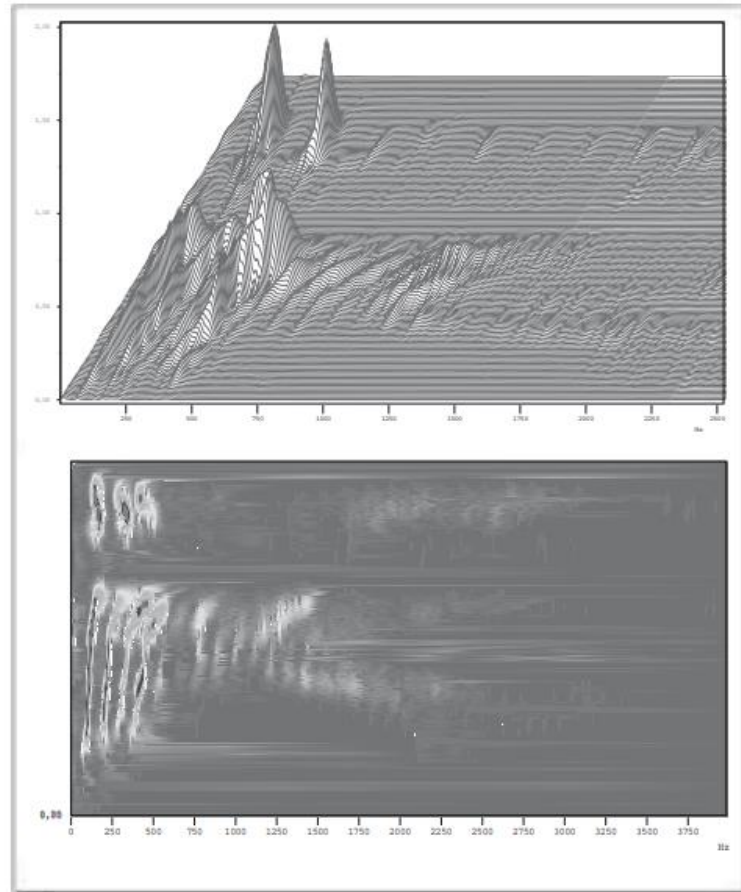
Tetapi tidak peduli apa detail di balik proses ini, satu hal yang pasti, itu adalah proses biofisik, atau lebih tepatnya, fenomena dari bidang fisika gelombang dan osilasi. Karena alam adalah guru besar ilmu-ilmu alam seperti teknik komunikasi, saya ingin membahas secara singkat prinsip-prinsip generasi dan persepsi bahasa.



Gambar 72: Kata "sejarah" sebagai representasi air terjun dan lanskap frekuensi-waktu

Di bagian atas Anda dapat melihat urutan lengkap kata dalam domain waktu, di bagian bawah representasi air terjun (domain waktu). Harap perhatikan bagian sinyal yang tumpang tindih dalam representasi air terjun. Mereka ditandai oleh dua panah. Urutan dimulai dengan plosif "h", diikuti oleh vokal "i". Vokal "i" dan "o" dapat dibedakan dengan jelas karena keduanya memiliki struktur hampir-periodik yang khas. Sibilant "s" juga dapat dikenali dengan jelas dalam domain waktu, tetapi hampir tidak dalam domain frekuensi.. Representasi waterfall digunakan untuk analisis frekuensi untuk menyelesaikan karakteristik non-periodik dan mendekati-periodik secara lebih efektif. Ini jelas dikenali dalam lanskap frekuensi-waktu.

Jenis analisis sinyal ini harus digunakan sehubungan dengan pola akustik dan pengenalan suara agar dapat mengidentifikasi kata tertentu berdasarkan urutan karakteristik konsonan dan vokalnya.



Gambar 73: Sonogram sebagai bentuk khusus dari lanskap frekuensi-waktu

Di atas Anda melihat varian lanskap frekuensi waktu yang disempurnakan dari kata "sejarah". Berbeda dengan Gambar 72, jendela FFT hanya tergeser secara minimal dibandingkan dengan jendela sebelumnya.

Sebanyak 100 spektrum direkam secara berurutan. Sekarang lanskap frekuensi waktu terlihat seperti lanskap yang tepat. Vokal diwakili oleh "cakram" yang jaraknya sama satu sama lain.

Sonogram di bagian bawah mewakili pola vertikal grafik di bagian atas. Tingkat amplitudo dibagi menjadi beberapa lapisan vertikal. Setiap lapisan memiliki warna yang berbeda, yang tentu saja tidak dapat Anda lihat pada cetakan hitam putih (dokumen elektronik menunjukkan warna pada layar).

Sonogram digunakan dalam penelitian suara dan bahasa untuk mengenali karakteristik akustik suara melalui pola grafik.

Bagaimana Ucapan, Nada, Dan Suara Dihasilkan Dan Dirasakan

Ada dua alasan mengapa saya ingin melakukan perjalanan singkat ke anatomi manusia dan, dalam konteks yang sama, ke fisika gelombang dan osilasi:

- Alam adalah pembimbing terbesar ilmu-ilmu alam seperti teknik komunikasi. Dalam perjalanan evolusi alam telah mengembangkan mekanisme persepsi yang memungkinkan berbagai spesies yang berbeda untuk bertahan hidup. Organ indera

manusia sangat sensitif dan merupakan sensor presisi yang jauh melampaui tiruan teknologi. Contoh yang baik adalah telinga manusia: bahkan sinyal akustik terlemah yang hanya sedikit di atas tingkat kebisingan yang disebabkan oleh bombardir gendang telinga dengan molekul udara dapat dirasakan.

- Korelasi fisiologis ini merupakan dasar akustik dan segala bentuk komunikasi lisan.

Insinyur untuk beberapa alasan sering menghindari dari fisika dan terutama dari biofisika meskipun teknik tidak lebih dari penerapan hukum ilmu alam yang masuk akal dan bertanggung jawab. Namun, para ahli teori dalam ilmu alam sejauh ini gagal menghasilkan model matematis dari persepsi sensorik seperti pendengaran, dan segala sesuatu yang tidak dapat didefinisikan secara matematis secara luas diabaikan dalam buku teks tentang teori teknik komunikasi.

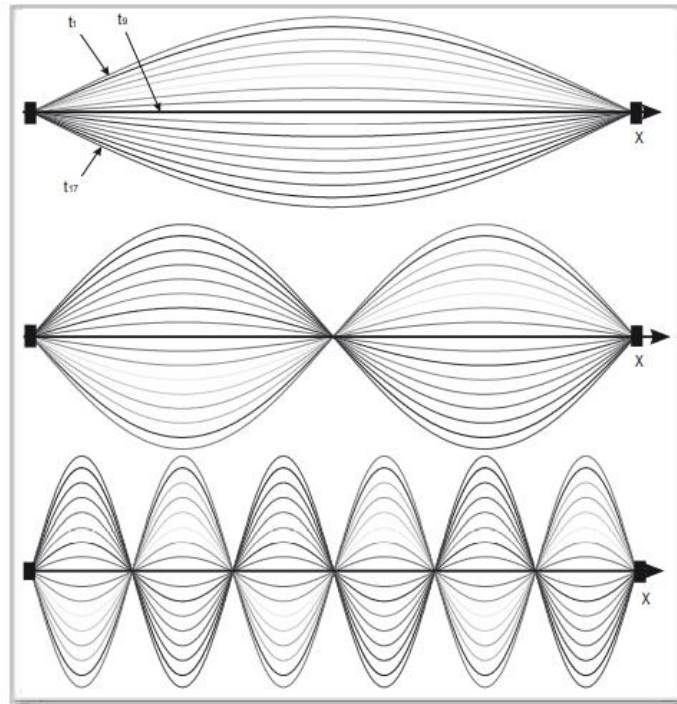
Tujuan saya adalah untuk mendemonstrasikan bagaimana suara dan bahasa dihasilkan dalam organ bicara dan bagaimana persepsi akustik di telinga manusia bekerja. Sebagai sorotan, kami akan mengembangkan studi kasus tentang sistem pengenalan suara berbantuan komputer yang sederhana.

Kita harus puas dengan model telinga manusia yang sangat sederhana karena persepsi akustik dan terutama pemrosesan sinyal oleh otak manusia begitu kompleks – seperti yang telah saya tunjukkan – sehingga sejauh ini relatif sedikit yang diketahui tentang hal ini. proses.

Bagaimanapun, itu semua berkaitan dengan fisika osilasi dan gelombang yang membutuhkan sedikit pengetahuan untuk dapat memahami proses ini. Harap diingat: tidak ada proses di alam atau di rekayasa yang akan bertentangan dengan hukum ilmu alam – mis. hukum fisika. Jadi mari kita mulai dengan hukum-hukum ini.

Jika kita ingin melakukan penelitian di bidang pembangkitan nada, bunyi, dan ucapan, kita harus bertanya pada diri sendiri apa yang diperlukan untuk menghasilkannya. Yang kita butuhkan pada dasarnya adalah osilator dan resonator rongga serta energi untuk memicu proses.

Definisi: osilator mekanik adalah sistem bergetar yang – setelah diberi pulsa mekanik – berosilasi dalam frekuensi alami karakteristiknya. Osilasi dapat dipertahankan jika energi yang relevan disuplai. Osilasi dapat dipertahankan secara efektif jika spektrum energi yang disuplai mengandung dalam sinyalnya frekuensi alami osilator. Contoh osilator mekanik adalah garpu tala, contoh lain adalah buluh di corong klarinet yang terus bergetar melalui aliran udara.



Gambar 74: Gelombang sinusoidal berdiri pada senar instrumen

Defleksi sinusoidal dari string disajikan dengan cara yang sangat berlebihan. Pada penggambaran di atas panjang tali adalah $\lambda/2$. Jalan ke atas dari kurva berlaku untuk momen t_1 , laju di bawahnya untuk momen t_2 dst. Momen t_9 menunjukkan bahwa tali tidak bergerak sementara. Dengan momen t_{17} , bottom run tercapai. Setelah itu seluruh proses berbalik. Pada t_{25} tali akan tidak bergerak lagi dan pada t_{33} situasi yang sama seperti pada t_1 akan tercapai. Ini berarti bahwa gelombang berdiri adalah kondisi dinamis, yaitu variabel waktu. Area tali yang tidak bergerak secara permanen disebut node, area defleksi terbesar disebut antinode.

Di barisan tengah frekuensinya dua kali lebih tinggi tetapi panjang gelombangnya setengah dari yang di atas. Seperti yang Anda lihat, hanya kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar (atas) yang dapat membentuk gelombang berdiri pada seutas tali. Itulah sebabnya senar gitar menghasilkan suara periodik (hampir) dengan timbre yang khas. "Kondisi" dasar sinusoidal yang digambarkan di atas saling tumpang tindih (seperti yang telah Anda lihat sehubungan dengan Prinsip FOURIER FP) ketika senar dipetik untuk menghasilkan defleksi gigi gergaji atau segitiga.

Sebuah resonator rongga (mekanis), misalnya, semua jenis seruling, pipa organ atau rongga resonansi gitar. Bergantung pada bentuk dan ukuran volume udara, frekuensi atau rentang frekuensi tertentu diperkuat dalam resonator, yang lain dilemahkan. Rentang frekuensi diperkuat sehingga gelombang berdiri dapat dihasilkan di dalam rongga. Transisi bersifat cair karena seruling dapat didefinisikan sebagai osilator atau resonator. Dalam kedua kasus itu adalah sistem bergetar.

Pertama-tama mari kita berkonsentrasi pada sistem getar satu dimensi, senar gitar. Di kedua ujungnya terpasang dengan kuat dan dengan demikian tidak dapat dibelokkan di

sana. Ketika senar dipetik selalu menghasilkan nada yang sama atau setidaknya nada yang sama. Mengapa demikian?

String bergetar tetap adalah osilator/resonator satu dimensi. Ketika dipetik – yang merupakan suplai energi – ia menghasilkan osilasi yang berjalan bebas dalam frekuensi karakteristiknya (frekuensi alami; osilasi yang berjalan bebas).

Jika string dirangsang dengan cara sinusoidal periodik dengan frekuensi yang bervariasi itu akan berosilasi dengan cara yang terkontrol. Dalam hal ini frekuensi yang mengarah ke defleksi ekstrim dalam bentuk gelombang sinusoidal berdiri - disebut frekuensi resonansi. Frekuensi alami identik dengan frekuensi resonansi tetapi secara teoritis sedikit lebih rendah karena redaman menyebabkan penundaan dalam proses osilasi.

Memetik senar berarti merangsangnya di semua frekuensi karena pulsa pendek satu kali pada dasarnya berisi semua frekuensi (lihat Gambar 47). Tetapi semua gelombang sinusoidal yang naik dan turun pada tali – yang dipantulkan di ujung tali – saling menghapus, kecuali gelombang yang diperkuat oleh interferensi dan yang menghasilkan gelombang berdiri dengan simpul dan antinode. Node adalah titik-titik dari string yang secara permanen tidak bergerak, yaitu yang tidak dibelokkan. Frekuensi alami ini selalu merupakan kelipatan integral dari frekuensi dasar, yaitu string berosilasi dalam cara yang hampir periodik dan dengan demikian menghasilkan nada harmonik. Panjang gelombang dapat dihitung dengan mudah dengan mengambil panjang tali L .

Definisi:

Panjang gelombang dari gelombang sinusoidal adalah jarak yang ditempuh oleh gelombang dalam periode panjang T . Untuk kecepatan gelombang c , berikut ini benar:

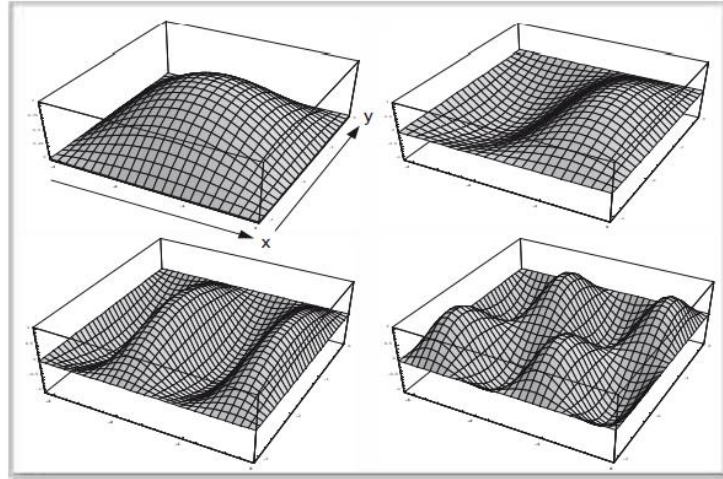
$c = \text{jarak} / \text{waktu} = \lambda / T$ dan sebagai $f = 1 / T$ mengikuti

$$c = \lambda \cdot f$$

Contoh:

Panjang gelombang dari gelombang suara ($c = 336 \text{ m/s}$) dari 440Hz adalah 0,74m.

Untuk gelombang berdiri pada dawai suatu instrumen, hanya gelombang sinusoidal yang panjang dawai merupakan kelipatan bilangan bulat dari $\lambda/2$ yang mungkin. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 74. Semua gelombang sinusoidal lainnya akan mereda di sepanjang tali atau saling menghilangkan.



Gambar 75: Mode osilasi sinusoidal dari membran persegi panjang

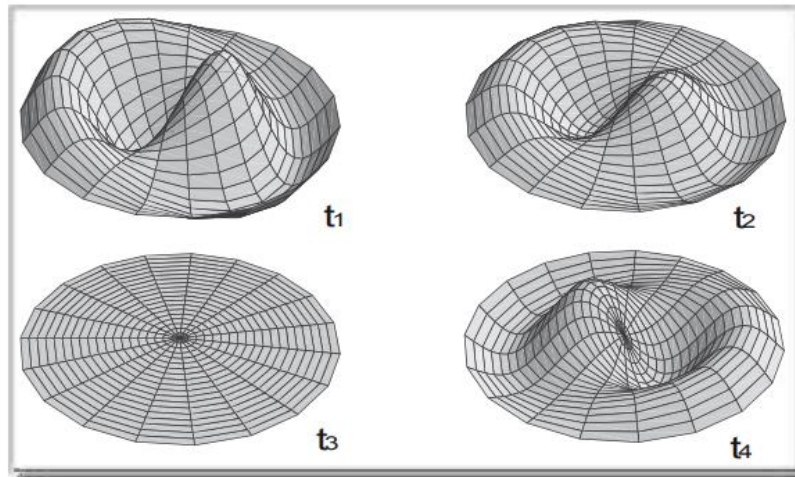
Di atas kiri potret gelombang berdiri (dasar) dengan $\lambda/2$ dalam arah x dan y . Perhatikan bahwa pada saat-saat berikutnya amplitudo berkurang, membran secara singkat datar dan kemudian dibelokkan ke bawah (dalam bentuk sinusoidal).

Kanan atas: $x = \lambda/2$ dan $y = \lambda/2$; kiri bawah: $x = \lambda/2$ dan $y = \lambda/2$; kanan bawah: $x = 2\lambda/2$ dan $y = 3\lambda/2$. Jika x dan y berbeda kedua arah juga memiliki panjang gelombang yang berbeda.

Kecepatan rambat gelombang nada dasar dengan demikian dapat dengan mudah ditetapkan secara eksperimental. Untuk nada dasar, panjang senar adalah $\lambda/2$ (lihat Gambar 74 di atas). Sekarang frekuensi f nada dasar ditetapkan dengan menggunakan mikrofon dan kecepatan rambat c dihitung dengan rumus di atas.

Sekarang mari kita beralih ke osilator/resonator dua dimensi. Membran persegi panjang yang ditambatkan dengan kuat dipilih sebagai contoh. Jika dipukul mode tertentu dari bentuk osilasi di atasnya. Modus osilasi muncul pada gilirannya dengan pembentukan gelombang berdiri, dalam hal ini namun dalam bentuk dua dimensi. Bentuk dasar dari mode osilasi ini adalah sinusoidal. Sekarang periksa dengan cermat Gambar 75 dan Anda akan memahami mode osilasi mana yang dapat muncul dan bagaimana mode bergantung pada panjang dan lebar membran persegi panjang. Kiri atas Anda melihat kasus di mana membran beresonansi dalam arah x dan y dengan $\lambda/2$.

Sebuah membran – dan inilah koin dan gelas yang beresonansi – dapat dilihat sebagai string "dua dimensi". Jika misalnya panjang membran persegi panjang tidak dalam hubungan bilangan bulat dengan lebar, osilasi alami atau frekuensi yang mungkin tidak dalam hubungan bilangan bulat dengan osilasi dasar tetapi bersama-sama membentuk spektrum garis (agak kabur). Ini adalah sinyal kuasi-periodik. Mereka sering tidak terdengar "harmonis". Bunyi kendang misalnya memiliki bunyi seperti bunyi perkusi yang khas ini.



Gambar 76: Osilasi membran pada drum

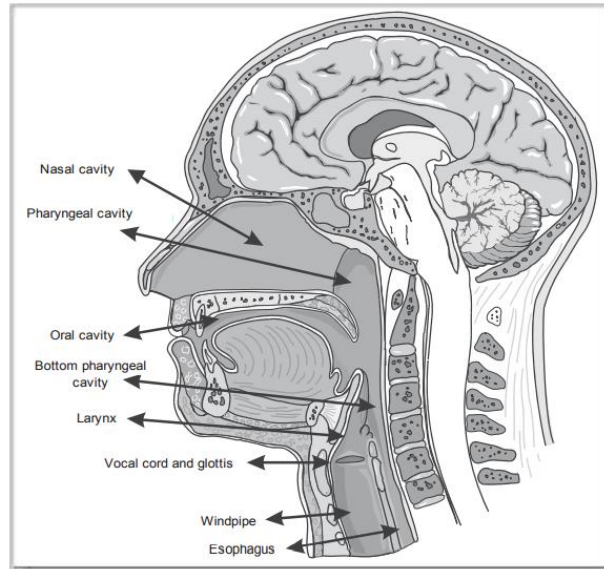
Menggunakan program ("Mathematica" dari Wolfram Research) deformasi membran drum setelah dipukul oleh stik drum dihitung untuk beberapa momen berturut-turut berdasarkan hukum fisika gelombang. Setiap Gambar mewakili superimposisi mode osilasi yang mungkin (frekuensi alami). Mode osilasi membran kencang tetap melingkar jauh lebih kompleks dan sulit dipahami daripada membran persegi panjang.

Membran biasanya menghasilkan sinyal kuasi-periodik. Contohnya adalah drum. Untuk alasan ini, ketukan drum terdengar kuasi-periodic dan bukan "harmonik" (mendekati-periodik), meskipun spektrumnya hanya terdiri dari "garis". Sehubungan dengan ini, lihat gelas anggur reverberating pada Gambar 58.

Akhirnya, kita sampai pada osilator tiga dimensi/resonator rongga. Gitar akustik memiliki ruang resonansi atau rongga resonator. Inilah yang memberi gitar timbre karakteristiknya. Tergantung pada bentuk dan ukuran ruang resonansi ini, gelombang akustik berdiri tiga dimensi dapat dibentuk seperti juga, misalnya, pada pipa organ apa pun atau alat musik tiup kayu. Gelombang berdiri tiga dimensi tidak dapat digambarkan secara memuaskan dalam bentuk grafik (gelombang berdiri dua dimensi juga digambarkan secara tiga dimensi). Untuk alasan ini tidak ada Gambar yang diberikan di sini.

Setiap instrumen senar dengan ruang resonansi bekerja dengan cara berikut: senar dipetik dan menghasilkan suara dengan spektrum mendekati periodik. Ruang resonansi/resonator rongga memperkuat frekuensi di mana gelombang berdiri dapat terbentuk di dalam rongga dan melemahkan frekuensi yang tidak demikian. Dari sudut pandang teknologi informasi, ruang resonansi dengan demikian setara dengan filter pembobotan.

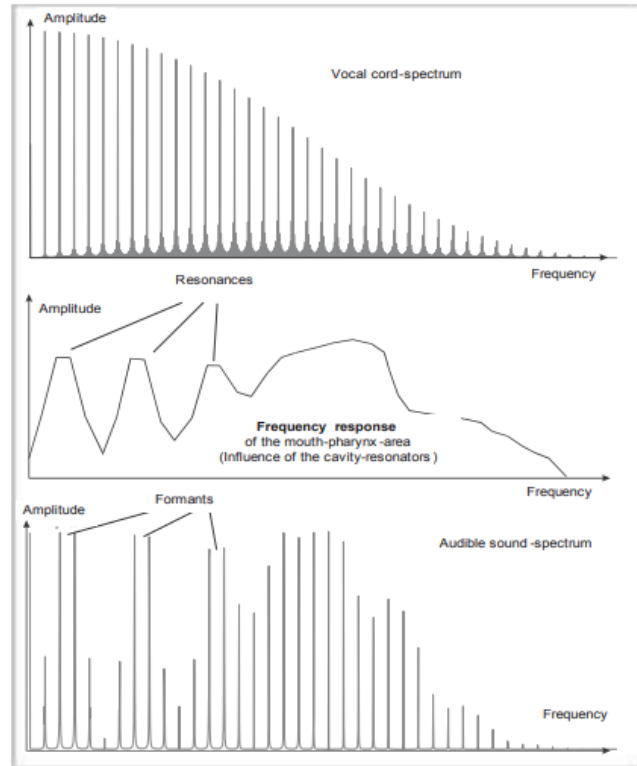
Sekarang mari kita coba menerapkan wawasan ini pada organ vokal manusia (lihat Gambar 77). Sumber energi adalah aliran udara dari paru-paru. Jika tekanan menumpuk di pita suara mereka adalah sesuatu antara string dan membran dan dalam hal ini mewakili osilator – mereka membuka, tekanan tiba-tiba dilepaskan, kemudian mereka menutup lagi dll. Dalam kasus vokal ini mendekati periodik, dalam kasus konsonan non-periodik.



Gambar 77: Saluran bicara manusia sebagai resonator rongga yang dapat dideformasi

Organ vokal manusia terdiri dari penyimpan energi – paru-paru – , osilator – pita suara – , dan rongga resonator yang dapat disesuaikan – rongga mulut dan tenggorokan. Paru-paru terutama berfungsi untuk menghasilkan aliran udara dengan tekanan yang cukup. Udara mengalir melalui glottis, ruang antara dua pita suara di ujung bawah laring. Jika tekanan meningkat, pita suara ditekan terpisah dalam sepersekian detik. Akibatnya tekanan tiba-tiba dilepaskan, pita suara menutup kembali, dan dalam kasus vokal atau dalam nyanyian ini mendekati periodik. Jika pita suara bergetar hampir secara periodik maka spektrum pita suara secara praktis merupakan spektrum garis.

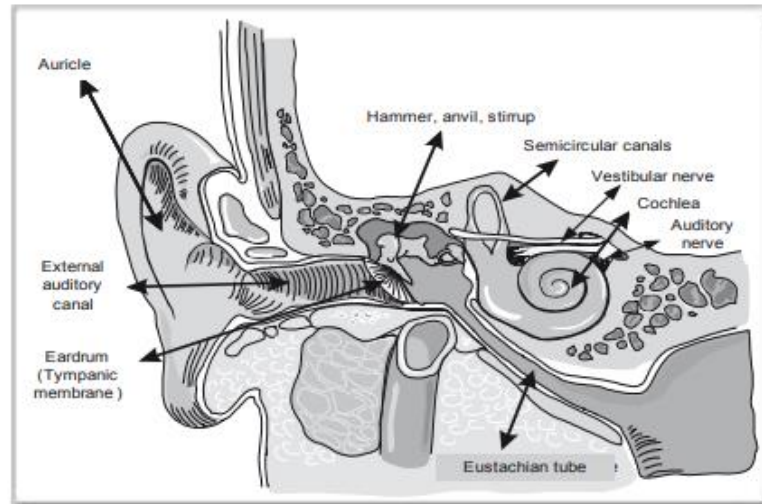
Gambar 77 menjelaskan peran resonator rongga mulut dan tenggorokan. Spektrum pita suara – seperti yang dijelaskan untuk gitar – dipengaruhi sejauh menyangkut frekuensi oleh rongga resonator. Ruang resonansi bertindak seperti "bank filter" dengan beberapa filter pass band paralel pada sinyal periodik dekat yang dihasilkan oleh pita suara. Dengan cara ini semua frekuensi yang terletak di dekat frekuensi formant akhirnya ditekankan. Dengan kata lain – evaluasi frekuensi/pembobotan sinyal pita suara dilakukan. Sebuah vokal milik setiap kombinasi dari empat sampai lima formant. Vokal karena itu harus harmonik, yaitu dekat-periodik karena ruang resonansi melakukan sinyal hampir-periodik terkontrol, berbeda dengan osilasi bebas (frekuensi alami) dari membran drum. Frekuensi spektrum pita suara yang terletak di daerah resonansi ini jelas "ditekankan" atau diperkuat. Semua yang lain ditundukkan.



Gambar 78: Resonansi dan forman

"Penekanan" atau amplifikasi berbasis resonansi dari berbagai area frekuensi menghasilkan forman. Kombinasi mereka sesuai dengan vokal yang berbeda. Ruang resonansi dapat seperti yang diarahkan oleh otak dikurangi atau ditingkatkan ukurannya dengan berbagai cara. Jika ini terjadi di satu tempat hanya forman yang berubah atau bergeser dengan cara yang berbeda. Ada tiga kemungkinan yang terlihat untuk mengubah resonator rongga – dengan rahang, bagian belakang lidah dan ujung lidah.

Keajaiban yang sebenarnya adalah pembentukan rongga mulut dan tenggorokan secara sistematis sebagai rongga resonator dan pengendalian aliran udara oleh individu sedemikian rupa sehingga dihasilkan sinyal-sinyal akustik yang memungkinkan terjadinya komunikasi antar manusia. Anak manusia membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk belajar menghasilkan rangkaian suara dan menghubungkan makna tertentu dengannya.



Gambar 79: Struktur organ pendengaran

Fluktuasi akustik tekanan diangkut ke gendang telinga. Hal ini dipengaruhi oleh mekanisme ossicles antara koklea dan gendang telinga. Tulang-tulang pendengaran menghasilkan gelombang perjalanan yang cerdas di koklea yang diisi dengan cairan.

Gelombang ini pada prinsipnya harus dilihat sebagai sinyal sapan – lihat Bab 6 “Analisis Sistem”. Seluruh spektrum frekuensi yang ada dalam fluktuasi tekanan tersebar di sepanjang kanal koklea, yaitu area tertentu dari sel-sel rambut sensorik berada bertanggung jawab untuk frekuensi tertentu.

Apa peran pendengaran dalam proses ini? Dapat ditunjukkan bahwa pengenalan pola yang sebenarnya dilakukan di sini atau setidaknya disiapkan di sini. Gambar 79 menunjukkan struktur organ pendengaran.

Fluktuasi akustik dalam tekanan gelombang suara mencapai gendang telinga dari daun telinga (efek corong) atau dari saluran pendengaran luar. Fluktuasi tekanan ini disampaikan oleh sistem mekanis tulang-tulang pendengaran – palu dan sanggurdi – ke "sub-sistem" yang paling penting, koklea.

Ini dimaksudkan sebagai deskripsi sederhana dari proses-proses ini. Koklea memiliki bentuk keseluruhan dari corong runcing yang digulung dan diisi dengan cairan. Sepanjang corong ini "rambut sensorik" didistribusikan yang terhubung ke sel saraf – neuron. Ini adalah sensor sinyal yang sebenarnya.

Fluktuasi tekanan menciptakan gelombang perjalanan yang mereda menjelang akhir koklea. Ini terjadi dengan cara tertentu yang disebut dispersi frekuensi. Komponen frekuensi tinggi dalam fluktuasi tekanan menyelaraskan diri di bagian gelombang yang berbeda dari elemen frekuensi rendah. Jadi bagian koklea yang terdefinisi dengan baik dengan rambut sensoriknya bertanggung jawab atas frekuensi rendah, sedang dan tinggi.

Menurut HELMHOLTZ sistem fenomenal ini berfungsi dalam analisis akhir seperti pengukur frekuensi buluh. Ini terdiri dari rantai garpu tala kecil. Setiap garpu tala hanya dapat bergetar dengan satu frekuensi, yaitu setiap garpu tala berosilasi secara sinusoidal! Frekuensi alami garpu tala ini meningkat terus menerus dari satu sisi ke sisi lain. Oleh karena itu yang berikut ini benar:

Telinga kita hanya dapat merasakan sinyal sinusoidal, yaitu telinga kita adalah penganalisis FOURIER.

Organ pendengaran kita mengubah semua sinyal akustik menjadi domain frekuensi. Seperti dapat dilihat dari Gambar 56 dan Gambar 58, pola spektral nada, bunyi, dan vokal terdiri dari beberapa baris yang kontras dengan progresi waktu. Ini berisi penyederhanaan pola yang sangat efektif atau, dalam istilah modern, kompresi data yang efisien. Otak kita perlu "hanya" untuk menghubungkan pola garis yang relatif sederhana dengan konsep tertentu.

Transformasi sinyal akustik ke dalam domain frekuensi melalui organ pendengaran kita pada saat yang sama menyiratkan penyederhanaan pola atau kompresi data yang sangat efektif.

Studi Kasus: Sistem Sederhana Untuk Pengenalan Suara

Prinsip fisiologis dasar yang dijelaskan di atas harus ditiru secara teknologi dalam proyek kecil. Kami akan menggunakan DASYLab untuk ini. Kami akan melebih-lebihkan sumber daya kami jika kami memilih terlalu banyak kata.

Untuk alasan ini, latihannya adalah sebagai berikut: Di gudang dengan rak tinggi, truk fork-lift harus dikontrol melalui mikrofon. Ini membutuhkan kata-kata "atas", "bawah", "kiri", "kanan" dan "berhenti". Jadi, kita membutuhkan mikrofon yang terhubung dengan kartu suara PC.

Atau, papan multi-fungsi profesional dengan mikrofon terpasang dapat digunakan. Untuk membuat tautan dengan perangkat lunak driver DASYLab diperlukan. Untuk ini, Anda memerlukan DASYLab versi industri.

Dalam contoh pertama, sampel bahasa harus direkam dan dianalisis secara akurat menggunakan rangkaian eksperimental dalam domain waktu dan frekuensi yang sesederhana mungkin. Seperti dijelaskan di atas pengenalan atau perbandingan pola jauh lebih mudah dalam domain frekuensi daripada di domain waktu. Yang penting adalah menetapkan fitur dari masing-masing lima pola frekuensi ini.

Perencanaan dan tahap percobaan awal:

- Mikrofon harus merespons hanya di atas tingkat suara tertentu, jika tidak, kebisingan latar belakang akan langsung direkam segera setelah sirkuit diaktifkan dan sebelum kata-kata diucapkan. Modul pemacu dan relai (Gambar 80) diperlukan untuk ini. Tingkat pemacu ini tergantung pada mikrofon dan harus dicoba dengan hati-hati.
- Tak satu pun dari kata-kata ini bertahan lebih dari satu detik. Berbeda dengan aliran bahasa, pada awalnya kami tidak merencanakan analisis "air terjun" atau analisis lanskap frekuensi waktu.
- Pengaturan dalam modul "FFT" memungkinkan pengaturan spektrum daya, spektrum kerapatan daya, analisis FOURIER dan representasi logaritmik dari spektrum dalam db (desibel) selain dari spektrum amplitudo yang (dengan spektrum fase) yang selama ini kita gunakan khusus.
- Catatan: Aplikasi "FFT kompleks dari fungsi nyata atau kompleks" akan dibahas di Bab 5.

- Percobaan beberapa kali dengan setiap kata. Perhatikan bagaimana perbedaan kecil dalam penekanan membuat diri mereka terasa. Untuk memastikannya, penting untuk menetapkan beberapa "pola frekuensi" untuk setiap kata untuk menghindari komponen acak sebagai tipikal. Sebuah spektrum referensi dengan spektrum setiap kata yang diucapkan harus dibandingkan, kemudian harus dipilih dari pola-pola ini.

Objek dari percobaan ini adalah pembentukan spektrum referensi. Spektrum kata-kata yang diucapkan ke mikrofon nantinya akan dibandingkan dengan spektrum referensi ini atau kesamaan dari spektrum yang diukur dan referensi akan ditetapkan. Tapi bagaimana kesamaan diukur?

Ada juga modul yang cocok untuk tujuan ini: Korelasi. Ini menentukan hubungan timbal balik (korelasi) atau kesamaan antara – dalam hal ini – dua spektrum melalui faktor korelasi. Nilai 0,74 berarti secara praktis kesamaan 74%, apa pun yang dirujuknya.

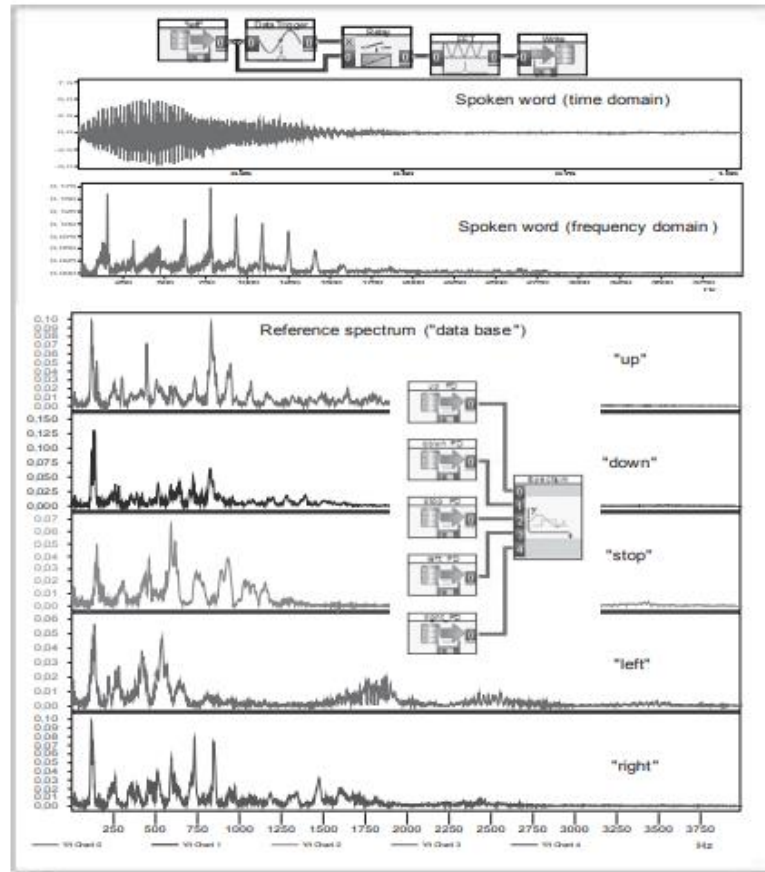
Kami menggunakan modul ini – agar tidak mengganggu studi kasus yang tidak perlu – dengan cara yang disederhanakan pada awalnya tanpa menganalisis lebih dekat fungsinya. Ini akan dilakukan di bagian berikut "Pengenalan pola".

Jika kita berhasil mencapai identifikasi yang kurang lebih berbeda dari kata yang diucapkan dengan tampilan digital berikutnya dari faktor korelasi menggunakan korelasi modul, studi kasus kita akan praktis selesai.

Karena bagaimanapun, setiap spektrum kata yang diucapkan memiliki beberapa kesamaan dengan setiap spektrum referensi, penting untuk memeriksa proses apa yang memberikan margin keamanan paling jelas antara kata yang diucapkan dan diidentifikasi dan kata-kata lainnya.

Tingkat kesalahan atau kepastian mungkin akan menjadi lebih kritis jika orang yang mengucapkan kata-kata tersebut berbeda dengan pencetus spektrum referensi. Apakah ada proses dimana sistem dapat disesuaikan dengan pembicara yang berbeda?

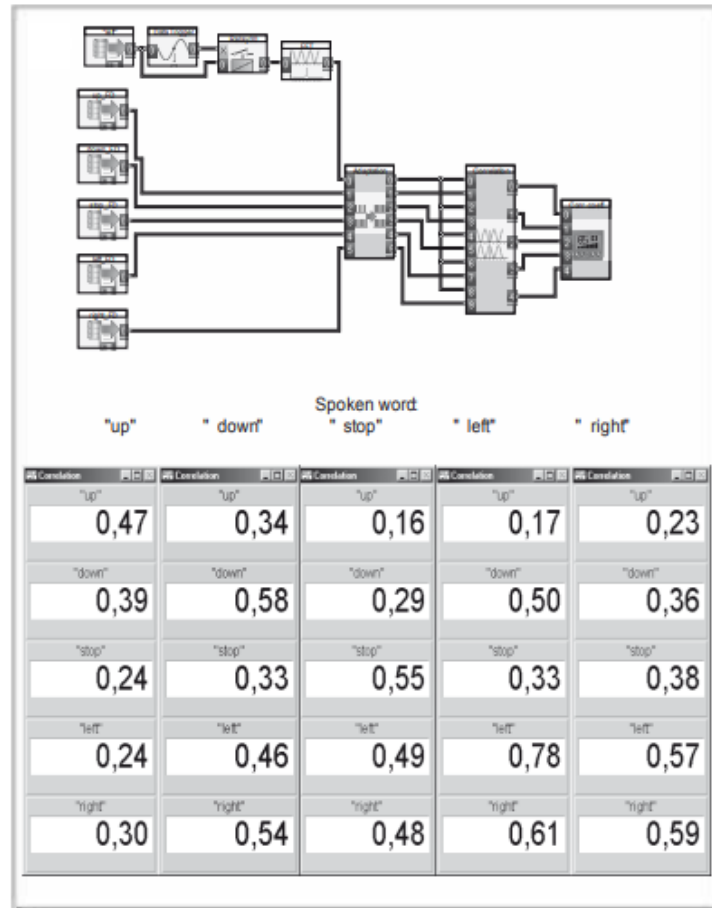
Dengan demikian ada ruang lingkup yang cukup besar untuk bereksperimen. Temuan harus menunjukkan bahwa kita berurusan di sini dengan salah satu sistem yang paling kompleks jauh dari menjalankan ilmu sekolah pabrik. Bukan tanpa alasan kelompok peneliti luar biasa yang bekerja di seluruh dunia pada solusi andal dari aplikasi pembunuh yang layak secara komersial ini. Terlebih lagi: sistem akustik kita sendiri tampaknya tak terkalahkan.



Gambar 80: Pengukuran teknis spektrum referensi (spektra amplitudo)

Di bagian atas Anda melihat sirkuit yang cocok untuk menampilkan dan menyimpan spektrum referensi. Di sini kata "naik" ditampilkan dalam domain waktu dan frekuensi. Pastikan sebelum menyimpan spektrum referensi Anda menetapkan file dengan benar dan mengatur jalur yang sesuai di menu modul "Membaca Data". Sangat penting untuk melanjutkan dengan hati-hati.

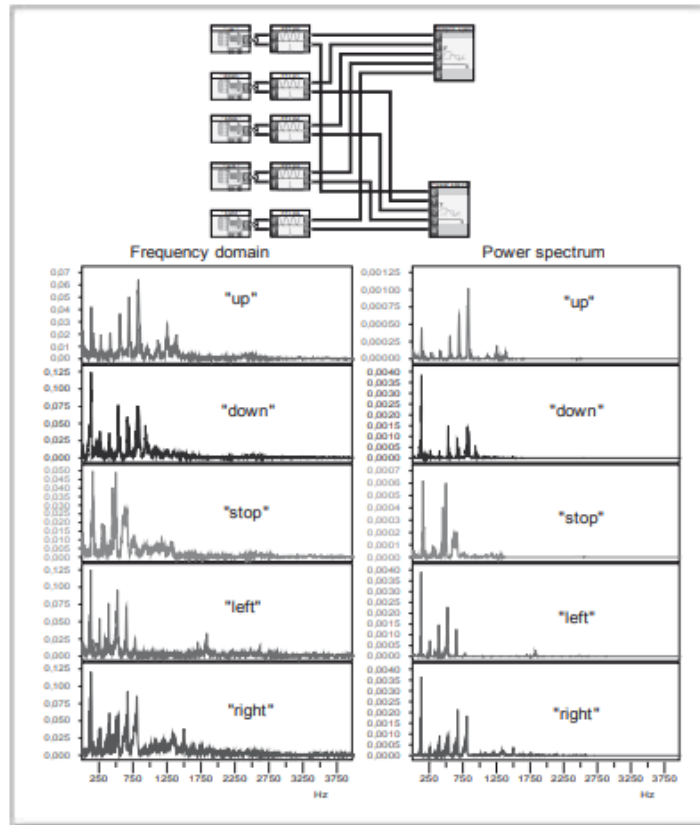
Agar dapat membandingkan spektrum secara kualitatif dan kuantitatif, Anda harus memasukkan kelima spektrum referensi dalam satu representasi. Untuk tujuan ini desain sirkuit bawah. Modul "Adaptasi" berfungsi untuk menyinkronkan data dan memeriksa apakah semua sinyal direkam dengan panjang blok dan laju sampling yang sama. Dalam hal ini, panjang blok dan laju sampel 4096 ditetapkan di bilah menu (A/D). Anda akan melihat bahwa sangat sedikit yang terjadi di atas 1000 Hz. Pilih fungsi lensa untuk memeriksa area spektrum ini lebih dekat.



Gambar 81: Pengenalan suara dengan pengukuran faktor korelasi

Kata-kata diucapkan satu demi satu dari atas ke bawah dan faktor korelasi untuk semua spektrum referensi diukur. Kata "benar" diakui paling tidak andal. Margin keamanan di sini sangat kecil. Secara diagonal Anda melihat faktor korelasi dari setiap kata yang diucapkan. Sistem sudah berfungsi dengan wajar.

Dalam percobaan Anda akan melihat betapa pentingnya modul "adaptasi". Spektrum referensi segera dimasukkan dan modul memberi sinyal EOF (akhir file). Spektrum kata yang diucapkan membutuhkan waktu lebih lama untuk muncul karena harus dihitung terlebih dahulu. Baru kemudian kelima faktor korelasi tersebut dihitung.



Gambar 82: Spektrum amplitudo dan spektrum daya

Di kolom sebelah kiri Anda melihat spektrum amplitudo dan di kolom sebelah kanan spektrum daya untuk sinyal yang sama. Anda mendapatkan spektrum daya dengan menghitung kuadrat amplitudo. Apa arti dalam hal ini?

Dalam spektrum amplitudo Anda mengenali "garis" frekuensi karakteristik yang berasal dari vokal dan yang naik di atas frekuensi lain yang kurang khas. Dengan mengkuadratkan amplitudo spektrum ini, frekuensi karakteristik menjadi lebih berbobot, frekuensi yang kurang penting diturunkan sehingga dapat diabaikan (lihat sisi kanan).

Anda sekarang harus memeriksa apakah tidak akan lebih baik karena alasan ini untuk melakukan pengenalan suara melalui spektrum daya. Spektrum daya sangat penting secara teoritis (teorema WIENER-KHINTCHINE) dalam bidang pengenalan pola.

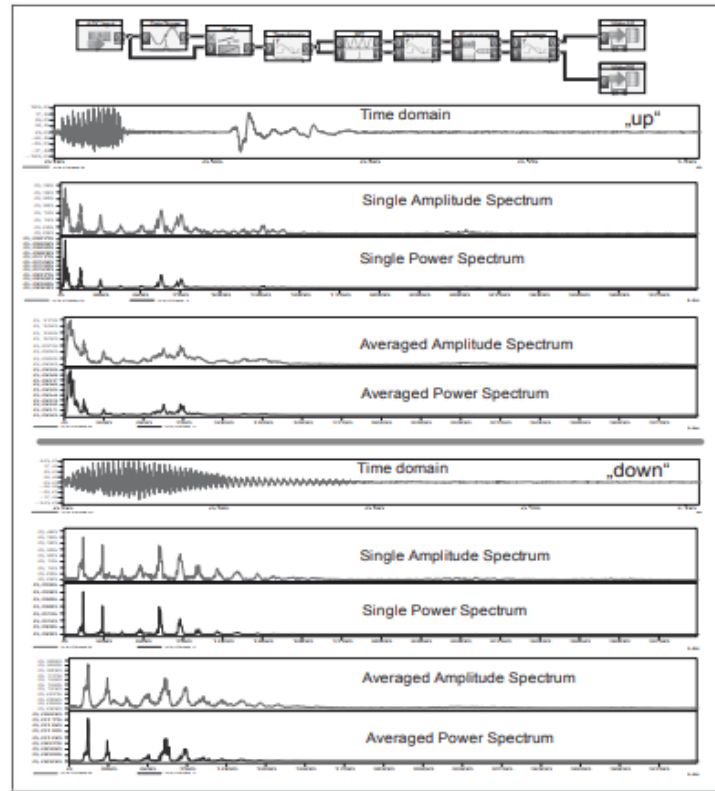
Fase Penyempurnaan Dan Pengoptimalan

Sistem yang ditunjukkan pada Gambar 81 pada prinsipnya sudah bekerja meskipun belum sempurna. Jika Anda bereksperimen dengannya, Anda akan melihat betapa mudahnya itu dapat "ditipu". Apa yang mungkin menjadi penyebab hal ini dan kemungkinan alternatif apa yang ada?

- Rentang frekuensi hingga 2000 Hz dihasilkan menurut pengukuran kami dari laju sampel dan panjang blok 4096. Resolusi frekuensi kira-kira 1 Hz karena Anda dapat dengan mudah memeriksa menggunakan kursor (langkah terkecil $df = 1$ Hz; lihat prinsip pengambilan sampel di Bab 9).

- Setiap fluktuasi suara dalam pengucapan lima kata melibatkan pergeseran frekuensi karakteristik dalam kaitannya dengan spektrum referensi. Dalam kasus resolusi frekuensi tinggi ini, faktor korelasi berfluktuasi karena frekuensi karakteristik tidak lagi identik. Oleh karena itu, seseorang harus mempertimbangkan bagaimana misalnya area frekuensi karakteristik dapat dirasakan dengan cara yang lebih "tidak pasti".
- Pada Gambar 82 perbedaan antara spektrum amplitudo dan spektrum daya dapat dilihat dengan jelas. Dengan mengkuadratkan amplitudo dalam spektrum daya, frekuensi karakteristik dengan amplitudo tinggi – yang berasal dari vokal – diperkuat secara tidak proporsional sedangkan elemen spektral yang kurang relevan dari konsonan ditekan secara tidak proporsional. Oleh karena itu, peningkatan (sedikit) dalam pengenalan suara dengan korelasi spektrum daya harus diperiksa.
- Alih-alih modul "korelasi" filter tepi curam dapat digunakan yang menyaring frekuensi karakteristik yang diharapkan. Sebuah "sisir filter" dengan modul "potong" dapat memeriksa masing-masing dari lima kata apakah ada frekuensi karakteristik dengan amplitudo yang sesuai. Namun, prosedur ini tampaknya agak sulit dibandingkan dengan korelasinya karena melibatkan banyak kesulitan dalam menyetel filter.
- Ide dasar apa yang dapat membantu proyek? Mungkin berguna untuk menemukan prosedur yang lebih toleran, mungkin menggunakan spektrum referensi "toleran", yang pada dasarnya adalah rata-rata spektrum setiap diucapkan beberapa kali, kata yang sama. Spektrum rata-rata mungkin lebih mengenali spektrum yang berbeda dari kata yang diucapkan.
- Proses ini dijelaskan dalam Gambar 83 dan Gambar 84 untuk lima kata. Metode ini dapat diperluas ke spektrum referensi amplitudo dan daya (kepadatan).
- Melihat spektrum amplitudo rata-rata dan spektrum kerapatan daya secara lebih rinci, jelas bahwa frekuensi tipikal dibandingkan dengan spektrum individu ditampilkan "lebih lebar". Dengan demikian, pengukuran korelasi mungkin lebih toleran terhadap sedikit variasi frekuensi yang disebabkan oleh pengucapan kata yang berbeda.

Dalam Bab 14 pendekatan yang sama sekali baru akan diperkenalkan untuk meningkatkan sistem pengenalan suara. Hal ini dilakukan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan. Jaringan saraf tiruan mewakili pergeseran paradigma dalam pemrosesan sinyal karena mereka dapat belajar dalam arti tertentu: jaringan saraf cocok dengan data nyata "terlatih" sampai memberikan hasil yang diinginkan.



Gambar 83: Metode toleransi untuk pengenalan suara

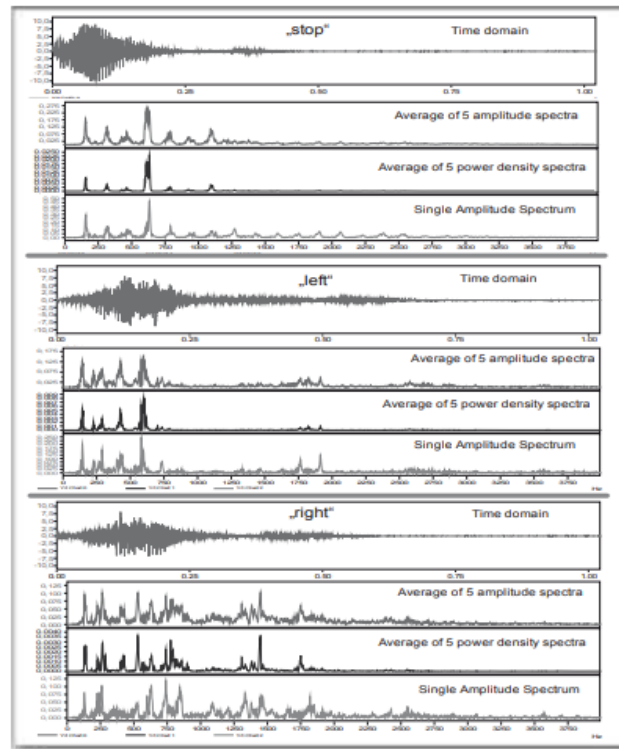
Metode menurut Gambar 81 memiliki beberapa kelemahan, dalam hal frekuensi harus secara khusus menganalisis ke "lengan" bahwa perubahan yang sangat kecil dalam nada vokal, yang memanifestasikan dirinya sebagai sedikit perubahan dalam frekuensi mempengaruhi secara signifikan faktor korelasi dan menghasilkan hasil yang salah dengan cepat.

Dalam mencari metode "stabil", menawarkan ide dengan rata-rata beberapa spektrum referensi dari kata yang sama untuk mencapai lebih banyak toleransi dalam pengenalan pola. Dengan demikian diharapkan dapat mengkristalkan apa yang khas dari spektrum referensi dengan lebih baik.

Di atas, rangkaian dapat ditunjukkan, dengan bantuan spektrum referensi rata-rata untuk amplitudo dan kerapatan daya yang dibuat dan disimpan. Dalam ini dan Gambar 84 dicatat untuk masing-masing dari lima kata, semua sinyal untuk domain waktu dan frekuensi.

Sebuah melihat lebih dekat pada spektrum ini menunjukkan bahwa spektrum rata-rata dengan baik kecenderungan umum semua spektrum lebih baik daripada spektrum mewakili sampel tunggal, yang selalu menyertakan "kekeliruan" atipikal-antara.

Anda harus mencoba untuk mencapai dengan sampel suara Anda sendiri pengenalan kata yang ditingkatkan!



Gambar 84: Pengenalan suara yang canggih untuk truk penumpuk

Dalam semua spektrum referensi dari Gambar 83 dan Gambar 84, informasi utama jelas berada dalam kisaran hingga 2000 Hz, ini adalah kelemahan lain untuk prediksi selain fakta bahwa di sini, karena tidak ada lanskap frekuensi-waktu ("pola papan kuku) Basis deteksi dapat digunakan.

Jika Anda berhasil membuat dengan informasi ini suatu sistem dapat didemonstrasikan dengan "akurasi" yang wajar. Anda telah menunjukkan pengetahuan tingkat lanjut tentang tema "sinyal - proses - sistem".

Jadi, hampir tidak ada batasan untuk kreativitas dan inspirasi Anda dan DASYLab memungkinkan untuk memeriksa hampir semua ide dengan beberapa klik mouse. Solusi yang berhasil, bagaimanapun, mengharuskan Anda untuk melanjutkan secara sistematis. Bereksperimen secara acak tidak akan membuahkan hasil.

Penting untuk melanjutkan sesuai dengan metode ilmiah. Pertama, sejumlah kemungkinan berdasarkan ide yang dapat dijelaskan secara fisik harus dipertimbangkan. Mereka harus hati-hati dicoba secara eksperimental dan dilaporkan.

Solusi sempurna tidak mungkin atas dasar ini, hanya yang terbaik dalam arti relatif. Otak kita menggunakan metode tambahan yang sangat efektif, misalnya, dan mengenali kata yang diucapkan dari konteksnya. Di sinilah bahkan DASYLab memiliki keterbatasan.

Pengenalan Pola

Pada dasarnya, dalam memperkenalkan korelasi kita telah mengambil fenomena mendasar komunikasi: pengenalan pola. Pemancar tidak dapat berkomunikasi dengan penerima kecuali ada kumpulan pola yang menyampaikan makna atau telah disepakati.

Tidak peduli apakah itu proses modulasi teknis atau liburan ke luar negeri dengan masalah bahasa yang menyertainya.

Agar Anda tidak perlu menggunakan modul "korelasi" dengan cara yang tidak tepat, kami akan menunjukkan di sini betapa mudahnya pengenalan pola (walaupun tidak selalu begitu mudah!). Bagaimana faktor korelasi – yaitu “kesamaan dua sinyal yang diberikan sebagai persentase” – dihitung oleh komputer?

Gambar 85 memberikan dasar penjelasan. Bagian atas dimaksudkan untuk mengingatkan Anda bahwa komputer pada kenyataannya memproses string angka secara aritmatika dan tidak mewakili fungsi kontinu. String angka dapat direpresentasikan secara grafis sebagai urutan data pengukuran tingkat tertentu.

Faktor korelasi untuk dua sinyal yang lebih rendah sekarang harus ditentukan. Sinyal yang lebih rendah akan menjadi sinyal referensi. Kami tidak tertarik apakah itu domain frekuensi atau waktu. Demi kesederhanaan, kami membatasi jumlah data pengukuran menjadi 16 dan mengkuantisasi sinyal, dengan mengizinkan hanya 9 nilai integer yang berbeda dari 0 hingga 8.

Sekarang kita akan mengalikan pengukuran satu di bawah yang lain dengan satu sama lain. Semua produk kemudian dijumlahkan. Hal ini mengakibatkan

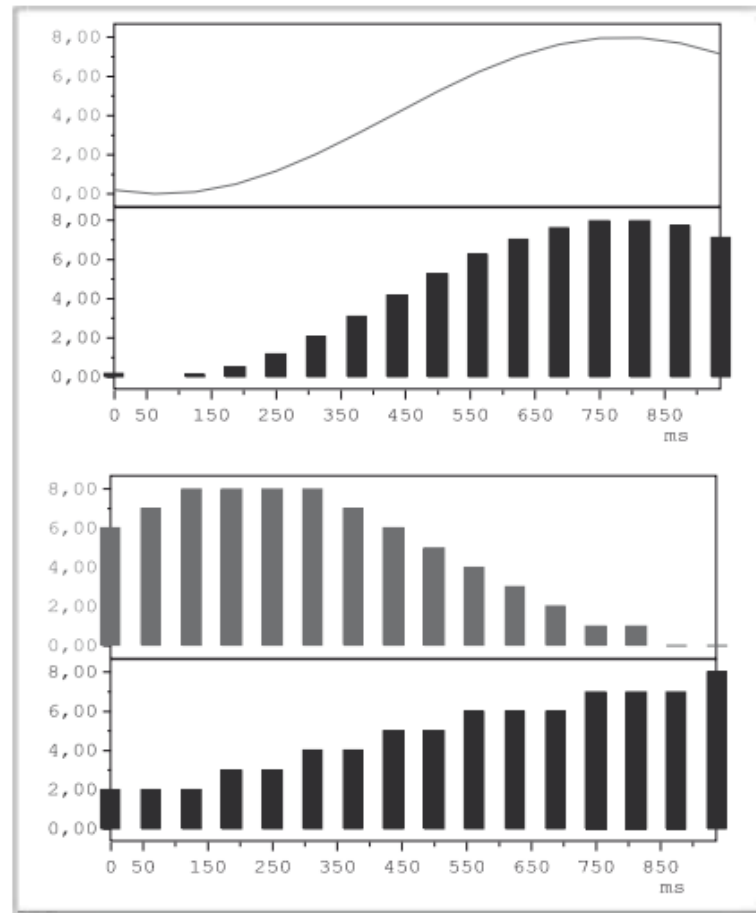
$$2 \cdot 6 + 2 \cdot 7 + 2 \cdot 8 + 3 \cdot 8 + 3 \cdot 8 + 4 \cdot 8 + \dots + 7 \cdot 1 + 7 \cdot 1 + 0 \cdot 7 + 0 \cdot 8 = 273$$

Angka ini sudah mengatakan sesuatu tentang kesamaan; semakin besar semakin banyak kesepakatan yang seharusnya ada.

Tetapi bagaimana kita "menskalakan" nilai ini sehingga terletak di antara 0 dan 1? Karena sinyal yang lebih rendah diambil sebagai sinyal referensi, "kesamaan antara sinyal referensi dan sinyal itu sendiri" ditentukan dengan cara yang sama. Ini member

$$2 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 3 + 3 \cdot 3 + 4 \cdot 4 + \dots + 7 \cdot 7 + 7 \cdot 7 + 7 \cdot 7 + 8 \cdot 8 = 431$$

Pada 431 kesepakatan akan menjadi 100% atau 1,0. Dengan membagi bagian atas dengan angka yang lebih rendah (perhitungan menggunakan aturan tiga) kami memperoleh $271/431 = 0,63$, yaitu kesamaan 63% antara dua sinyal atau segmen sinyal.



Gambar 85: Perhitungan korelasi atau faktor korelasi

DASYLab mewakili sinyal sebagai fungsi kontinu dengan menghubungkan titik pengukuran satu sama lain. Jika Anda melihat lebih dekat di bagian atas Anda akan melihat garis lurus antara dua titik pengukuran. Meskipun ini meningkatkan kejelasan, ini menunjukkan secara menipu bahwa kita berada di dunia analog.

Apa yang dimaksud dengan kesamaan di sini? Di satu sisi (di sini) semua pengukuran positif. Selain itu, mereka memiliki dimensi yang sama. Dalam dua segmen kecil, sinyal berkembang dengan cara yang kurang lebih sama.

Latihan pada Bab 4

Agar dapat melakukan latihan berikut, Anda memerlukan papan multi-fungsi atau kartu suara dengan driver DASYLab yang sesuai. Versi DASYLab S (versi pendidikan), di mana sinyal akustik dapat langsung dimasukkan melalui kartu suara adalah yang paling disukai. Anda dapat memiliki akses jika diperlukan untuk menyimpan file ucapan (*.ddf).

Latihan 1

- (a) Cobalah untuk mengenali di layar segmen vokal dan konsonan seperti pada Gambar 67 melalui file .ddf dari kata yang diucapkan.
- (b) Kembangkan sirkuit yang dengannya Anda dapat menganalisis berbagai segmen ini kurang lebih secara terpisah.
- (c) Rekam kata tertentu beberapa kali pada interval yang lebih lama dan bandingkan spektrumnya.
- (d) Rekam kata tertentu yang diucapkan oleh berbagai orang dan bandingkan spektrumnya.
- (e) Dalam aspek apa spektrum referensi yang akan dipilih?
- (f) Apa keuntungan memilih spektrum daya pengaturan daripada spektrum amplitudo? Frekuensi mana yang ditekankan dan mana yang ditekan?

Latihan 2

- (a) Merancang sebuah sistem untuk menciptakan lanskap frekuensi-waktu bicara (lihat Gambar 72).
- (b) Bagilah sinyal menjadi blok-blok berjendela yang semakin kecil dan tumpang tindih dan amati perubahan dalam lanskap frekuensi-waktu.
- (c) Mewakili lanskap frekuensi-waktu sebagai pola dasar paku dengan memilih representasi batang dari sinyal (lihat Gambar 70).
- (d) Mewakili lanskap frekuensi-waktu sebagai sonogram (lihat Gambar 73). Atur skala warna sedemikian rupa sehingga area dengan amplitudo yang berbeda direpresentasikan secara optimal.
- (e) Lakukan penelitian (misalnya di Internet) untuk mengetahui kegunaan sonogram dalam sains dan teknologi.
- (f) Bagaimana vokal dan konsonan dapat dibedakan dalam sonogram?

Latihan 3

- (a) Mencoba merancang sistem untuk pengenalan akustik orang ("pembuka pintu" di bidang keamanan).
- (b) Kemungkinan teknis apa yang dapat Anda pikirkan untuk mengecoh sistem semacam ini?
- (c) Tindakan apa yang dapat Anda ambil untuk mencegah hal ini?

Latihan 4

Lakukan percobaan yang berkaitan dengan Gambar 83 dan Gambar 84 dan coba kembangkan sistem pengenalan suara yang disempurnakan untuk lima kata. Berpikir kreatif dan mencoba menemukan solusi baru jika memungkinkan.

BAB 5 PRINSIP SIMETRI

Simetri adalah salah satu elemen struktural terpenting di alam. Ruang adalah simetris yaitu tidak ada arah yang diberikan preferensi dalam pengertian fisik dan kami menuntut dan menemukan hampir semua partikel unsur (misalnya elektron dengan muatan unsur negatifnya) objek "gambar cermin" (misalnya positron dengan muatan unsur positif). Untuk alasan simetri ada materi dan antimateri.

Untuk Alasan Simetri: Frekuensi Negatif

Sinyal periodik tidak dimulai pada $t = 0$ s. Ia memiliki masa lalu dan masa depan dan keduanya praktis simetris dengan masa kini.

Namun, spektrum (sampai sekarang) selalu dimulai pada $f = 0$ Hz. Setara dengan masa lalu akan menjadi "frekuensi negatif" dalam domain frekuensi. Frekuensi negatif tampaknya tidak masuk akal karena tampaknya tidak mungkin untuk menafsirkannya secara fisik. Tapi kita harus mengambil prinsip simetri alam cukup serius untuk mencari efek di mana frekuensi negatif mungkin memberikan kunci untuk pemahaman.

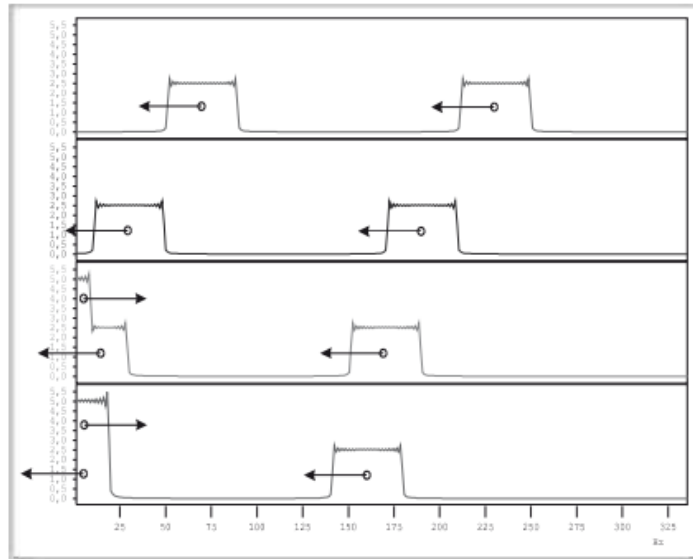
Gambar 86 menjelaskan efek semacam ini. Untuk membangkitkan rasa ingin tahu Anda, perhatikan dengan cermat Gambar 45 sekali lagi. Perkembangan spektrum menjadi semakin asimetris karena durasi sinyal t semakin dibatasi. Ini memerlukan penjelasan karena tidak ada yang setara dengan ini dalam domain waktu.

Kami bermaksud untuk membuktikan secara eksperimental bahwa asimetri dapat dijelaskan dan diimbangi, seolah-olah, jika frekuensi negatif dan amplitudo negatif diizinkan. Secara fisik frekuensi negatif dan positif harus bekerja bersama, masing-masing mewakili setengah energi.

Catatan: Mari kita lihat lebih dekat proses pengukuran untuk menentukan waktu misalnya durasi periode T dan/atau frekuensi melalui $f = 1/T$. Pertama, titik referensi waktu dipilih, di sini tepatnya maksimum positif dari sinyal sinusoidal. Mulai dari titik acuan ini, titik waktu ditentukan di mana sinyal sinusoidal (periodik) mencapai nilai ini secara tepat lagi. Proses pengukuran dapat dilakukan dalam dua arah yang berbeda. Kedua pengukuran memberikan hasil yang sama. Dalam arti fisik mereka berbeda dalam kaitannya dengan titik acuan, satu pengukuran dilakukan ke kanan ke "masa depan" dan yang lain ke kiri ke "masa lalu". Kedua pengukuran bayangan cermin dari titik acuan masing-masing dapat dikodekan dengan tanda positif atau negatif dari durasi periode T . Pertimbangan yang mungkin tampak agak sederhana ini sesuai dengan interpretasi pengukuran objek kuantum. Dengan demikian, apa pentingnya hasil pengamatan? Cukup (kode) informasi!

Bukti Keberadaan Fisik Frekuensi Negatif

Gambar 86 memberikan indikasi pertama keberadaan fisik frekuensi negatif. Melalui trik "konvolusi" dari fungsi Si (lihat Bab 10) – dua pita frekuensi dari sinyal yang diberikan semakin bergeser ke kiri dalam arah $f = 0$ Hz. Apa yang akan terjadi ketika $f = 0$ Hz akhirnya terlampaui?



Gambar 86: Refleksi frekuensi?

Sinyal yang sangat kompleks – kurva yang dalam domain waktu tidak menarik bagi kita di sini – menghasilkan spektrum yang terdiri dari dua pita frekuensi yang terpisah, sama curam dan lebar. Dengan manipulasi sinyal yang terampil, kedua pita frekuensi dipindahkan selangkah demi selangkah ke kiri ke arah $f = 0$ Hz – tanpa mengubah lebar atau jarak di antara keduanya. Apa yang terjadi ketika pita frekuensi yang lebih rendah naik di atas $f = 0$ Hz? Dalam tiga Gambar bawah dapat dilihat bahwa "spektrum negatif" muncul di area positif seolah-olah dipantulkan dan "tumpang tindih" yaitu ditambahkan ke area positif. Ketika frekuensi dipindahkan lebih jauh, "pita frekuensi positif" "bergerak" lebih jauh ke kiri, "pita frekuensi negatif" di sisi lain bergerak lebih jauh ke kanan.

Frekuensi yang sebelumnya lebih rendah sekarang menjadi lebih tinggi dan sebaliknya. Gambar yang paling menarik adalah tanpa diragukan lagi yang ada di bawah. Dalam hal ini area positif dan negatif tumpang tindih sedemikian rupa sehingga karakteristik low pass kiri terlihat jelas. Jadi lowpass sampai batas tertentu merupakan filter bandpass dengan frekuensi menengah $f = 0$ Hz, virtual – dan seperti yang akan kita tunjukkan – bandwidth fisik adalah dua kali lipat bandwidth yang terlihat di sini. Jika tidak ada frekuensi negatif, pita frekuensi secara bertahap akan semakin terputus dan akhirnya menghilang!

Hal ini, bagaimanapun, tentu tidak terjadi. Bagian pita frekuensi yang mencapai daerah negatif di atas $f = 0$ muncul pada sumbu vertikal seolah-olah kembali "dipantulkan" di daerah positif. Apakah arah pergerakan pita frekuensi telah berubah dan apakah semua frekuensi yang sebelumnya rendah sekarang menjadi tinggi dan sebaliknya? Atau apakah

nilai absolut dari frekuensi negatif masih diperhitungkan? Atau apakah pita frekuensi yang simetris dengan domain positif seperti bayangan cermin bergerak dari domain negatif ke positif dan sebaliknya?

Gambar paling bawah dalam Gambar 86 tentu saja yang paling menarik. Dalam kasus pita frekuensi sebelah kiri itu adalah karakteristik lowpass bandwidth yang persis setengah dari bandwidth asli, yaitu sesuai dengan bandwidth dari pita kanan. Di sisi lain kurva amplitudo dua kali lebih tinggi. Filter lolos rendah dengan demikian tampaknya memiliki "kurva amplitudo virtual" yang dua kali lebih besar dari bandwidth yang terlihat dalam spektrum dengan frekuensi positif. Dimungkinkan untuk menunjukkan bahwa bandwidth "virtual" ini adalah bandwidth fisik sebenarnya. Ini mengikuti dari UP. Oleh karena itu, jika rentang filter dimulai pada $f = 0$ Hz, filter lolos rendah pada saat itu akan memiliki kecuraman tepi yang sangat besar. Namun justru hal ini dikesampingkan oleh UP. Hal ini juga diungkapkan oleh domain waktu (lihat Bab 6 di bawah judul "Transien").

Sinyal cerdas dari Gambar 86 dihasilkan dalam domain waktu melalui fungsi Si. Ini jelas jika Anda melihat sekali lagi pada Gambar 48 dan Gambar 49. Bentuk sinyal ini tampaknya semakin penting dan timbul pertanyaan apakah fungsi Si juga ada dalam rentang frekuensi negatif. Jawabannya adalah "ya" jika kita mengakui frekuensi negatif dan amplitudo negatif. Dengan demikian, Prinsip Simetri antara domain waktu dan frekuensi ditunjukkan dengan jelas.

Dalam Gambar 87 di atas kita melihat sekali lagi spektrum 3D dari pulsa persegi panjang sempit (berkala). Perhatikan baik-baik pada "bidang permainan" dari sinyal sinusoidal, khususnya di mana pulsa persegi panjang simetris dengan $t = 0,5$ s. Karena faktor tugas pulsa t/T kira-kira $1/10$, 0 pertama terletak pada harmonik ke-10. Amplitudo dari 10 harmonik pertama pada $t = 0,5$ s pada "lapangan bermain" mengarah ke atas, yang dari 11 hingga 19 mengarah ke bawah, lalu ke atas lagi dll. Akan lebih baik untuk memasukkan amplitudo spektrum amplitudo di detik (sektor keempat dll.) (11 hingga 19) mengarah ke bawah alih-alih

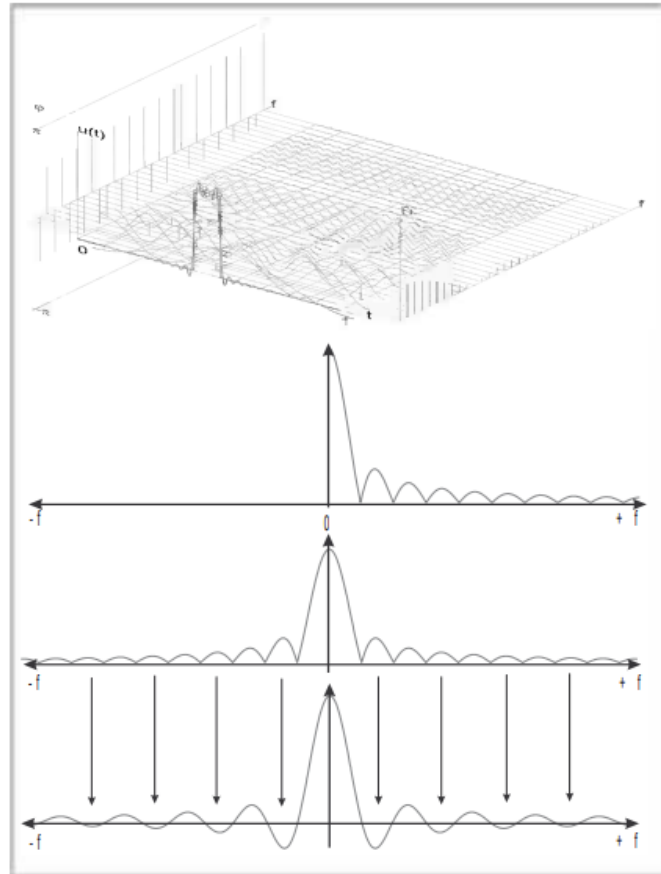
Dalam Gambar 87 (tengah) Anda melihat spektrum amplitudo kontinu dari pulsa persegi panjang satu kali. Jika kurva ditarik ke bawah di sektor ke-2, ke-4, ke-6 dst., itu akan mulai terlihat pada Anda. Apa yang Anda lihat adalah setengah simetris kanan dari fungsi Si. Last but not least jika kita menggambarkan fungsi Si secara simetris ke arah kiri dalam rentang frekuensi negatif, kita memperoleh fungsi Si total (tepatnya, hanya setengahnya karena setengah energi dialokasikan ke frekuensi negative).

Latar belakang pengetahuan:

Apa yang telah kami temukan di sini melalui "eksperimen" – simulasi yang dilakukan di sini dengan sistem virtual di dunia nyata akan menghasilkan hasil yang persis sama dengan menggunakan alat ukur yang sesuai – disediakan secara otomatis oleh matematika jika perhitungan dilakukan di tempat yang sesuai. skala (pesawat GAUSSian yaitu bilangan kompleks).

Mengapa matematika (dari transformasi FOURIER) memberikan hasil ini?

Jika perhitungan didasarkan dari awal pada premis fisik yang benar dengan kondisi marginal nyata, semua perhitungan matematis lebih lanjut menghasilkan hasil yang benar karena operasi matematika yang digunakan pada dasarnya bebas dari kontradiksi. Namun, tidak setiap operasi matematis dapat ditafsirkan secara fisik.



Gambar 87: Spektrum simetris

Atas: representasi pulsa persegi panjang (periodik) dengan faktor tugas pulsa $t/T = 1/10$ dalam domain waktu dan frekuensi. Amplitudo dari 9 harmonik pertama mengarah ke atas pada "bidang permainan" sinyal sinusoidal di pusat pulsa ($t = 0,5$ s) dalam arah pulsa, 9 harmonik berikutnya dengan kontras mengarah ke bawah dll. Bawah : representasi spektrum amplitudo (satu kali, yaitu pulsa persegi panjang non-periodik) dengan frekuensi dan amplitudo negatif. Sebuah "transformasi FOURIER simetris" dari waktu ke domain frekuensi dan sebaliknya sekarang hasil. Perhatikan bahwa sekarang informasi fase juga terkandung dalam spektrum amplitudo.

Fungsi persegi panjang dalam domain waktu/domain frekuensi dengan demikian menghasilkan fungsi Si dalam domain frekuensi/domain waktu jika karena alasan simetri frekuensi negatif dan amplitudo negatif diperbolehkan dan diberi bobot yang sama di samping nilai positif.

Semua frekuensi dan pita frekuensi yang terjadi dalam domain frekuensi positif murni muncul secara simetris dalam bentuk bayangan cermin dalam domain frekuensi negatif. Untuk alasan yang berkaitan dengan energi kurva hanya "setengah tinggi".

Prinsip Simetri SP:

Hasil transformasi FOURIER dari domain waktu ke domain frekuensi dan dari domain frekuensi ke domain waktu sebagian besar identik ketika frekuensi dan amplitudo negatif diterima. Sebagai hasil dari metode representasi ini, representasi sinyal dalam domain frekuensi sebagian besar sesuai dengan domain waktu.

Menurut ini hanya satu "sinyal" tunggal yang memiliki garis spektral tunggal dalam spektrum frekuensi simetris: tegangan DC (offset) di mana $f = 0$ Hz berlaku sehingga $+f$ dan $-f$ bertepatan. Di sisi lain, setiap sinus memiliki dua frekuensi $+f$ dan $-f$ yang simetris dengan $f = 0$ Hz. Dalam kasus sinus, amplitudo negatif harus dimiliki oleh salah satu dari dua frekuensi karena alasan simetri. Dalam kasus cosinus – yaitu sinus dengan fase yang dipindahkan oleh $/2$ rad atau $T/4$ yang dipindahkan dalam waktu – simetrinya lebih sempurna: kedua garis menunjuk ke satu arah.

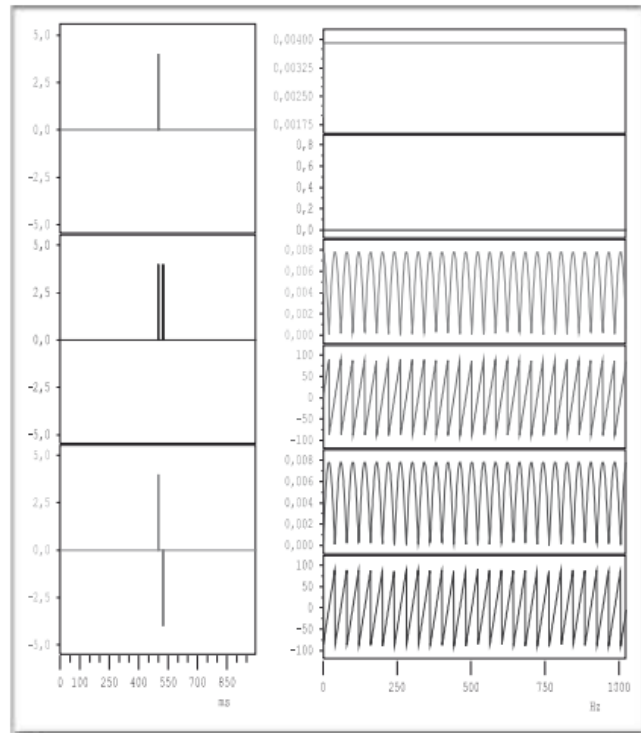
Setengah pita frekuensi dari filter lolos rendah yang terletak pada rentang frekuensi negatif disebut "pita sisi bawah". Ini adalah "gambar cermin" dari "pita sisi atas" dalam kisaran positif.

Sekarang mungkin untuk menjelaskan bagaimana "distorsi simetri" dalam Gambar 45 (bawah) muncul. Rentang frekuensi negatif menonjol ke dalam rentang frekuensi positif dan ditambahkan ke frekuensi positif. Ini paling terlihat di sekitar sumbu nol.

Sebaliknya, rentang frekuensi positif juga menonjol ke negatif dan tumpang tindih dengannya sehingga menghasilkan dua bidang spektral simetris bayangan cermin sepenuhnya pada sumbu nol.

Melalui Prinsip Simetri SP kami telah sampai pada deskripsi yang disederhanakan dan terpadu dari domain waktu dan frekuensi. Selain itu metode representasi ini juga mengandung lebih banyak informasi. Jadi "amplitudo negatif" menunjukkan perkembangan fase yaitu ke posisi relatif dari sinyal sinusoidal.

Sejujurnya: tidak selalu dapat diasumsikan bahwa ada simetri sempurna sehubungan dengan amplitudo negatif. Dengan transformasi FOURIER ini dibatasi pada sinyal yang berkembang – seperti fungsi sinus dan fungsi persegi panjang – secara simetris menjadi "masa lalu" dan "masa depan" (lihat Gambar 91).



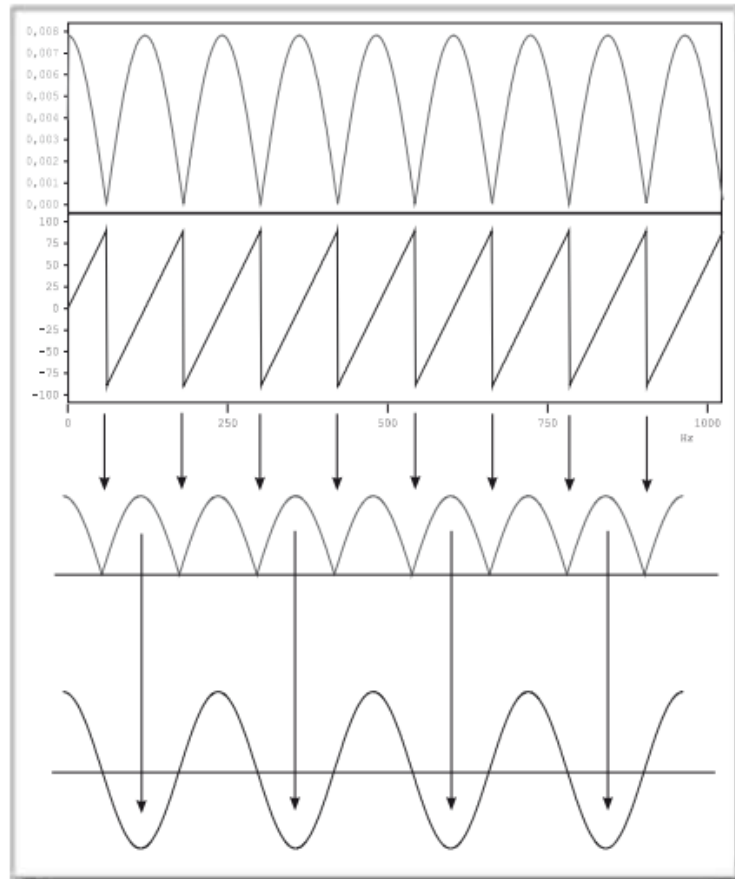
Gambar 88: Apakah spektrum amplitudo sinusoidal juga ada karena alasan simetri?

Sebuah pertanyaan menarik yang dapat dianggap sebagai kasus uji untuk prinsip simetri.

Seri teratas: Satu baris dalam domain waktu (misalnya pada $t = 0$) menghasilkan perkembangan spektrum amplitudo yang konstan seperti halnya satu baris dalam spektrum amplitudo pada $f = 0$ menghasilkan "tegangan DC" dalam domain waktu.

Seri tengah dan bawah: dua garis (misalnya pada $t = -20$ ms dan $t = +20$ ms) menghasilkan progresi spektrum amplitudo berbentuk kosinus atau sinusoidal (dengan asumsi bahwa amplitudo negatif diterima!), seperti halnya dua garis dalam amplitudo spektrum (misalnya pada $f = -50$ Hz dan $f = +50$ Hz) menjamin progresi berbentuk kosinus atau sinusoidal dalam domain waktu. Tahap fase dari , atau lebih tepatnya dari $+\pi/2$ ke $-\pi/2$, ke posisi nol dari spektrum amplitudo (sinusoidal) adalah bukti bahwa setiap detik "setengah gelombang" harus berada dalam kisaran negatif.

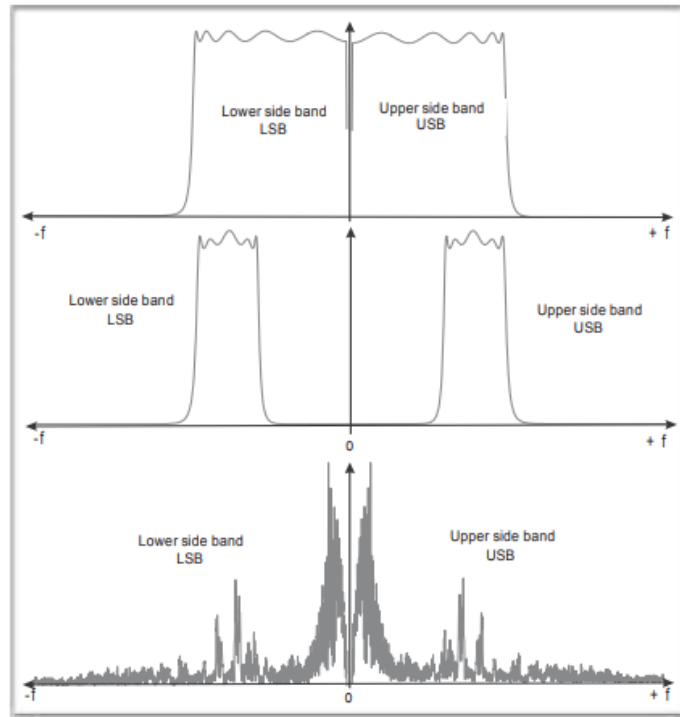
Berkenaan dengan transformasi FOURIER domain waktu dan frekuensi sebagian besar simetris jika, sebagaimana telah disebutkan, frekuensi dan amplitudo negatif untuk area spektral diterima.



Gambar 89: Spektrum fase memberikan penjelasan untuk kurva sinusoidal

Anda mungkin memiliki ide berikut: jika satu pulsa menghasilkan kurva spektral konstan (karena semua frekuensi memiliki amplitudo yang sama) dua -pulsa secara teoritis akan menghasilkan kurva spektral konstan yang dua kali lebih tinggi.

Gagasan ini tidak sepenuhnya salah tetapi hanya berlaku untuk titik-titik di mana pulsa sinusoidal dengan frekuensi yang sama dari kedua pulsa berada dalam fase. Ini hanya berlaku untuk titik nol dari spektrum fase. Pada titik pergeseran spektrum fase pulsa sinusoidal dengan frekuensi yang sama dari kedua pulsa didefase tepat oleh dan dengan demikian menghilangkan satu sama lain (interferensi). Di antara dua titik ekstrem ini, mereka memperkuat atau mengurangi satu sama lain tergantung pada posisi relatif mereka dalam fase.



Gambar 90: Pita samping atas dan bawah sebagai karakteristik spektrum simetris

Seri atas: spektrum simetris dari lintasan rendah. Setiap lowpass, seolah-olah, sebuah bandpass dengan frekuensi menengah $f = 0$ Hz. Kedua bagian spektrum identik secara simetris. Mereka mengandung di atas semua informasi yang sama. Namun, low pass tidak dapat dimulai pada $f = 0$ Hz karena kemudian akan memiliki tepi filter dengan kemiringan tak terhingga. Ini tidak akan sesuai dengan UP.

Seri tengah: band pass juga memiliki pasangan simetris. Harap dicatat bahwa ungkapan "frekuensi cutoff atas dan bawah" harus digunakan dengan hati-hati sehubungan dengan sideband atas dan bawah.

Seri bawah: spektrum simetris (dengan posisi reguler dan terbalik) dari detail sinyal audio ("ucapan"). Beberapa program komputer selalu menyajikan spektrum simetris dalam rentang frekuensi. Spektrum simetris juga secara otomatis disediakan oleh matematika (FFT). Namun, dalam kasus itu, setengah layar akan digunakan untuk informasi yang berlebihan.

Tidak seperti persegi panjang (berkala), tidak ada simetri dalam arah masa lalu dan masa depan sehubungan dengan sinyal audio "asimetris". Oleh karena itu tidak ada simetri sederhana seperti itu dalam domain frekuensi dengan amplitudo positif dan negatif, dll.

Spektrum simetris tidak menyebabkan salah tafsir kurva spektral seperti pada Gambar 45. Selain itu, proses sinyal non-linier (Bab 7) seperti perkalian, pengambilan sampel atau konvolusi yang sangat penting untuk pemrosesan sinyal digital (DSP) dapat lebih mudah dipahami.

Spektrum periodik

Ingat, sinyal periodik memiliki spektrum garis. Garis-garis tersebut berjarak sama dan merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar.

Sebagai hasil dari prinsip simetri, hal-hal berikut harus berlaku:

Garis-garis yang berjarak sama dalam domain waktu juga harus menghasilkan spektrum periodik dalam domain frekuensi.

Ini diselidiki secara eksperimental dalam Gambar 92. Pada seri pertama Anda melihat spektrum garis dari fungsi gigi gergaji periodik.

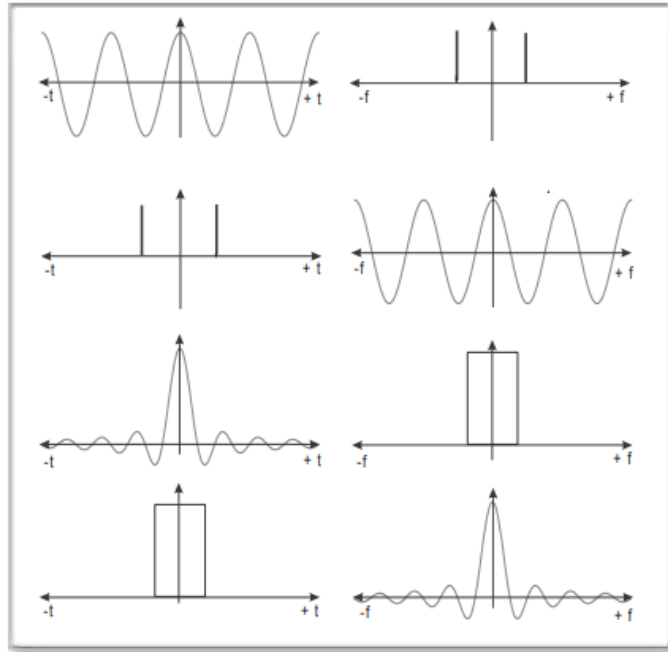
Dalam seri kedua dan ketiga Anda melihat urutan -pulsa periodik dari frekuensi yang berbeda – baik dalam domain waktu dan frekuensi! Ini adalah kasus khusus di mana keduanya terjadi secara bersamaan dalam domain waktu dan frekuensi: periodisitas dan garis.

Deret keempat menunjukkan fungsi kontinu satu kali – bagian dari fungsi S_i yang memiliki spektrum kontinu yang relatif sempit. Jika sinyal ini didigitalkan – yaitu disajikan sebagai rantai angka – dari sudut pandang matematis, ini setara dengan perkalian fungsi kontinu ini dengan urutan pulsa periodik (dalam hal ini dengan urutan pulsa dari seri ketiga). Ini ditunjukkan di seri bawah.

Setiap sinyal digital terdiri sebagai hasil dari urutan -pulsa periodik tetapi "berbobot". Setiap sinyal digital juga terdiri dari garis-garis (equidistant) dalam domain waktu dan karena itu harus memiliki spektrum periodik.

Perbedaan esensial antara sinyal analog waktu kontinu dan sinyal digital diskrit waktu dapat ditemukan dalam domain frekuensi: sinyal digital selalu memiliki spektrum periodik!

Spektrum periodik oleh karena itu tidak berarti keingintahuan teoretis, melainkan mewakili kasus normal karena pemrosesan sinyal digital DSP telah lama berada di atas angin dalam teknologi komunikasi dan pemrosesan sinyal. Seperti yang telah dijelaskan dalam Bab 1, teknologi analog semakin dibatasi ke tempat-tempat yang secara fisik diperlukan – sumber atau saluran sistem komunikasi (misalnya mikrofon – speaker dalam transmisi radio (digital)) dan jalur transmisi yang sebenarnya.



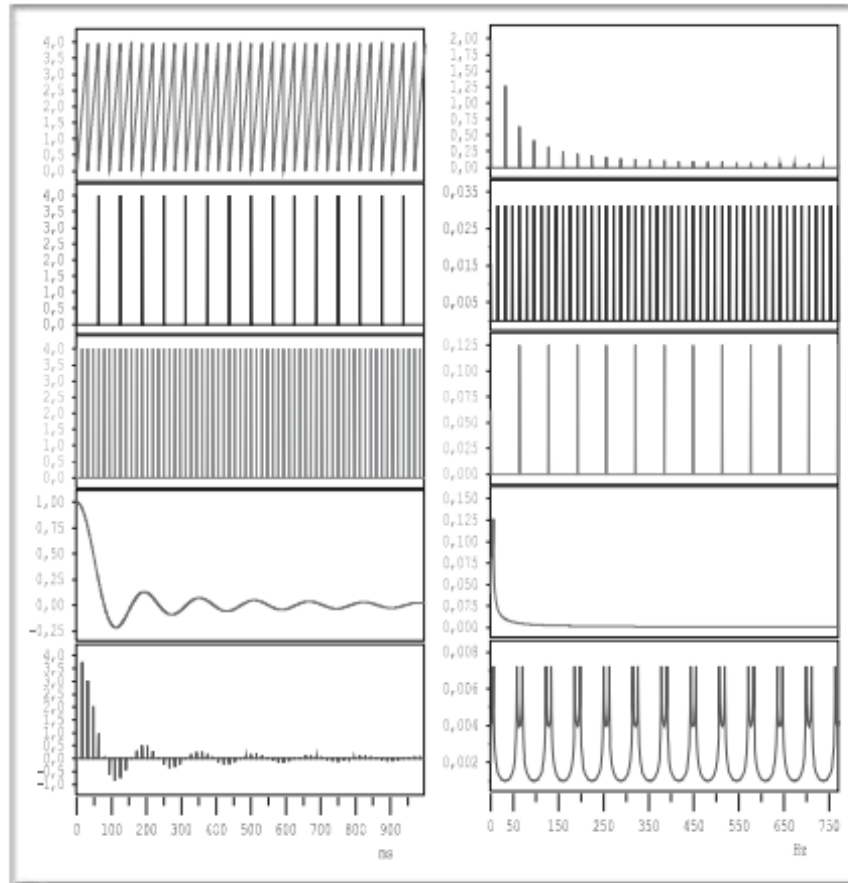
Gambar 91: Keseimbangan simetri

Diagram sekali lagi merangkum fitur simetri untuk dua sinyal komplementer sinus dan pulsa dan fungsi Si dan fungsi persegi panjang. Wawasan penting adalah: sinyal dalam domain waktu dapat terjadi dalam bentuk yang sama dalam domain frekuensi (dan sebaliknya) jika frekuensi negatif dan juga amplitudo negatif diterima. Domain waktu dan frekuensi mewakili dua "dunia" di mana angka-angka serupa yang diproyeksikan ke "dunia lain" menghasilkan salinan yang identik.

Tepatnya, pernyataan ini hanya sepenuhnya benar untuk sinyal yang seperti yang ditunjukkan di sini memiliki kurva bayangan cermin ke arah "masa lalu" dan "masa depan". Sinyal-sinyal ini terdiri dari osilasi sinusoidal yang fase-fasenya tidak diubah sama sekali atau diubah oleh ; atau dengan kata lain yang memiliki amplitudo positif atau negatif.

Anda juga harus mencatat bahwa sinyal ideal telah dipilih sebagai contoh di sini. Dari sudut pandang fisik, fungsi persegi panjang tidak ada baik dalam domain waktu maupun frekuensi. Karena fungsi Si adalah hasil dari transformasi FOURIER dari fungsi persegi panjang, ia juga tidak dapat eksis di alam. Seperti sinus di atas, ia juga memperpanjang jarak tak terbatas ke kiri dan ke kanan, yaitu dalam domain waktu jarak tak terbatas ke masa lalu dan masa depan. Akhirnya, garis juga tidak dapat ada karena sinyal sinusoidal harus bertahan untuk waktu yang sangat lama sebagai akibat dari UP.

Di alam setiap perubahan membutuhkan waktu dan segala sesuatu memiliki awal dan akhir. Fungsi (proses) yang diidealkan diperiksa untuk menemukan seperti apa solusi yang nyata dan mendekati ideal.



Gambar 92: Spektrum periodik

Gambar ini menjelaskan kesimpulan terpenting dari Prinsip Simetri SP untuk DSP pemrosesan sinyal digital modern.

Seri atas menunjukkan sekali lagi bahwa fungsi periodik dalam domain waktu – di sini sinyal gigi gergaji – memiliki spektrum garis dalam domain frekuensi. Ini selalu terdiri dari garis yang berjarak sama.

Prinsip Simetri menyiratkan proposisi terbalik: Garis-garis yang berjarak sama dalam domain waktu harus menghasilkan spektrum periodik.

Seri kedua dan ketiga menyajikan kasus khusus di mana Anda sudah akrab dengan fenomena ini, yang Anda abaikan: deret -pulsa periodik! Garis dan periodisitas hadir pada tingkat yang sama baik dalam domain waktu maupun frekuensi. Sebagai konsekuensi dari garis yang berjarak sama setiap sinyal digital harus dianggap sebagai "urutan pulsa periodik tetapi berbobot". Ini muncul dengan perkalian sinyal analog dengan urutan -pulsa periodik. Dalam spektrum, kedua karakteristik – yaitu sinyal analog dan urutan -pulsa periodik – harus ada. Hasil periodik harus dilihat di kanan bawah.

Harap dicatat bahwa hanya frekuensi positif yang diwakili di sini. Spektrum sinyal analog karena itu terlihat persis seperti setiap bagian (periodik) dari spektrum periodik.

Transformasi FOURIER Terbalik Dan Bidang GAUSSI

Saat masalah sinyal teknis dilihat dari kedua perspektif domain waktu dan frekuensi, tidak hanya Prinsip FOURIER FP dan Prinsip Ketidakpastian UP tetapi juga Prinsip Simetri SP terlibat.

Sedangkan sampai sekarang dalam Bab ini kita lebih banyak berurusan dengan fenomena "simetri", kita sekarang akan berurusan dengan aplikasi dan visualisasi melalui teknik pengukuran. Sebagai puncak dari prinsip simetri, seharusnya dimungkinkan untuk berpindah dari domain frekuensi ke domain waktu melalui operasi yang sama yaitu transformasi FOURIER.

Hal ini dapat disimpulkan langsung dari Gambar 91 karena domain waktu dan frekuensi dapat dipertukarkan di sini dalam kondisi yang diberikan. Selain itu, kemungkinan transformasi FOURIER ke arah lain dari domain frekuensi ke domain waktu – transformasi FOURIER terbalik IFT – ditunjukkan pada Bab 2.

Dalam Bab 2 di bawah judul "Spektrum fase yang membingungkan" ditunjukkan bahwa hanya amplitudo dan spektrum fase yang bersama-sama memberikan informasi lengkap tentang sinyal dalam domain frekuensi.

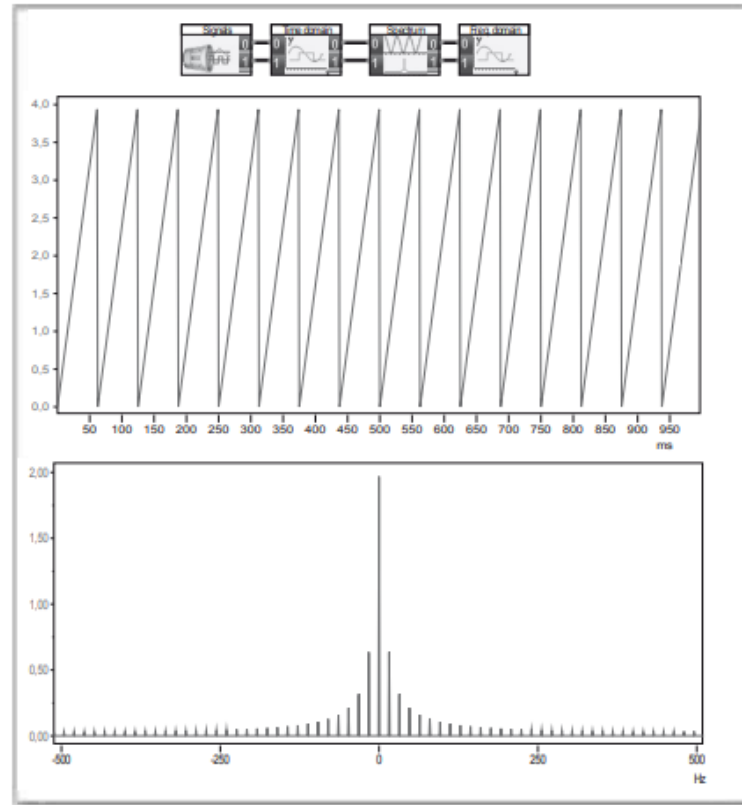
Perspektif yang ditawarkan oleh gerakan mundur dan maju antara domain waktu dan frekuensi ini sangat menarik. Mereka dieksploitasi lebih dan lebih dalam pemrosesan sinyal digital modern DSP. Contohnya adalah filter berkualitas tinggi yang menyediakan fungsi filter hampir persegi panjang kecuali untuk batas yang tidak dapat dihindari yang diberlakukan oleh UP.

Sinyal yang akan disaring terlebih dahulu ditransformasikan dalam domain frekuensi. Di sana rentang frekuensi yang tidak diinginkan dipotong, yaitu nilai dalam rentang ini hanya ditetapkan pada 0. Kemudian melalui IFT kita kembali ke domain waktu dan sinyal yang difilter selesai (lihat Gambar 95, bawah). Kendala di sini adalah, bagaimanapun, "pemrosesan waktu nyata". Proses komputasi yang dijelaskan harus dilakukan dengan sangat cepat sehingga bahkan dalam kasus sinyal yang tahan lama tidak terjadi kehilangan informasi yang tidak diinginkan.

Kemungkinan pergerakan mundur dan maju ini sekarang harus dieksplorasi dan dijelaskan secara eksperimental melalui DASYLab. Mari kita lihat dulu kemungkinan yang disediakan oleh modul "FFT" untuk masuk ke domain frekuensi. Sampai sekarang kami hanya menggunakan grup fungsi "FFT nyata dari sinyal nyata" dan amplitudo dan/atau spektrum fase di dalamnya.

Pada Bab sebelumnya kami menambahkan spektrum daya. Analisis FORIER, bagaimanapun, datang pertama dalam menu. Kami sekarang memilih ini. Sekarang buat sirkuit sesuai dengan Gambar 93 dan atur nilainya seperti yang diberikan dalam teks keterangan.

Anehnya, kita melihat Prinsip Simetri SP direalisasikan sampai batas tertentu karena ada simetri bayangan cermin dalam kaitannya dengan garis tengah vertikal. Dalam versi baru DASYLab dan dalam versi pendidikan, simetri dapat dipilih dengan mengklik ke titik menu "sumbu simetris".



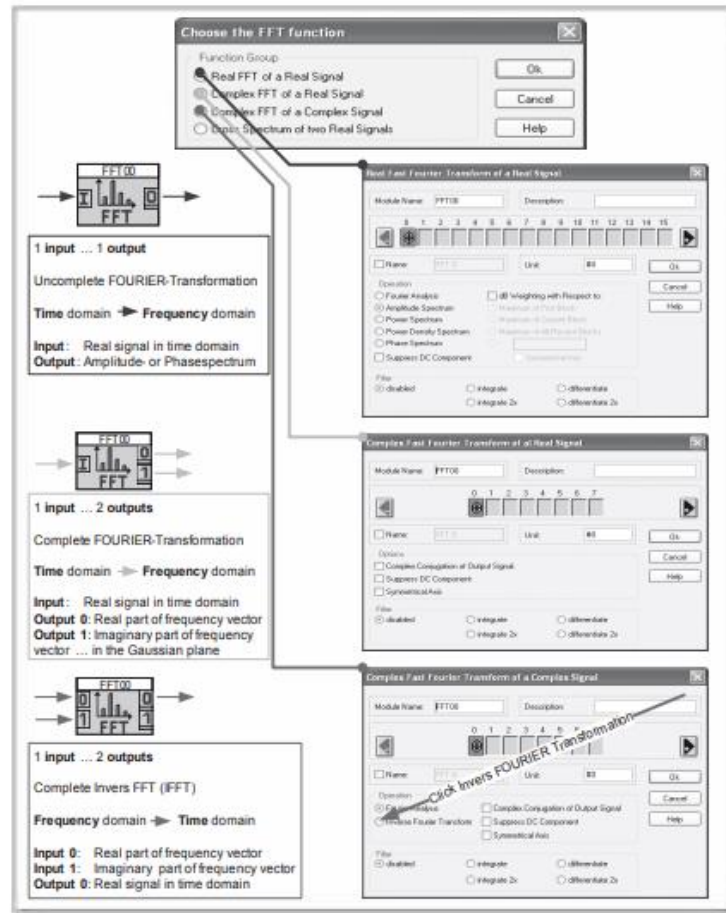
Gambar 93: Analisis FOURIER dan spektrum simetris

Dalam modul FFT, "FFT nyata dari sinyal nyata" dipilih seperti sebelumnya dan kemudian pengaturan "FOURIER-Analisis". Panjang blok pengaturan standar kami = laju pengambilan sampel = 1024 dipilih. Frekuensi gigi gergaji adalah 16 Hz.

Jika nilai frekuensi bukan pangkat dua – misalnya 21 Hz – , hasil garis spektral tambahan yang akan dibahas dalam Bab 9.

Hasilnya adalah spektrum simetris yang diukur dengan DASYLab. Namun, tidak dengan frekuensi positif dan negatif di bagian atas seperti yang ditunjukkan sebelumnya, tetapi pada semua peristiwa simetris. Dalam versi 6.0 baru dan dalam versi pendidikan sekarang ada kemungkinan untuk memilih representasi yang lebih rendah dengan rentang frekuensi positif dan negatif melalui pengaturan (kanan bawah) "sumbu simetris".

Namun, amplitudo negatif kurang dan tidak ada informasi tentang spektrum fase. Oleh karena itu, analisis FOURIER tidak memberikan semua informasi yang kita perlukan untuk mendapatkan representasi yang jelas dari sinyal dalam domain frekuensi. Untuk alasan ini sekarang kita akan memeriksa varian lain dari modul FFT yang ada (Gambar 94). Ada dua bentuk "FFT kompleks" yang memiliki dua output. Kita sekarang akan menggunakan ini.



Gambar 94: Pemilihan fungsi FFT

Modul FFT memungkinkan berbagai varian yang berbeda. Hal ini paling mencolok terlihat dalam jumlah input dan output dari modul ini (lihat kiri atas). Sampai sekarang kami hanya menggunakan "FFT nyata...". Dalam hal ini juga, ada berbagai alternatif yang berbeda (lihat pusat).

Seperti yang akan kita lihat, Prinsip Simetri SP dieksploitasi dalam dua bentuk "FFT kompleks..." untuk mencapai "maju dan mundur" antara domain waktu dan frekuensi (lihat bagian bawah). Untuk jalur dari waktu ke domain frekuensi (FT) kita memerlukan modul dengan satu input dan dua output dan untuk jalur sebaliknya (IFT) modul dengan dua input dan output. Sangat penting untuk memilih pengaturan "FOURIER synthesis" karena Anda ingin menggabungkan sinyal waktu dari osilasi sinusoidal dari spektrum. Sebelum kita memeriksa jenis transformasi FOURIER ini lebih dekat melalui eksperimen, itu harus terbukti berhasil.

Dalam Gambar 95 Anda melihat diagram blok yang sesuai. Jika Anda mengatur parameter sesuai dengan representasi dan teks keterangan dari Gambar 94, sinyal input sebelah kiri sebenarnya muncul kembali pada output atas dari modul FFT (terbalik). Jelas, semua informasi dari domain waktu telah ditransfer ke domain frekuensi sehingga transformasi FOURIER terbalik dalam arah terbalik kembali ke domain waktu melalui set lengkap semua informasi yang diperlukan juga berhasil.

Sekarang akan ditunjukkan betapa mudahnya dapat dimanipulasi dalam domain frekuensi. Dengan menambahkan modul "cut out" kami memiliki kemungkinan untuk memotong rentang frekuensi apa pun. Kami melihat langkah ini telah berhasil di bagian bawah: filter lowpass yang hampir ideal dengan frekuensi batas 32 Hz yang tidak mungkin diwujudkan hingga sekarang. Sirkuit ini akan terbukti menjadi salah satu yang paling penting dan canggih dalam banyak aplikasi praktis yang akan kita hadapi.

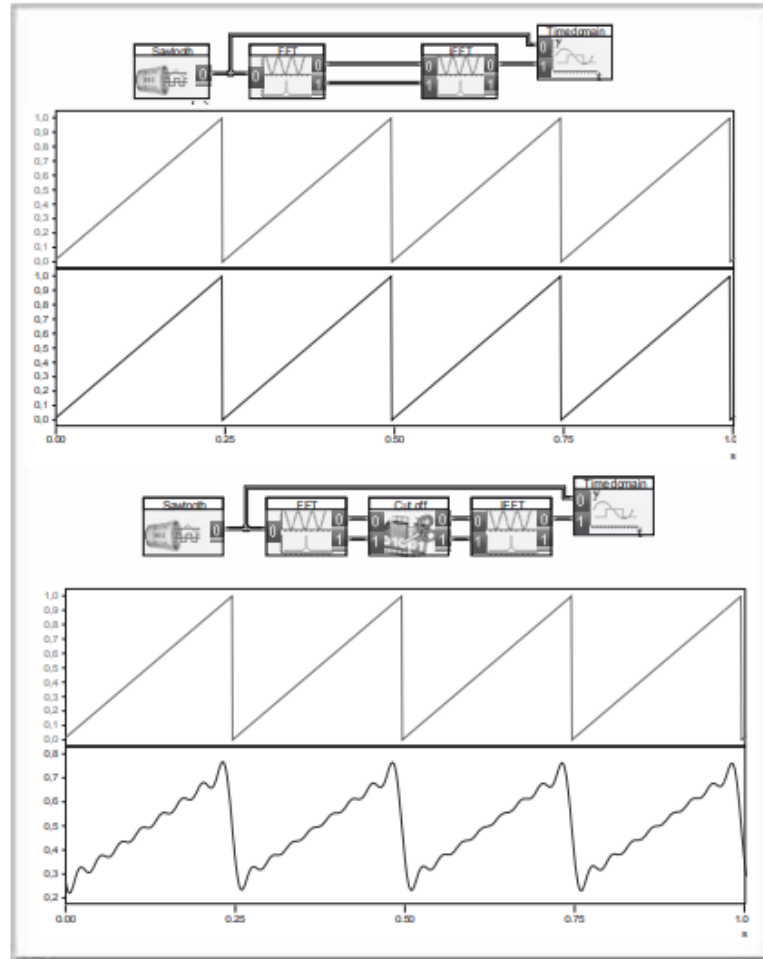
Langkah selanjutnya adalah menetapkan secara eksperimental bagaimana semuanya bekerja dan apa hubungannya dengan SP. Pertama, kami mewakili tiga sinyal sinusoidal sederhana dengan 0, 30 dan 230 derajat dan perpindahan fase 0, $\pi/6$ dan $4\pi/6$ rad melalui "FFT kompleks" dari sinyal nyata. Hasil pada Gambar 96 adalah dua spektrum garis yang berbeda – simetris – untuk masing-masing dari tiga kasus. Namun, tampaknya ini bukan masalah nilai dan fase absolut, karena hanya nilai positif yang mungkin dalam kasus nilai absolut. Spektrum yang lebih rendah dalam setiap kasus tidak dapat menjadi spektrum fase karena perpindahan fase dari sinyal sinusoidal tidak identik dengan nilai-nilai ini.

Kami terus mengeksplorasi dan menambahkan modul x-y (Gambar 97). Sekarang Anda melihat sejumlah "vektor frekuensi" di pesawat. Masing-masing vektor frekuensi ini memiliki "kembar" simetris bayangan cermin dalam kaitannya dengan sumbu horizontal. Dalam kasus sinyal sinusoidal dengan perpindahan fasa 30 derajat dan $\pi/6$, dua vektor frekuensi yang masing-masing memiliki perpindahan fasa 30 derajat dan $\pi/6$ rad dalam kaitannya dengan garis vertikal yang melalui titik pusat (0;0) jatuh ke dalam kategori ini. Perpindahan fase dalam kaitannya dengan garis yang berjalan secara horizontal melalui titik (0;0) adalah 60 derajat dan/atau $\pi/3$ rad.

Untuk sementara kita akan menyebut sumbu sinus vertikal karena kedua garis frekuensi dengan perpindahan fase 0 derajat atau 0 rad terletak di sini. Kita akan menyebut sumbu horizontal sebagai sumbu kosinus karena garis frekuensi dengan perpindahan fasa sinus 90 derajat atau $\pi/2$ – ini sesuai dengan kosinus – terletak pada ini.

Di sisi lain, sinus yang dipindahkan oleh $\pi/6$ rad tidak lain adalah kosinus yang dipindahkan oleh $-\pi/3$. Jika Anda sekarang membandingkan bagian sumbu dengan nilai spektrum garis, nilai spektrum atas termasuk dalam sumbu kosinus dan nilai spektrum bawah pada sumbu sinus.

Kedua garis frekuensi tersebut ternyata memiliki sifat-sifat vektor yang selain nilai mutlaknya juga mempunyai arah tertentu. Kita akan melihat bahwa panjang kedua vektor frekuensi mencerminkan amplitudo sinus dan sudut "vektor frekuensi" dalam kaitannya dengan garis vertikal dan horizontal mencerminkan perpindahan fase sinus dan kosinus pada titik waktu $t = 0$ S.

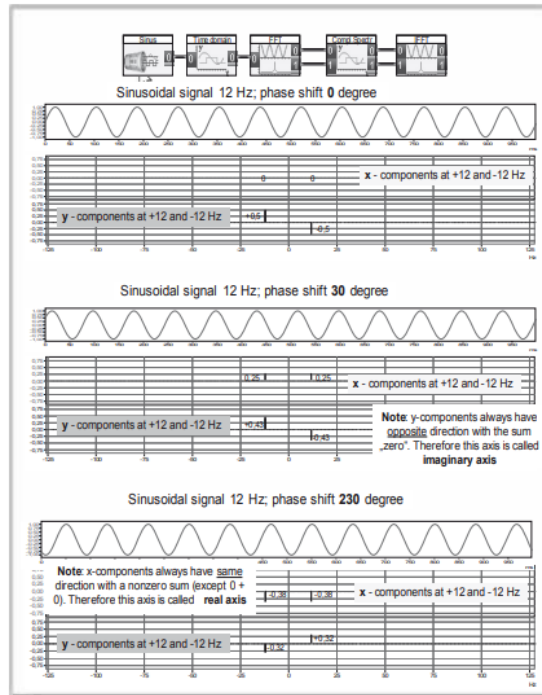


Gambar 95: FT dan IFT: transformasi FOURIER simetris

Sinyal gigi gergaji periodik dengan empat Hz dipilih sebagai sinyal uji. Namun, Anda juga dapat mengambil sinyal lain, misalnya noise. Atur seperti biasa frekuensi sampling dan panjang blok pada 1024 menggunakan opsi menu A/D.

Dalam modul "memotong" frekuensi 0 – 32 Hz diizinkan untuk lewat (dalam hal pengaturan yang dipilih, nilai sampel praktis setara dengan frekuensi). Anda melihat frekuensi tertinggi 32 Hz sebagai konten riak gigi gergaji: sinus "riak" ini mencakup 8 periode dengan gigi gergaji apa pun; dalam kasus frekuensi gigi gergaji 4 Hz frekuensi tertinggi yang diperbolehkan lewat) memiliki nilai $4 \cdot 8 = 32$ Hz.

Sangat penting dalam hubungan ini untuk mengatur "cut out" yang sama persis di kedua saluran (domain frekuensi).



Gambar 96: Spektrum simetris yang terdiri dari komponen x dan y (representasi xy)

Sekarang kita harus mengklarifikasi informasi apa yang muncul pada dua keluaran modul FFT ini. Pemberian amplitudo dan fase, selain frekuensi, merupakan bagian dari setiap sinyal sinusoidal. Oleh karena itu orang mungkin menduga bahwa amplitudo dan fase dari frekuensi positif dan negatif + dan - 12 Hz akan muncul pada dua keluaran. Diagram memberikan hasil yang berbeda.

Pengingat: Gambar 24 menghubungkan sinyal sinusoidal dengan penunjuk yang berputar. Jika kita mengejar ide lebih jauh, penunjuk yang berputar dapat direpresentasikan seperti vektor oleh komponen x dan y yang dapat berubah seiring waktu. Mengikuti ide ini dalam Gambar 97, sebuah modul xy dipilih untuk memvisualisasikan dua saluran. Hasil: dua pointer berputar ke arah yang berlawanan!

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 97, arah rotasi kedua "vektor frekuensi" berlawanan jika pergeseran fasa sinus bertambah atau berkurang. Frekuensi di sebelah kiri dalam Gambar 96 yang kami nyatakan sebagai frekuensi negatif dalam Gambar 93 (bawah) berputar berlawanan arah jarum jam, frekuensi positif searah jarum jam di mana pergeseran fasa positif meningkat.

Bagaimana nilai sesaat dari tiga sinyal sinusoidal menyembunyikan diri pada titik waktu $t = 0$ s di bidang? Bandingkan dengan cermat spektrum simetris Gambar 96 dengan bidang modul xy pada Gambar 97. Anda harus memperhitungkan bahwa garis frekuensi adalah vektor yang menerapkan aturan yang cukup spesifik. Vektor - misalnya gaya - dapat dibagi menjadi beberapa bagian dengan proyeksi pada sumbu horizontal dan vertikal yang dimasukkan di sini sebagai tanda.

Untuk sinyal sinusoidal dengan pergeseran fasa 30 derajat atau $\pi/6$ rad kita memperoleh nilai 2 dengan memproyeksikan ke sumbu kosinus. Jumlahnya adalah 4 (nilai

sesaat pada titik waktu $t = 0s$). Proyeksi ke sumbu sinus memberikan nilai 3,46 atau -3,46, yaitu penjumlahan sampai dengan 0.

Untuk alasan ini, vektor yang dihasilkan dari semua pasangan "vektor frekuensi" (simetris) selalu terletak pada sumbu kosinus dan mewakili nilai sesaat nyata pada titik waktu $t = 0$, yang dapat diukur. Untuk alasan ini apa yang disebut bagian nyata direpresentasikan pada sumbu kosinus.

Sebaliknya, proyeksi pasangan vektor frekuensi pada sumbu sinus selalu berlawanan satu sama lain. Oleh karena itu, jumlah mereka selalu 0 tidak tergantung pada posisi fase. Proyeksi ke sumbu sinus karena itu tidak memiliki pasangan yang dapat diukur. Mengikuti matematika perhitungan kompleks dalam apa yang disebut bidang GAUSSian, proyeksi pada sumbu sinus disebut sebagai bagian imajiner. Kedua proyeksi memiliki arti fisik yang penting. Hal ini dijelaskan oleh Gambar 98. Proyeksi menunjukkan bahwa setiap sinyal sinusoidal perpindahan fasa selalu dapat terdiri dari osilasi sinus dan kosinus dengan frekuensi yang sama. Konsekuensi penting dihasilkan dari ini:

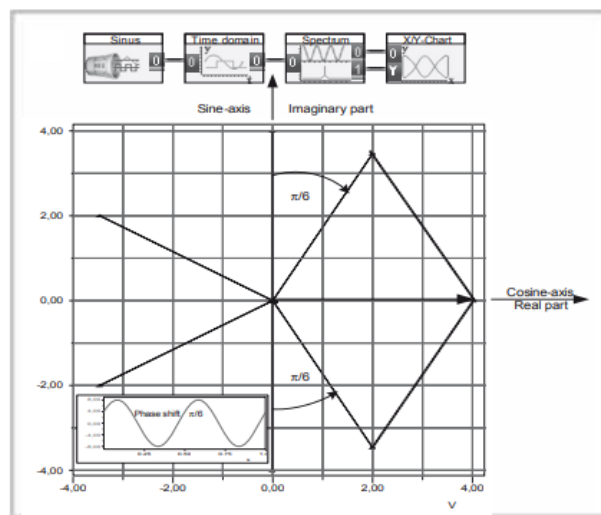
Semua sinyal dapat direpresentasikan dalam domain frekuensi dalam tiga cara:

- sebagai spektrum amplitudo dan fase
- sebagai spektrum vektor frekuensi pada bidang GAUSSian
- sebagai spektrum sinyal sinus dan cosinus

Spektrum simetris dari Gambar 96 (bawah) dinyatakan sebagai jenis terakhir dari representasi spektrum. Hal ini dibuktikan dengan Gambar 98.

Gambar berikut berhubungan dengan spektrum sinyal periodik dan non-periodik dalam representasi sebagai "pasangan vektor frekuensi" simetris dalam bidang bilangan kompleks GAUS. Anda akan menemukan informasi tambahan dalam teks keterangan.

Bilangan kompleks mengacu pada bilangan dalam matematika yang mengandung bagian nyata dan bagian imajiner. Akan sangat menggoda untuk menunjukkan bahwa menghitung dengan bilangan kompleks jauh dari "kompleks", dan sebaliknya jauh lebih mudah daripada menghitung dengan bilangan real. Tetapi pendekatan aslinya adalah melakukannya tanpa matematika.



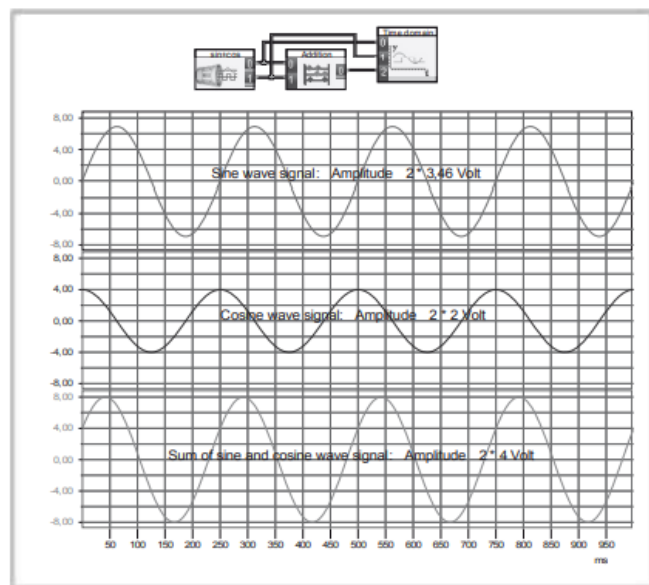
Gambar 97: Representasi dari "vektor frekuensi" dalam bidang GAUSSian kompleks.

Melalui modul x-y semua informasi pada dua spektrum dari Gambar 96 dapat disatukan pada satu tingkat. Masing-masing dari tiga sinyal sinusoidal di sini dalam bentuk "pasangan vektor frekuensi" yang selalu simetris dalam kaitannya dengan sumbu horizontal. Alih-alih panah vektor biasa, kami menggunakan bentuk segitiga kecil. Panjang semua "vektor frekuensi" dalam hal ini 4 V, yaitu, setengah amplitudo sinyal sinusoidal dialokasikan untuk masing-masing dari dua vektor frekuensi.

Paling sulit untuk mengenali sinyal sinusoidal tanpa pergeseran fasa: pasangan vektor frekuensi ini terletak pada sumbu vertikal yang melewati titik (0;0) dan yang untuk alasan ini kita sebut "sumbu sinus". Dalam kasus perpindahan fase 90 derajat atau $\pi/2$ rad – ini sesuai dengan kosinus – kedua vektor frekuensi terletak di atas satu sama lain pada sumbu horizontal. Oleh karena itu kami menyebutnya "sumbu kosinus". Dalam perpindahan fase 30 derajat atau $\pi/6$ rad kita memperoleh dua vektor frekuensi yang sudutnya terhadap sumbu sinus dimasukkan. Seperti yang Anda lihat sekarang, sinus dengan perpindahan fase 30 derajat atau $\pi/6$ rad hanyalah sebuah kosinus -60 derajat atau $-\pi/3$ rad. Sebuah fase yang dipindahkan sinus dengan demikian memiliki bagian sinus dan kosinus!

Hati-hati! Dua bagian kosinus yang sama besar dari pasangan vektor frekuensi dijumlahkan, seperti yang harus Anda periksa dalam Gambar 98, ke kuantitas yang sama dengan nilai sesaat dari sinyal sinusoidal ini pada titik waktu $t = 0$ s. Sebaliknya, bagian sinus selalu berjumlah 0 karena terletak berlawanan satu sama lain. Karena ada kuantitas di sepanjang sumbu kosinus yang dapat diukur dalam arti sebenarnya, kami menyebutnya bagian nyata. Karena pada sumbu sinus semuanya saling meniadakan dan tidak ada yang tersisa, kami memilih bagian imajiner ekspresi mengikuti matematika perhitungan kompleks.

Kami akan menunjukkan dalam Gambar berikutnya bahwa sinyal sinusoidal yang termasuk dalam "pasangan vektor frekuensi" dapat dihasilkan dari penambahan sinyal sinusoidal yang termasuk bagian nyata dan bagian imajiner.

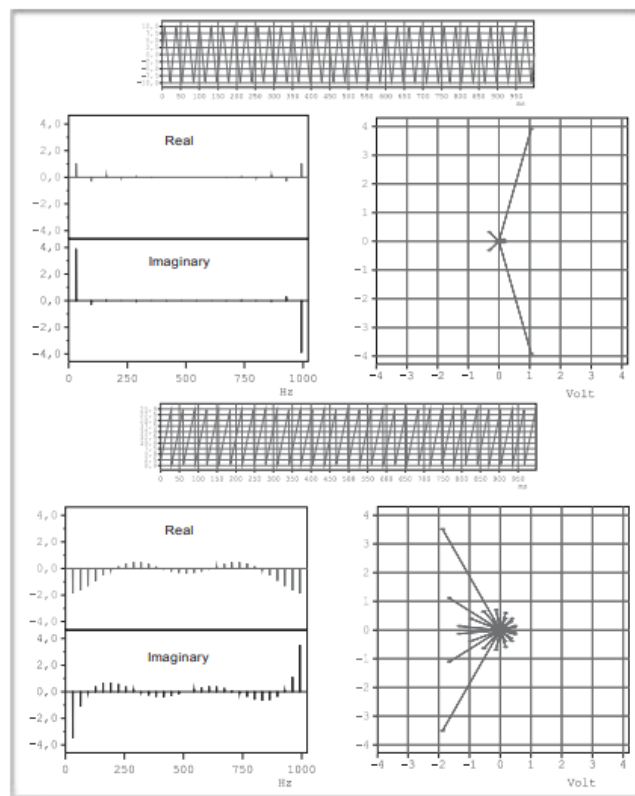


Gambar 98: Analisis spektral komponen sinus dan kosinus

Gambar ini membuktikan bahwa ketiga jenis representasi spektral atau representasi daerah frekuensi yang berbeda konsisten dalam dirinya sendiri. Komponen sinus dan kosinus yang relevan dihasilkan dari "vektor frekuensi" dalam bidang GAUSSian bilangan kompleks sebagai proyeksi pada sumbu sinus dan kosinus (komponen imajiner dan real).

Mari kita lihat dulu osilasi sinusoidal (atas) dengan amplitudo $2 \cdot 3,46 = 6,92$ V. Pada bidang numerik bilangan kompleks menghasilkan "pasangan vektor frekuensi" yang terletak pada sumbu sinus. Sebuah vektor dengan panjang 3,46 V menunjuk ke arah positif, "kembarannya" ke arah negatif. Jumlah vektor mereka sama dengan 0.

Sekarang mari kita lihat osilasi kosinus dengan amplitudo 4 V. "Pasangan vektor frekuensi" yang relevan dapat ditempatkan pada sumbu kosinus yang mengarah ke arah positif. Masing-masing dari dua vektor ini memiliki panjang 2. Jadi jumlah mereka adalah 4.



Gambar 99: Representasi spektral dari sinyal periodik dalam bidang GAUSSian

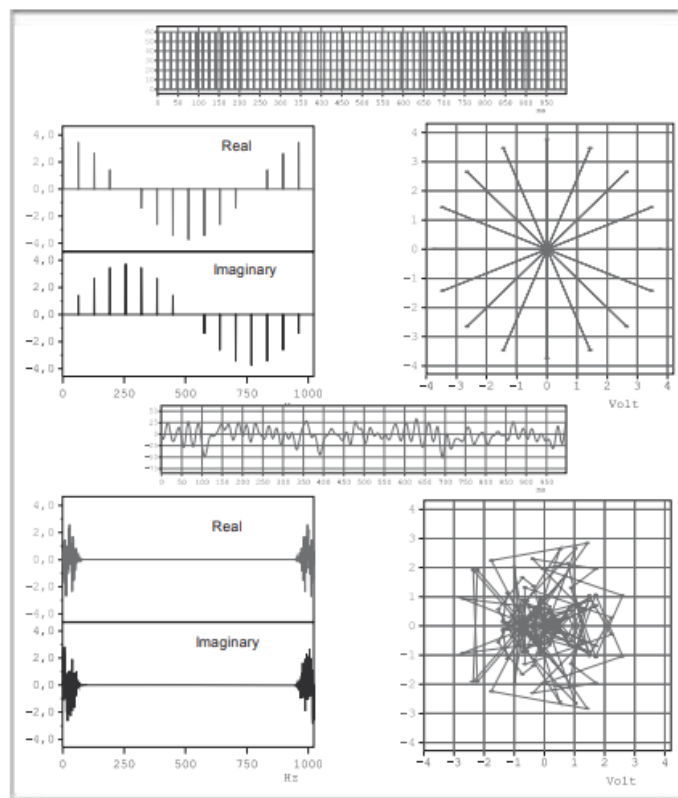
Dengan demikian, semuanya sesuai dengan Gambar 74. Perlu diketahui bahwa osilasi sinusoidal yang fasenya dipindahkan oleh 30 derajat atau $\pi/6$ rad juga memiliki amplitudo 8 V. Ini juga merupakan hasil perhitungan yang sesuai menggunakan hak- segitiga siku-siku: $3,462 + 22 = 42$ (Teorema Pythagoras).

Representasi dalam apa yang disebut bidang GAUSSian sangat penting karena pada prinsipnya menggabungkan ketiga cara representasi spektral: amplitudo dan fase sesuai dengan panjang dan sudut "vektor frekuensi". Komponen sinus dan kosinus sesuai dengan penguraian sinus yang bergeser fase menjadi bentuk sinus dan kosinus murni. Sejauh ini, kita hanya bisa melihat satu kelemahan: kita tidak bisa membaca frekuensinya. Posisi vektor tidak tergantung pada frekuensinya.

Sinyal periodik mengandung kelipatan umum dari frekuensi dasarnya hanya dalam spektrumnya. Berbeda dengan kasus sebelumnya, kita sekarang mengharapkan banyak "pasangan vektor frekuensi".

Di bagian atas Anda dapat melihat osilasi persegi panjang periodik dengan pergeseran fasa 30 derajat atau $\pi/6$ rad. Dalam Gambar 31 Anda dapat melihat seberapa cepat amplitudo menurun dengan meningkatnya frekuensi. Dalam hal ini hal yang sama berlaku: semakin rendah amplitudo semakin tinggi frekuensinya. Sebuah klasifikasi berkaitan dengan frekuensi demikian sudah mungkin asalkan kita mengetahui frekuensi dasar.

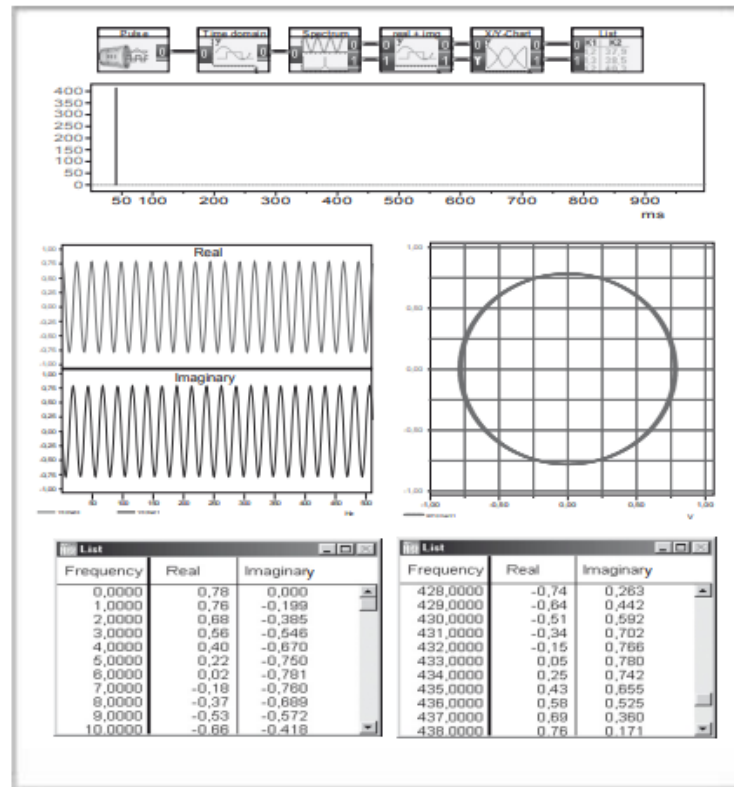
Hal yang sama berlaku untuk osilasi gigi gergaji dengan pergeseran fasa 15 derajat atau $\pi/12$ rad. Dalam hal ini amplitudo berubah (lihat Gambar 25 - Gambar 30) sesuai dengan hukum yang sangat sederhana: $n = 1/n$. Oleh karena itu, frekuensi kedua hanya memiliki setengah amplitudo dari frekuensi pertama, dll.



Gambar 100: Spektrum periodik dan non-periodik pada bidang GAUSSI

Di bagian atas Anda melihat sedikit dimanjakan oleh kisi urutan periodik dari -pulsa. Perhatikan bentuk sinus dan kosinus dari spektrum garis komponen real dan imajiner. Jika Anda mentransfer komponen sinus dan kosinus ini ke bidang GAUSSian, Anda akan menemukan "pasangan vektor frekuensi" pertama pada sumbu kosinus horizontal dalam arah positif, pasangan kedua dengan frekuensi dua kali lipat pada sudut $\pi/8$ ke sumbu kosinus, pasangan berikutnya pada dua kali sudut dll. Amplitudo semua frekuensi identik dengan -pulsa; hasilnya adalah simetri berbentuk bintang.

Di bawah ini Anda dapat melihat noise yang difilter lowpass (frekuensi cutoff 50Hz), yaitu sinyal non-periodik. Jenis sinyal ini tidak menghasilkan hukum apa pun sehubungan dengan amplitudo dan fase karena sifatnya yang murni acak – stokastik –. Anda dapat dengan jelas melihat simetri dari "pasangan vektor frekuensi". Yang lebih tinggi dan satu frekuensi yang lebih rendah terhubung langsung satu sama lain, yaitu satu baris mengarah ke frekuensi yang lebih rendah, yang lain ke frekuensi yang lebih tinggi. Kekacauan ini membuat sangat sulit untuk menemukan awal dan akhir dari garis umum. Jadi bagaimana kita mengetahui nilai frekuensi masing-masing pasangan?



Gambar 101: "Kurva lokus" dari satu kali -pulsa

Frekuensi-frekuensi yang dikandung oleh sinyal sekali-kali saling mengikuti satu sama lain. "Pasangan vektor frekuensi" dalam Gambar ini semuanya berada dalam satu lingkaran karena semua frekuensi pulsa memiliki amplitudo yang sama. Akan tetapi, seperti yang ditunjukkan oleh kurva berbentuk cosinus dan sinus dari komponen real dan imajiner, fase sangat bervariasi dari frekuensi ke frekuensi sehingga "pasangan vektor frekuensi" yang berdekatan disusun dalam simetri berbentuk bintang seperti pada Gambar 100.

Sinyal yang diukur memiliki durasi total 1 detik pada kecepatan pemindaian 1024 dan panjang blok 1024. Akibatnya, ketidakpastian frekuensi kira-kira 1 Hz (UP). Transformasi FOURIER yang kompleks menyediakan spektrum 0 hingga 1023, yaitu 1024 "frekuensi". Itu berarti 512 "pasangan vektor frekuensi" semua di lingkaran ini. Hasil jumlah "periode" spektrum berbentuk sinus dan kosinus (kira-kira 42) adalah

Bahwa rantai penghubung semua frekuensi mengorbit lingkaran kira-kira 42 kali. Perbedaan sudut antara frekuensi tetangga dengan demikian hanya di bawah $(42 \cdot 360) / 1024$

= 15 derajat atau $\pi/24$ rad. Sebuah garis lurus ditarik antara dua titik yang berdekatan. Karena 1024 garis ini tumpang tindih, garis lingkaran dalam Gambar ini tampak lebih tebal.

Dengan menggunakan kursor, mudah untuk menunjukkan komponen nyata dan imajiner yang relevan. Frekuensi yang relevan dapat ditentukan menggunakan modul grafik dengan akurasi maksimum 1 Hz.

Latihan pada Bab 5

Latihan 1

- Bagaimana urutan spektrum pada Gambar 86 dapat dijelaskan melalui Prinsip Simetri SP?
- Gambarkan spektrum simetris untuk dua spektrum bawah.

Latihan 2

- Coba buat diagram blok yang relevan untuk Gambar 88. Anda dapat menghasilkan dua pulsa menggunakan modul "cut out" dari urutan periodik pulsa. Untuk Gambar bawah, dimungkinkan untuk memulai dengan menghasilkan dua pulsa yang tertunda, kemudian membalikkan ($\bullet(-1)$) salah satunya dan akhirnya menjumlahkannya. Kemungkinan lain adalah menggunakan "penafsir rumus".
- Periksa efek yang dimiliki interval waktu dari dua pulsa pada spektrum sinusoidal. Sebelum Anda melakukan itu, pertimbangkan apa efeknya menurut Prinsip Simetri yang seharusnya.
- Apakah pulsa (dari +4V dan -4V) yang digambarkan di bawah menghasilkan spektrum sinusoidal atau kosinusoidal, yaitu spektrum yang digantikan oleh ?
- Potong tiga atau lebih -pulsa yang sangat dekat satu sama lain dan amati kurva spektrum (berkala!). Fungsi apa yang menentukan kurva?

Latihan 3

Mengapa sinyal audio tidak mungkin memiliki spektrum simetris sempurna dengan amplitudo negatif?

Latihan 4

- Ringkas pentingnya spektrum periodik untuk pemrosesan sinyal digital DSP.
- Temukan penjelasan untuk fakta bahwa spektrum periodik selalu terdiri dari komponen bayangan cermin.

Latihan 5

- Apa yang akan menjadi pasangan simetris dari sinyal-sinyal mendekati-periodik. Bagaimana spektrum hampir-periodik dapat dibuat?
- Apakah ada spektrum kuasi-periodik?

Latihan 6

Tunjukkan sinyal yang berbeda dalam domain frekuensi dalam varian berikut:

- (a) Amplitudo dan spektrum fase
- (b) Komponen nyata dan imajiner
- (c) "Pasangan vektor frekuensi" di bidang GAUSSI.

Latihan 7

Bagaimana frekuensi di bidang GAUSSI diukur?

BAB 6

ANALISIS SISTEM

Lambat laun kami bisa memetik buah dari prinsip dasar kami (FOURIER, the Uncertainty and Symmetry Principles).

Masalah praktis yang penting adalah mengukur sifat-sifat sirkuit, komponen atau sistem dari luar. Anda akan terbiasa dengan laporan pengujian yang, misalnya, membandingkan fitur amplifier yang berbeda. Yang dipermasalahkan selalu perilaku teknis transmisi ("respons frekuensi", "faktor distorsi", dll). Mari kita lihat dulu perilaku yang bergantung pada frekuensi dari sistem yang akan diuji.

Ini mudah selama kita tidak melupakan UP: setiap perilaku yang bergantung pada frekuensi pasti memicu reaksi yang bergantung pada waktu tertentu. Prinsip FOURIER mengatakan lebih tepatnya bahwa reaksi yang bergantung waktu dapat sepenuhnya disimpulkan dari perilaku yang bergantung pada frekuensi dan sebaliknya.

Pengujian sinyal teknis suatu rangkaian, komponen atau sistem umumnya dilakukan dengan membandingkan sinyal keluaran uout dengan sinyal masukan uin. Dalam contoh pertama, tidak penting (lihat di atas) apakah perbandingan sinyal dilakukan dalam waktu atau domain frekuensi.

Catatan:

Namun, tidak ada gunanya melihat sinyal dari antena (atap) TV Anda di layar osiloskop (cepat). Yang bisa Anda lihat hanyalah gambar kacau. Semua pemancar radio dan televisi disiarkan dalam frekuensi terhuyung-huyung. Untuk alasan ini mereka hanya dapat direpresentasikan secara terpisah pada layar penganalisis spektrum yang sesuai (Lihat Bab 8: Prosedur modulasi tradisional).

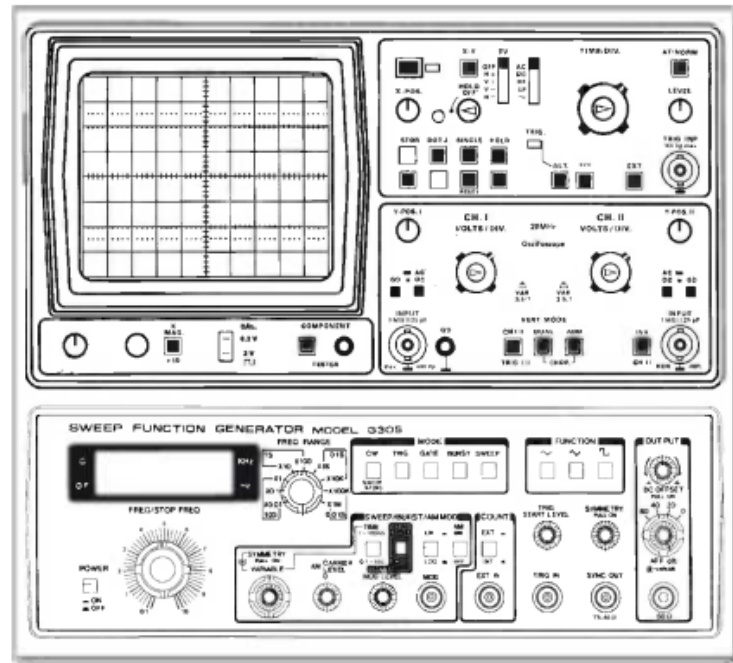
Prosedur standar didasarkan pada implementasi langsung dari Prinsip FOURIER:

Jika diketahui bagaimana sistem (linier) tertentu bereaksi terhadap sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda, juga jelas bagaimana reaksinya terhadap semua sinyal lain ... karena semua sinyal lain tidak terdiri dari apa pun kecuali sinyal sinusoidal.

Prosedur ini banyak dilakukan di laboratorium sekolah. Peralatan yang diperlukan adalah:

- Generator gelombang sinus dengan frekuensi yang dapat disesuaikan atau mode sapan.
- Osiloskop 2 saluran

Properti dalam domain waktu dan frekuensi harus ditetapkan dengan membandingkan uout dan uin. Kemudian kedua sinyal harus direpresentasikan secara bersamaan di layar. Untuk alasan ini uin terhubung tidak hanya ke input rangkaian tetapi juga ke saluran A dari osiloskop. Sinyal keluaran mencapai layar melalui saluran B.



Gambar 102: Generator fungsi dan osiloskop

Kedua instrumen ini tidak pernah kekurangan di laboratorium tradisional. Generator fungsi menghasilkan sinyal uji (berkala) uin. Berikut ini tersedia sebagai sinyal standar: sinus, segitiga dan persegi panjang. Selain itu, instrumen yang lebih canggih memungkinkan untuk menghasilkan sinyal “sweep”, sinyal burst, dan sinyal “one-shot” (disebabkan oleh proses pemicu hanya satu periode rangkaian sinyal yang dihasilkan). Osiloskop "analog" hanya dapat membuat sinyal "berdiri" secara berkala terlihat di layar. Osiloskop penyimpanan digital diperlukan untuk sinyal sekali pakai. (Lihat di atas).

Hari-hari kedua alat ukur analog tradisional ini diberi nomor. Komputer dengan periferal yang sesuai (kartu multi-fungsi PC untuk input dan output sinyal analog dan digital) dapat digunakan untuk aplikasi tertentu melalui antarmuka grafis untuk tugas apa pun dalam pengukuran dan teknik kontrol otomatis atau segala bentuk sinyal. pemrosesan (misalnya FT)

Melalui generator fungsi dan osiloskop dimungkinkan – menggunakan prosedur pengukuran yang memakan waktu, merekam nilai pengukuran, dan perhitungan dengan kalkulator saku – untuk menentukan representasi respons frekuensi menurut amplitudo ($\hat{U}_{out}/\hat{U}_{in}$) dan fase (ϕ) antara u_{out} dan u_{in} .

Penentuan sifat selektif frekuensi – respon frekuensi dan fungsi transfer – dari sistem (linier) pada prinsipnya terbatas pada dua pertanyaan atau pengukuran yang berbeda:

- Se jauh mana sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda diperbolehkan lewat? Dalam konteks ini amplitudo u_{out} dan u_{in} dalam rentang frekuensi yang bersangkutan dibandingkan satu sama lain ($\hat{U}_{out}/\hat{U}_{in}$).
- Seberapa besar waktu tunda antara u_{out} dan u_{in} ? Ini ditentukan melalui perbedaan fasa antara u_{out} dan u_{in} .

Catatan:

Dalam kasus semua sinyal uji non-sinusoidal dan prosedur analisis modern – seperti yang akan dijelaskan berikut ini – masalahnya sebagian besar direduksi menjadi dua pengukuran amplitudo dan kurva fase. Satu-satunya perbedaan adalah bahwa semua frekuensi yang kita minati diberikan pada input pada waktu yang sama.

Jika Anda tidak memiliki proses modern berbantuan komputer, Anda harus memperhatikan trik dan tip berikut:

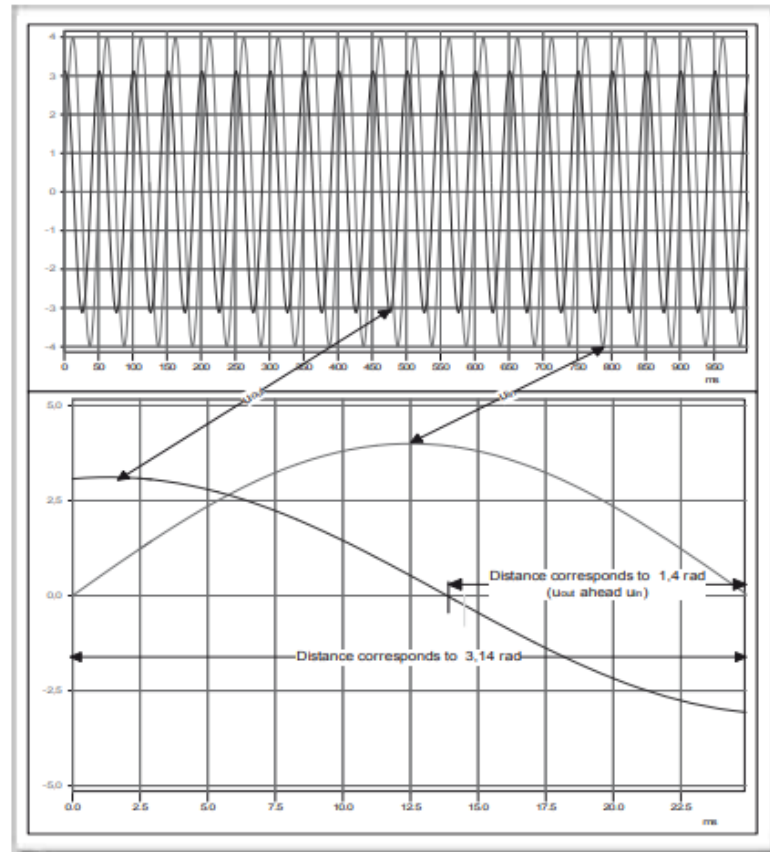
- (a) Selalu picu sinyal input dan jangan ubah amplitudo uin (jika memungkinkan, pilih in = 1V) selama seluruh rangkaian pengukuran.
- (b) Putar rentang frekuensi yang akan diperiksa secara manual pada generator fungsi dan catat area di mana amplitudo uin berubah paling kuat. Lakukan sebagian besar pengukuran di area ini.
- (c) Pilih untuk pengukuran amplitudo (\hat{U}_{out} tergantung pada frekuensi) basis waktu yang besar sehingga arus bolak-balik sinusoidal muncul sebagai "batang" pada layar. Amplitudo dapat paling mudah ditentukan dengan cara ini. (Lihat Gambar 103, atas).
- (d) Untuk mengukur beda fasa setel tepat setengah periode sinyal input uin dengan menggunakan pengatur basis waktu yang tidak dikalibrasi, yang dapat disetel sesuai keinginan.

$T/2$ misalnya 10 cm pada skala layar dan sesuai dengan sudut rad. Sekarang baca perbedaan fase (atau pergeseran waktu) antara titik-titik persimpangan u_{out} dan u_{in} dan Anda memperoleh (awalnya) x cm. Akhirnya, dengan aturan tiga menggunakan kalkulator saku, tentukan beda fasa dalam rad untuk setiap nilai x . Jika u_{out} tertinggal seperti pada Gambar 103 (bawah) adalah positif, jika tidak maka negatif.

Untuk pengukuran lengkap dan hati-hati dengan evaluasi Anda membutuhkan sekitar 2 jam. Untuk membangkitkan antusiasme Anda terhadap pemrosesan berbasis komputer modern – untuk pengukuran dan evaluasi yang sama dengan tingkat presisi yang jauh lebih tinggi, Anda hanya memerlukan sepersekian detik!

Menyapu

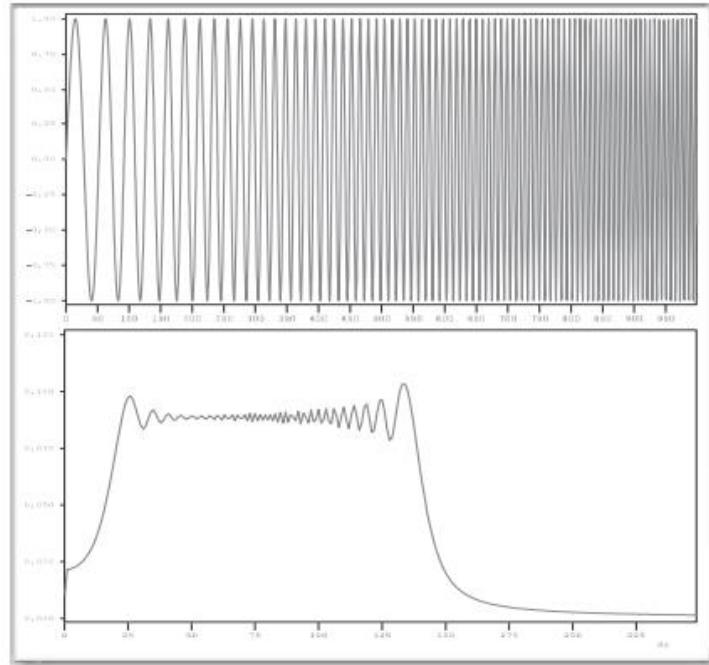
Dimungkinkan untuk mendapatkan gambaran yang lebih cepat tentang perilaku bergantung-frekuensi dari amplitudo keluaran out melalui sinyal sapuan (Gambar 104). Di sini idenya adalah sebagai berikut. Alih-alih mengatur rentang frekuensi secara terus menerus dengan tangan dari awal yang lebih rendah frekuensi f_{start} ke stop atas frekuensi f_{stop} ini dilakukan dalam instrumen dengan menggunakan Voltage Controlled Oscillator VCO.



Gambar 103: Generator fungsi dan osiloskop

Melalui generator fungsi tradisional dan osiloskop dimungkinkan – dengan pengukuran, pelaporan, evaluasi yang memakan waktu (menggunakan kalkulator saku) dan grafik kurva – untuk menentukan respons frekuensi menurut amplitudo ($\hat{U}_{\text{keluar}}/\hat{U}_{\text{in}}$) dan fase ($\phi = \text{keluar} - \text{in}$). Proses berbantuan komputer menangani hal ini dalam sepersekian detik.

Gambar menunjukkan dua trik untuk menetapkan respons frekuensi. Representasi atas menunjukkan bahwa kurva amplitudo tergantung pada frekuensi dapat didaftarkan dengan sangat cepat tanpa secara konstan mengubah basis waktu osiloskop jika basis waktu yang dipilih cukup besar. Sinyal input (sinusoidal) dan sinyal output muncul sebagai "bar" yang levelnya dapat dengan mudah dibaca. Ketepatan kurva fase dapat dimaksimalkan dimana untuk setiap frekuensi yang diukur dengan menggunakan pengatur basis waktu biasanya sebuah kenop pada atau di sebelah sakelar basis waktu – tepat satu setengah periode u_{in} disajikan di seluruh skala. Dengan cara perhitungan menggunakan aturan tiga pergeseran fasa dapat dengan mudah dihitung. Akibat dari $u_{\text{out}} - u_{\text{in}}$ dan $n = 0$ pada situasi di atas menghasilkan $= 1,4 \text{ rad}$ atau 81° (u_{out} bergeser ke depan).



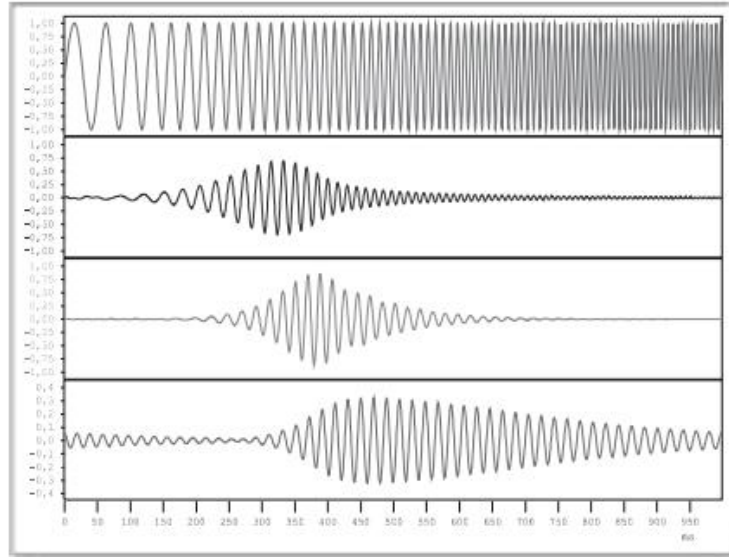
Gambar 104: Sinyal sapuan sebagai "pemindai rentang frekuensi"

Sinyal sapuan adalah langkah pertama menuju perekaman respons frekuensi otomatis. "Sedikit demi sedikit" semua osilasi atau frekuensi gelombang sinus (dengan $\omega = \text{konstan}$) dari frekuensi awal f_{start} hingga frekuensi berhenti f_{stop} dihubungkan dengan input rangkaian uji. Pada keluaran out tergantung pada karakteristik frekuensi dari rangkaian uji. Sumbu waktu dari sinyal sapuan secara tidak langsung mewakili sumbu frekuensi dari f_{start} ke f_{stop} .

Masalah dari prosedur ini adalah ketidakakuratannya: Karena UP tidak mungkin ada "frekuensi sesaat" karena osilasi gelombang sinus dari frekuensi tertentu harus berlangsung lama sehingga $\rightarrow 0$.

Jika durasi "frekuensi sesaat" ini terlalu pendek, sistem hanya dapat bereaksi dengan distorsi atau tidak sama sekali (transient response error). Hal ini juga ditunjukkan oleh FT dari sinyal sapuan (bawah). Sebenarnya jendela frekuensi persegi panjang dari f_{start} ke f_{stop} akan dihasilkan. Kontravensi UP menghasilkan jendela frekuensi yang bergelombang dan kabur.

Rentang sapuan dan kecepatan sapuan ditentukan oleh tegangan gigi gergaji yang sesuai. Jika tegangan gigi gergaji naik secara linier maka frekuensi sinus juga berubah secara linier tetapi jika tegangan gigi gergaji berubah secara logaritmik, hal ini juga berlaku untuk frekuensi tegangan keluaran sinusoidal. Amplitudo in tetap konstan selama proses sapuan ini.



Gambar 105: Reaksi yang bergantung pada frekuensi dari filter bandpass terhadap sinyal satuan

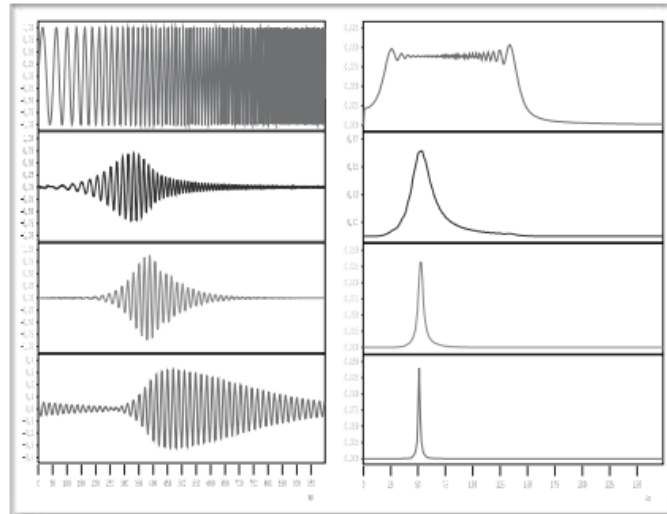
Seri atas menunjukkan sinyal satuan yang terhubung dengan cara yang sama dengan input dari tiga filter bandpass. Mereka semua memiliki frekuensi tengah yang sama (!), tetapi memiliki kualitas yang berbeda (seri ke-2 $Q = 3$; seri ke-3 $Q = 6$ dan seri ke-4 $Q = 10$).

Respons satuan dari ketiga filter bandpass tidak banyak memberi tahu kita. Dalam seri kedua – dari BP dengan $Q = 3$ – tampaknya mungkin untuk melihat dengan tepat pada frekuensi sementara apa filter bandpass bereaksi paling kuat, kurva amplitudo tampaknya sesuai dengan respons frekuensi filter.

Pada seri ketiga maksimum lebih ke kanan meskipun filter bandpass tidak mengubah frekuensi tengahnya. Frekuensi sepertinya tidak seperti sinyal satuan yang tidak berubah dari kiri ke kanan. Akhirnya, dalam seri yang lebih rendah – dari BP dengan $Q = 10$ – respon satuan uout jelas memiliki frekuensi sesaat yang sama selama seluruh periode. Respons satuan tentu saja tidak mereproduksi respons frekuensi.

Dengan demikian, rangkaian secara bertahap diuji dengan semua frekuensi rentang frekuensi yang kita bahas di sini. Dalam Gambar 104 seluruh sinyal satuan ditampilkan pada layar, di sebelah kiri frekuensi awal dan di sebelah kanan frekuensi berhenti. Dengan cara ini kurva uout pada layar tidak hanya menunjukkan kurva waktu tetapi juga secara tidak langsung respon frekuensi dari sistem yang diperiksa.

Tapi hati-hati! Jangan pernah melupakan Prinsip Ketidakpastian UP. Transformasi FOURIER dari sinyal satuan ini menunjukkan konsekuensi dari memulai sinyal secara tiba-tiba, berubah dengan cepat dan berakhir dengan tiba-tiba. Sinyal satuan harus benar-benar menghasilkan respons frekuensi persegi panjang yang jelas. Mudah-mudahan, Anda sekarang tahu bahwa ini tidak mungkin. Semakin cepat sinyal satuan berubah, semakin pendek "frekuensi sesaat" dan semakin tidak akurat pengukurannya.



Gambar 106: Sapu – metode pengukuran dengan kesalahan yang telah diprogram sebelumnya

Di sini kita melihat tiga respons sinyal sapuan dari Gambar 105 sekali lagi. Dalam domain waktu mereka sangat berbeda satu sama lain; terutama di seri bawah efek "misterius" terjadi.

Sebaliknya FT dari sinyal "manja" ini menunjukkan respons frekuensi dengan sangat tepat; karenanya informasi yang benar tentang respons frekuensi harus ada di uout (lihat bagian berikutnya: Transien). FT tampaknya, oleh karena itu, menjadi satu-satunya cara yang cocok untuk mengatakan sesuatu yang tepat tentang perilaku frekuensi suatu rangkaian/proses. Sekarang sinyal di seri bawah mudah dijelaskan. Karena filter bandpass sangat sempit di sini ($\Delta f \rightarrow 0$) maka secara praktis hanya dapat melewatkan satu frekuensi – lihat kiri bawah – dan akibatnya UP uout juga harus bertahan lebih lama.

Sebagai hasil dari UP, metode sapuan mengandung terlalu banyak kesalahan – kecuali pengukuran dilakukan dengan sangat lambat karena selubung mungkin tidak mencerminkan kurva amplitudo yang sebenarnya. Seperti dapat dilihat di sebelah kanan, ketiga band pass filter memiliki frekuensi tengah yang sama yaitu 50Hz.

Pada Gambar 105 pengukuran sapuan dilakukan dengan menggunakan band pass filter dengan bandwidth atau kualitas yang berbeda Q. Kualitas Q dari band pass filter sederhana adalah ukuran kemampuan untuk menyaring sesempit mungkin lebar pita atau tolok ukur untuk mengukur kecuraman sisi filter. Pertama, "kualitas buruk" yaitu filter lolos pita lebar lebar tanpa sisi curam ($Q = 3$) disapu. Respon frekuensi dapat dikenali di sini dengan jelas melalui kurva amplitudo. Akibat bandwidth yang besar $B = f$ semua frekuensi sesaat cukup panjang sehingga $t \gg 1$ terpenuhi (UP).

Pikirkan kurva yang menghubungkan nilai maksimum atas (yaitu amplitudo dari "frekuensi sesaat") satu sama lain. Kurva ini dimaksudkan untuk mewakili respons frekuensi (dari amplitudo) filter.

Jika lebar pita filter lolos pita disetel semakin sempit dengan kualitas Q – z.B. $Q = 6$ dan $Q = 10$ – dan kecuraman sisi meningkat, kurva sapuan tidak lagi menunjukkan respons

frekuensi karena UP telah bertentangan. Sinyal keluaran uout lebih mencerminkan osilasi difus sebagai reaksi terhadap sinyal sapuan tetapi bukan respons frekuensi amplitudo.

Kita dapat melarikan diri dari jalan buntu ini berkat sedikit kecerdasan dan metode yang lebih baik (dibantu komputer!). Rupanya sinyal bandpass dengan kualitas Q yang lebih tinggi telah ditandai oleh perilakunya dalam domain waktu, sifat transfer apa yang dimilikinya dalam domain frekuensi. Sampai batas tertentu ditunjukkan oleh perilakunya dalam respons transiennya (dalam domain waktu) seperti apa perilakunya dalam domain frekuensi.

Ini harus dinyatakan lebih tepat. Melalui sinyal sapuan secara bertahap (keseluruhan $t = 1s$) semua frekuensi – sinyal sinusoidal – dari rentang frekuensi yang akan diperiksa dengan amplitudo konstan diarahkan ke input. Sinyal keluaran harus mengandung semua frekuensi dengan ketidakpastian tertentu, yang telah melewati filter bandpass dengan kekuatan (amplitudo) dan pergeseran fasa tertentu.

Oleh karena itu, out harus dikenai FT melalui komputer. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 106. Kurva sapuan "salah" "terdistorsi" oleh transien respons dalam domain frekuensi tampaknya menunjukkan respons frekuensi dari lintasan pita sempit yang direpresentasikan sebagai spektrum amplitudo. Menurut informasi ini terkandung dalam sinyal keluaran uout – tetapi informasi ini hanya dapat dikenali melalui FT.

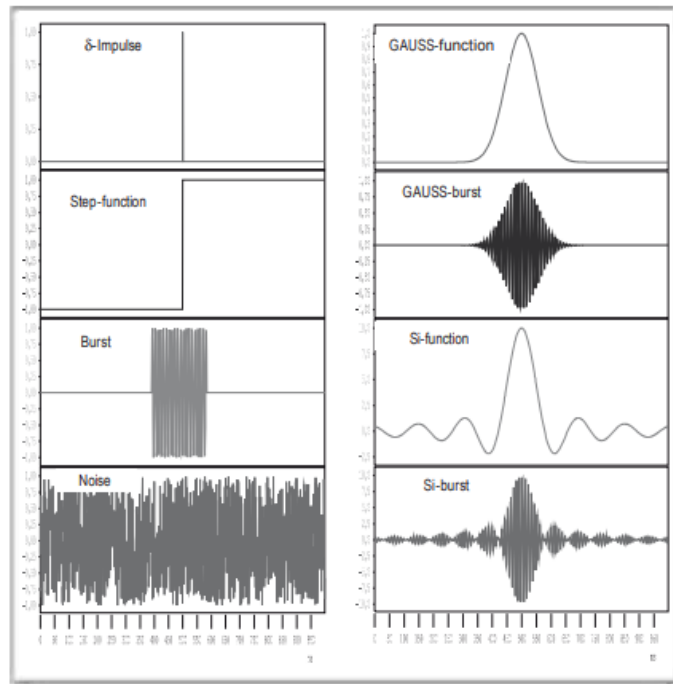
Kesimpulan awal:

- Fitur transmisi sirkuit/komponen/sistem hanya dapat disimpulkan secara tidak akurat dan dengan cara yang sangat memakan waktu dengan alat ukur tradisional – generator fungsi analog dan osiloskop analog.
- Di atas semua kemungkinan untuk menggunakan FT dan IFT (FT inverse) kurang. Namun hal ini mudah dilakukan dengan sistem pemrosesan sinyal digital (DSP) melalui komputer.
- Hanya ada satu jalur yang benar dari domain waktu ke domain frekuensi dan sebaliknya – FT dan IFT!

Karena itu, masa depan pembangkitan dan pemrosesan sinyal modern serta analisis sinyal dan sistem terletak pada pemrosesan sinyal digital berbantuan komputer (computer-aided digital signal processing, DSP). Sinyal analog dapat disimpan secara digital dan dievaluasi sesuai dengan kriteria yang diinginkan dan direpresentasikan secara grafis melalui kartu suara langsung dan versi DASyLab S.

Sinyal Uji Modern

Di zaman pemrosesan sinyal berbasis komputer ini, sinyal uji lainnya mendapatkan signifikansi praktis karena kepentingan teoretisnya karena setiap proses matematika teoretis dapat diimplementasikan dalam arti sebenarnya melalui algoritme program tertentu.



Gambar 107: Bentuk penting dari sinyal uji untuk metode berbasis komputer

Sinyal yang disajikan di sini sejauh ini hampir secara eksklusif penting secara teoritis. Sebagai hasil dari komputer, teori dan praktek menjadi lebih dan lebih dari satu unit karena teori berkaitan dengan model proses matematika dan komputer dapat dengan mudah menghitung hasil dari proses matematika (rumus) dan mewakili mereka secara grafis.

Sinyal uji penting lainnya adalah

- -pulsa
- GAUSSian pulse
- Fungsi langkah
- pulsa osilasi GAUSSian
- Pulsa meledak
- Fungsi-si
- Kebisingan
- Denyut si-osilasi

Semua sinyal uji ini dihasilkan berdasarkan rumus melalui komputer dan bukan melalui sirkuit analog khusus. Masing-masing sinyal uji ini memiliki kelebihan dan kekurangan tertentu yang akan diuraikan secara singkat di sini.

pulsa

Bagaimana sifat osilasi mobil – massa mobil, pegas, peredam kejut membentuk lintasan pita mekanis teredam kuat – diukur dengan cara yang lurus? Mudah – dengan mengemudi di atas lubang di jalan dengan kecepatan tinggi! Jika mobil terus bergetar untuk waktu yang lebih lama – karena UP itu adalah sistem pita sempit – peredam kejut tidak beres, yaitu mobil sebagai sistem osilasi mekanis tidak cukup teredam.

Setara listrik dengan lubang di jalan adalah -pulsa. Reaksi sistem terhadap defleksi spontan yang berumur sangat pendek ini disebut respons pulsa pada keluaran sistem (lihat Gambar 108). Jika diperpanjang dalam waktu domain frekuensi menurut UP sangat terbatas, yaitu semacam rangkaian berosilasi terjadi. Setiap sirkuit berosilasi yang sangat teredam (peredam kejut utuh atau resistansi ohmik) adalah pita lebar, yaitu karena itu menghasilkan respons pulsa singkat. Ini adalah satu-satunya cara perilaku fisik filter (termasuk filter digital) dapat dipahami.

Respons -pulsa (umumnya disebut "respons pulsa" $h(t)$) memberikan melalui informasi kualitatif UP tentang sifat frekuensi dari sistem yang diuji. Tetapi hanya FT yang memberikan informasi yang tepat tentang domain frekuensi. Itu sendiri menunjukkan frekuensi apa (dan amplitudo dan fasenya) yang dikandung oleh respons pulsa.

Jika suatu sistem diuji dengan pulsa, sistem tersebut – tidak seperti sinyal sapan – diuji secara simultan dengan semua frekuensi (osilasi sinusoidal) dengan amplitudo yang sama. Misalnya pada keluaran dari filter lolos tinggi, frekuensi rendah di bawah frekuensi cutoff hampir sama sekali tidak ada. Jumlah frekuensi (tinggi) yang diizinkan lewat dari respons pulsa $h(t)$. Untuk mendapatkan respons frekuensi, respons pulsa $h(t)$ harus menjalani FT.

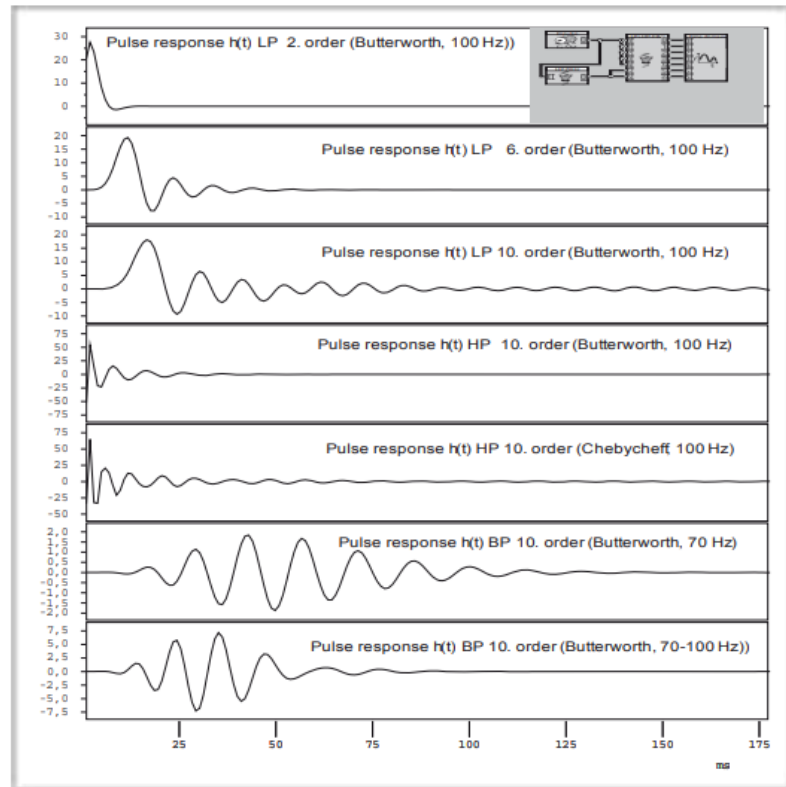
Pentingnya pulsa sebagai sinyal uji didasarkan pada fakta bahwa transformasi FOURIER FT dari respons pulsa $h(t)$ sudah mewakili fungsi transfer/respons frekuensi $H(f)$ dari sistem yang diuji.

Definisi fungsi transfer $H(f)$: Untuk setiap frekuensi, amplitudo dan perpindahan fase ϕ_{out} dan ϕ_{in} dibandingkan satu sama lain.

$$H(f) = (\hat{U}_{out}/\hat{U}_{in}) \quad (0 < f < \infty) \quad \Delta\phi = (\phi_{out} - \phi_{in}) \quad (0 < f < \infty)$$

Kesimpulan dan catatan:

- Berbeda dengan sinyal sapan dalam kasus pulsa, sistem diukur secara simultan dengan semua frekuensi ($\hat{U} = \text{konstan}$).
- Seperti dalam kasus -pulsa $\hat{U}_{in} = \text{konstan}$ untuk semua frekuensi, spektrum amplitudo dari respon pulsa membentuk kurva nilai absolut $H(f)$ dari transfer fungsi. Karena keterkaitan ini, respons pulsa direpresentasikan secara internasional sebagai $h(t)$.



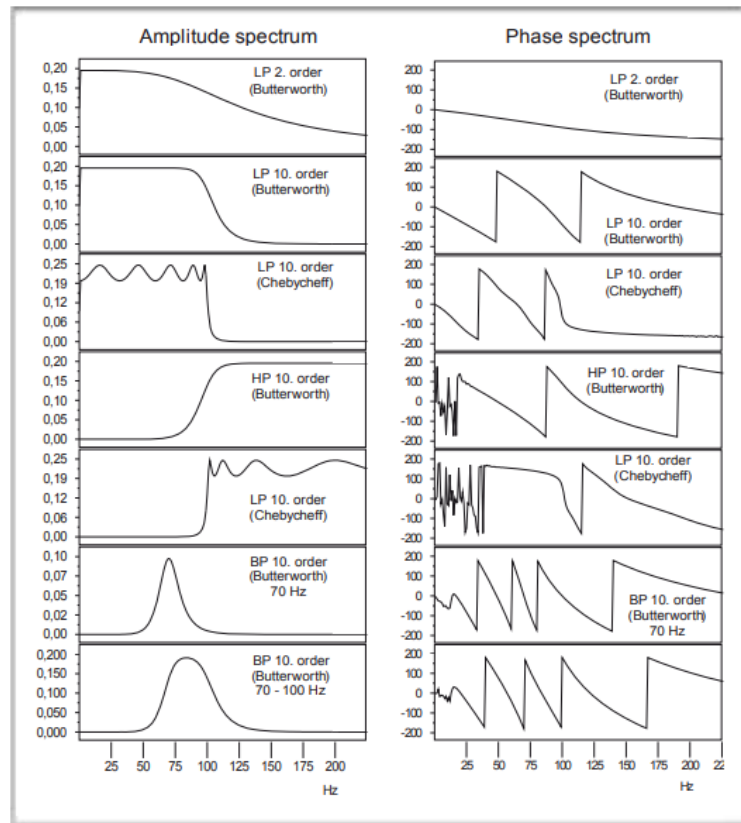
Gambar 108: Dari itik jelek....

Meskipun kita sekarang harus terbiasa dengan sifat-sifat pulsa, ia berisi semua frekuensi dan osilasi sinusoidal dengan amplitudo yang sama, yaitu sistem diuji secara bersamaan dengan semua frekuensi hasil dari analisis pengukuran ini tidak pernah gagal untuk mengejutkan. Respons pulsa pada pandangan pertama terlihat sangat tidak signifikan tetapi memberi tahu ahli banyak hal tentang perilaku filter yang terkait dengan frekuensi.

Dalam kasus filter orde tinggi, kecuraman tepi lebih besar dan akibatnya wilayah konduksi filter lebih kecil. Akibatnya, respons pulsa $h(t)$ bertahan lebih lama karena NAIK. Hal ini dapat dilihat dengan cukup jelas dalam kasus narrow band pass filter (70Hz). Dan, semakin besar kecuraman tepi, semakin besar penundaan di awal respons pulsa.

Filter highpass selalu broadband, respons pulsanya dimulai dengan langkah dan meningkat hingga frekuensi cutoff-nya. Sebagai hasil dari tingkat kecuraman tepi yang tinggi dari filter highpass CHEBYCHEFF, $h(t)$ bertahan lebih lama daripada di high pass BUTTERWORTH dengan urutan yang sama.

Sepertinya keajaiban bahwa FT dari respons pulsa yang tampak tidak signifikan ini menghasilkan fungsi transfer $H(f)$ yang tepat sesuai dengan nilai dan fase absolut (lihat Gambar 109). Namun spektrum fase hanya diberikan dengan benar jika -pulsa diposisikan pada titik referensi waktu $t = 0$. Berbeda dengan metode tradisional pengukuran menggunakan osiloskop dan generator fungsi, pengukuran dan evaluasi berbasis komputer hanya membutuhkan fraksi. dari satu detik.



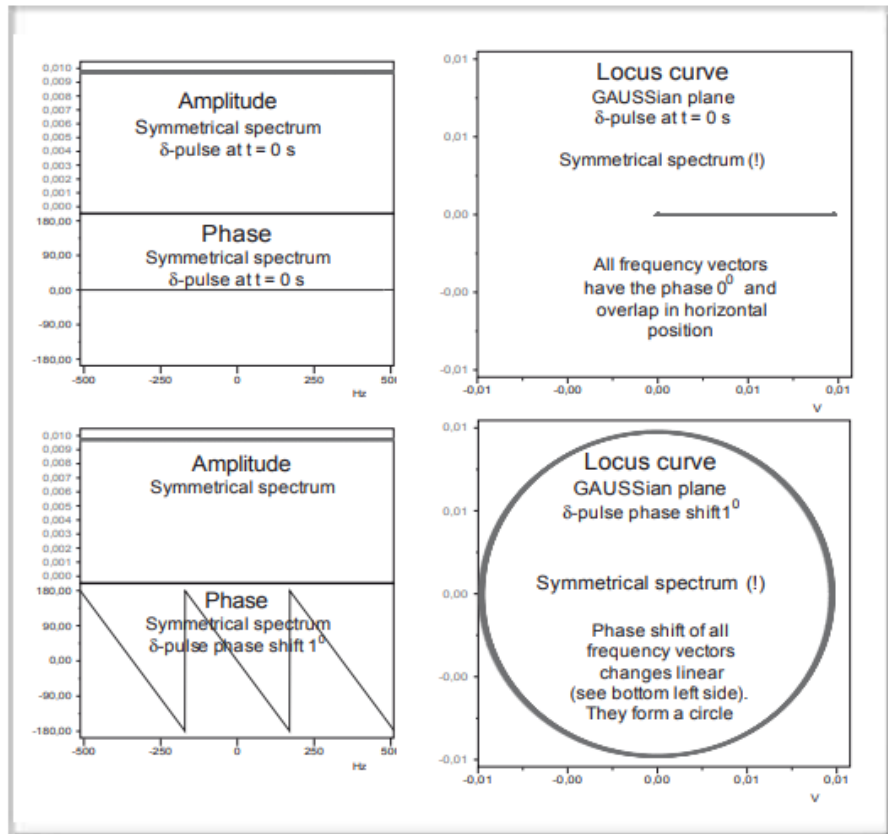
Gambar 109: kepada angsa yang cantik

FT dari respons pulsa yang tampak tidak signifikan $h(t)$ dari Gambar 108 menghasilkan seolah-olah ajaib – meskipun penjelasannya cukup jelas – fungsi transfer menurut nilai dan fase absolut.

Dalam kasus spektrum fase Anda melihat "langkah-langkah aneh". Alasannya adalah spektrum fase hanya diwakili antara $-\pi$ (atau -180 derajat) dan π (atau 180 derajat). Jika nilai terakhir terlampaui, kurva "melompat" ke bawah karena kedua sudutnya identik. Kurva fase "seperti kebisingan" yang tidak teratur muncul karena ketidakakuratan dalam perhitungan.

Dapat dilihat dengan jelas berapa harga kecuraman tepi. Jenis CHEBYCHEFF memiliki tepi yang lebih curam dengan urutan yang sama di wilayah keadaan konduksi tetapi juga konten riak yang lebih besar.

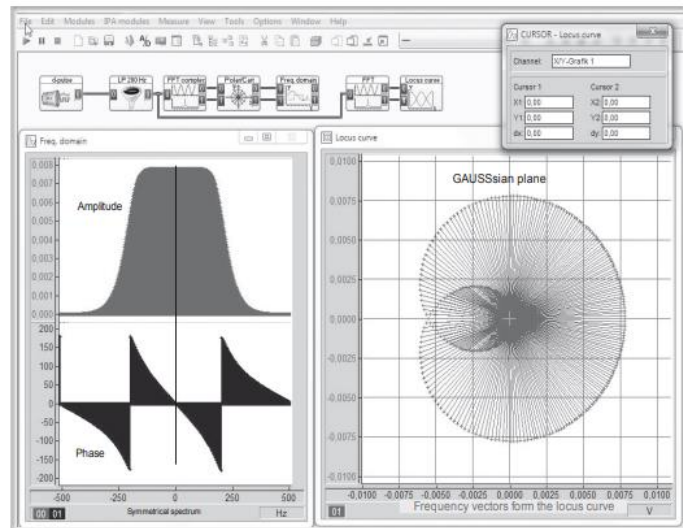
Pertimbangan sebelumnya menunjukkan pentingnya (teoretis) tertentu dari -pulsa sebagai sinyal uji. Dalam aplikasi praktis mereka harus sangat tinggi untuk memiliki energi yang cukup. Dalam hal ini mereka mewakili sesuatu seperti "percikan", yaitu seperti tegangan tinggi yang sangat singkat. Oleh karena itu, mereka mewakili bahaya bagi semua sirkuit dalam mikroelektronika. Apakah teori memberikan alternatif, yaitu sinyal uji dengan energi yang cukup, yang mudah dihasilkan dan tidak berbahaya bagi mikroelektronika?



Gambar 110: Representasi spektrum frekuensi pulsa dengan dephasing = 0 dan 1 derajat

Karena -pulsa adalah sinyal uji yang ideal untuk mengukur fungsi transfer dari proses sinyal atau sistem dari sudut pandang murni, perilaku frekuensinya harus diketahui dengan tepat.

- Jadi, secara singkat kita dapat menulis: $|FT(h(t))| = |H(f)|$ ("nilai absolut FT dari $h(t)$ sama dengan nilai absolut dari fungsi transfer $H(f)$ "). Selain itu, berikut ini berlaku: $IFT(H(f)) = h(t)$ ("FT kebalikan dari fungsi transfer $H(f)$ adalah respon pulsa $h(t)$ ").
- Kurva fase FT dari respon pulsa secara umum tidak persis sama dengan kurva fase dari fungsi transfer $H(f)$. Spektrum fase dari -pulse juga termasuk dan itu tergantung pada posisi -pulse terhadap $t = 0$ s. Jika -pulsa terletak tepat pada $t = 0$ s – yang sebagai akibat dari lebar terbatas fisik t dari -pulse tidak pernah mungkin – kedua kurva fase setuju persis satu sama lain.
- Komputer dapat menghitung "penyesuaian" ini dan kemudian memberikan kurva fase dari fungsi transfer.



Gambar 111: Vektor frekuensi membentuk fungsi alih $H(f)$ sebagai kurva lokus

Representasi kurva lokus dari -pulsa diketahui dengan baik dari Bab 5, Gambar 101. Di sini fungsi transfer filter BUTTERWORTH-lowpass dibuat oleh FFT dari respons pulsa sebagai kurva lokus.

Sebuah trik memungkinkan representasi dari vektor frekuensi individu (Laju pengambilan sampel dua kali lebih besar dari panjang blok) pada interval 1 Hz.

Garis yang menghubungkan titik akhir vektor membentuk "kurva lokus" dari fungsi transfer $H(f)$. Kedua representasi dari fungsi transfer - spektrum amplitudo dan spektrum fase (ke kiri) serta kurva lokus - mengandung informasi yang sama.

Kerugian dari pulsa- sebagai sinyal uji adalah energinya yang rendah karena durasinya yang singkat. Ini hanya dapat ditingkatkan dengan meningkatkan level (mis. 100V). Pulsa tegangan tinggi seperti itu dapat merusak mikroelektronika input. Untuk akustik, yaitu sistem elektromekanis seperti pengeras suara, pulsa sama sekali tidak cocok, bahkan berbahaya sebagai sinyal uji. Jika sinyalnya cukup kuat, membran loudspeaker mungkin akan rusak. Itu akan memiliki efek yang sama seperti pukulan singkat dengan palu pada membran atau seperti lubang di jalan yang terlalu dalam untuk mobil.

Fungsi Alih Sebagai Kurva Lokus

Dari sudut pandang teoretis, -pulsa adalah sinyal uji yang ideal, karena ia memasok semua frekuensi pada amplitudo yang sama! Jika -pulsa diposisikan pada $t = 0$, semua frekuensi memiliki pergeseran fasa 0 derajat atau 0 rad, yang direpresentasikan dalam Gambar 110. Hal ini penting untuk memastikan bahwa spektrum fasa dari proses dan/atau sistem yang dianalisis adalah untuk ditampilkan dengan benar.

Sampai saat ini pengukuran fungsi transfer telah direpresentasikan dalam dua cara: spektrum Amplitudo dan spektrum fasa. Kelemahan kecil selama representasi sebelumnya adalah bahwa hanya rentang frekuensi positif yang dipertimbangkan dalam hal amplitudo dan fase.

Dalam Bab 5 kemungkinan menyatukan informasi amplitudo dan fase sinyal dalam "vektor" tunggal di bidang GAUSSian telah disarankan. Bagian real dan imajiner menggambarkan vektor frekuensi dalam hal nilai x - dan y -nya. Karena setiap osilasi gelombang sinus terdiri dari dua vektor frekuensi $+f$ dan $-f$, baik rentang frekuensi positif maupun negatif disertakan, seperti yang ditunjukkan dengan jelas dalam Gambar 90 hingga Gambar 93.

Mari kembali lagi ke -pulsa dan representasi rentang frekuensinya, yang ditunjukkan pada Gambar 101 dan sekarang pada Gambar 110 sebagai apa yang disebut "kurva lokus". Jika -pulsa terjadi pada $t = 0$ s, semua (jumlah tak terhingga) vektor frekuensi berada pada posisi yang sama pada sumbu horizontal. Jika sebaliknya pulsa menyimpang seperti pada Gambar 110 – misalnya hanya sekitar 10^{-6} s, spektrum fasa menunjukkan sudut fasa lain untuk setiap frekuensi. Dengan demikian kurva lokus muncul sebagai sosok melingkar.

Jika -pulsa yang digunakan sebagai sinyal uji tidak dimulai pada $t = 0$ s, spektrum fasa dari proses dan/atau sistem tidak dapat ditentukan dengan tepat. Juga respon pulsa harus selalu dimulai pada

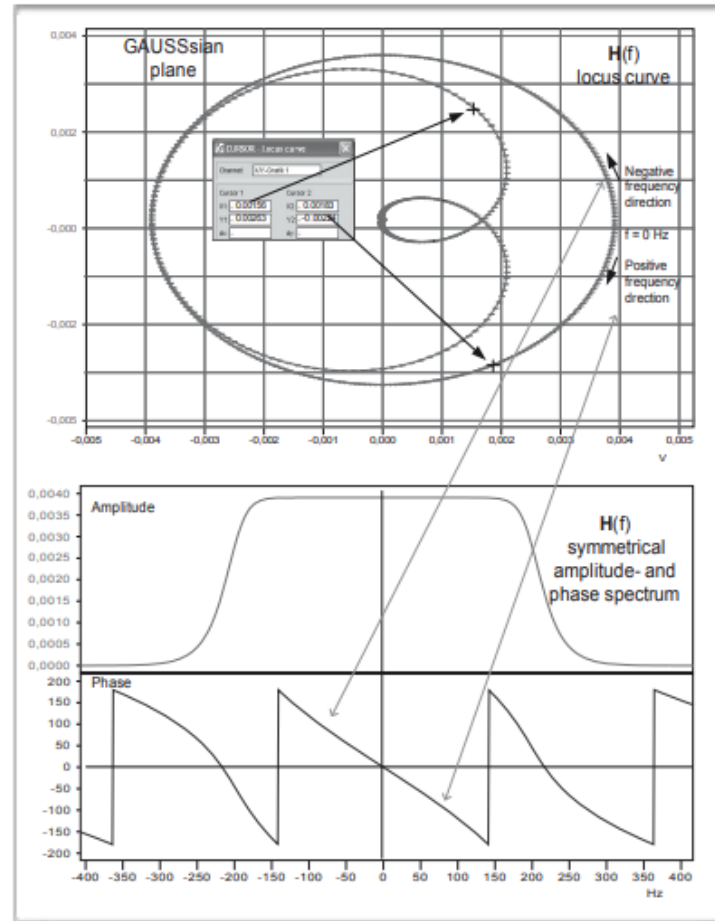
$t = 0$ detik!

Karena dalam proses dan/atau sistem yang bergantung pada frekuensi, frekuensi individu bervariasi dalam amplitudo dan fase, evaluasi frekuensi dari respons pulsa dari suatu proses dan/atau sistem dalam bidang GAUSSian menunjukkan perubahan posisi semua vektor frekuensi. Kurva lokus kemudian dihasilkan dari garis yang menghubungkan ujung-ujung vektor.

Khususnya contoh fungsi transfer $H(f)$ dari filter menunjukkan kelayakan bentuk representasi kurva lokus dari $H(f)$. Spesialis mengenali kualitas filter tertentu secara sekilas karena ini digambarkan dengan cara yang mengesankan secara visual oleh kurva lokus dengan simetri terhadap sumbu horizontal. Filter bergradasi tinggi, yaitu, dengan sisi curam yang hampir berbentuk persegi panjang, menunjukkan hasil dari respons pulsa Prinsip Ketidakpastian (UP) dalam durasi yang lama. Dalam hal osilasi gelombang sinus, "penyebaran" ini sesuai ke pergeseran fasa yang sangat besar, sering kali kelipatan 360° atau 2π rad. Setiap riaknya filter di pita lulus dikenali sebagai deviasi – "penyok" – dari kurva lokus lingkaran.

Hasil keseluruhan:

- Daerah pita pemblokiran dari kurva lokus terletak di sekitar pusat $(0,0)$ bidang GAUSSian karena amplitudo menuju ke sana melawan nol.
- Daerah pita lolos dari filter akan berada pada zona kira-kira melingkar dari kurva lokus. Jika zona ini agak lebar, ini sesuai dengan wilayah pita bergelombang. Filter yang diapit curam menyebabkan pergeseran fasa ekstrim dari vektor frekuensi, hingga kelipatan 2π rad atau 360° .



Gambar 112: Detail fungsi alih dalam kedua bentuk representasi

Dengan kedua bentuk representasi, seluruh - positif dan negatif - rentang frekuensi terdaftar. Cukup menarik, pada 0 Hz spektrum fase berubah secara terus menerus dan lancar dari positif pada 0 Hz ke rentang frekuensi negatif. Spektrum fase secara keseluruhan adalah titik-simetris.

Dua panah menunjukkan segmen positif dan negatif dari kurva lokus, yang terletak simetris dengan sumbu horisontal. Jarak antara "titik pengukuran", yang ditandai dengan salib kecil, adalah 1 Hz. Jarak antara persilangan kecil pada kurva lokus adalah yang terbesar di mana fase dan amplitudo berubah paling cepat.

Transisi antara pita lintasan (atau "wilayah") dan pita pemblokiran – sayap filter – terbentuk dalam kasus filter dengan sayap curam pendek, dengan filter buruk garis penghubung yang lebih panjang antara wilayah tengah dan cincin luar.

Kurva lokus memiliki fungsi "pembesar", karena area yang menjadi perhatian utama – pass band dan filter flanks – ditampilkan diperbesar. Itu dapat dikenali dari jarak antara titik pengukuran, yaitu, jarak yang lebih besar menyiratkan perubahan amplitudo yang lebih besar dan fase untuk perubahan frekuensi tertentu.

Karena pentingnya fungsi transfer $H(f)$ idealnya harus diwakili $H(f)$ dalam kedua bentuk, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 111. Dengan demikian wilayah spektrum negatif dapat dimasukkan baik untuk amplitudo maupun fase.

Dalam bidang GAUSSI, bagian real dan imajiner mewakili apa yang disebut koordinat Cartesien, biasanya ditunjuk sebagai koordinat x dan y . Dalam menu modul DASY- Lab sekarang ada modul di bagian pemrosesan sinyal yang mengubah koordinat x dan y dari vektor ini menjadi "bentuk kutub" - amplitudo dan fase -. Ini sesuai persis dengan amplitudo dan kemajuan fase di bawah dimasukkannya rentang frekuensi positif dan negatif

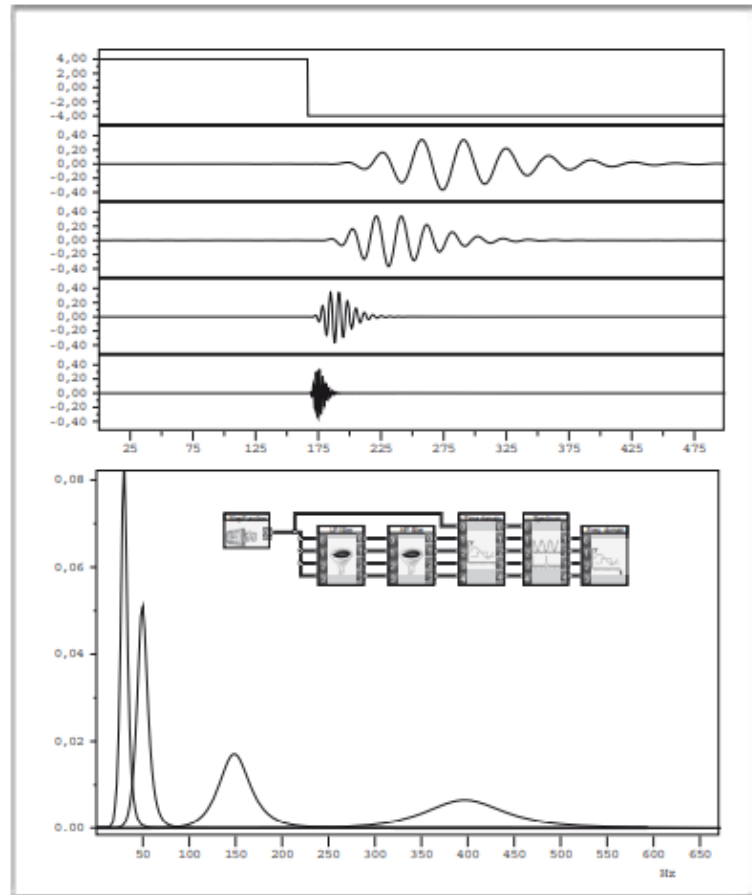
Fungsi langkah

Sinyal uji yang umumnya digunakan dalam rekayasa kendali otomatis adalah fungsi langkah (lihat Gambar 107). Ini didasarkan pada filosofi berikut: Sistem terkena satu perubahan keadaan yang sangat singkat (dalam kasus pulsa ada dua perubahan keadaan ekstrim yang mengikuti satu sama lain dimana perubahan keadaan pertama segera dibalik). Perubahan keadaan ini sehubungan dengan fungsi langkah menyebabkan reaksi tertentu dalam sistem. Ini kemudian mengungkapkan segala sesuatu tentang perilaku fisiknya sendiri sehubungan dengan osilasi dalam sistem.

Sedangkan lubang yang dikendarai dengan kecepatan sesuai sebagai sinyal uji untuk -pulsa, sifat fungsi langkah dapat dibandingkan dengan mengendarai mobil ke atau turun dari trotoar (asalkan trotoar tidak terlalu tinggi!). Mobil yang bergetar sebentar memberi tahu kita apakah peredam kejut baik-baik saja. Dari sudut pandang kelistrikan, fungsi langkah setara dengan menghidupkan atau mematikan tegangan searah, yaitu sangat mudah untuk menghasilkan sinyal uji ini.

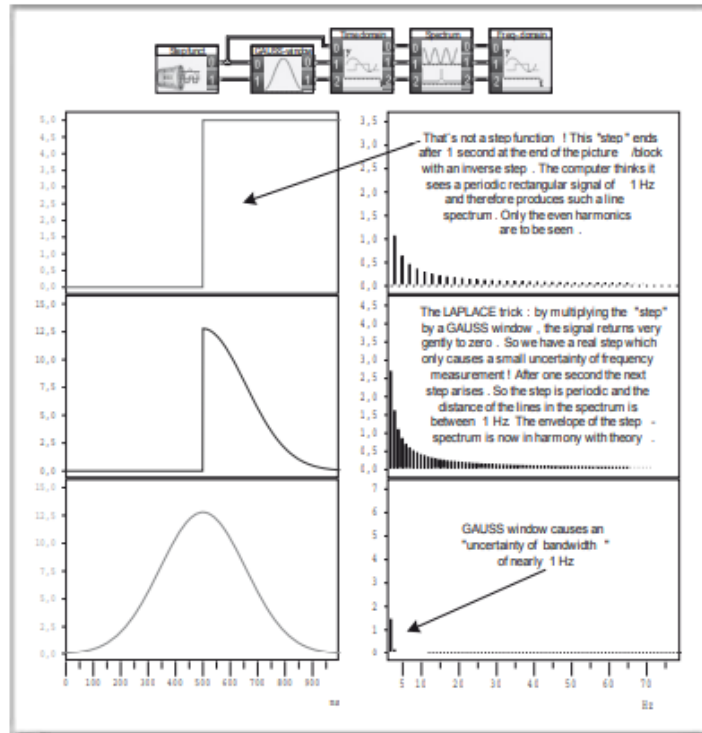
Fungsi langkah memiliki keunggulan dibandingkan dengan -pulsa yang memiliki lebih banyak energi. Ini juga dapat dipahami dengan mempertimbangkan mobil sebagai "sirkuit osilasi mekanis". Sebuah lubang di jalan – setara dengan -pulse – mungkin tidak diperhatikan oleh pengemudi jika "diserap". Hanya dari ukuran tertentu itu akan membuat dirinya terasa. "Lompatan" mobil dari tepi jalan akan selalu terlihat betapapun cepatnya mobil melaju darinya.

Karena setiap sistem beresilasi akan bereaksi terhadap "langkah" seperti itu atau rangkaian beresilasi apa pun digerakkan dengan frekuensinya sendiri (frekuensi alami f_E), fungsi langkah satu kali harus berisi semua frekuensi.



Gambar 113: Apakah fungsi langkah memuat semua frekuensi?

Fungsi langkah dihubungkan dengan filter pass band yang sangat sempit (dibentuk dari LP dan HP) yang hanya memungkinkan melalui satu frekuensi. Oleh karena itu tanggapan langkah adalah "sinyal sinusoidal singkat". Hanya frekuensi tengah yang divariasikan tanpa mengubah sensitivitas (Kualitas Q) filter. Spektrum - FT dari respons langkah - menunjukkan bahwa frekuensi rendah jauh lebih kuat terwakili dalam spektrum daripada yang tinggi. Lebih tepatnya - jika frekuensi digandakan, ketinggian spektrum amplitudo dari respons langkah menjadi setengahnya. Ini menunjukkan: $U \sim 1/f$. Sifat ini akan dieksploitasi dalam percobaan yang disajikan pada Gambar 113 untuk memperoleh informasi tentang kurva spektrum amplitudo fungsi langkah.



Gambar 114: Trik dengan Transformasi LAPLACE

Fungsi langkah berisi masalah matematika dan teknologi pengukuran karena tidak jelas apa yang terjadi setelah langkah. Akhir dari prosedur pengukuran menyiratkan akhir atau "melompat mundur" dari fungsi langkah. Jadi, (dalam retrospeksi) kami tidak menggunakan fungsi langkah sebagai sinyal uji melainkan persegi panjang lebar t . Masalah ini dihilangkan dengan trik. Fungsi langkah diakhiri selembut mungkin karena memudar secara eksponensial atau menurut fungsi GAUSSI. Semakin lambat ini terjadi, semakin sinyal uji ini memiliki fitur fungsi langkah (teoretis). Trik ini sehubungan dengan FT selanjutnya disebut Transformasi LAPLACE.

Menjalankan fungsi langkah FT tidak mudah tanpa trik karena tidak periodik dan durasinya tidak ditentukan. (Apa yang terjadi setelah "langkah" – lompatan mundur?).

Memikirkan hal ini membawa kita selangkah lebih maju – fungsi langkah adalah semacam persegi panjang dalam Gambar 33 – ukuran untuk posisi nol dari spektrum amplitudo persegi panjang. Semakin besar, semakin kecil jarak antara posisi nol dari spektrum. "Langkah" kedua (lompat ke belakang) praktis di mana prosedur pengukuran berakhir.

Tergantung pada durasi "merekam" t , memiliki nilai yang cukup spesifik. Kesulitan yang cukup besar dalam pengertian teknologi matematika dan pengukuran yang terlibat di sini.

Matematikawan memiliki jalan lain untuk tas trik mereka dan trik ini disebut Transformasi LAPLACE. Ini terdiri dari membatasi durasi fungsi langkah secara artifisial sehingga memungkinkan untuk mengevaluasinya melalui FT. Umumnya fungsi-e atau atau fungsi GAUSSian digunakan di sini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 114. Ini membentuk transisi begitu "lembut" sehingga hampir tidak terlihat dalam hal frekuensi.

Penggunaan transisi "lembut" tersebut ("windowing") dalam analisis FT dari sinyal non-periodik telah dijelaskan (Gambar 52 – Gambar 54).

Catatan:

Hanya sinyal periodik – meskipun tidak terbatas waktunya – yang dapat dianalisis secara tepat karena selalu diulang dengan cara yang sama. Panjang analisis harus tepat merupakan kelipatan bilangan bulat dari panjang periode T .

Jika tidak, sinyal hanya dapat dianalisis dengan resolusi frekuensi f yang karena UP setara dengan nilai kebalikan dari durasi t dari panjang sinyal.

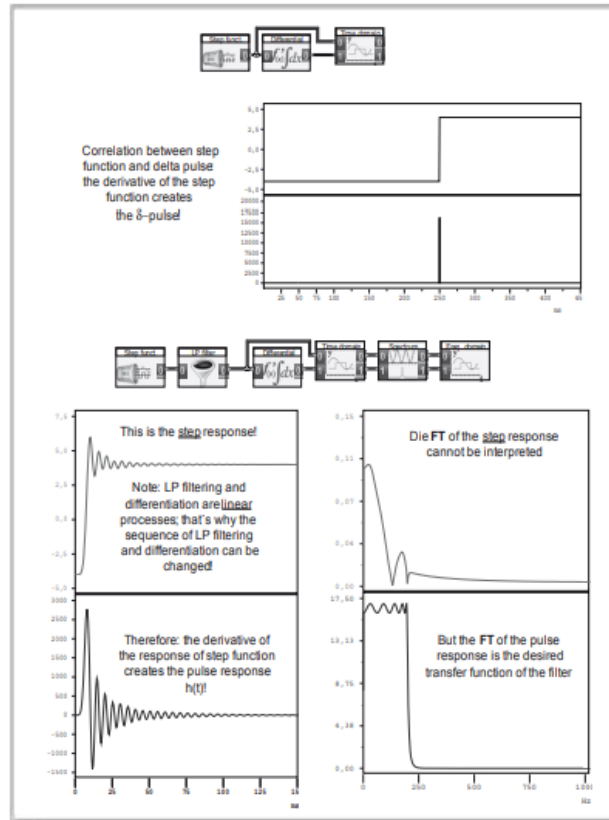
Pembatasan ini terjadi "tanpa terasa" dimana nilai langkah (misalnya 1 V) setelah langkah secara bertahap dan eksponensial mendekati nol. Untuk durasi t dari "pendekatan ke nol", $t > 1/\Delta f$ harus diterapkan karena UP dimana f adalah resolusi frekuensi yang diinginkan.

Teori ini menyediakan metode paling cerdas untuk menggabungkan keunggulan fungsi langkah – energi yang cukup – dengan keunggulan pulsa, FT dari respons pulsa secara langsung memberikan fungsi transfer dan respons frekuensi. Sebuah pulsa dapat dihasilkan dari fungsi langkah dengan diferensiasi. Diferensiasi adalah salah satu operasi matematika terpenting yang digunakan dalam ilmu pengetahuan alam dan teknologi. Bab 7 (Proses linier dan non-linier) akan membahas hal ini secara lebih rinci. Pada titik ini cukup untuk mengetahui apa efeknya pada sinyal.

Diferensiasi memungkinkan untuk menetapkan seberapa cepat sinyal berubah pada titik waktu tertentu. Semakin cepat sinyal meningkat pada saat tertentu, semakin besar nilai langsung dari sinyal yang terdiferensiasi. Jika sinyal berkurang pada saat tertentu, nilai langsung dari sinyal terdiferensiasi adalah negatif. Lihat saja Gambar 115 dan Anda akan tahu apa efek dari diferensiasi sinyal.

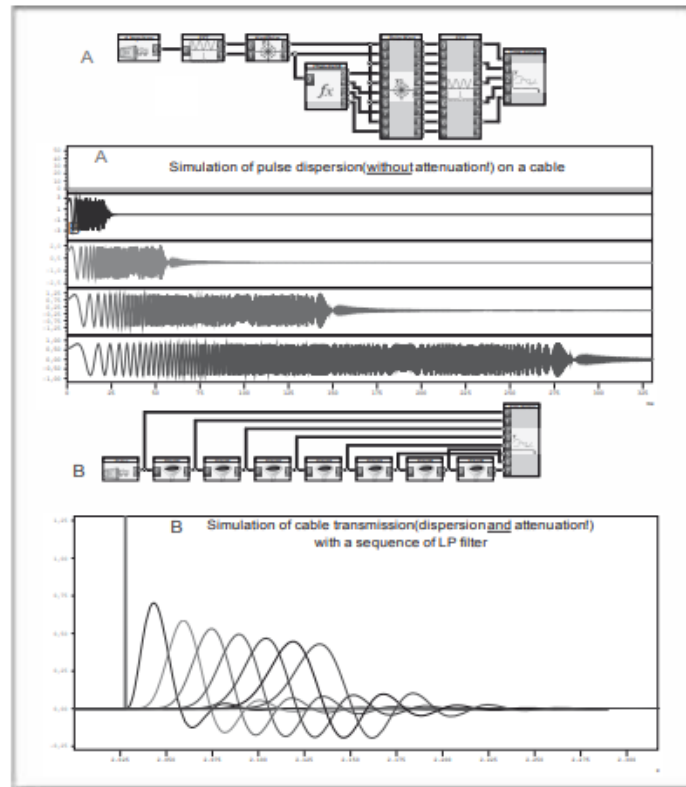
Melalui urutan operasi dalam Gambar 115, metode ini sampai batas tertentu dioptimalkan. Seperti yang dapat Anda lihat dari teks keterangan, fungsi langkah sinyal uji memiliki energi yang cukup meskipun langkahnya sedikit tinggi – fungsi ini tidak merusak mikroelektronika – tetapi respons pulsa $h(t)$ dievaluasi, FT dari yang secara langsung memberikan fungsi transfer $H(f)$.

Fungsi langkah juga sangat penting sebagai sinyal uji nyata. Ini memiliki energi yang cukup dan sangat mudah untuk menghasilkan. Melalui pemrosesan terkomputerisasi dari respons langkah – diferensiasi pertama, kemudian FT – kami memperoleh fungsi transfer $H(f)$, yaitu informasi lengkap tentang domain frekuensi dari sistem yang diuji. Semua kesulitan matematika dan fisika yang biasanya kita alami dengan fungsi langkah sekarang dapat dihindari.



Gambar 115: Optimalisasi analisis sistem: diferensiasi respons langkah

Jika fungsi langkah terdiferensiasi menghasilkan pulsa, respons langkah terdiferensiasi juga menghasilkan respons pulsa $h(t)$. Ini mengikuti dari fakta bahwa low pass dan diferensiasi mewakili proses linier. Oleh karena itu urutan urutan dapat diubah. Fungsi langkah yang memiliki energi yang cukup diarahkan pada rangkaian lowpass atau sistem. Tanggapan langkah dibedakan, respons pulsa $h(t)$ diperoleh. Sistem demikian secara tidak langsung diuji oleh -pulsa. Proses ini tidak dapat dipahami tanpa latar belakang teoritis.



Gambar 116: Dispersi pulsa pada kabel

Sejauh bentuk mereka yang bersangkutan pulsa jarum pada pandangan pertama akan ideal untuk mengukur waktu transit di kabel atau untuk menetapkan kecepatan propagasi dalam kabel. Namun, fenomena fisik terjadi pada kabel homogen yang mengubah bentuk pulsa: sebagai akibat dari dispersi yang bergantung pada frekuensi – kecepatan rambat tergantung pada frekuensi – spektrum fase berubah; sebagai akibat dari penyerapan yang bergantung pada frekuensi (redaman) spektrum amplitudo sinyal berubah. Sinyal yang berbeda muncul pada output dari input.

Di sini "kasus murni" dari dispersi -pulsa diwakili. Kabel disimulasikan oleh beberapa allpass yang terhubung secara serial. Mereka murni dispersif, yaitu mereka tidak meredam tergantung pada frekuensi tetapi hanya mengubah spektrum fase. -pulsa pada $l = 0$ km praktis memiliki spektrum amplitudo yang sama seperti pada $l = 16$ km. Menariknya, -pulsa menyebar menjadi pulsa osilasi yang menyerupai sinyal sapuan.

Kabel nyata dapat dengan mudah disimulasikan melalui serangkaian filter lowpass karena lowpass memiliki redaman yang bergantung pada frekuensi dan perpindahan fase (penyerapan dan dispersi, lihat di bawah).

Denyut GAUSSian

Di zaman DSP (Digital Signal Processing) pulsa memainkan peran yang sangat penting seperti halnya pola biner, yaitu informasi biner apa pun dari sudut pandang fisik terdiri dari susunan pulsa (pola pulsa).

Pulsa persegi panjang memiliki pita frekuensi yang sangat lebar sebagai akibat dari "langkah" mereka. Pita frekuensi yang lebar ini membuat dirinya tidak nyaman dalam teknologi transmisi. Jadi, setiap kabel mewakili media "dispersif" yang membuat transmisi pulsa lebih sulit.

Suatu medium bersifat dispersif, jika kecepatan rambat c di dalamnya tidak konstan tetapi bergantung pada frekuensi tertentu.

Akibatnya spektrum fase berubah sepanjang kabel karena osilasi sinusoidal individu menyebar pada kecepatan yang berbeda dan pada akhirnya mereka berada dalam posisi yang berbeda dalam hubungannya satu sama lain, yaitu spektrum fase sinyal telah berubah. Sebagai hasil dari efek ini, pulsa individu menyebar di sepanjang kabel; mereka menjadi lebih datar dan lebih lebar sampai mereka tumpang tindih. Informasi dengan demikian hilang.

Untuk alasan ini hampir tidak mungkin untuk mengukur kecepatan rambat c sepanjang bentangan kabel dengan menggunakan pulsa segi empat selama waktu transit t . Pulsa yang muncul di ujung kabel menjadi begitu tersebar dalam kasus kabel yang lebih panjang sehingga awal dan akhir pulsa tidak dapat lagi dibuat.

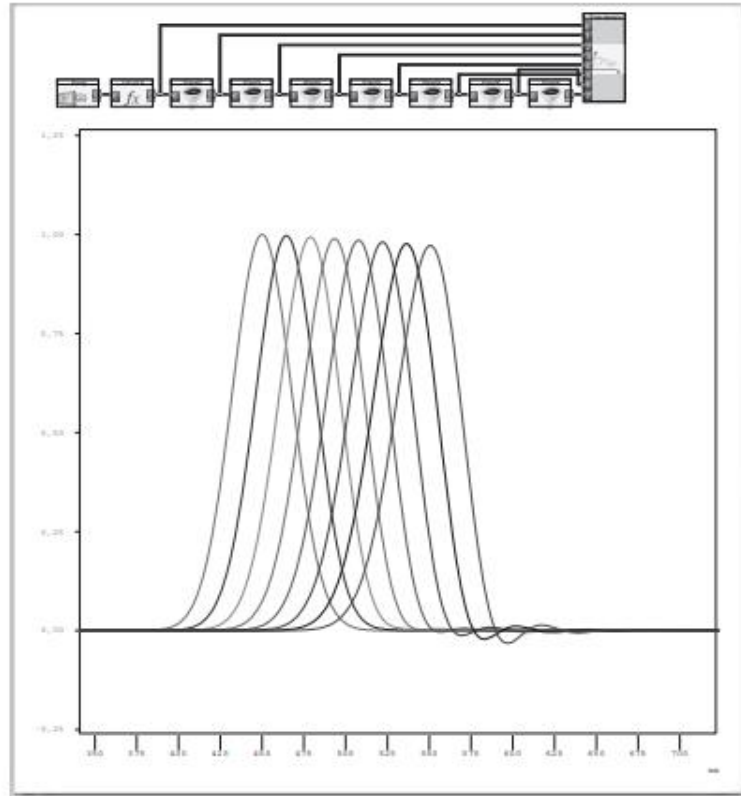
Untuk teknologi transmisi dan juga untuk teknologi pengukuran pulsa yang dirujuk di sini diperlukan pulsa yang untuk durasi tertentu t dan tinggi U memiliki pita frekuensi sesempit mungkin. Pulsa seperti itu hampir tidak menyebar mereka hanya teredam karena sebagai akibat dari pita frekuensi yang sempit, frekuensi hampir tidak menyebar pada kecepatan yang berbeda.

Saat pulsa GAUSSI dimulai dengan sangat lembut, berubah dengan lembut dan berakhir dengan lembut, ia menunjukkan sesuai dengan pengetahuan yang kita miliki sejauh ini (NAIK!) perilaku yang diinginkan.

Untuk alasan ini bentuk pulsa GAUSSI tidak hanya cocok untuk transmisi cepat data biner tetapi juga untuk mengukur waktu transit dalam sistem.

Ada bentuk sinyal lain yang dimulai dan diakhiri dengan lembut dan pada pandangan pertama hampir tidak berbeda dari pulsa GAUSSI. Semua sinyal ini memainkan peran penting sebagai "jendela" dalam menentukan dan menganalisis sinyal non-periodik.

Sifat penting dari pulsa GAUSSian harus ditunjukkan di sini: FT dari fungsi GAUSSian juga merupakan fungsi GAUSSian, yaitu spektrum termasuk frekuensi negatif memiliki bentuk yang sama dengan sinyal dalam domain waktu. Ini tidak berlaku untuk fungsi lain.



Gambar 117: Pulsa GAUSSian sebagai pulsa optimal untuk transmisi digital.

Alih-alih -pulsa pulsa GAUSSian di sini terkena dispersi. Hasilnya jelas: bentuk pulsa tidak banyak berubah. Dengan demikian, pulsa GAUSSian adalah pulsa optimal untuk transmisi melalui kabel. Hal ini tidak terbatas pada pengukuran waktu transit tetapi juga berlaku untuk proses transmisi digital dimana umumnya informasi dalam bentuk pola biner ditransmisikan. Pulsa GAUSSian cocok sebagai jenis pulsa untuk pola biner ini meskipun metode modulasi lainnya adalah yang paling canggih di sini.

Karena dimulai dan diakhiri dengan lembut, yaitu tidak memiliki transisi cepat, bandwidthnya minimal, frekuensi yang hampir tidak berbeda menyebar pada kecepatan yang hampir sama. Dengan cara ini dispersi tidak memiliki banyak peluang.

Pulsa osilasi GAUSSian

Sementara pulsa GAUSSian memiliki spektrum sempit yang simetris dengan frekuensi $f = 0$ Hz, spektrum ini dapat dipindahkan ke posisi domain frekuensi apa pun dengan menggunakan trik. Ini menghasilkan pulsa osilasi GAUSSian dalam domain waktu.

Untuk tujuan ini pulsa GAUSSian dikalikan dengan sinus frekuensi f_C (C sebagai "frekuensi pembawa") dimana spektrum akan dipindahkan. Hasilnya kemudian sinus dalam domain waktu yang dimulai dan diakhiri dengan lembut (lihat Gambar 107). Dalam domain frekuensi ini menyebabkan perpindahan spektrum (simetris) dari $f = 0$ Hz ke $f = f_C$ Hz (dan $f = -f_C$). Semakin sempit sinyal ini yang disebut pulsa osilasi GAUSSian dalam domain waktu, semakin luas spektrumnya dalam domain frekuensi. (NAIK; lihat juga Gambar 46). Trik penting menggunakan perkalian ini dibahas secara lebih rinci di Bab 7 dan 8).

Pulsa osilasi GAUSSian – seperti pulsa GAUSSian – cocok untuk menentukan secara langsung kecepatan grup v_{gr} dalam kabel atau di seluruh sistem dan – sebagai tambahan – untuk membandingkannya dengan apa yang disebut kecepatan fase v_{ph} .

Kecepatan fase v_{ph} adalah kecepatan gelombang sinusoidal. Dalam media dispersi - mis. sepanjang kabel – v_{ph} tidak konstan tetapi tergantung pada frekuensi f dan panjang gelombang λ . Kecepatan grup v_{gr} dipahami sebagai kecepatan sekelompok gelombang, yaitu sekelompok gelombang yang terbatas dalam waktu dan tempat (misalnya pulsa osilasi GAUSSian).

Catatan:

Energi dan informasi merambat sendiri pada kecepatan grup v_{gr} . Jika pulsa osilasi GAUSSian digunakan sebagai sekelompok gelombang, waktu transit t dari sinyal pembawa sinusoidal adalah tolok ukur untuk kecepatan fase v_{ph} , GAUSS kurva berbentuk amplop di sisi lain adalah tolok ukur untuk kecepatan grup v_{gr} . Jika v_{ph} konstan $v_{gr} = v_{ph}$. Sifat fisik yang menarik adalah kenyataan bahwa kecepatan grup v_{gr} tidak pernah bisa lebih besar dari kecepatan cahaya dalam ruang hampa c_0 ($c_0 = 300.000$ km/s). Ini belum tentu benar untuk kecepatan fase v_{ph} . Batas atas maksimum untuk transportasi energi dan informasi dengan demikian adalah kecepatan cahaya, atau kecepatan energi elektromagnetik dari medium yang terlibat. Dalam kabel, kecepatannya antara 100.000 dan 300.000 km/s.

Kesimpulan awal:

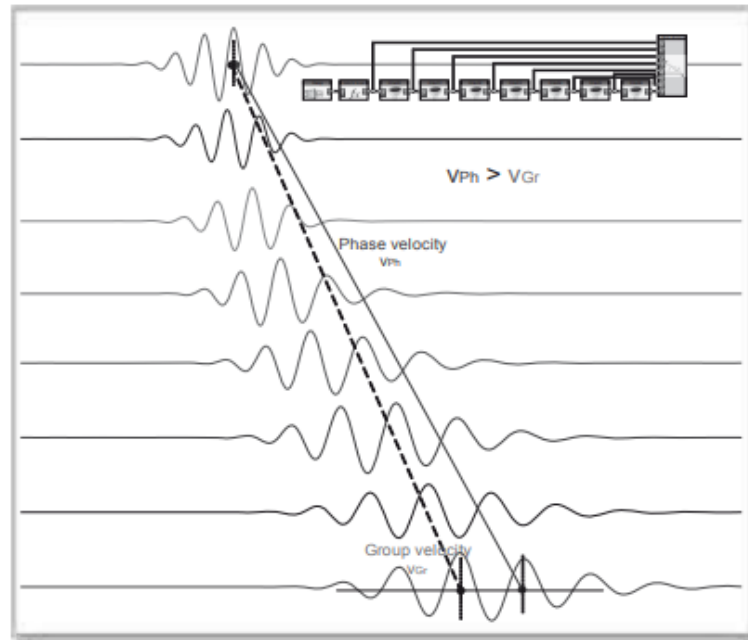
Pulsa GAUSSian dan pulsa osilasi GAUSSian kurang penting sebagai sinyal uji untuk mengukur respons frekuensi sirkuit dan sistem. Mereka dapat digunakan dalam pengukuran pulsa untuk menentukan secara langsung waktu transit, kelompok dan kecepatan fase.

Sinyal meledak

Sinyal burst adalah – seperti yang telah kita ketahui dari Gambar 45 – “sinus” terbatas waktu. Namun itu dimulai dan berakhir tiba-tiba dan ini memiliki konsekuensi untuk bandwidth dan ketidakpastian frekuensi gelombang sinus.

Dengan demikian burst dapat digunakan untuk menguji selektivitas frekuensi suatu rangkaian atau sistem secara kualitatif dalam lingkup nilai frekuensi sinus (mid-frequency). Namun, spektrum memiliki posisi nol; ini mewakili kesenjangan frekuensi.

Transien sirkuit selektif frekuensi dapat ditunjukkan dengan luar biasa melalui ledakan. Lihat bagian selanjutnya tentang “Transien”.



Gambar 118: Kecepatan grup dan fase

Pulsa osilasi GAUSSian ini diarahkan di sini ke rangkaian filter lowpass yang sama menurut Gambar 116. Hal ini dipengaruhi oleh redaman dan perpindahan fasa.

Kecepatan fase divisualisasikan di sini dengan menggunakan nilai maksimum dari sinus "berumur pendek" atau garis yang ditarik melalui tiga maxima. Kecepatan grup sesuai dengan kecepatan fungsi GAUSSian yang menyelimuti. Kedua kecepatan tidak identik karena maksimum tetangga tidak menjaga tingkat yang sama.

Fungsi Si dan pulsa osilasi Si

Kerugian dari -pulsa sebagai sinyal uji adalah energi spektralnya yang rendah dan tingkat pulsanya yang "berbahaya". Selain itu energi mendistribusikan dirinya sendiri secara merata di seluruh domain frekuensi dari 0 hingga .

Seperti apa sinyal uji yang ideal? – sinyal uji yang memiliki semua kelebihan pulsa tanpa kekurangannya. Mari kita coba menggambarkan sinyal semacam ini:

- Energi sinyal harus dibatasi pada rentang frekuensi sistem yang akan diuji
- Dalam rentang ini semua frekuensi (seperti dalam kasus pulsa) harus memiliki amplitudo yang sama sehingga FT secara langsung menghasilkan fungsi transfer $H(f)$.
- Semua frekuensi harus hadir secara bersamaan sehingga – tidak seperti sinyal sapuan sistem yang akan diuji dapat merespon pada waktu yang sama untuk semua frekuensi.
- Energi dari sinyal uji tidak boleh dimasukkan secara tiba-tiba atau dalam waktu yang sangat singkat, tetapi terus menerus agar sistem tidak rusak. Harap dicatat dalam hubungan ini bahwa sebagai akibat dari UP, sinyal terbatas pita frekuensi Df harus memiliki durasi tertentu Dt .

- Nilai maksimum sinyal uji tidak boleh terlalu besar sehingga mikroelektronika rusak.

Ada sinyal yang melakukan semua hal ini dan yang sudah sangat kita kenal. Fungsi Si dan pulsa osilasi Si. Mengapa sampai sekarang belum banyak digunakan. Sederhana. Itu hanya dapat dihasilkan yaitu dihitung dan dievaluasi menggunakan komputer. Oleh karena itu, penggunaan sinyal ini tidak dapat dipisahkan dengan DSP (Digital Signal Processing) berbasis komputer.

Gambar 48 sudah menunjukkan:

Fungsi Si (dan pulsa osilasi Si) tidak lain adalah segmen yang dipotong dari spektrum pulsa. Fungsi Si (dalam domain waktu) dihasilkan sebagai segmen frekuensi dari pulsa dari $f = 0$ hingga $f = f_{Si}$ Hz dengan respons frekuensi LP filter lowpass yang hampir sempurna. Lebih tepatnya, spektrum fungsi Si berkisar dari $f = -f_{Si}$ hingga $f = +f_{Si}$. Lihat juga Gambar 91.

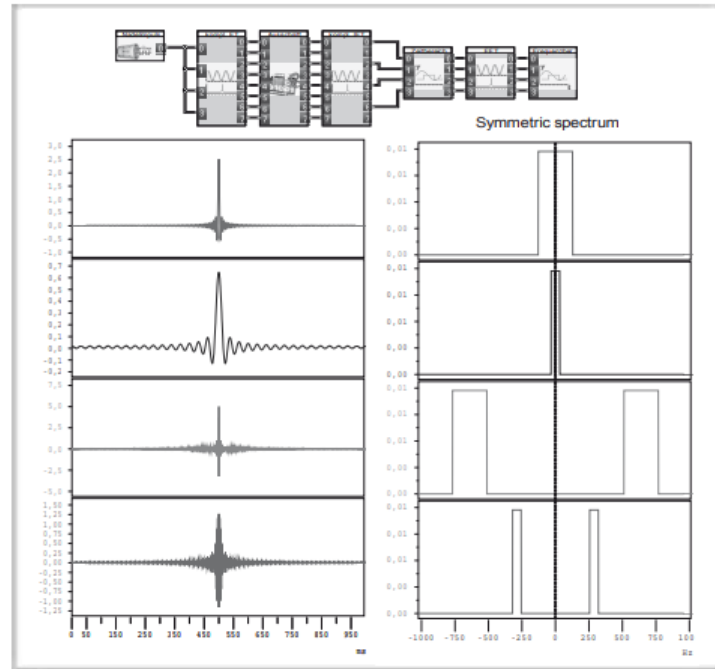
Pulsa osilasi Si (dalam domain waktu) dihasilkan sebagai segmen frekuensi pulsa d dari f_{bottom} ke f_{top} dengan respons frekuensi dari filter bandpass BP yang hampir ideal.

Ada dua metode pembangkitan fungsi Si dan fungsi osilasi Si. Pertama murni melalui rumus (misalnya dengan menggunakan modul "penerjemah rumus" dari DASYLab). Anda kemudian harus melakukan banyak percobaan sampai fungsi Si atau pulsa osilasi Si memiliki bandwidth yang tepat.

Metode yang sudah disarankan di halaman ini dengan hanya memotong segmen yang diinginkan dari spektrum pulsa jauh lebih elegan. Ini adalah metode yang digunakan dalam Gambar 95 dan sekarang digunakan dalam Gambar 119. Hanya pada tahap ini menjadi jelas betapa elegannya metode mengubah "maju dan mundur" dalam praktik.

Catatan:

- Semakin lebar pita frekuensi f dari fungsi Si atau fungsi Si-osilasi semakin menyerupai pulsa. Dalam hal ini ujung pulsa Si mungkin dapat membahayakan mikroelektronika.
- Semakin lama fungsi Si berlangsung sama sekali – yaitu semakin kurva Si cenderung menuju nol semakin banyak respons frekuensi yang menyerupai kurva persegi ("ideal") (UP!).



Gambar 119: Generator uji-Si yang ideal

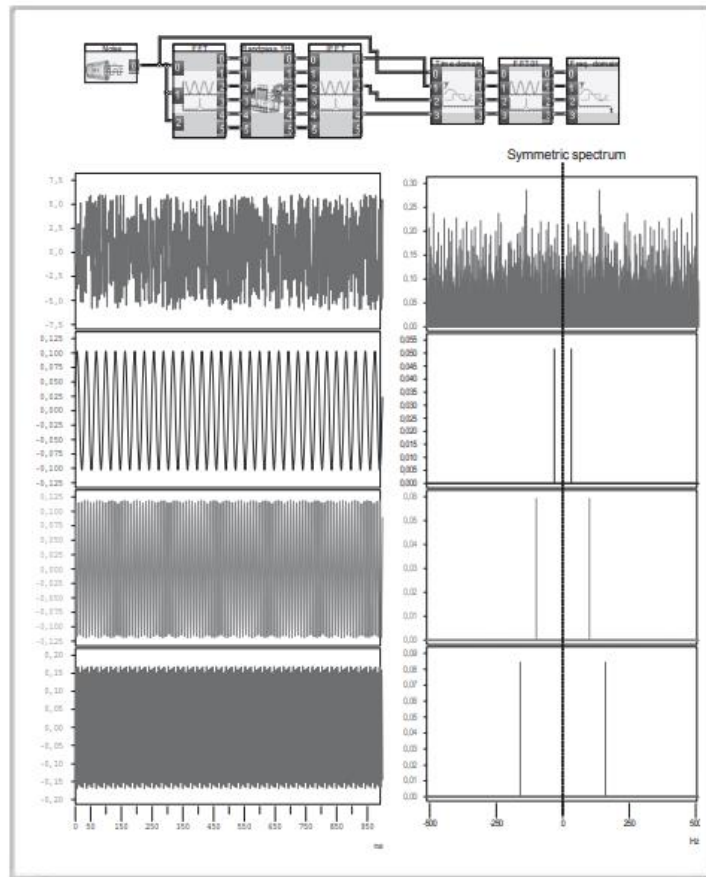
Rangkaian ini yang pada prinsipnya telah digunakan dalam Gambar 95 memanfaatkan fakta bahwa fungsi Si dan pulsa osilasi Si dihasilkan sebagai segmen frekuensi yang terputus dari pulsa.

Pulsa pertama kali ditransformasikan dalam domain frekuensi (FT). Di sana bagian nyata dan imajiner keduanya dipotong dengan cara yang sama. Jika sinyal lowpass diperlukan, frekuensi dari 0 hingga frekuensi cutoff f_{Si} dipotong. Dalam kasus sinyal bandpass hanya bagian yang relevan, dll. Sisa pita frekuensi kemudian diubah kembali ke dalam domain waktu (IFT). Sekarang tersedia sebagai sinyal uji dengan rentang frekuensi yang ditentukan secara tepat.

Perhatikan bahwa lowpass atas memiliki bandwidth dua kali lipat dari $-f_{Si}$ ke $+f_{Si}$. Sinyal ketiga (bandpass) memiliki bandwidth yang sama persis dengan yang pertama (lowpass). Hal yang sama berlaku untuk sinyal kedua dan keempat. Hal ini dapat dilihat pada domain waktu. Pulsa osilasi Si yang ditunjukkan memiliki sinyal Si yang digambarkan sebagai amplop.

Kebisingan

Sinyal uji yang paling "eksotis" tanpa diragukan lagi adalah noise stokastik murni. Seperti yang ditunjukkan pada akhir Bab 2, ini dihasilkan dari proses acak di alam. Proses tersebut dapat disimulasikan seperti yang diinginkan oleh komputer sehingga noise juga dapat dibangkitkan melalui komputer.



Gambar 120: Apakah noise benar-benar mengandung semua frekuensi?

Ini dapat diperiksa dengan mudah dengan menggunakan "sirkuit super" kami. Setiap empat frekuensi disaring dalam domain frekuensi – dalam Gambar 32, 100 dan 160 Hz ini dari atas ke bawah.

Kedengarannya sederhana tetapi pada saat yang sama cukup menakjubkan. Di mana ada filter – bandpass – yang lebar pitanya hanya memungkinkan satu frekuensi lewat, atau kemiringan sisinya cenderung "menuju tak terhingga". Bank filter kami hanya dibatasi oleh UP: dalam kasus durasi sinyal 1 detik, bandwidth atau ketidakpastian frekuensi harus minimal 1 Hz. Anda akan memperhatikan bahwa frekuensi yang disaring atau osilasi sinusoidal memiliki amplitudo yang berbeda. Jika Anda membuat dan mengoperasikan sirkuit sendiri, Anda akan mencatat bahwa amplitudo dan posisi fase berfluktuasi (kaca pembesar). Tidak mungkin untuk melihat keteraturan karena noise adalah sinyal stokastik atau acak. Menurut Anda, kapan fluktuasi ini akan menjadi lebih besar – dalam kasus sinyal derau pendek atau dalam kasus yang sangat, sangat panjang?

Jika kita telah mendefinisikan informasi sebagai pola bermakna yang tersusun (lihat Bab 2), noise stokastik tampaknya menjadi satu-satunya sinyal yang menurut definisi kita tidak memiliki informasi apa pun. Sebuah pola dalam sinyal memberikan kecenderungan untuk mempertahankan dirinya sendiri. Ini berarti bahwa sebagai transmisi suatu pola memerlukan periode waktu tertentu dalam kasus dua segmen waktu A dan B yang langsung mengikuti satu sama lain sesuatu di segmen B harus mengingatkan salah satu segmen A.

Dengan kata lain: harus ada kesamaan atau hubungan tertentu antara segmen waktu A dan B.

Kesamaan atau hubungan adalah konsep yang kompleks. Dalam hal sinyal, mereka dapat merujuk ke tiga area:

Pola sinyal mungkin mirip satu sama lain dalam domain waktu dan/atau frekuensi, hubungan/kesamaan juga dapat merujuk pada informasi statistik.

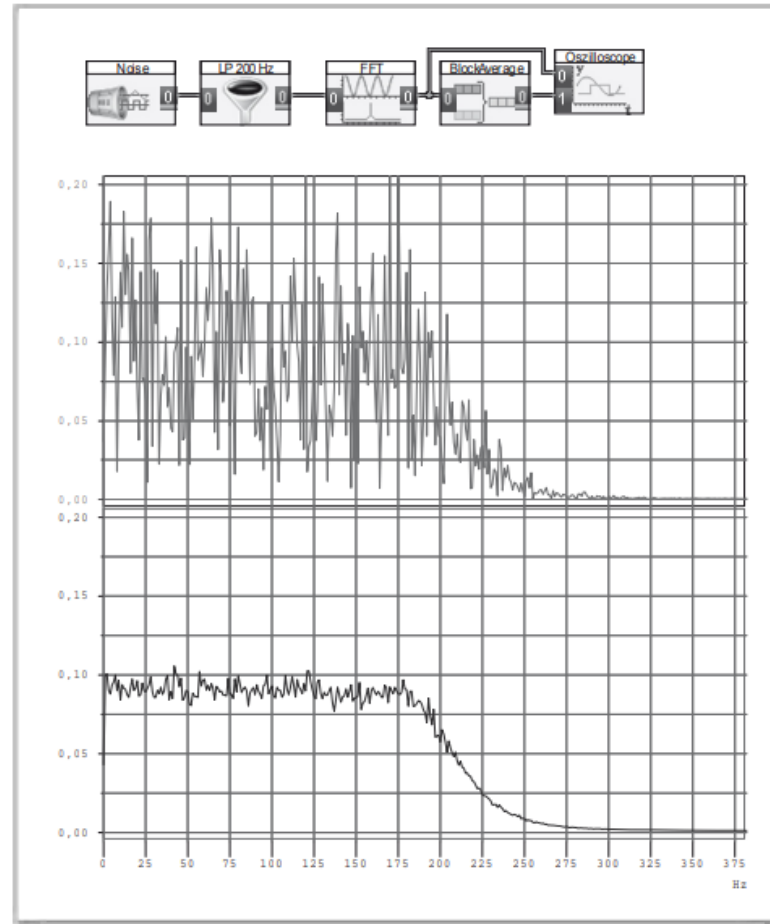
Contoh: peluruhan radioaktif terjadi secara acak. Peluruhan radioaktif yang diucapkan membuat terdengar atau terlihat melalui detektor membuat dirinya terasa sebagai kebisingan. Interval waktu antara dua proses peluruhan yang mengikuti satu sama lain atau antara dua klik secara statistik tunduk pada "distribusi eksponensial". Interval singkat antara dua klik sangat sering terjadi, interval panjang jarang terjadi. Dengan demikian, dua sinyal yang muncul sebagai hasil dari proses peluruhan radioaktif mungkin memiliki hubungan (statistik) tertentu satu sama lain.

Pertimbangan seperti itu mau tidak mau membawa kita ke teori informasi. Kita tidak bisa mengabaikan aspek teoretis dalam hal sinyal uji. Sementara sinyal suara uin tidak berisi informasi apa pun tentang fitur sistem, respons sistem, yaitu uout, harus berisi dan membuat transparan semua informasi tentang sistem. Sinyal uji yang ditangani sampai sekarang memiliki kecenderungan tertentu ke arah pelestarian, yaitu keteraturan tertentu dalam domain waktu dan frekuensi. Ini tidak terjadi dengan sinyal kebisingan – terlepas dari fitur statistik.

Semua informasi yang berisi respons noise berasal dari sistem, semua informasi mengatakan sesuatu tentang sistem. Sayangnya informasi tentang sistem ini tidak dapat dikenali secara langsung baik dalam domain waktu maupun frekuensi karena respons derau masih memiliki komponen acak.

Untuk mendapatkan fitur sistem dalam bentuk murni dari respons kebisingan, kita harus menggunakan statistik. Misalnya, dimungkinkan untuk menambahkan beberapa respons kebisingan dan menghitung rata-ratanya. FT dari respons kebisingan rata-rata ini adalah peningkatan yang jelas.

Nilai rata-rata memainkan peran yang menentukan dalam statistik, sebagian karena nilai rata-rata dari serangkaian pembacaan pengukuran stokastik harus sama dengan nol. Jika nilai rata-rata ini tidak nol, kuantitas tertentu akan muncul lebih sering daripada yang lain. Pembacaan pengukuran atau sinyal tidak akan murni acak.



Gambar 121: Kebisingan sebagai sinyal uji

Semakin lama sinyal kebisingan berlangsung semakin sedikit acak sehubungan dengan amplitudo frekuensi yang terkandung dalam kebisingan. Hal ini dibuktikan dengan metode pengukuran ini.

Alih-alih sinyal noise yang panjang, rata-rata hasil dari banyak sinyal noise dengan panjang 1 detik dihitung dalam Gambar (atas). Di bagian bawah Anda melihat spektrum sinyal noise yang difilter lowpass berdurasi 1 detik.

Kebisingan yang dihasilkan di sini melalui suatu algoritma (metode komputasi) dan secara tegas tidak lagi sesuai dengan kasus yang ideal. Ini ditunjukkan di sini karena bahkan setelah blok yang sangat panjang, rata-rata kurva filter tidak "halus". Di beberapa tempat puncak terus ada.

Transien dalam sistem

Dalam kasus beberapa sinyal uji – seperti -pulsa atau fungsi langkah – kami memaparkan sirkuit atau sistem pada perubahan mendadak dan mengamati reaksi (u_{out}). Respons pulsa $h(t)$ dan respons langkah mereproduksi reaksi ini. Sirkuit selektif frekuensi menunjukkan keterlambatan waktu tertentu akibat UP. Gambar 108 menunjukkan ini untuk semua jenis filter.

Dimungkinkan untuk memperkirakan lebar pita f dari sistem sebagai hasil dari $f \cdot t = 1$ (lihat Gambar 109).

Respons transien mencerminkan reaksi sistem terhadap perubahan mendadak pada kondisi semula. Itu berlangsung selama sistem selaras dengan perubahan atau telah mencapai apa yang disebut keadaan stasioner.

Setiap perubahan yang dipaksakan dari luar ke sistem (linier) yang mampu beresilasi - ini selalu merupakan sistem selektif frekuensi - tidak tiba-tiba atau tiba-tiba tetapi membutuhkan fase transisi. Fase transisi ini disebut sebagai "sementara". Keadaan tunak mengikuti yang biasanya disebut sebagai keadaan stasioner.

Respons pulsa $h(t)$ menggambarkan transien yang khas. Karena FT menghasilkan fungsi transfer $H(f)$ contoh ini memperjelas hal berikut: lihat Gambar 108.

Transien suatu sistem menunjukkan fitur osilasi dalam waktu dan karenanya dalam domain frekuensi. Untuk alasan ini, ini dapat dikenakan analisis sistem.

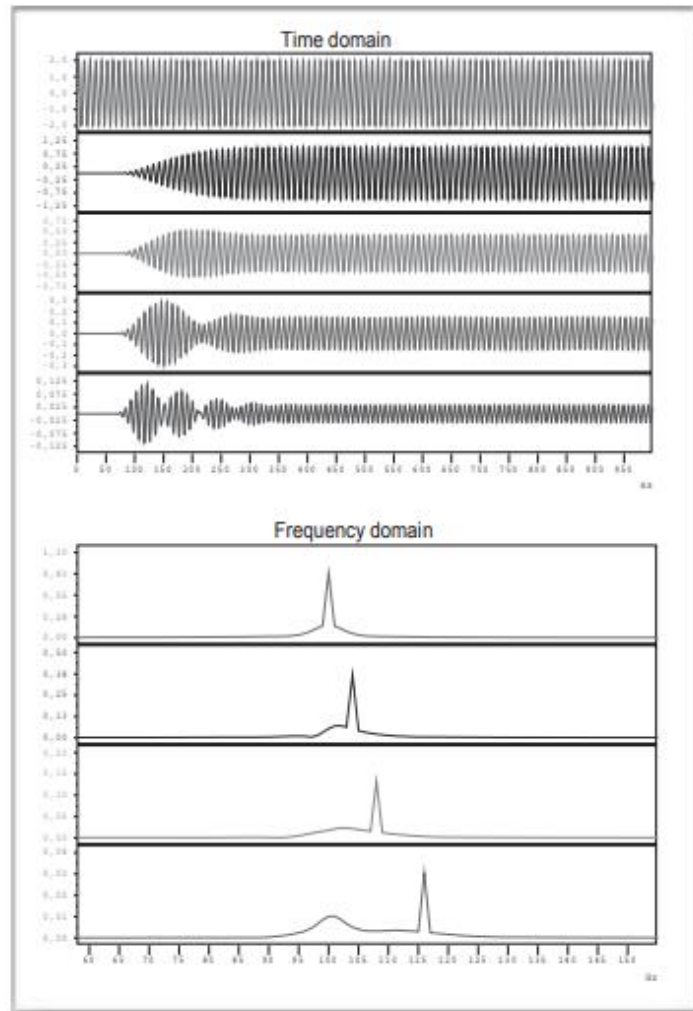
Selama transien sistem memberikan informasi tentang dirinya sendiri dan kemudian sebagian besar menyembunyikan informasi tentang sinyal aktual yang akan diangkut dari input ke output. Transmisi yang sebenarnya dari sinyal dibatasi pada dasarnya untuk lingkup kondisi stasioner (steady state).

Untuk mencapai arus informasi yang cukup besar di seluruh sistem, waktu transien t harus sesingkat mungkin. Menurut UP bandwidth f dari sistem harus sebesar mungkin.

Dalam Gambar 122 percobaan khusus dimaksudkan untuk menunjukkan apa yang sebenarnya terjadi selama transien dalam sistem selektif frekuensi.

Eksperimen ini memiliki hasil yang sangat penting bagi teknologi informasi. Ini menunjukkan dan menjelaskan mengapa sistem pita sempit hanya dapat mengirimkan sejumlah kecil informasi per unit waktu. Anda akan menemukan penjelasan yang lebih rinci di bagian utama teks.

Kami memilih filter bandpass yang sangat sempit – rangkaian osilasi – karena periode transien cukup besar untuk memungkinkan melihat dan menafsirkan proses dengan lebih mudah. Biarkan frekuensi keadaan konduksi (frekuensi alami, frekuensi resonansi) sama dengan 100 Hz



Gambar 122: Sementara: sistem mengatakan sesuatu tentang dirinya sendiri

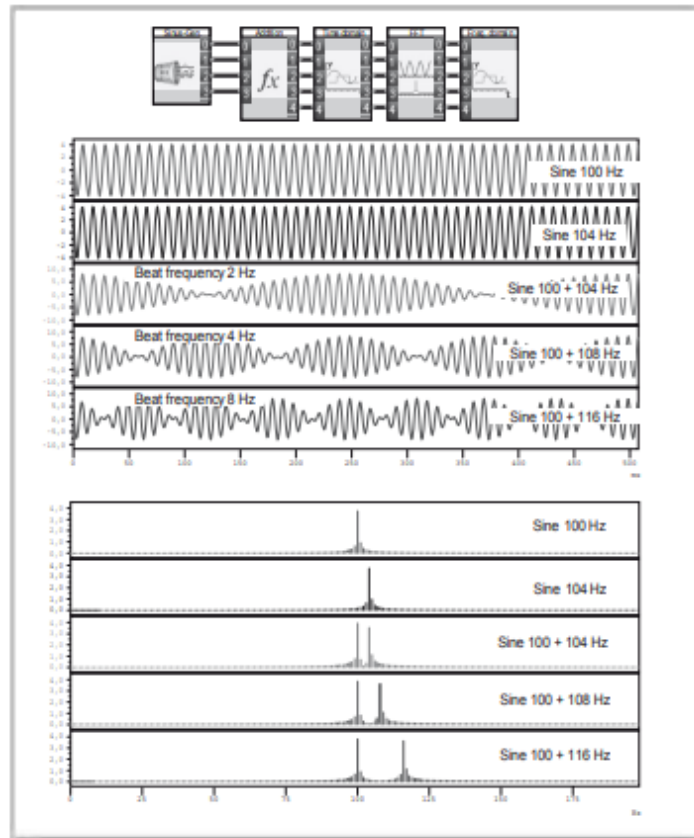
Definisi:

- Frekuensi alami f_E dipahami sebagai frekuensi beresilasi rangkaian resonansi setelah dimulai – misalnya oleh -pulse dan kemudian dibiarkan sendiri.
- Frekuensi resonansi f_R menunjukkan frekuensi di mana rangkaian resonansi dimulai oleh sinus dan dipaksa untuk beresilasi menunjukkan reaksi maksimumnya.
- Frekuensi alami dan frekuensi resonansi memiliki nilai yang sama dalam rangkaian resonansi berkualitas tinggi. Dalam kasus redaman tinggi dari rangkaian resonansi, frekuensi resonansi sedikit lebih tinggi dari frekuensi alami: $f_R > f_E$

Pilih pulsa burst yang awal tetapi tidak akhir dapat dilihat pada Gambar 122 sebagai "sinyal uji". FM frekuensi tengah dari sinyal burst sekarang sedikit bervariasi. Awalnya 100 Hz, lalu 104, 108 dan akhirnya 116 Hz. Empat baris terbawah dalam Gambar 122 menunjukkan transien – yaitu sinyal keluaran – dalam urutan yang diberikan.

Pertama-tama terlihat yang berlalu setelah proses start-up (seri atas) sampai reaksi muncul pada output dari rangkaian bandpass/resonansi. Waktu adalah 20 ms. Setelah ini transien dimulai yang berakhir pada kira-kira $t = 370$ ms. Setelah itu keadaan stasioner dimulai.

Sebagai hasil dari empat “frekuensi tengah” yang berbeda dari sinyal burst, transien semuanya berbeda. Perhatikan juga penskalaan yang berbeda pada sumbu vertikal. Jadi tingkat tegangan transien terendah (pada 116 Hz) hanya kira-kira 1/10 dari transien atas pada 100 Hz.



Gambar 123: Efek ketukan dan frekuensi ketukan

Orang yang berpengalaman segera melihat penampilan seperti ketukan dari tiga transien yang lebih rendah. Apa yang dimaksud dengan ini?

Sebuah ketukan muncul sebagai akibat dari penambahan dua osilasi sinusoidal dengan frekuensi yang kira-kira sama (lihat Gambar 123). Ia menyatakan dirinya dalam amplifikasi dan redaman periodik dengan frekuensi ketukan $f_b = |f_1 - f_2|/2$.

Ketukan adalah fenomena interferensi khas di mana amplifikasi atau redaman maksimum muncul sebagai akibat dari posisi fase yang sama atau posisi yang dipindahkan oleh π dari dua osilasi sinusoidal.

Harus ada dua frekuensi yang terlibat meskipun kami memulai sistem hanya menggunakan satu frekuensi (pusat-). Yang kedua dari mana?

Ketukan muncul dengan penambahan dua sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang hampir sama. Perbedaan kecil dalam frekuensi kadang-kadang memiliki efek perpindahan fase. Dalam dua seri atas Anda melihat dua osilasi sinusoidal dan di ketiga penambahan (jumlah). Sementara di kiri dan kanan dua sinyal sinusoidal tampak memiliki fase yang sama, di tengah "perpindahan fase" praktis 180° atau π rad. Di kiri dan kanan mereka saling

menguatkan hingga mencapai dua kali amplitudo, tetapi di tengah mereka saling memadamkan.

Secara akustik, ketukan ditandai dengan naik turunnya volume. Irama yang terjadi disebut frekuensi ketukan. Hal ini dapat dikenali secara visual oleh sampul ketukan dan dihitung dengan rumus $f_B = |(f_1 - f_2)|/2$

Filter bandpass kami – secara fisik – merupakan rangkaian resonansi sederhana yang secara praktis hanya dapat beresonansi dengan satu frekuensi. Seperti ayunan anak-anak. Setelah digerakkan, ia berayun hanya dengan satu frekuensi, frekuensi alaminya f_E . Jika didorong secara teratur secara berkala hanya akan mencapai ayunan maksimum ketika ini terjadi tepat dalam ritme frekuensi alaminya. Seri kedua dalam Gambar 122 menunjukkan kasus ini.

Jika ritme suplai energi menjadi agak lebih besar atau lebih kecil, sebab dan akibat berada pada saat-saat tertentu dalam fase, kemudian semakin berkurang sampai mereka berada pada fase kontra. Dalam hal ini ayunan akan diberikan dorongan ketika mendekati orang yang mendorong dan melambat di sini. "Dalam fase" setara dengan kasus di mana ayunan didorong ke arah gerakan. Lendutan kemudian terbesar sementara.

Dalam tiga kasus terbawah pada Gambar 122 filter bandpass "ayunan" diberikan dorongan pada waktu yang tepat atau setidaknya hampir tepat pada ritme dan kemudian pada ritme yang salah. Defleksi meningkat atau menurun dalam ritme tertentu. Para ahli menyebut frekuensi beat ini f_B . Ini direproduksi oleh amplop.

Hasil berikut harus dicatat: bahkan ketika tegangan sinusoidal dinyalakan, reaksi rangkaian resonansi mengungkapkan proses yang terjadi secara fisik di dalamnya. Ia mencoba beresonansi dengan frekuensi alaminya. Pada awalnya ia berayun seperti ayunan dengan frekuensi alaminya jika frekuensi pengaktifannya sedikit berbeda. Semakin banyak frekuensi pengaktifan berbeda sementara dari frekuensi alami, semakin lemah rangkaian resonansi beresonansi dalam keadaan stasioner.

Bagian bawah Gambar 122 menunjukkan hal ini dengan sangat jelas. Ini menunjukkan empat transien dalam domain frekuensi. Puncak dalam spektrum mewakili sinyal input yang mengaktifkan bandpass (100, 104, 108, 116 Hz). Spektrum yang tersisa berasal dari rangkaian bandpass/resonansi dan terjadi terutama pada 100Hz (frekuensi alami).

Latihan pada Bab 6

Latihan 1

- (a) Pilih generator sapuan dari perpustakaan sirkuit DASYLab dan coba variasikan frekuensi mulai dan berhenti serta kecepatan sapuan secara sistematis.
- (b) "Trik" apa yang memungkinkan untuk meningkatkan frekuensi sapuan waktu linier?

Latihan 2

Diskusikan konsep frekuensi sesaat. Mengapa kata ini mengandung inkonsistensi?

Latihan 3

Untuk mengukur respons frekuensi, Anda berencana untuk "menyapu" sistem. Apa yang harus Anda pertimbangkan agar tidak mengukur omong kosong.

Latihan 4 Sinyal uji modern

- (a) Mengapa pulsa- tampak sebagai sinyal uji yang ideal dari sudut pandang teoretis tetapi tidak dari sudut pandang praktis?
- (b) Anda ingin mengukur seluruh fungsi transfer filter menurut nilai absolut dan fase. Apa yang harus Anda perhitungkan?
- (c) Jelaskan metode pengukuran fungsi alih bernorma menurut nilai mutlak dan fase. Pilih sirkuit yang sesuai dari perpustakaan sirkuit DASYLab dan analisis metodenya.
- (d) Selesaikan proses ini dan nyatakan fungsi alih sebagai kurva lokal pada bidang GAUSSI.
- (e) Anda harus membuat perangkat keras dari generator sinyal uji. Dalam hal sinyal mana yang paling mudah ini?
- (f) Masalah apa yang ada dengan fungsi langkah sebagai sinyal uji dan bagaimana cara menghindarinya?
- (g) Bagaimana sinyal uji dapat dihasilkan yang memiliki kurva amplitudo konstan dalam rentang frekuensi yang ditentukan secara spesifik?
- (h) Apa keuntungan dan kerugian dari sinyal uji yang disebutkan terakhir?
- (i) Apa bidang aplikasi yang mungkin untuk sinyal burst sebagai sinyal uji?
- (j) Apa yang membuat sinyal noise begitu menarik sebagai sinyal uji? Dan apa yang membuatnya begitu sulit?
- (k) Ukur faktor korelasi antara dua sinyal noise yang berbeda dan satu sinyal noise yang sama. Faktor korelasi apa yang Anda antisipasi dan yang Anda ukur? Bagaimana faktor korelasi bergantung pada panjang sinyal noise? Apa yang diwakili oleh faktor korelasi dalam hal konten?

Latihan 5

Di mana pulsa GAUSSian atau pulsa osilasi GAUSSian dapat digunakan secara bermakna dalam teknologi pengukuran? Sifat fisik apa yang menarik yang mereka miliki?

Latihan 6

- (a) Apa yang dikatakan transien tentang fitur-fitur sistem?
- (b) Sistem – misalnya filter – membutuhkan lebih banyak waktu untuk merespons. Apa yang dapat Anda simpulkan dari ini?
- (c) Apakah respon pulsa $h(t)$ menggambarkan transien?
- (d) Apakah fungsi langkah $g(t)$ menggambarkan transien?
- (e) Dalam kondisi apa "respon ledakan" $b(t)$ menggambarkan transien?
- (f) Jelaskan istilah "frekuensi alami" dan "frekuensi resonansi" dalam konteks transien.

Lakukan eksperimen yang diperlukan dengan DASYLab agar dapat menjawab pertanyaan dengan percaya diri.

BAB 7

PROSES LINIER DAN NON-LINIER

Dalam teknik komunikasi ada secara teoritis - seperti yang telah saya tunjukkan - jumlah proses sinyal yang tak terbatas. Ini adalah contoh bagus lainnya yang dengan jelas menunjukkan perbedaan antara teori dan praktik karena hanya sekitar dua atau tiga lusin proses ini yang dapat digunakan dan relevan untuk kerja praktik. Jumlah ini kira-kira sesuai dengan jumlah huruf dalam alfabet kita. Karena kita telah belajar membaca dan menulis dengan menggunakan huruf dan kata dengan cara yang bermakna, kita seharusnya tidak memiliki masalah dalam melakukan hal yang sama dengan proses yang relevan dalam pensinyalan.

Analisis sistem dan sintesis sistem

Beberapa chip saat ini berisi seluruh sistem yang terdiri dari jutaan transistor dan komponen elektronik. Dengan demikian tidak mungkin untuk menangani setiap transistor individu. Oleh karena itu, produsen chip menjelaskan pensinyalan chip dan properti sistem melalui diagram blok. Kita dapat menafsirkan sistem ini dengan menganalisis langkah demi langkah modul (proses!) yang terkandung dalam diagram blok. Dan di sisi lain, kita dapat merancang sistem seperti itu dengan menggabungkan proses (modul!) yang memadai untuk membuat diagram blok. Prosedur ini disebut sintesis.

Ini mengarah pada pandangan keseluruhan yang lebih baik jika proses/komponen pensinyalan relevan yang berbeda dapat dikategorikan sesuai dengan karakteristik yang mereka miliki bersama. Mereka sebenarnya dapat dikategorikan dan dialokasikan ke dua (untuk saat ini) kelompok. Satu grup linier, grup lain proses/komponen non-linear.

Semua proses pensinyalan yang mungkin secara teoritis, termasuk yang dapat digunakan secara praktis, dapat dibedakan berdasarkan sifat linier dan non-liniernya.

Mengukur suatu proses untuk mengungkapkan apakah itu linier atau non-linier

Saya tidak akan bertele-tele, tetapi langsung memberi tahu Anda apa ciri pembeda dari kedua kelompok ini: bagaimana Anda mengetahui apakah suatu proses linier atau non-linier saat mengukurnya?

Jika sinyal sinusoidal dari frekuensi apa pun dimasukkan ke dalam input modul dan jika hanya sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang sama yang muncul pada output, prosesnya linier. Jika tidak, itu adalah non-linear.

Tolong dicatat:

Osilasi sinusoidal dari sinyal keluaran dapat bervariasi sehubungan dengan amplitudo dan fase. Amplitudo dapat meningkat (amplifikasi) atau menurun secara dramatis (redaman ekstrim). Ingatlah bahwa perpindahan fasa hanyalah modifikasi waktu dari osilasi sinusoidal keluaran dibandingkan dengan osilasi sinusoidal masukan. Lagi pula, proses apa pun membutuhkan waktu sebelum selesai.

Garis dan spasi

Salah satu contoh terpenting dari sistem linier dalam komunikasi adalah saluran. Di ujung sebuah garis akan selalu ada osilasi sinusoidal dengan frekuensi yang sama seperti yang diumpankan ke saluran di ujung lainnya, tidak peduli apakah garis itu hanya berukuran beberapa yard atau beberapa mil. Garis meredam sinyal dengan bertambahnya panjang, yaitu semakin panjang garis semakin rendah amplitudo. Waktu transmisi juga meningkat seiring dengan panjangnya – kecepatan transmisi saluran adalah sekitar 100.000 dan 200.000 km/s. Ini menjadi terlihat sebagai perpindahan fase pada osiloskop.

Akan menjadi bencana jika sebuah garis memiliki sifat non-linear! Telepon saluran tetap misalnya hampir tidak mungkin karena pita frekuensi suara di ujung lain saluran akan berada dalam rentang frekuensi yang sama sekali berbeda, mungkin tidak terdengar, dan panjang saluran akan berperan juga.

"Sistem linier" yang paling penting adalah ruang. Jika tidak, sinyal stasiun radio akan mencapai pendengarnya dalam frekuensi yang berbeda, atau beberapa frekuensi yang berbeda, dari yang dimaksudkan oleh stasiun tersebut. Dan lagi, seperti halnya saluran, akan ada ketergantungan pada jarak antara pemancar dan penerima. Contoh ini menunjukkan pentingnya proses linier lebih dari yang lain. Nanti dalam buku ini kita akan melihat di balik layar untuk melihat mengapa garis dan ruang memiliki sifat linier dan alasan fisik di baliknya.

Signifikansi antar-disiplin

Linearitas dan non-linearitas memainkan peran yang sangat penting dalam matematika, fisika, teknologi, dan ilmu alam secara umum. Persamaan linier dalam matematika misalnya dapat diselesaikan dengan cukup mudah, sedangkan persamaan non-linier jarang, jika pernah, dapat diselesaikan. Persamaan kuadrat adalah contoh persamaan non-linier dan generasi murid telah tersiksa dengannya. Sangat sulit dipercaya: matematika (saat ini) kebanyakan gagal dalam memecahkan masalah non-linier. Karena fisika teoretis menemukan dukungannya yang paling penting dalam matematika, fisika non-linier agak terbelakang dan, seolah-olah, masih dalam masa pertumbuhan.

Perilaku sistem linier secara umum lebih mudah dipahami daripada sistem non-linier. Yang terakhir bahkan dapat menyebabkan kekacauan, yaitu perilaku yang pada dasarnya tidak dapat diprediksi, atau menciptakan apa yang disebut struktur fraktal yang – jika direpresentasikan secara grafis – dapat menjadi keindahan estetika yang luar biasa. Selain itu, mereka memiliki properti "universal" yang tampaknya menjadi semakin penting: menjadi fraktal. Jika Anda melihat lebih dekat mereka pada dasarnya menampilkan struktur yang sama apakah Anda memperbesar atau memperkecil skala.

Yang menarik adalah bahwa struktur yang sangat kompleks ini dapat dibuat dengan proses non-linier yang sangat sederhana. Jadi jelas salah untuk berasumsi bahwa sistem yang sangat kompleks adalah hasil dari penyebab yang sangat kompleks. Beberapa objek fraktal yang diciptakan oleh matematika ini memiliki kemiripan yang menakjubkan dengan tanaman tertentu sehingga hukum sederhana yang serupa diasumsikan berada di balik proses biologis

tertentu. Oleh karena itu kita tahu bahwa proses non-linier harus bertanggung jawab atas keragaman fenomena alam dan penelitian di bidang ini cukup cepat saat ini.

Sementara komputer telah menjadi media yang paling penting untuk membuat, memetakan dan memeriksa struktur non-linear. Ini telah memberikan momentum baru untuk matematika modern. Bahkan pada tingkat kita, dalam banyak kasus dimungkinkan untuk mengGambarkan keterkaitan dan karakteristik non-linier. Kami akan melihat lebih dekat proses non-linier yang sangat sederhana dan memeriksanya menggunakan komputer nanti dalam buku ini.

Pencermian dan proyeksi

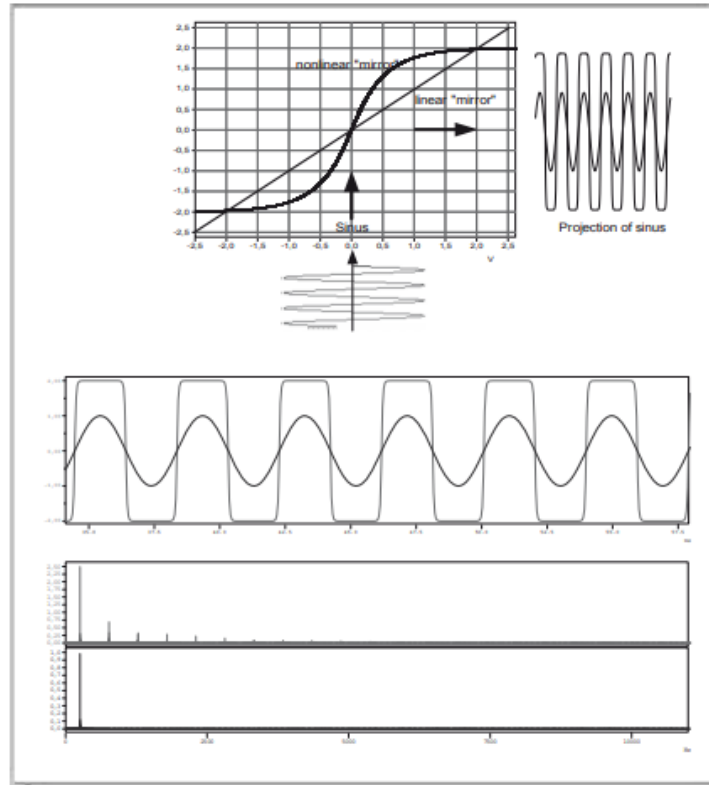
Tapi cukup komentar misterius sebelumnya. Biarkan saya sekarang mencoba dan menjelaskan istilah linearitas dan non-linearitas dalam pemrosesan sinyal dengan kata-kata sederhana tanpa menggunakan matematika apa pun. Untuk sementara cermin datar dan cermin lengkung sudah cukup untuk memberikan penjelasan.

Setidaknya sekali sehari – di pagi hari – kita melihat bayangan kita di cermin (datar) kamar mandi kita. Di cermin kita melihat bayangan cermin wajah kita yang hidup (namun, semuanya salah). Kami berharap bayangan cermin menjadi pemetaan sebenarnya dari gambar asli dalam hal proporsi. Ini adalah contoh penggambaran linier yang disebabkan oleh pencermian linier. Contoh lainnya adalah foto. Objek yang digambarkan biasanya jauh lebih kecil dari aslinya, tetapi proporsinya identik. Pembesaran dan pengurangan – atau perkalian dengan konstanta untuk menggunakan ekspresi matematika – oleh karena itu merupakan operasi linier.

Anda mungkin pernah ke aula cermin di pameran yang menyenangkan melihat bayangan Anda di cermin yang terdistorsi. Permukaan cermin ini tidak linier, yaitu tidak rata, tetapi tidak rata dan menggembung. Ini adalah contoh cermin non-linier. Seperti apa gambar yang dipantulkan? Tubuhmu sangat terdistorsi. Satu cermin menunjukkan kepala kecil di badan besar dengan tunggul kaki pendek yang melekat padanya. Satu lagi memperbesar kepala dan mengurangi bagian tubuh lainnya menjadi sosis yang layu. Tubuh kita terdistorsi secara non-linear. Bayangan cermin tidak mencerminkan bentuk yang tepat karena proporsinya terdistorsi.

Mengubah sinyal melalui pemrosesan sinyal dapat dijelaskan dengan cara yang sama. Kurva karakteristik – yang setara dengan cermin – menggambarkan hubungan antara sinyal input u_{in} dan sinyal output u_{out} dari komponen atau proses.

Gambar 124 menunjukkan bahwa kurva sinyal diproyeksikan secara vertikal ke atas ke kurva karakteristik dan dari sana secara horizontal ke kanan. Proyeksi adalah setara dengan proses mirroring.



Gambar 124: Distorsi non-linier dari osilasi sinusoidal

Sinyal baru dibuat dengan memproyeksikan osilasi sinusoidal pada kurva karakteristik non-linier. Osilasi sinusoidal hanya berisi satu frekuensi sedangkan sinyal baru berisi beberapa frekuensi dalam spektrum (spektrum bawah).

Akan tetapi, sudut datang setiap sinar tidak sama dengan sudut pantulnya. Jika kurva karakteristik linier, proporsi dipertahankan dalam proyeksi. Jika tidak linier, proporsinya terdistorsi. Gambar 124, bawah, menunjukkan osilasi sinusoidal yang diubah menjadi pulsa persegi tumpul.

Sementara sinus hanya berisi satu frekuensi, analisis persegi panjang tumpul menunjukkan bahwa ada beberapa frekuensi. Maka dari itu kurva karakteristik non-linier menimbulkan distorsi yang pada rentang frekuensi juga menimbulkan frekuensi tambahan, yaitu distorsi nonlinier.

Komponen kompleks: transistor

Komponen terpenting dalam mikroelektronika tidak diragukan lagi adalah transistor. Sayangnya, transistor pada umumnya memiliki kurva karakteristik non-linier karena alasan fisik. Oleh karena itu agak sulit untuk mengembangkan sirkuit dengan transistor yang bekerja sangat tepat, meskipun pesan yang disampaikan di kelas dan kuliah berbeda. Hal ini membutuhkan para ahli untuk membangun penguat transistorized linier yang menguatkan dengan cara yang "mempertahankan proporsi". Penguat seperti itu sampai batas tertentu dapat dilinierkan melalui berbagai trik teknologi rangkaian – trik terbaik disebut umpan balik

negatif. Tetapi untuk alasan di atas tidak ada penguat yang sepenuhnya linier. Faktor distorsi yang disebut adalah ukuran non-linearitasnya.

Konsekuensi pertama:

Gambar dan penjelasan di atas menunjukkan dalam kasus apa proses linier dan non-linier umumnya diterapkan:

Jika rentang frekuensi sinyal akan – atau dapat – diubah, misalnya dengan merelokasinya ke kisaran yang berbeda, itu hanya dapat dicapai dengan menggunakan proses non-linear.

Jika frekuensi yang terkandung dalam sinyal tidak diubah atau frekuensi baru ditambahkan, ini hanya dapat dicapai dengan menggunakan proses linier.

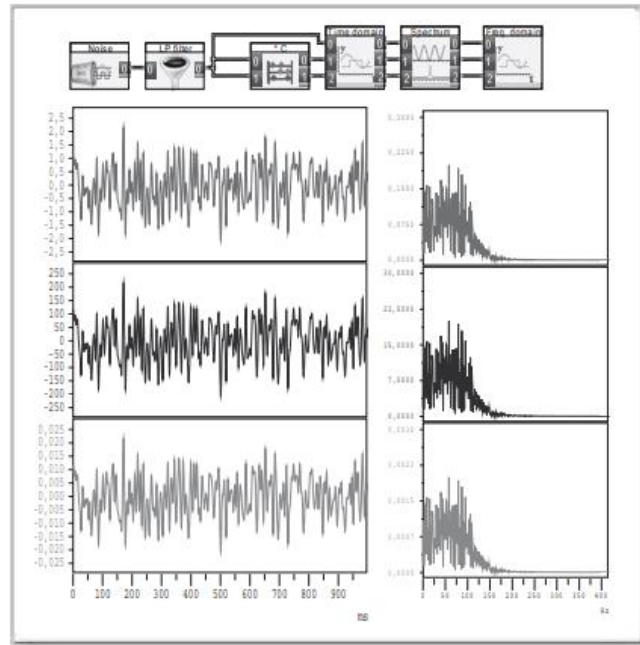
Ini berarti bahwa linearitas dan non-linier adalah tentang apakah frekuensi baru atau tidak, mis. osilasi sinusoidal, dibuat dalam suatu proses.

Tidak seperti matematika, teknologi komunikasi berurusan dengan linearitas dan non-linier hanya dalam konteks osilasi sinusoidal. Ini cukup dapat dimengerti karena menurut Prinsip FOURIER yang mendasari sinyal apa pun dapat dianggap terdiri dari osilasi sinusoidal.

Hampir setiap pemrosesan sinyal menyebabkan perubahan domain waktu dan frekuensi. Kaitan antara dua perubahan ini (tentu saja) adalah transformasi FOURIER, yang merupakan satu-satunya cara untuk berpindah dari waktu ke domain frekuensi dan sebaliknya. Oleh karena itu, semua hasil pemrosesan sinyal yang dijelaskan di bawah ini akan dijelaskan dalam domain waktu dan frekuensi.

Hanya ada beberapa proses linier

Situasinya cukup jelas. Hanya ada total lima atau enam proses linier dan kebanyakan dari mereka tampak sangat sederhana pada pandangan pertama. Tapi mereka masih sangat penting dan muncul di banyak aplikasi. Berbeda dengan variasi dan kompleksitas proses non-linier yang tidak terbatas, kita mengetahui hampir semua hal tentangnya dan hampir tidak ada kejutan, bahkan ketika beberapa proses linier digabungkan untuk membentuk sistem linier.



Gambar 125: Perkalian dengan konstanta: penguatan atau redaman

Seri teratas menunjukkan sinyal asli – noise yang difilter – dalam domain waktu dan frekuensi. Di tengah: sinyal setelah diperkuat seratus, dan akhirnya di bawah, sinyal setelah redaman seratus (dikalikan 0,01).

Amplifikasi dan redaman diberikan dalam dB (desibel), skala logaritmik. Faktor seratus di sini sama dengan 40 dB.

Mungkin mengejutkan bahwa ada sebagian besar operasi matematika yang sangat sederhana di balik proses ini yang, pada pandangan pertama, tidak ada hubungannya dengan teknik komunikasi. Selain itu, tujuan kami adalah untuk meninggalkan matematika dari itu.

Perkalian sinyal dengan konstanta

Ini terdengar dan sangat mudah. Namun di balik itu ada konsep penting seperti amplifikasi dan redaman. Amplifikasi seratus kali lipat berarti perkalian semua nilai variabel sesaat dengan faktor 100, dan dalam domain frekuensi meregangkan respons amplitudo sebesar seratus.

Penambahan dua atau lebih sinyal

Sebenarnya, FP dapat dilihat sebagai penambahan (jumlah tak terbatas) osilasi sinusoidal dari frekuensi, amplitudo, dan fase yang berbeda: sinyal apa pun dapat dilihat sebagai terdiri dari osilasi (penambahan) sinusoidal yang berbeda.

Mengapa proses penambahan linier? Jika dua osilasi sinusoidal mis. 50 Hz dan 100 Hz ditambahkan, sinyal keluaran hanya akan berisi dua frekuensi tersebut. Tidak ada frekuensi baru yang ditambahkan. Dengan demikian prosesnya linier.

Penambahan osilasi sinusoidal tidak harus identik dengan penambahan sederhana angka. Seperti yang ditunjukkan oleh bagian yang relevan dalam Gambar 123, penambahan dua osilasi sinusoidal dengan amplitudo dan frekuensi yang sama dapat sama dengan nol jika

digeser fase oleh ϕ . Jika tidak mengalami pergeseran fasa, hasilnya adalah osilasi sinusoidal dengan amplitudo dua kali lipat.

Oleh karena itu, osilasi sinusoidal hanya ditambahkan dengan cara yang benar jika nilai variabel sesaat yang relevan ditambahkan. Dengan kata lain: ketika osilasi sinusoidal ditambahkan, posisi fase masing-masing dalam kaitannya satu sama lain secara otomatis diperhitungkan. Untuk alasan ini osilasi sinusoidal hanya dapat ditambahkan dengan cara yang benar jika dari sudut pandang domain frekuensi – amplitudo dan spektrum fase diketahui.

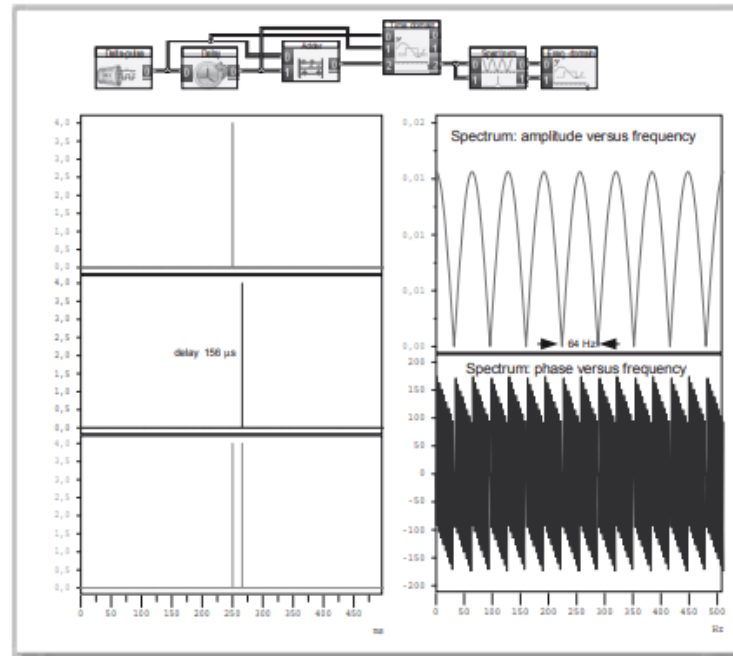
Gambar 35 menunjukkan bahwa, jika dilihat bagian demi bagian, jumlah (jumlah tak terhingga) osilasi sinusoidal dari frekuensi yang berbeda dapat sama dengan nol. Dalam kasus -pulsa jumlah dari bilangan tak hingga“ dari osilasi sinusoidal selalu sama dengan nol dalam domain waktu, kecuali untuk titik di mana -pulse muncul. Dalam matematika titik seperti itu disebut singularitas.

Untuk menyimpulkan bagian tentang penjumlahan, kita harus melihat (yang lain) pada kasus khusus yang sangat menarik dan penting: dua pulsa yang berurutan (Gambar 126). Masing-masing dari dua pulsa awalnya berisi semua frekuensi dengan amplitudo yang sama. Spektrum amplitudo dengan demikian merupakan fungsi konstan. Dengan demikian, dua pulsa harus mengandung semua frekuensi dua kali amplitudo!?! Tidak, mereka tidak! Alasannya adalah bahwa salah satu pulsa adalah waktu terhuyung-huyung dibandingkan dengan yang lain dan karena itu memiliki spektrum fase yang berbeda. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 88 dan Gambar 89, spektrum berbentuk sinus. Pada posisi nol spektrum, osilasi sinusoidal dengan frekuensi dan ukuran yang sama ditambahkan dengan cara kontrafase, yaitu saling meniadakan dan hasilnya sama dengan nol.

Semua contoh ini menunjukkan betapa pentingnya proses sederhana seperti penambahan dalam bidang analisis, sintesis, dan pemrosesan sinyal.

Delay

Jika sinus dimasukkan ke dalam kabel yang agak panjang dan sinyal input dan output dibandingkan pada layar osiloskop dua saluran, sinyal output muncul sebagai fase-perpindahan, yaitu waktu tunda dibandingkan dengan sinyal input. Sebuah waktu tunda berarti bahwa spektrum fase dalam domain frekuensi telah berubah.



Gambar 126: Penundaan plus penambahan = filter sisir digital

Gambar ini menunjukkan cara sederhana untuk menggandakan pulsa : pulsa input ditunda (dalam hal ini $1/64$ s) dan dimasukkan ke penambah. Di sisi kanan Anda dapat melihat – mirip dengan Gambar 88 dan Gambar 89 – spektrum dari dua pulsa bawah menurut nilai absolut dan fase.

Spektrum amplitudo berbentuk cosinus dengan interval posisi nol 64 Hz. Posisi nol pertama adalah pada 32 Hz (posisi nol pertama dalam rentang frekuensi negatif adalah pada -32 Hz).

Semua sinyal digital terdiri dari baris angka yang dapat direpresentasikan sebagai pulsa tertimbang” (lihat Gambar 37 dan Gambar 126 bawah). Amplop mereproduksi sinyal analog asli. Jika Anda menambahkan masing-masing -pulsa – di sini setelah $1/64$ s – pulsa dengan tingkat yang sama, semua kelipatan ganjil 32 Hz, yaitu 32 Hz, 96 Hz, 160 Hz dll, akan disaring dari spektrum.

Filter, yang, seperti sisir, memiliki celah secara berkala, disebut filter sisir. Dalam hal filter sisir digital ini, celahnya muncul pada interval 64 Hz. Tahukah Anda bahwa mendesain filter semudah itu?

Hampir tidak mungkin untuk menunda sinyal yang diberikan secara tepat dengan nilai yang direncanakan melalui teknologi analog, tetapi tidak ada masalah apa pun jika DSP pemrosesan sinyal digital digunakan.

Bersama dengan penambahan dan perkalian dengan konstanta, penundaan membentuk triad pemrosesan sinyal elemental. Jika Anda melihat lebih dekat, banyak proses (linier) yang sangat kompleks hanya terdiri dari kombinasi dari tiga proses dasar ini. Contoh yang baik adalah filter digital. Bab 10 akan mendemonstrasikan dengan tepat bagaimana mereka bekerja dan bagaimana mereka dirancang.

Diferensiasi

Kalkulus diferensial dan integral adalah di mana "matematika yang lebih tinggi" umumnya dianggap dimulai. Kedua jenis kalkulus itu penting karena hukum alam dan hubungan teknologi yang paling penting hanya dapat dimodelkan dengan menggunakan ini.

Tapi jangan khawatir – kita tidak akan menggunakan matematika formal. Ini memaksa kita untuk menggambarkan substansi masalah dan tidak hanya menunjuk begitu saja ke matematika "sepele".

Oleh karena itu, Anda harus mengenali melalui Gambar 127 apa arti sebenarnya dari diferensiasi sebagai proses sinyal teknis dalam domain waktu. Coba jawab pertanyaan berikut:

- Pada titik waktu uin apa maxima dan minima lokal terjadi dalam kasus sinyal uout yang terdiferensiasi
- Properti apa yang dimiliki sinyal input uin pada titik waktu ini?
- Pada titik waktu uin berapakah sinyal terdiferensiasi uout ekuivalen dengan nol?
- Properti apa yang dimiliki sinyal input uin pada titik waktu ini?
- Dalam hal apa uin berbeda di tempat di mana uout memiliki maksimum lokal positif dan "maksimum lokal negatif" (sama dengan minimum lokal)?

Anda harus sampai pada hasil berikut:

Sinyal yang terdiferensiasi uout menunjukkan seberapa cepat sinyal input uin berubah.

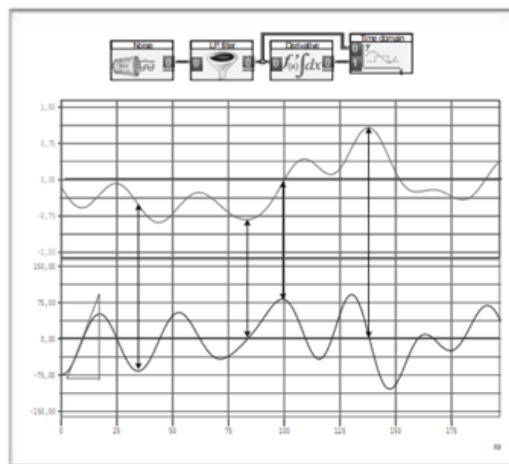
Sebagai contoh, dua hukum yang paling penting dari teknik elektro akan disebutkan dalam konteks ini.

Hukum induksi:

Semakin cepat perubahan arus dalam kumparan semakin besar tegangan induksi.

Hukum kapasitas:

Semakin cepat tegangan pada kapasitor berubah semakin besar arus yang mengalir masuk atau keluar (arus pengisian atau arus pengosongan kapasitor).



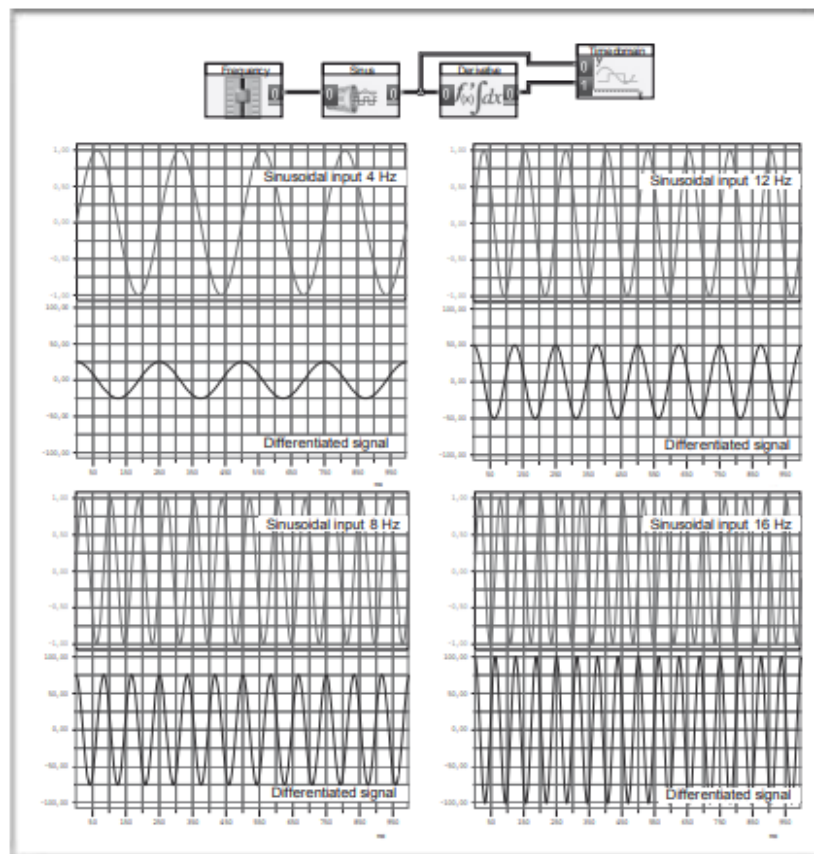
Gambar 127: Kuis singkat untuk non-matematika: apa yang terjadi dalam proses diferensiasi?

Untuk membuat pernyataan yang umumnya valid, kurva sinyal acak dipilih. Ini dia kebisingan yang disaring lowpass. Bandingkan dengan cermat sinyal input uin (atas) dengan sinyal output yang berbeda uout (bawah). Sejumlah baris telah dimasukkan untuk membantu. Perilaku apa yang ditunjukkan oleh sinyal input uin pada titik maksimum lokal seperti yang ditandai dalam kasus sinyal yang berbeda uout? Dan perilakunya di minimum lokal seperti yang ditandai? Seberapa cepat sinyal input uin berubah seketika jika sinyal yang terdiferensiasi sama dengan nol?

Di kiri atas "segitiga gradien" telah dimasukkan. Pertama garis singgung pada titik kurva yang menarik di sini, kemudian komponen horizontal dan vertikal dimasukkan. Bagian vertikal dibagi dengan bagian horizontal (Kathetes) harus memberikan secara tepat nilai fungsi terdiferensiasi.

Catatan: maksimum lokal dipahami sebagai titik tertinggi di lingkungan yang ditentukan. Jadi ada nilai yang lebih kecil di sebelah kiri dan kanan maksimum lokal ini. Hal yang sama berlaku untuk minimum lokal.

Dalam kasus diferensiasi, "kecepatan perubahan" diukur. Dari sudut pandang matematika ini sesuai dengan gradien sesaat dari kurva sinyal. Kalkulus diferensial tidak dapat dipisahkan dengan konsep gradien ke atas dan gradien ke bawah. Misalnya, sebuah bola dipercepat pada gradien ke bawah yang meningkat dan diperlambat pada gradien ke atas.



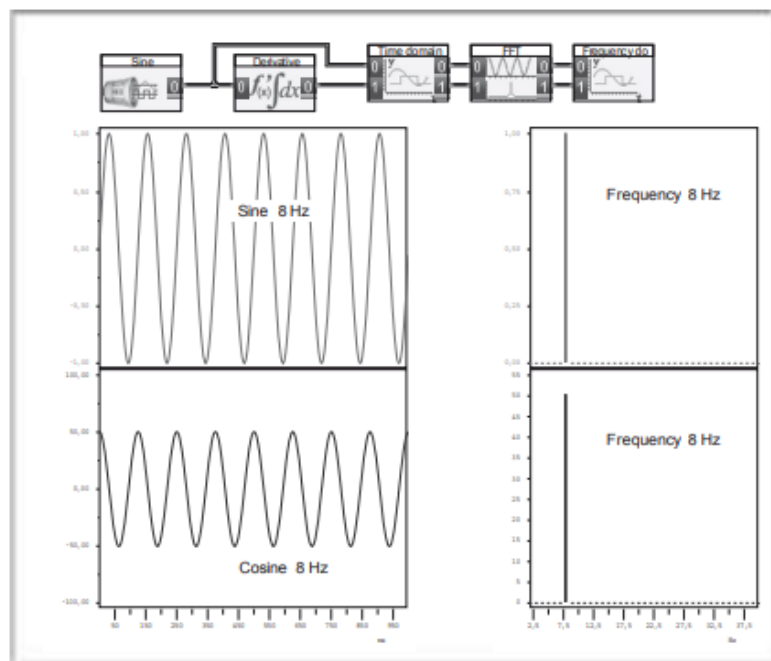
Gambar 128: Diferensiasi tegangan sinus dari frekuensi yang berbeda

Pertama, sistem modul yang agak membingungkan untuk diferensiasi harus dijelaskan. Apa yang sebenarnya harus dilihat adalah tanda integral yang akan lebih baik dengan integrasi – operasi linier berikutnya. Diferensiasi dan integrasi saling terkait, yang dalam hal integrasi masih harus ditunjukkan secara eksperimental. Kata "turunan" adalah ekspresi alternatif yang digunakan untuk diferensiasi dalam matematika.

Grid ditunjukkan sehingga Anda dapat melihat proporsionalitas yang ketat antara frekuensi sinyal input dan amplitudo sinyal output (dibedakan). Ini membuka berbagai aplikasi yang sangat akurat dalam teknologi pengukuran.

Oleh karena itu, proses diferensiasi sinyal juga dapat digunakan sebagai perangkat pensinyalan apakah sesuatu berubah terlalu cepat atau terlalu lambat atau sebagai perangkat pengukuran yang menunjukkan seberapa cepat sesuatu berubah.

Kita harus memberikan perhatian khusus pada bagaimana proses diferensiasi mempengaruhi sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda.



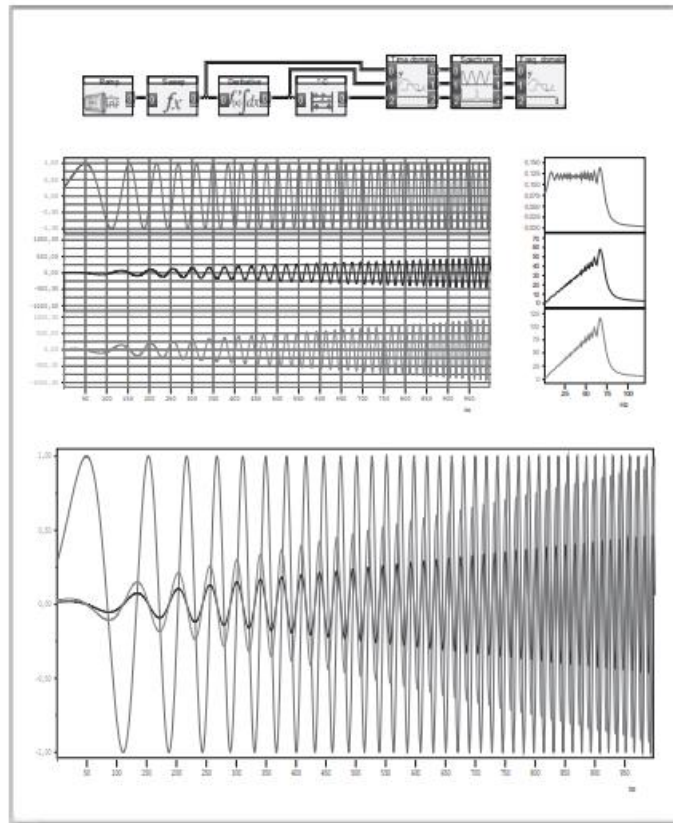
Gambar 129: Bukti eksperimental: Diferensiasi sinus menunjukkan cosinus

Pada pandangan pertama, sinyal sinus yang terdiferensiasi memiliki osilasi gelombang kosinus dan/atau sinus. Tetapi apakah itu benar-benar tepat kosinus? Jika tidak, diferensiasi akan menjadi non-linear.

Dalam domain frekuensi kami memiliki prosedur yang dapat diandalkan untuk membuktikan hal ini. Karena sinyal terdiferensiasi dalam domain frekuensi – seperti sinus pada input – memiliki frekuensi tunggal 4 Hz, ini hanya dapat berupa proses linier. Ini menyebabkan pergeseran fasa $/2$ (Cosinus!). Amplitudonya sangat proporsional dengan frekuensi ... dan amplitudo sinyal input (mengapa?).

Hasil ini tidak mengejutkan dan dihasilkan langsung dari sifat umum diferensiasi yang dapat dilihat pada Gambar 127.

- Sinus terdiferensiasi menghasilkan cosinus, yaitu menggantikan fase dengan 2 rad. Ini tidak mungkin sebaliknya karena gradien terbesar di persimpangan nol; maka sinyal yang terdiferensiasi juga paling besar pada titik ini. Bahwa ini benar-benar mengejutkan sebuah kosinus dibuktikan dengan domain frekuensi (Gambar 129): garis dengan frekuensi yang sama masih ada di sana.
- Semakin tinggi frekuensi semakin cepat sinyal sinusoidal berubah (juga pada zero crossing). Amplitudo tegangan yang dibedakan juga sangat proporsional dengan frekuensi.

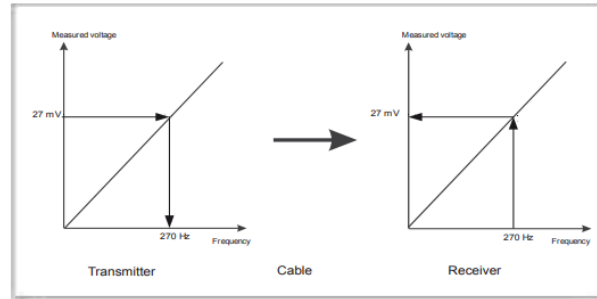


Gambar 130: Diferensiasi sinyal sapuan

Sinyal sapuan diatur sedemikian rupa sehingga frekuensi sesaat berubah dengan cara yang sepenuhnya linier dalam waktu. Hal ini dapat dibuktikan dengan cara diferensiasi berikut. Amplitudo meningkat sepenuhnya) secara linier dalam waktu, yaitu amplop menghasilkan garis lurus karena Anda dapat dengan mudah memeriksa menggunakan penggaris.

Melalui penguat berikut – perkalian dengan konstanta – gradien selubung dan dengan demikian sensitivitas rangkaian terhadap perubahan frekuensi dapat diatur secara virtual sesuka hati.

Hal ini menghasilkan aplikasi praktis penting yang memanfaatkan linearitas kabel dan ruang sebagai media transfer.



Gambar 131: Prinsip sistem telemetri (dengan pengkodean dan penguraian frekuensi)

Dalam prakteknya banyak sensor hanya memberikan tegangan pengukuran kecil yang sulit untuk ditransmisikan tanpa distorsi. Metode telemetri yang disajikan di sini pada prinsipnya memungkinkan untuk mengirimkan pembacaan pengukuran (kecil) tersebut dengan tingkat akurasi yang tinggi dan bebas dari distorsi.

Catatan: DASYLab S versi baru menggunakan kartu suara untuk input dan output sinyal analog. Sebagai akibat dari filter input, ia tidak dapat mencatat sinyal yang berubah sangat lambat. Akan tetapi, hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan VCO.

Situasi tersebut dapat digambarkan dengan indah dengan sinyal sapuan (Gambar 130) yang frekuensinya berubah secara linier dari waktu ke waktu. Dengan demikian, sinyal yang terdiferensiasi menunjukkan peningkatan linier dalam amplitudo.

Hal ini memungkinkan penerapan teknis yang sensasional: melalui suatu pembeda, konverter frekuensi-tegangan dengan karakteristik linier sempurna dapat dibuat (Gambar 131). Melalui penguat berikut – perkalian dengan konstanta – kecuraman karakteristik dapat diatur secara virtual sesuka hati. Ini setara dengan sensitivitas konverter tegangan-frekuensi terhadap perubahan frekuensi.

Dalam telemetri yang penting adalah mengirimkan pengukuran seakurat mungkin melalui kabel atau tanpa kabel. Tetapi dalam transmisi semacam ini semuanya dapat terdistorsi: seluruh bentuk sinyal atau bahkan dalam kasus sinus, amplitudo dan fase. Namun, satu hal tidak dapat berubah karena kedua media – kabel dan ruang – adalah linier dan itulah frekuensinya.

Untuk memastikan secara mutlak, pengukuran harus diberi kode frekuensi: pada titik penerimaan, pengukur frekuensi cukup dalam hal praktis untuk menerima pengukuran dengan tingkat akurasi yang tinggi. Namun, pada titik transmisi, konverter frekuensi tegangan yang sangat akurat (VCO: Voltage Controlled Oscillator) diperlukan. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 131.

Pada prinsipnya sekarang kita memiliki sistem telemetri yang sangat akurat yang memanfaatkan linearitas media transmisi. VCO dengan tingkat akurasi yang tinggi tersedia di pasaran. Dalam diferensiasi, kami memiliki proses yang hampir ideal untuk mengubah frekuensi apa pun secara linier sepenuhnya menjadi tegangan tingkat yang sesuai.

Dengan demikian, kami telah mengambil langkah pertama ke arah modulasi dan demodulasi frekuensi (FM), metode transmisi yang rentan distorsi yang digunakan dalam rentang VHF dan juga di televisi (suara). Detailnya akan diberikan di bab berikutnya.

Sekarang kita akan meringkas efek diferensiasi dalam domain frekuensi:

Diferensiasi sinyal satuan menunjukkan dengan jelas peningkatan linier amplitudo dengan frekuensi. Diferensiasi karena itu memiliki sifat highpass yaitu semakin tinggi frekuensi semakin baik konduktivitas.

Gambar 128 memungkinkan definisi yang tepat dari konteks matematika (menentukan konstanta proporsionalitas dan konstanta gradien). Amplitudo semua sinyal input adalah 1 V.

Frequency f (Hz)	\hat{U}_{out} (V)
4	25
8	50
12	75
16	100

Jadi amplitudo meningkat secara linier dengan frekuensi. Faktor proporsionalitas atau konstanta gradien adalah:

$$25 \text{ V}/4 \text{ Hz} = 50 \text{ V}/8 \text{ Hz} = 75 \text{ V}/12 \text{ Hz} = 100 \text{ V}/16 \text{ Hz} = 6.28 \dots = 2\pi / \text{Hz}$$

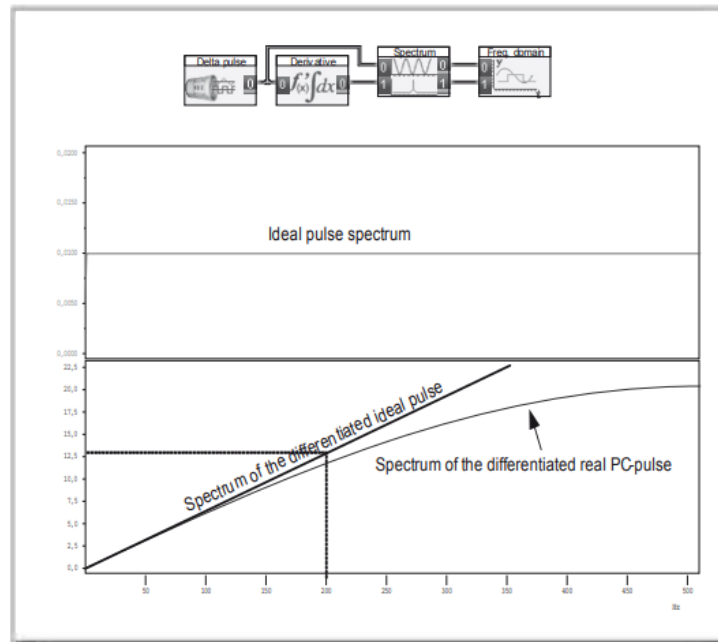
Oleh karena itu, berikut ini:

$$\hat{U}_{out} = 2\pi f \hat{U}_{in} = \omega \hat{U}_{in}$$

Oleh karena itu, diferensiasi dalam domain waktu sesuai dengan perkalian dengan $2\pi f$ dalam domain frekuensi.

Sebagaimana seharusnya, sebagai kesimpulan kita menentukan respon frekuensi atau fungsi transfer dari diferensiator. Sebagai sinyal uji, -pulsa pada posisi $t = 0s$ dipilih.

Anehnya spektrum pada awalnya naik secara linier tetapi kemudian semakin kehilangan kecuraman. Apakah ada yang salah dengan rumus di atas? Pulsa jarum adalah apa yang salah. Ini bukan pulsa yang ideal tetapi pulsa dengan lebar tak terhingga (di sini $1/1024 \text{ s}$). Spektrum pulsa jarum pada Gambar 132 (atas) adalah konstan, yaitu semua frekuensi memiliki amplitudo yang sama. Spektrum denyut nadi jarum yang berbeda mengungkapkan kebenaran: ideal -pulsa tidak ada.



Gambar 132: Fungsi alih diferensiator

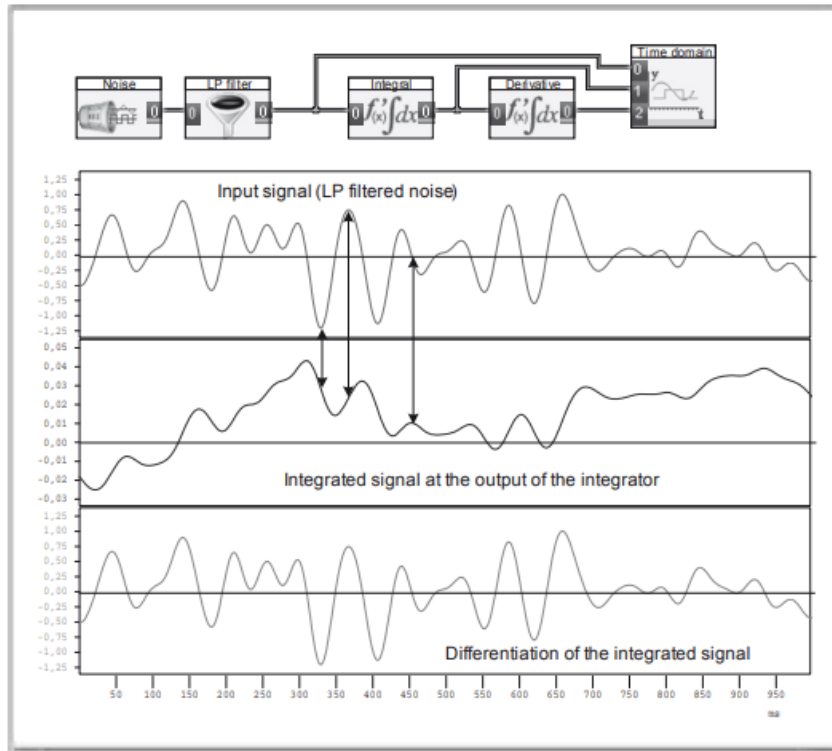
Sesuai dengan pemahaman yang dijelaskan, fungsi alih modul "turunan" harus memiliki ramp linier sempurna. Pengukuran (bawah) menunjukkan ini hanya untuk rentang frekuensi yang lebih rendah; setelah itu ramp terus dikurangi.

Ini adalah contoh keterbatasan teknik pengukuran berbantuan komputer dan pemrosesan sinyal yang presisi. Kami bekerja secara konseptual dengan -pulsa yang secara praktis tidak ada. Pulsa jarum kami harus memiliki durasi (lebar) yang terbatas yang dihasilkan dari panjang blok dan kecepatan pemindaian. Ini tidak terungkap di mana pun dengan begitu jelas seperti dalam diferensiasi.

Ramp linier yang diharapkan dimasukkan sebagai garis singgung di titik nol. Faktor proporsionalitas adalah (awalnya) $2\pi f =$. Dalam hubungan ini perhatikan pada gambar (atas) bahwa amplitudo untuk semua frekuensi hanya 0,01 V.

Integrasi

Sifat-sifat proses integrasi harus ditentukan secara eksperimental. Integrasi harus terkait dengan cara tertentu untuk diferensiasi – dua proses jika tidak, tidak akan disertakan dalam satu dan modul DASYLab yang sama. Kami pertama-tama memilih kurva sinyal acak lowpass filtered noise – dan melakukan integrasi (Gambar 133).



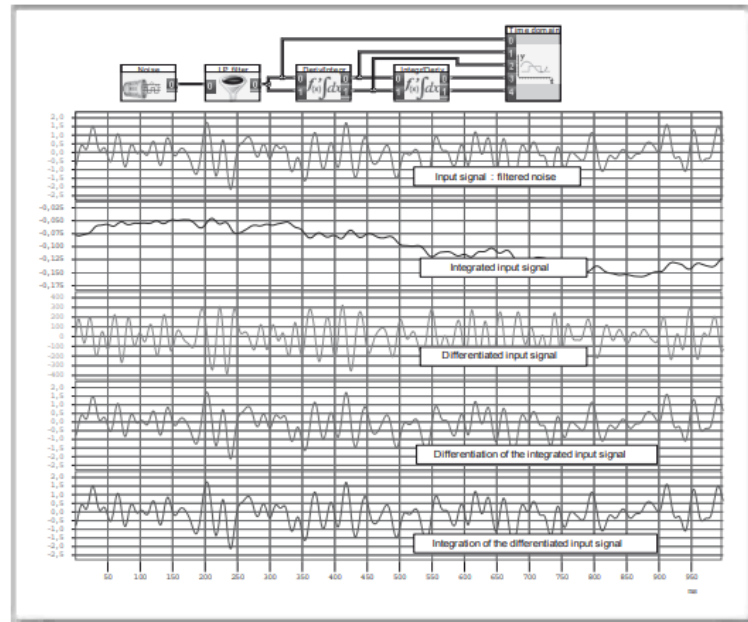
Gambar 133: Visualisasi hubungan antara integrasi dan diferensiasi

Pemeriksaan lebih dekat membuat orang menduga bahwa sinyal tengah setelah diferensiasi menghasilkan sinyal atas. Eksperimen yang sesuai menunjukkan kesepakatan: diferensiasi sinyal terintegrasi menghasilkan sinyal asli.

Saat kita berfokus pada diferensiasi, itu harus menyerang pengamat yang penuh perhatian bahwa sinyal tengah (terintegrasi) ketika dibedakan harus memberikan sinyal input. Maksima dan minima lokal dari sinyal input sekali lagi dapat ditemukan pada titik tercuram dari sinyal input.

Pemeriksaan lebih dekat membuktikan dugaan ini. Dengan demikian, diferensiasi tampaknya merupakan kebalikan dari integrasi. Apakah integrasi kebalikan dari diferensiasi? Eksperimen yang disajikan dalam Gambar 133 juga membuktikan hal ini. Fakta bahwa dalam kedua contoh sinyal acak dipilih secara praktis memastikan bahwa ini secara umum valid.

Diferensiasi dapat dilihat sebagai kebalikan dari integrasi dan integrasi sebagai kebalikan dari diferensiasi.



Gambar 134: Mengubah urutan dimungkinkan

Seperti yang dibuktikan secara eksperimental urutan proses diferensiasi (turunan) dan integrasi dapat diubah bulat. "Diferensiasi pertama dan kemudian integrasi" mengarah kembali ke sinyal asli persis seperti "integrasi pertama dan kemudian diferensiasi" tidak.

Pada pemeriksaan lebih dekat dari sinyal dua aspek lebih lanjut dalam domain waktu dapat diduga:

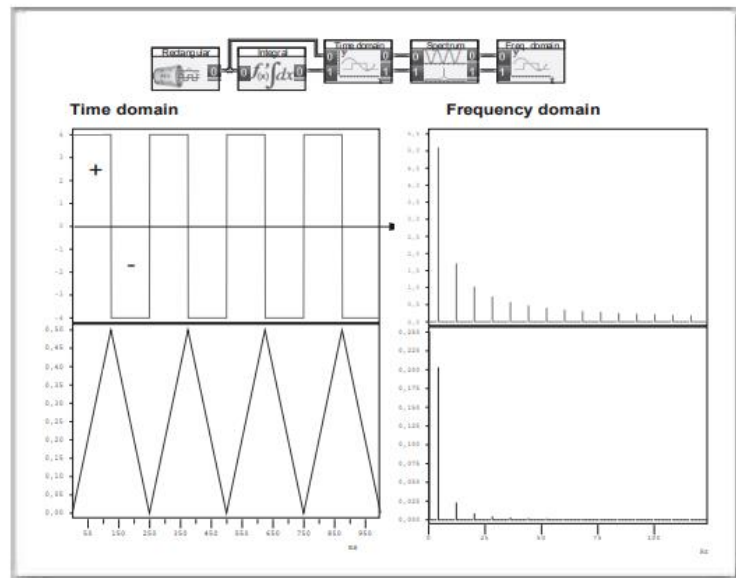
- Sinyal terintegrasi memiliki kecuraman tepi yang jauh lebih sedikit daripada sinyal input. Ini akan menyiratkan penekanan frekuensi yang lebih tinggi dalam domain frekuensi, yaitu karakteristik lowpass
- Kurva sinyal terintegrasi tampak seolah-olah nilai rata-rata dibentuk secara berurutan dari sinyal input. Kurva menurun segera setelah sinyal input negatif dan meningkat setelah positif.

Untuk menguji asumsi pertama kami memilih sinyal persegi panjang periodik. Ini memiliki kecuraman tepi terbesar yang dapat dibayangkan pada titik-titik langkah. Sinyal terintegrasi seharusnya tidak menunjukkan sisi "vertikal". Spektrum sinyal terintegrasi harus memiliki proporsi frekuensi yang lebih tinggi yang jauh lebih kecil. Pada saat yang sama kurva sinyal persegi panjang adalah konstan – terlepas dari titik langkah. Ini memungkinkan jawaban atas pertanyaan tentang apa yang dilakukan integrator dengan fungsi konstan.

Kami memilih kurva sinyal yang sangat sederhana dalam kasus sinyal persegi panjang periodik. Ini mengungkapkan sifat integrasi dengan sangat jelas.

Segmen positif konstan mengarah ke garis lurus naik dan segmen negatif konstan mengarah ke garis lurus turun. Rupanya, dilihat dari sudut pandang geometris, integral secara berurutan mengukur area antara kurva sinyal dan sumbu waktu horizontal. "Area" dari sinyal persegi panjang pertama adalah $4 \sqrt{2} 125 \text{ ms} = 0,5 \text{ Vs}$ dan justru nilai inilah yang diberikan oleh kurva integrasi setelah 125 ms. Kita harus terus membedakan antara "area"

positif dan negatif karena area berikutnya – dalam hal nilai absolut yang sama besar – dikurangi, sehingga setelah 250 ms nilainya kembali nol.



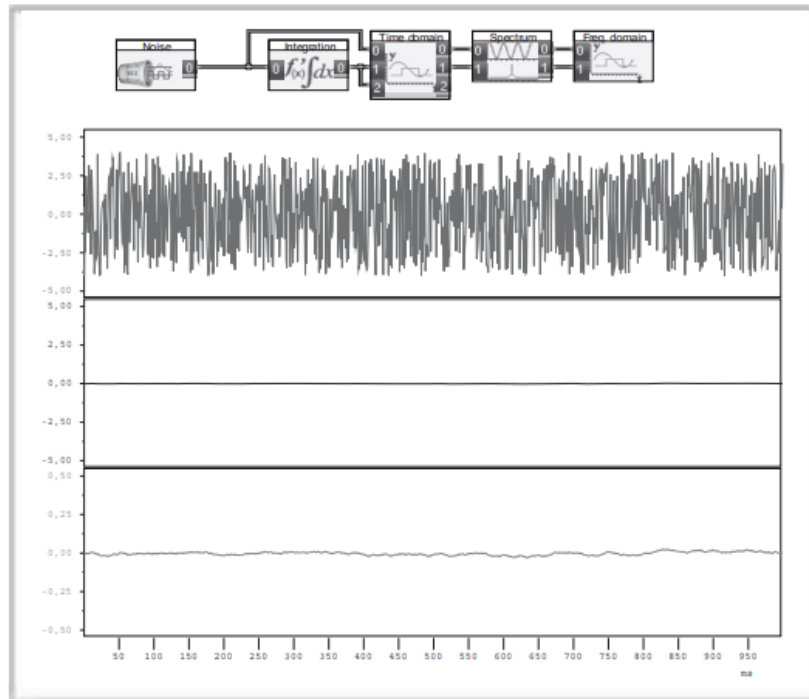
Gambar 135: Integrasi sinyal persegi panjang periodik

Domain frekuensi (kanan) memberikan petunjuk kualitatif dan kuantitatif yang tidak ambigu. Awalnya, integrasi cukup jelas memiliki karakteristik lowpass. Kedua sinyal – sinyal persegi panjang dan segitiga – hanya berisi kelipatan ganjil dari frekuensi dasar (lihat Bab 2). Aturan untuk penurunan amplitudo cukup mudah dan dapat diukur dengan menggunakan kursor. Untuk penahan gigi gergaji $n = \hat{U}1/n$ (misalnya 3 = 1/3 dll). Untuk spektrum kurva segitiga $n = 1/n^2$ (misalnya 3 = 1/9) berlaku.

Jika frekuensi spektrum yang sama dibandingkan satu sama lain, hasilnya adalah segitiga = gigi gergaji / $2\pi f$ = gigi gergaji / π . Integrasi sebagai pembalikan diferensiasi juga dalam domain frekuensi dengan demikian sepenuhnya ditanggung di sini.

Anggapan pertama sepenuhnya didukung oleh pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 135:

Integrasi menunjukkan perilaku lowpass. Untuk membuatnya lebih akurat, domain frekuensi dari sinyal input dibagi dengan $2\pi f$ = dalam integrasi. Amplitudo dari frekuensi yang lebih tinggi dengan demikian berkurang secara tidak proporsional dalam ukuran.



Gambar 136: Membentuk nilai rata-rata dengan integrasi

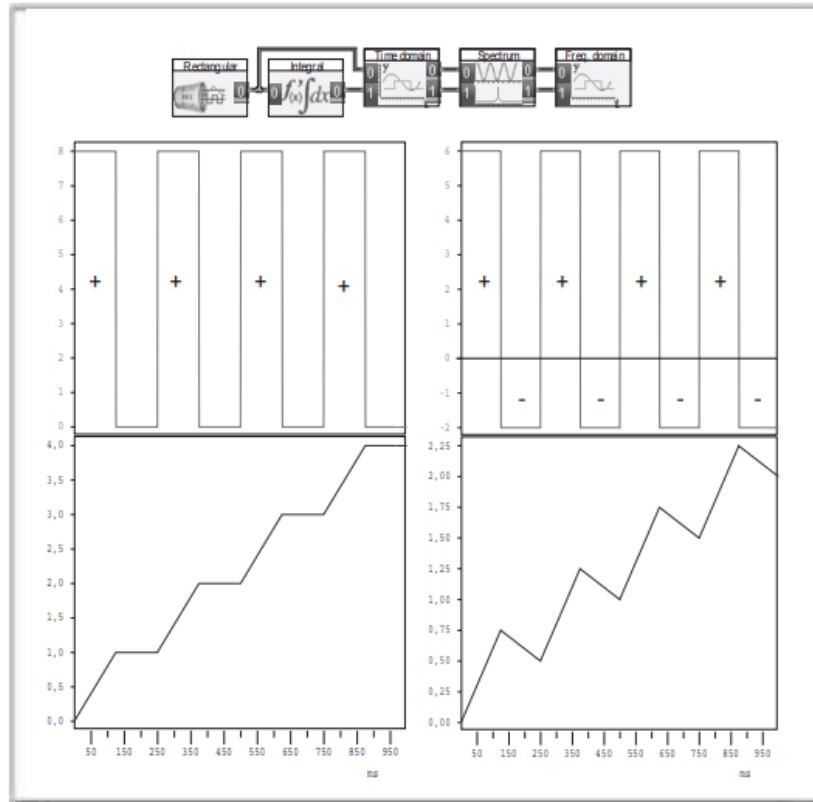
Dalam hal ini sinyal noise terintegrasi. Hasilnya praktis nol dengan fluktuasi kecil (resolusi bawah lebih tinggi. Proses integrasi menambahkan "area" positif dan negatif bersama-sama. Karena semuanya acak dalam kasus sinyal noise, distribusi "area" positif dan negatif yang sama harus sekarang Rata-rata semuanya harus nol.

Dengan demikian, integrasi dapat digunakan untuk membentuk nilai rata-rata, aspek yang sangat penting untuk teknologi pengukuran. Selain itu, membentuk nilai rata-rata ternyata menghilangkan noise lebih baik daripada filter normal.

Sangat mengejutkan seberapa cepat nilai rata-rata nol tercapai dalam kasus kebisingan. Karena kebisingan terdiri dari "urutan stokastik pulsa individu", yaitu praktis dari urutan "pulsa tertimbang, ini mudah dimengerti. 'Area' positif dan negatif yang memiliki pengaruh penting hanya muncul ketika suatu keadaan dipertahankan 'untuk jangka waktu yang tidak terlalu lama'.

Dalam pengujian proses integrasi sebagai pembangkit nilai rata-rata Gambar 136 mendapatkan hasil sebagai berikut:

- Akibatnya jelas bahwa kebisingan memiliki nilai rata-rata nol. Integrasi sinyal noise secara praktis memberikan nilai ini, yaitu nilai rata-rata dapat ditentukan dengan cara integrasi.
- Tampaknya, elemen noise dapat dihilangkan dari sinyal melalui integrasi, lebih baik daripada yang dimungkinkan dengan filter normal.



Gambar 137: Pemeriksaan lebih dekat terhadap 'pengukuran luasan' dan pembentukan nilai rata-ratanya

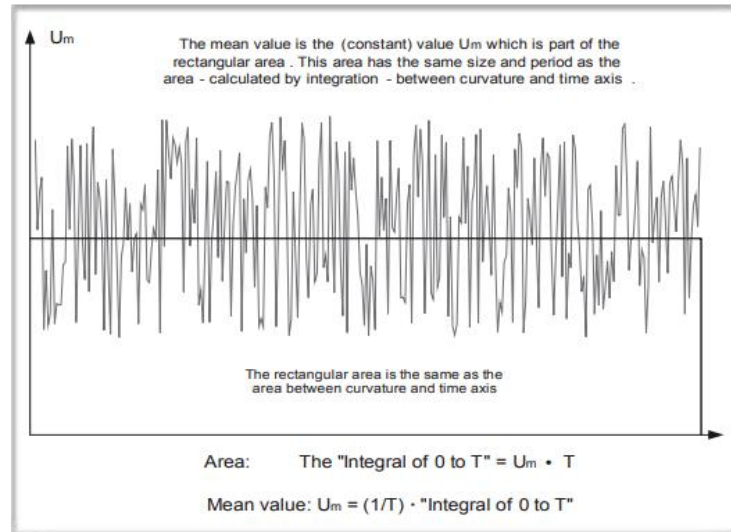
Di sebelah kiri sinyal persegi panjang terintegrasi yang terletak seluruhnya di bidang positif. Sesuai dengan Gambar 135, area meningkat secara linier dari 0 menjadi 125 ms. Setelah itu tetap konstan hingga 250 ms karena kurva persegi panjang adalah nol pada titik ini. Namun di sebelah kanan area berkurang secara linier karena dari 125 ms kurva sinyal terletak di bidang negatif.

Jika seseorang terus melakukan integrasi sinyal persegi panjang periodik, kurva sinyal akan semakin meningkat dalam kedua kasus dan cenderung menuju tak terhingga. Dimana letak nilai rata-ratanya?

Nilai rata-rata dari sinyal input kiri atas terletak pada empat – seperti yang dapat dilihat tanpa kesulitan – nilai dari sinyal input kanan atas terletak pada dua. Kurva integrasi menunjukkan dengan tepat nilai-nilai ini setelah 1 s.

Hasil pada Gambar 137 menunjukkan:

Jika kurva sinyal sebagian besar terletak di bidang positif (atau negatif), sinyal terintegrasi semakin meningkat (atau semakin turun). Dalam kasus sinyal semacam ini dalam integrasi murni, nilai rata-rata yang benar ditunjukkan tepat setelah 1 s!



Gambar 138: Definisi yang tepat dari nilai rata-rata (aritmatika)

Sebagaimana jelas dari Gambar di atas dan catatan serta definisi yang diberikan di sana, prosedur yang tepat untuk menentukan nilai rata-rata (aritmatika) adalah sebagai berikut: tentukan luas dari 0 hingga T antara kurva dan sumbu waktu dengan cara integrasi. Ubah area ini menjadi area persegi panjang dengan ukuran yang sama dengan durasi waktu yang sama T. Tinggi persegi panjang ini mewakili nilai rata-rata (aritmatika) U_m .

Subjek 'nilai rata-rata' sebenarnya adalah bagian dari teknologi pengukuran. Untuk alasan ini kita tidak akan membahas semua kemungkinan bentuk nilai rata-rata di sini. Nilai rata-rata (aritmatika) hanyalah nilai rata-rata dari urutan angka. Jika barisan bilangan adalah, misalnya (21; 4; 7; -12) nilai rata-ratanya adalah $U_m = (21 + 4 + 7 + (-12)) / 4 = 5$. Di sini disajikan secara sederhana sebagai kemungkinan hasil integrasi dan relevansinya sebagai proses sinyal teknis dijelaskan.

Sekarang kita dapat melihat yang berikut dari Gambar 136 dan Gambar 137:

- Dalam proses integrasi nilai rata-rata U_m hanya ditunjukkan tepat setelah 1s. $T = 1$ s berlaku di sini
- Nilai rata-rata U_m untuk durasi lain T dapat ditentukan dengan membagi nilai integral dari 0 ke T dengan durasi T
- Dalam konteks teknologi sinyal, pembentukan nilai rata-rata menggambarkan proses inersia yang tidak dapat mengenali perubahan yang cepat (lihat Gambar 136) tetapi hanya nilai rata-rata. Ini mirip dengan perilaku filter lowpass. Ini menghitung semacam "nilai rata-rata meluncur" di mana
 - mirip dengan Gambar 52 dan Gambar 68
 - nilai rata-rata dari "jendela" yang tumpang tindih ditampilkan terus menerus.

Catatan: Mata kita melakukan ini, misalnya, dengan televisi. Alih-alih 50 (setengah-) gambar per detik, kita melihat urutan gambar "rata-rata" terus menerus.

Sebagai hasil integrasi, kurva sinyal diubah dengan cara tertentu yang sangat penting secara matematis. Yang paling sederhana dari semua fungsi, fungsi konstanta $u(t) = K$ menjadi dengan integrasi fungsi linier $u(t) = K \cdot t$, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 137.

Apakah ada aturan yang terjadi dalam kasus integrasi berulang dan yang dapat dibalik dengan diferensiasi? Gambar 139 menunjukkan hubungan yang terlibat:

- Fungsi konstan tipe $u(t) = K$

dengan integrasi menjadi fungsi linier dari tipe $u(t) = K \cdot t$

Ini menjadi dengan integrasi fungsi "kuadrat" dari tipe $u(t) = K_1 \cdot t^2$

(dimana $K_1 = K/2$)

Dengan integrasi ini menjadi fungsi "kubik" dari tipe $u(t) = K_2 \cdot t^3$

dimana $K_2 = K_1/3$ dll. Ini hanya benar untuk integrasi dilakukan (blockwise) dengan kurva sinyal ("integral spesifik").

- Dengan diferensiasi (multiple) dimungkinkan untuk membalikkan integrasi (multiple) ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 134.

Integrasi dalam praktiknya merupakan operasi yang begitu penting – yang harus disadari oleh semua orang – sehingga kita hampir melupakan pertanyaan terpenting: apa yang terjadi dalam kasus integrasi ke sinyal sinusoidal?

Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 140. Ini menunjukkan perilaku yang diharapkan jika kita menganggap integrasi sebagai pembalikan diferensiasi, yaitu diferensiasi sinyal terintegrasi harus menghasilkan sinyal asli.

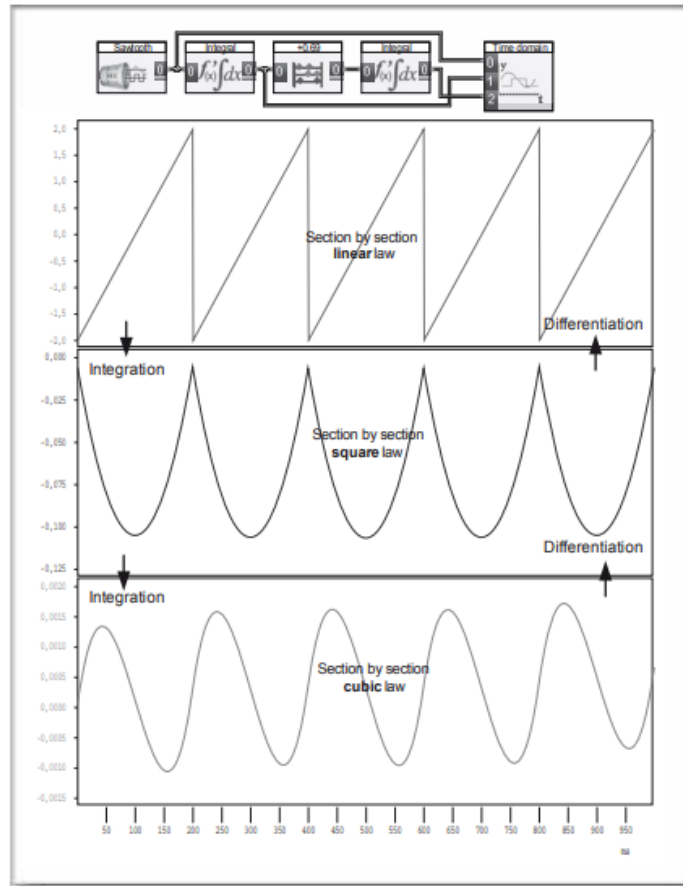
Fungsi berbahaya atau kurva sinyal

Bukan hanya demi kelengkapan, pada titik ini kita harus menyebutkan fungsi atau kurva sinyal tertentu yang dapat diintegrasikan tetapi tidak dibedakan.

Misalnya ada sinyal kebisingan "kacau". Jika Anda membedakan sinyal ini, Anda akan mendapatkan hasil. Tetapi noise memiliki sifat yang tidak dimiliki sinyal normal – nilai acak yang berurutan berubah dalam "langkah". Komputer bersikeras untuk mengukur gradien dari perbedaan antara dua hasil acak yang berdekatan dan interval waktu (konstan). Hasilnya adalah sinyal noise yang berbeda. Ini juga menunjukkan bahwa sinyal derau yang dihasilkan komputer adalah salinan sederhana dari proses derau alami. Kebisingan alami tidak menghasilkan "klik" pada interval waktu yang konstan.

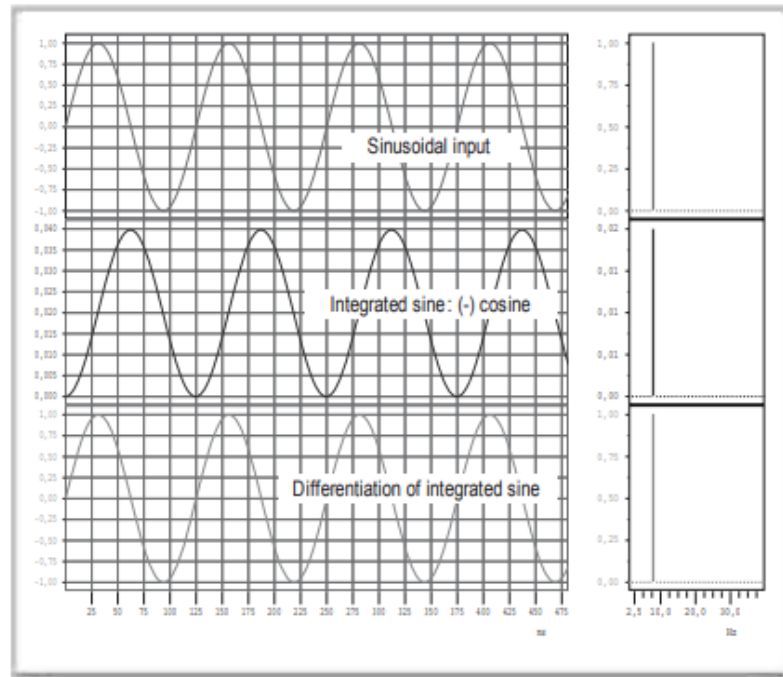
Untuk memuaskan rasa ingin tahu Anda, inilah tip lain: coba bedakan sinyal persegi panjang periodik atau sinyal gigi gergaji. Pada titik apa ada masalah atau nilai ekstrim?

Ini adalah "langkah" poin! Inilah sebabnya mengapa matematikawan telah menciptakan istilah grafis untuk menunjuk prasyarat untuk diferensiasi – kontinuitas suatu fungsi. Ini dapat didefinisikan secara grafis sebagai berikut:



Gambar 139: Integrasi: dari konstanta ke fungsi linear, kuadrat, kubik dan kembali melalui diferensiasi

Kita tidak dapat sepenuhnya melakukannya tanpa pengetahuan dasar tentang teori fungsi. Namun, semuanya divisualisasikan di sini, dijelaskan dengan kata-kata sederhana tanpa pendekatan matematis yang ketat. Penting untuk menindaklanjuti ini secara eksperimental menggunakan rangkaian di atas. Apa yang Anda amati setelah beberapa saat? Seperti apa kurva sinyal jika Anda tidak menambahkan konstanta padanya? Perhatikan bahwa fungsi yang lebih rendah tidak memiliki kurva sinusoidal tetapi dalam segmen "kubik", yaitu proporsional t^3 .



Gambar 140: Pada integrasi gelombang sinus

Sinus (atas) yang telah diintegrasikan menghasilkan kurva (-) berbentuk cosinus (tengah). Ini dapat direproduksi melalui diferensiasi sinyal terintegrasi, yaitu pembalikan integrasi. "Kurva gradien" dari sinyal terintegrasi sesuai dengan sinus asli (lihat atas dan bawah).

Suatu fungsi kontinu jika fungsi tersebut dapat digambarkan dengan cara yang benar secara matematis tanpa meletakkan "pensil" di bawah, itu berarti tanpa titik "langkah". Hanya fungsi kontinu yang dapat dibedakan karena kecuraman pada titik "langkah" (secara teoritis) tidak terbatas.

Filter

Ketika proses linier terdaftar, filter sering dilupakan meskipun sangat diperlukan dalam teknologi informasi dan pemrosesan sinyal. Proses linier yang disebutkan sejauh ini mengacu pada domain waktu sejauh menyangkut namanya. Dengan demikian proses diferensiasi sinyal berarti diferensiasi dilakukan dalam domain waktu. Ini ekuivalen, seperti telah dijelaskan, dengan perkalian dalam domain frekuensi (spektrum amplitudo) dengan $= 2\pi f$, dan dengan pergeseran spektrum fase dengan $/2$ (diferensiasi sinus menghasilkan a cosinus; ini setara dengan pergeseran fase ini!)

Perilaku filter mengacu pada proses dalam domain frekuensi. Jadi filter "lowpass" memungkinkan frekuensi rendah lewat, frekuensi tinggi sebagian besar diblokir, dll. Jenis filter selalu menunjukkan kisaran apa yang disaring.

Catatan:

Kata "filter" dicadangkan dalam pemrosesan sinyal untuk domain frekuensi. Proses yang setara dalam domain waktu adalah "jendela".

Radio dan televisi saat ini (masih) merupakan teknologi yang tidak dapat dipisahkan dengan penyaringan. Setiap stasiun beroperasi dalam pita frekuensi tertentu. Di atas dan di bawah pita frekuensi ini ada stasiun lain. Antena menerima semua penyiar, tugas "tuner" di atas segalanya adalah menyaring stasiun ini secara akurat. Dengan demikian, fungsi tuner pada prinsipnya seperti filter pelacakan.

Sejarah teknologi filter (analog) adalah contoh dari upaya yang pada dasarnya sia-sia untuk mengembangkan filter menggunakan komponen analog – kumparan, kapasitor yang mendekati ideal filter persegi panjang. Dalam Bab 3 – Prinsip Ketidakpastian – ditunjukkan bahwa filter persegi panjang pada dasarnya tidak mungkin diwujudkan karena akan bertentangan dengan hukum alam.

Filter digital mewakili lompatan kuantum dalam teknologi filter. Mereka mendekati ideal persegi panjang meskipun mereka tidak pernah bisa mencapainya. Seperti yang akan ditunjukkan dalam Bab 10 – lihat juga Gambar 126 – tanpa kecuali dapat direalisasikan melalui tiga proses linier yang sangat langsung: penundaan, penambahan dan perkalian sinyal dengan konstanta. Semua ini dalam domain waktu.

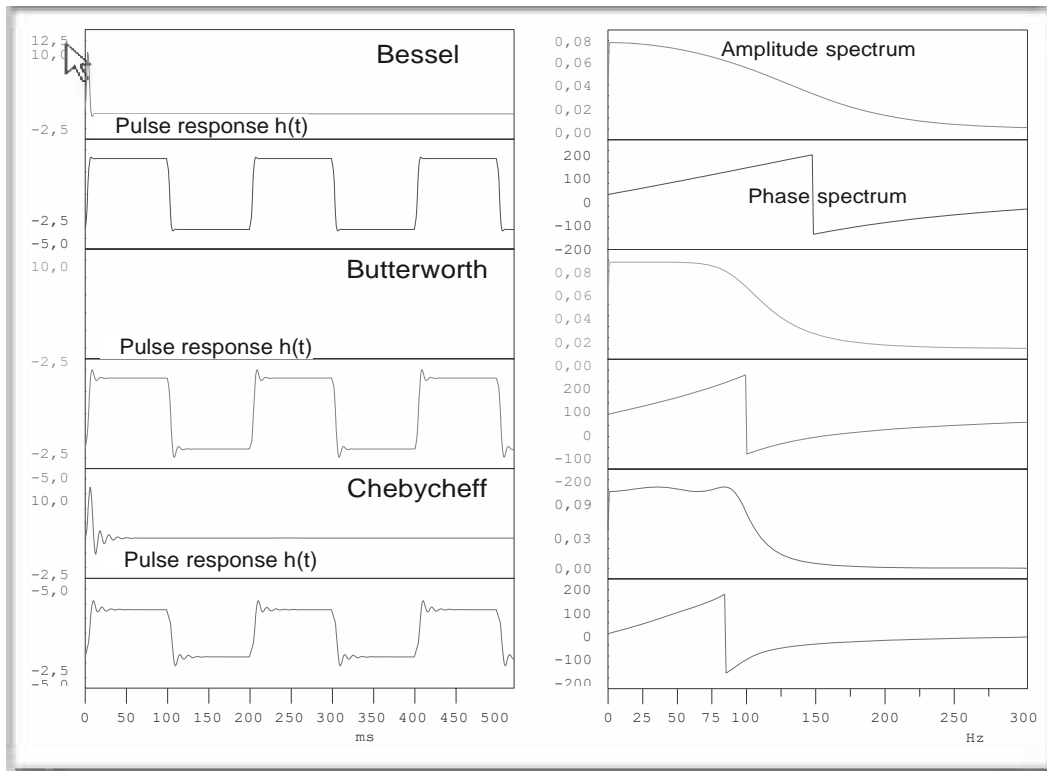
Pertama, sejumlah jenis filter tradisional yang digunakan dalam teknologi analog akan dijelaskan secara singkat dan diperiksa dari sudut pandang teknologi pengukuran menggunakan DASYLab. Kami akan membatasi diri pada tiga jenis yang dapat direalisasikan sebagai filter lowpass, highpass, bandpass dan filter eliminasi band. Filter bandpass dan eliminasi band pada prinsipnya dapat disatukan dari filter lowpass dan highpass.

Ketiga jenis ini dinamai ilmuwan yang menciptakan dasar matematika untuk menghitung sirkuit:

1. Filter BESSEL
2. Filter MENCUCI
3. Filter CHEBYCHEFF

Jenis filter ini penting dalam kerangka teknologi filter analog. Namun, mereka juga dapat diwujudkan secara digital. Namun, ada filter yang jauh lebih baik yang tersedia dalam pemrosesan sinyal digital.

Dalam Gambar 141 ketiga jenis filter ini dikontraskan dengan menggunakan contoh filter lowpass. Perilaku mereka dalam konteks teknologi transmisi menunjukkan keuntungan dan kerugian yang berbeda dan menunjukkan area aplikasi yang mungkin.



Gambar 141: Jenis filter analog tradisional

Ketiga jenis ini digunakan dalam teknologi analog – khususnya dalam domain frekuensi rendah – tergantung pada area aplikasi. Di setiap seri kiri atas Anda melihat respons pulsa $h(t)$ dari setiap jenis filter, di antaranya distorsi linier dari urutan pulsa persegi panjang pada keluaran filter ini. Kanan atas, kurva amplitudo dan di bawah ini kurva fase.

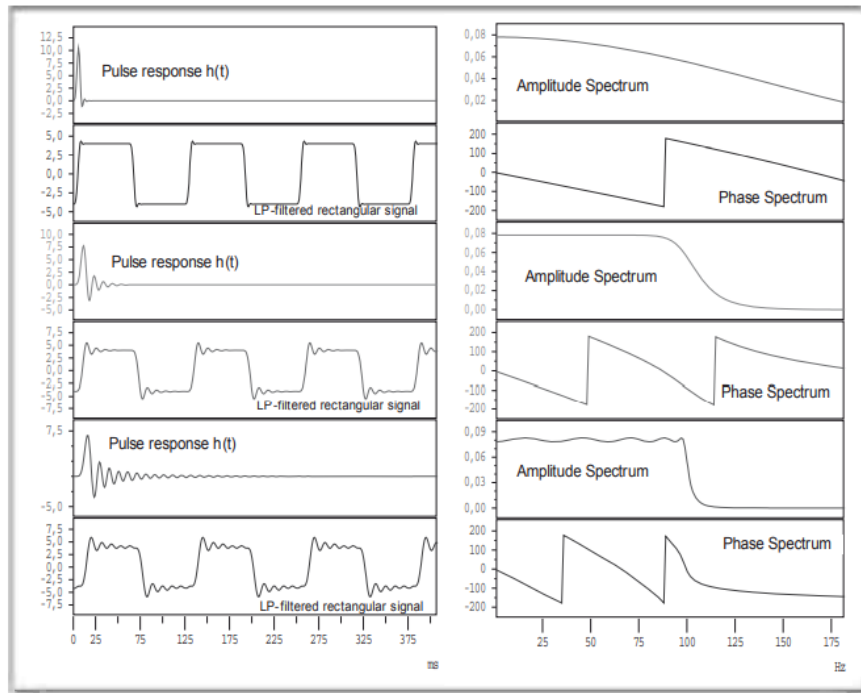
Seberapa penting kurva fase linier dapat berada di wilayah keadaan konduksi dapat dilihat dalam kasus filter BESSEL menggunakan urutan pulsa persegi panjang periodik. Hanya dengan demikian simetri sinyal dan "konservasi bentuknya" dipertahankan secara optimal. Hanya dalam kasus ini semua frekuensi (osilasi sinusoidal) yang terkandung dalam sinyal tertunda dengan nilai yang persis sama.

Dalam kasus filter CHEBYCHEFF kurva fase non-linier – hati-hati! penyaringan adalah proses linier - mengarah ke overshoot dari bentuk pulsa. Di sisi lain, kecuraman sisi-sisinya sangat bagus. Isi riak $h(t)$ atau urutan pulsa persegi panjang periodik setara dengan frekuensi cutoff dari wilayah keadaan konduksi. Filter BUTTERWORTH adalah kompromi yang sering digunakan antara dua jenis lainnya.

Semua jenis filter ini tersedia dalam berbagai kualitas (pesanan). Filter dengan orde yang lebih tinggi umumnya memerlukan kompleksitas sirkuit yang lebih besar dan/atau komponen dengan toleransi yang sangat kecil. Jenis filter yang disajikan di sini adalah dari urutan ke-4.

Dalam kasus penyimpanan besar filter BESSEL diatur oleh respons fase linier, di sisi lain kecuraman filter antara wilayah keadaan penghantar dan wilayah keadaan pemblokiran buruk, hal yang sama berlaku untuk kurva amplitudo di wilayah keadaan penghantar. .

Dalam hal filter CHEBYCHEFF, sangat penting untuk melekatkan kecuraman tepi. Di sisi lain, respon fase sangat non-linear dan kurva amplitudo di wilayah negara melakukan sangat "ripple".



Gambar 142: Filter lowpass analog tradisional orde ke-10

Susunan sinyal atau kurva amplitudo dan fasenya sesuai persis dengan Gambar 141. Namun, semua filter lowpass di sini adalah urutan ke-10, kira-kira maksimum dari apa yang dapat dibuat dalam istilah analog dengan pengeluaran usaha yang wajar.

Dalam distorsi sinyal persegi panjang Anda melihat kelemahan dan kelebihan dari berbagai jenis filter. Perhatikan bahwa respons pulsa $h(t)$ berlangsung lebih lama semakin curam tepi filter. Orang yang terlatih dapat memberikan informasi yang sangat tepat tentang kurva fungsi alih $H(f)$ dari kurva $h(t)$.

Langkah-langkah dalam kurva fase seharusnya tidak membingungkan Anda. Mereka selalu pergi dari ke -180 atau dari 180 derajat ke -180 derajat. Kedua sudut itu identik. Untuk alasan ini biasanya untuk memasukkan kurva fase hanya antara dua nilai cutoff ini. Sudut 210 derajat diplot pada $-180 + 30 = -150$ derajat.

Kanan bawah Anda melihat kurva fase dengan "langkah acak". Ini hasil dari perhitungan numerik dan tidak ada hubungannya dengan kurva nyata. Tepatnya, komputer mengalami kesulitan dengan pembagian nilai yang "mendekati nol".

Filter BUTTERWORTH mewakili kompromi penting antara kedua jenis ini. Ini memiliki kurva amplitudo yang cukup linier di wilayah keadaan konduksi dan kecuraman tepi yang dapat ditoleransi dalam transisi dari wilayah keadaan konduksi ke wilayah keadaan pemblokiran.

Dalam kasus filter analog tradisional hanya ada kemungkinan untuk mendapatkan karakteristik filter yang dapat ditoleransi dengan mengorbankan nilai filter lainnya. Ada dua alasan langsung untuk ini:

- Untuk membuat filter dengan kualitas yang lebih tinggi, sangat akurat – misalnya, akurat hingga 10 titik desimal – komponen analog (kumparan, kapasitor, dan resistansi) harus tersedia. Namun hal ini tidak mungkin karena toleransi dalam manufaktur dan fluktuasi terkait suhu membuat hal ini tidak mungkin.
- Semua filter digital berkualitas tinggi didasarkan – seperti yang akan ditunjukkan – pada proses penundaan yang tepat. Penundaan yang tepat tidak mungkin dilakukan dalam teknologi analog.

Kualitas jenis filter individu dapat ditingkatkan dengan sirkuit yang secara teknis lebih kompleks dimana, misalnya, dua filter dari jenis yang sama (dipisahkan) dihubungkan seri satu di belakang yang lain. "Urutan" adalah tolok ukur matematis/fisik untuk kualitas ini. Filter analog dari jenis yang dijelaskan dapat direalisasikan ke urutan ke-10 dengan upaya yang wajar.

Catatan: Filter analog berkualitas tinggi dapat dibuat dengan upaya yang cukup besar dengan memanfaatkan prinsip fisik lainnya. Filter kristal kuarsa dan filter gelombang permukaan harus disebutkan di sini. Aplikasi mereka terutama di bidang frekuensi tinggi. Mereka tidak ditangani di sini.

Anda telah menemukan jenis filter digital khusus dan mudah dipahami beberapa kali. Perhatikan dengan seksama Gambar 95, Gambar 119 dan Gambar 126. Tipe ini hampir ideal karena respons fasenya linier, kecuraman tepinya hanya dibatasi oleh UP dan kurva amplitudonya di daerah konduksi keadaan hampir konstan.

Bagaimana ini dicapai? Mudah – menggunakan komputer! Pertama, segmen sinyal (panjang blok) mengalami transformasi FOURIER (FFT). Dengan demikian, segmen sinyal ini tersedia dalam domain frekuensi. Menggunakan alat pemotong (Modul "Potong" rentang frekuensi didefinisikan yang diizinkan untuk lewat. Kemudian muncul transformasi FOURIER terbalik (IFT) dengan cara "sisa" sinyal "dipancarkan" kembali ke domain waktu. Dalam domain frekuensi Anda melihat dua jalur sinyal yang harus diatur secara identik. Amplitudo dan spektrum fase harus diblokir untuk area yang sama, sehingga untuk berbicara.

Dalam Gambar 119, filter bandpass ideal yang praktis telah direalisasikan yang memiliki bandwidth hanya 1 Hz. Sayangnya filter ini tidak beroperasi secara real time, yaitu tidak dapat menyaring sinyal kontinu dengan panjang tertentu tanpa kehilangan informasi. Itu hanya dapat menyaring sinyal yang dibatasi waktu, mis. blok sinyal dari 1024 pembacaan pengukuran dengan laju pengambilan sampel yang ditetapkan pada 1024 pengukuran per detik.

Berikut ini dapat dikatakan secara umum tentang filter:

Semakin banyak fungsi transfer filter mendekati ideal persegi, semakin besar kompleksitas sirkuit dalam kasus filter analog dan semakin besar jumlah perhitungan dalam kasus filter digital.

Dari sudut pandang fisik, hal berikut ini berlaku: Saat 'pulsa muncul 'tercoreng' pada waktunya pada keluaran filter, filter harus berisi rantai penyimpanan energi yang saling berhubungan. Semakin baik filternya, semakin kompleks "sistem retardasi" ini.

Proses non-linier

Empat operasi linier ditangani sampai sekarang -

- Perkalian dengan konstanta
- Penambahan dan pengurangan
- Diferensiasi
- Integrasi

adalah empat operasi matematika linier klasik seperti yang diketahui dari "Teori persamaan diferensial linier". Mereka ditangani di sini terutama dari perspektif teknologi sinyal.

Mereka sangat penting karena mereka cukup untuk menggambarkan dalam istilah matematika hukum alam yang paling penting - elektromagnetisme dan fisika kuantum. Inilah sebabnya mengapa ruang dan kabel menunjukkan perilaku linier dalam perambatan sinyal.

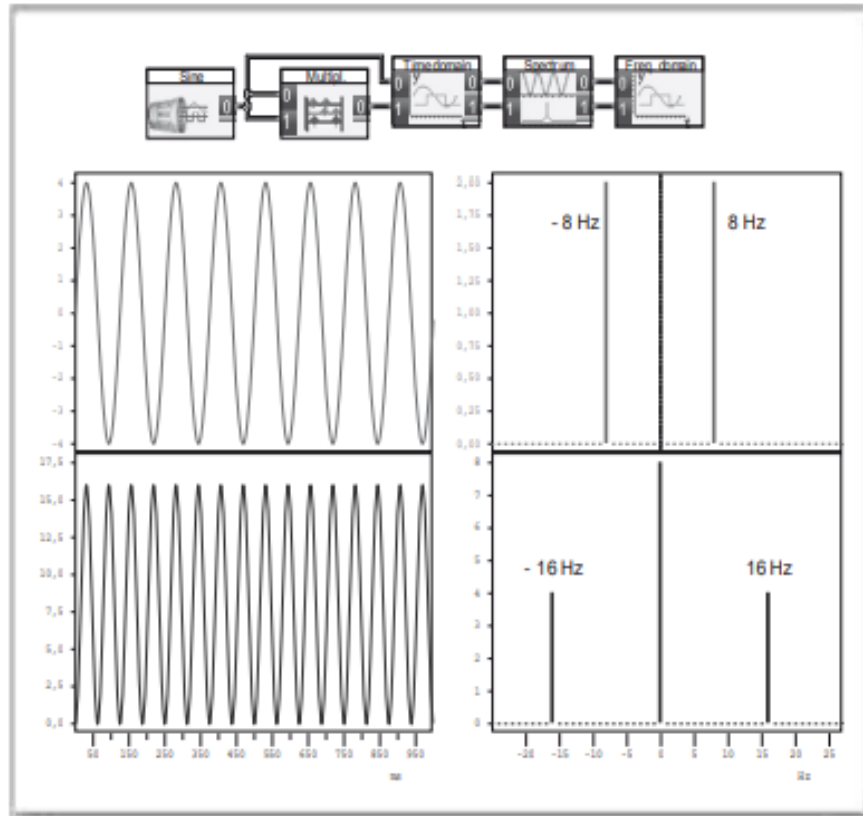
Dalam literatur khusus tentang Teori Sistem Pemrosesan Sinyal, proses atau sistem non-linier hampir tidak disebutkan. Ini memberi kesan bahwa proses/sistem non-linier dengan pengecualian satu atau dua proses "eksotis" hampir tidak memiliki kepentingan praktis. Ini sangat salah.

Ingat Bab 1: di sini Teori Sistem Pemrosesan Sinyal dipahami sebagai pemodelan matematis pemrosesan sinyal berdasarkan fenomena fisik. Memang benar bahwa dalam kasus proses dan sistem non-linier, pemodelan matematika berhasil dalam bentuk persamaan tetapi dengan sedikit pengecualian persamaan ini tidak dapat larut.

Matematika gagal hampir sepenuhnya dalam penyelesaian persamaan non-linier.

Untuk alasan ini proses non-linier hampir tidak disebutkan dalam buku-buku teori ini. Hanya dengan bantuan komputer proses non-linier semacam itu dapat diselidiki dan hasilnya setidaknya divisualisasikan. Untuk sejumlah alasan ini tampaknya semakin penting untuk penelitian:

- Meskipun ada sekitar setengah lusin proses linier yang berbeda, jumlah proses non-linier yang berbeda jauh lebih besar.
- Pentingnya proses non-linier untuk semua "sistem" yang benar-benar menarik menjadi semakin nyata. Hal ini tampaknya berlaku terutama untuk proses biologis. Akhirnya kita ingin memahami, misalnya, menurut hukum apa pertumbuhan tumbuhan dan hewan terjadi. Tetapi di alam mati juga, non-linearitas berkuasa. Turbulensi di atmosfer adalah contohnya, seperti halnya tetesan air atau gelombang. Istilah populer untuk penelitian non-linier adalah "teori kekacauan". Dalam hubungan ini terdapat berbagai literatur ilmiah populer yang menarik perhatian masyarakat pada apa yang akan menjadi bidang utama penelitian ilmiah dalam beberapa dekade mendatang.



Gambar 143: Perkalian sinyal sinusoidal identik

Mengingat keragaman tak terbatas dari proses non-linier kita harus selektif. Pada titik ini kita akan berurusan dengan beberapa proses mendasar. Jika perlu, yang lain akan ditambahkan – misalnya, dalam teknologi pengukuran. Penting untuk mengklarifikasi fitur umum apa yang dimiliki proses non-linier (dalam domain waktu) dalam domain frekuensi.

Perkalian sinyal sinusoidal dengan sendirinya dapat digunakan sebagai teknik untuk menggandakan frekuensi. Sinyal keluaran berisi frekuensi yang berbeda dari sinyal masukan. Dengan demikian merupakan proses non-linear.

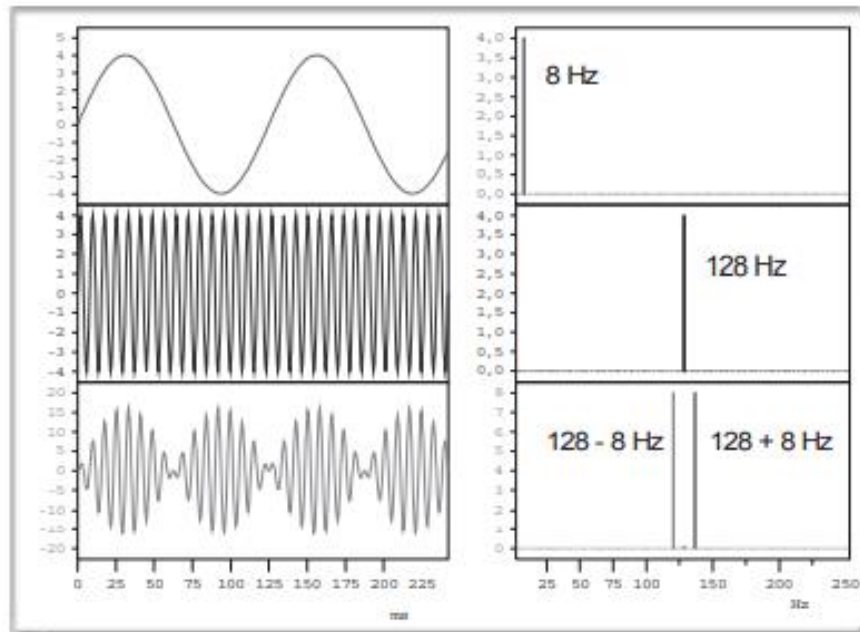
Sinyal keluaran selalu positif. Domain frekuensi menunjukkan bahwa ia terdiri dari sinyal sinusoidal (16 Hz) dan offset („frekuensi nol“ 0 Hz).

Perkalian dua sinyal

Apa yang terjadi ketika dua sinyal dikalikan satu sama lain? Mari kita lanjutkan secara sistematis. Sebagai perwakilan dari semua sinyal sebagai hasil dari FP, kami memilih dua sinyal sinusoidal, awalnya dengan frekuensi, amplitudo, dan ukuran fase yang sama.

Gambar 143 menunjukkan hasil yang menakjubkan dalam domain waktu dan frekuensi. Dalam domain waktu kita melihat sinyal sinusoidal dua kali frekuensi, yang memiliki tegangan langsung ditumpangkan di atasnya. Eksperimen lebih lanjut menunjukkan hal berikut: tingkat tegangan searah tergantung pada perpindahan fase dari dua sinyal

sinusoidal dalam hubungannya satu sama lain. Dalam domain frekuensi kita melihat garis dalam frekuensi dua kali lipat - sehingga benar-benar sinyal sinusoidal.



Gambar 144: Perkalian dua sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang jelas berbeda

Dalam hal ini prinsip muncul dengan jelas untuk pertama kalinya yang mencirikan spektrum frekuensi dari sebagian besar proses non-linier – hubungan non-linier dari dua sinyal. Literatur berbicara tentang jumlah dan perbedaan frekuensi, yaitu semua frekuensi yang terkandung dalam spektrum ini dihasilkan dari. Dalam bahasa spektrum linier – lihat Bab 5 – yang menyatakan bahwa spektrum bayangan cermin berada dalam domain frekuensi negatif, dalam kasus proses non-linier ini hanya jumlah semua frekuensi negatif dan positif yang terbentuk.

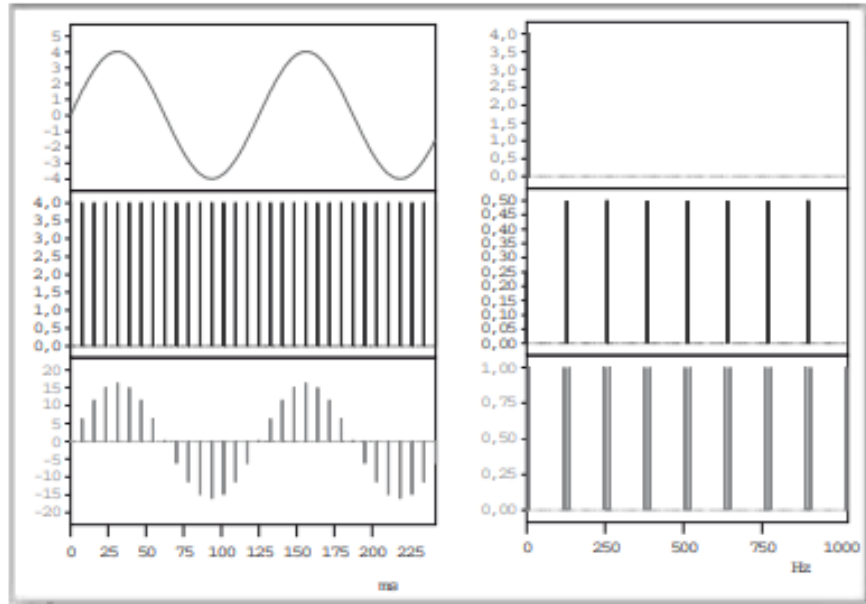
Perkalian sinyal sinusoidal dengan sendirinya dapat digunakan secara teknis untuk menggandakan frekuensi.

Perkalian dua sinyal sinusoidal jelas merupakan proses non-linier karena sinyal keluaran mengandung frekuensi yang berbeda dari sinyal masukan.

Sekarang kita memilih dua sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang jelas berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 144. Ada sinyal dalam domain waktu yang setara dengan ketukan (lihat Gambar 123). Hal ini juga ditunjukkan dalam domain frekuensi. Ada dua sinyal tetangga yang berdekatan frekuensi yang terkandung di sini.

Eksperimen yang sesuai dengan DASYLab biasanya memberikan $f_1 \pm f_2$

Tepatnya, f_1 dan f_2 adalah – simetris positif dan negatif – frekuensi dari sinyal sinusoidal (lihat Bab 5).



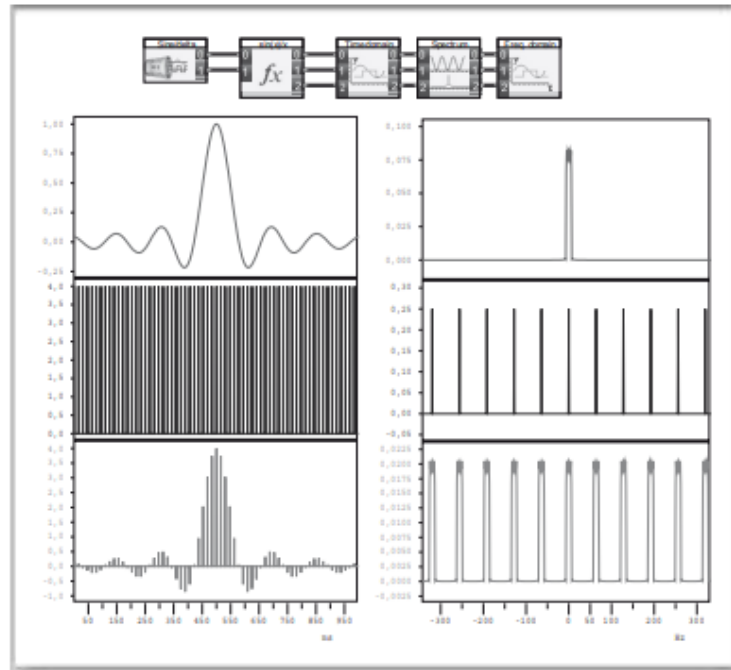
Gambar 145: Pengambilan sampel sebagai perkalian sinyal dengan urutan –pulsa

Menggunakan contoh osilasi sinusoidal, perkalian sinyal dengan urutan (frekuensi yang lebih tinggi) dari pulsa ditunjukkan. Urutan pulsa memiliki jumlah osilasi sinusoidal yang tak terbatas dengan amplitudo yang sama, selalu pada interval yang sama dari 128Hz.

Dalam spektrum yang lebih rendah Anda hanya akan menemukan "jumlah dan perbedaan frekuensi" dari dua frekuensi dari dua spektrum atas. Semakin kecil salah satu dari dua frekuensi, semakin dekat jumlah dan selisih frekuensi satu sama lain.

Denyut dapat dihasilkan dengan mengalikan osilasi sinusoidal dari frekuensi rendah dengan osilasi sinusoidal dari frekuensi yang lebih tinggi. Frekuensi ketukan berada dalam simetri bayangan cermin ke frekuensi yang lebih tinggi. Perhatikan bahwa amplop ketukan sesuai dengan kurva sinusoidal dari setengah perbedaan frekuensi. Perkalian apa lagi yang penting secara teknis? Secara intuitif, tampaknya masuk akal untuk memasukkan sinyal terpenting kedua – pulsa dalam perkalian.

Aplikasi praktis yang paling penting adalah penggandaan sinyal (band terbatas) dengan urutan pulsa Seperti yang jelas dari Gambar 37 dan Gambar 92 (bawah-bawah) ini setara dengan proses pengambilan sampel di mana sampel Pengambilan sampel ini selalu merupakan langkah pertama dalam transformasi sinyal analog menjadi sinyal digital. Biasanya, frekuensi urutan pulsa- jauh lebih besar daripada frekuensi sinyal (tertinggi).



Gambar 146: Konvolusi dalam domain frekuensi sebagai hasil perkalian dalam domain waktu

Penjelasan sederhana untuk perilaku aneh domain frekuensi dalam kasus perkalian dua sinyal dalam domain waktu telah diberikan di akhir Bab 5 Prinsip Simetri “– sinyal periodik dalam domain waktu memiliki spektrum garis yang berjarak sama Jadi garis yang berjarak sama dalam domain waktu harus menghasilkan spektrum periodik untuk alasan simetri. Pencermian simetris spektrum LF pada setiap frekuensi pulsa disebut konvolusi.

Langkah pertama dalam konversi sinyal analog ke sinyal digital selalu perkalian sinyal dengan urutan periodik -pulsa, yang merupakan proses non-linear Jadi sinyal digital terutama dalam domain frekuensi memiliki sifat yang Sebagian besar masalah dalam pengambilan informasi asli dari sinyal analog kemudian muncul dari fakta ini.

Fenomena terkait frekuensi ini harus ditunjukkan dari sudut pandang teknologi pengukuran menggunakan contoh dua bentuk sinyal. Yang pertama dipilih adalah gelombang sinus, bentuk sinyal paling sederhana. Setelah itu kurva berbentuk Si (lihat Gambar 119) sebagai sinyal terbatas pita yang hampir ideal.

Berikut adalah hasil investigasi tersebut (Gambar 145 dan Gambar 146):

- Dalam percobaan dengan sinus, dua garis muncul cukup jelas dalam hubungan bayangan cermin untuk setiap frekuensi deret periodik pulsa dalam interval antara frekuensi sinus Untuk setiap frekuensi f_n dari deret pulsa oleh karena itu ada jumlah dan frekuensi perbedaan dari bentuk $f_n \pm f_{sin}$.
- Untuk alasan simetri (Bab 5) kita harus menghubungkan frekuensi positif dan negatif dengan sinus, kedua frekuensi ini sampai batas tertentu tercermin dalam setiap frekuensi f_n dari deret periodik pulsa Kita harus membayangkan seluruh spektrum seperti yang dicerminkan di wilayah frekuensi negatif.

Situasi ini disajikan lebih jelas dan di atas segalanya dengan cara yang lebih relevan dalam praktiknya dalam pengambilan sampel fungsi S_i :

- Seperti yang ditunjukkan pada Bab 5 Prinsip Simetri "bandwidth penuh dari fungsi S_i , yang merupakan daerah frekuensi positif dan negatif awalnya, berbelit-belit pada setiap frekuensi f_n dari urutan pulsa periodik.
- Oleh karena itu, informasi (terkait frekuensi) pada sinyal asli terkandung (secara teoritis) dalam jumlah tak terhingga dalam spektrum sinyal sampel.

Perkalian dalam domain waktu menghasilkan konvolusi dalam domain frekuensi. Untuk alasan simetri, berikut ini harus diterapkan: konvolusi dalam domain waktu menghasilkan perkalian dalam domain frekuensi.

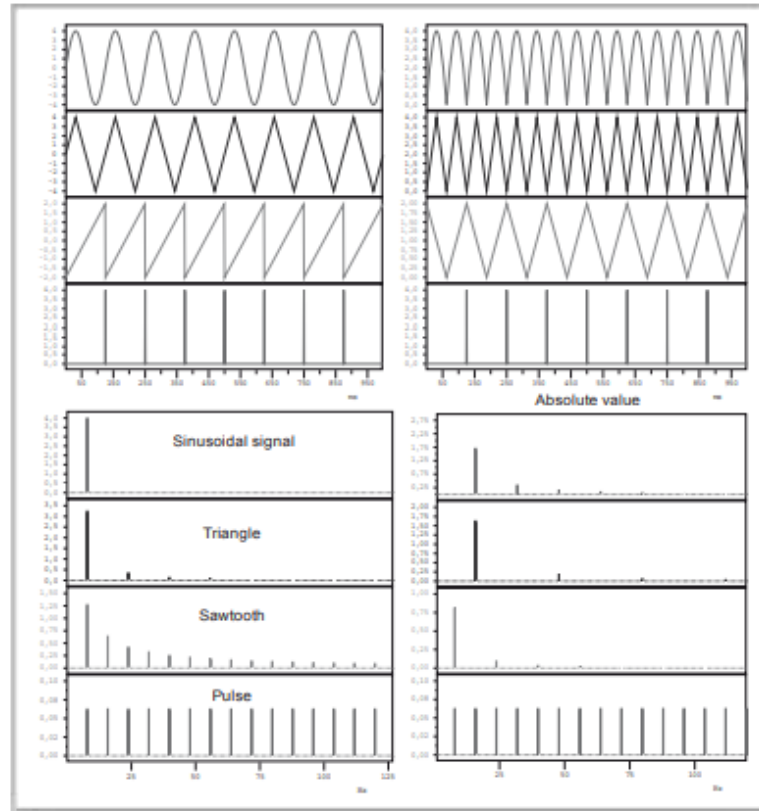
Pembentukan nilai absolut

Pembentukan nilai absolut adalah proses non-linier yang sangat langsung, aturannya adalah:

Dalam kasus pembentukan nilai absolut, tanda minus dihapus di depan semua nilai negatif dan diganti dengan tanda plus; nilai positif awalnya tetap tidak berubah.

Dalam arti, semua tanda diperbaiki ". Penyearah (gelombang penuh) arus atau sinyal dalam teknik elektro adalah contoh paling terkenal dari pembentukan istilah abstrak dari nilai absolut. Dalam Gambar 147 contoh-contoh dalam domain waktu menunjukkan apa efek pembentukan nilai absolut mungkin akan terjadi dalam domain frekuensi: periodisitas osilasi dasar berlipat ganda dibandingkan dengan periodisitas sinyal input.

Hal ini berlaku untuk dua sinyal pertama – sinus dan segitiga – pada Gambar 147. Sebagai konsekuensi dari pembentukan nilai absolut, panjang periode menjadi setengahnya, yaitu frekuensi dasar digandakan. segitiga dan gigi gergaji – memiliki posisi simetris dalam kaitannya dengan garis nol yang sama. Oleh karena itu, pada mungkin akan berpikir bahwa nilai absolut gigi gergaji akan menjadi dua kali lipat dalam frekuensi dasarnya. Namun, tidak demikian; ia menjadi periodik osilasi segitiga dengan frekuensi yang sama.



Gambar 147: Respon nilai absolut dari sinyal yang berbeda

Kiri atas Anda melihat sinyal input dalam domain waktu, di bawah ini spektrum frekuensinya; kanan atas Anda melihat sinyal respons dalam domain waktu dan di bawah ini spektrum frekuensinya. Dalam kasus dua sinyal atas – sinus dan segitiga – a Prinsip umum yang berlaku untuk pembentukan nilai absolut tampaknya telah ditemukan dalam penggandaan frekuensi; sayangnya ini tidak berlaku untuk gigi gergaji periodik yang juga terletak pada hubungan simetris dengan garis nol dan yang menjadi segitiga periodik dari frekuensi dasar yang sama Tapi apakah frekuensi – kelipatan genap – menghilang? Akhirnya, urutan pulsa tetap tidak berubah karena terletak di daerah positif hanya pada garis nol Proses linier?

Apakah gigi gergaji telah terdistorsi secara non-linear atau ada frekuensi baru yang ditambahkan? Dalam arti tertentu, ya, karena kelipatan genap dari frekuensi dasar sekarang kurang. Posisi fase dipindahkan oleh dibandingkan dengan frekuensi yang sudah ada. Atau apakah ini proses linier?

Akhirnya urutan periodik yang lebih rendah dari pulsa terletak tanpa kecuali pada nol di wilayah positif. Pembentukan nilai absolut juga mengarah ke sinyal yang identik di sini. Ini akan sesuai dengan proses linier.

Proses sederhana "pembentukan nilai absolut" ini menunjukkan dengan jelas betapa bergantungnya hasilnya pada sinyal input yang diberikan.

Proses pensinyalan tertentu dapat menunjukkan perilaku non-linier tergantung pada bentuk sinyal dan perilaku linier dalam kasus bentuk sinyal lainnya. Setiap penguat linier (praktis) menunjukkan perilaku non-linier, misalnya, jika overdrive).

Kuantisasi

Akhirnya, kita akan berurusan dengan kuantisasi, proses non-linier yang sangat penting yang selalu terjadi dalam konversi sinyal analog menjadi sinyal digital.

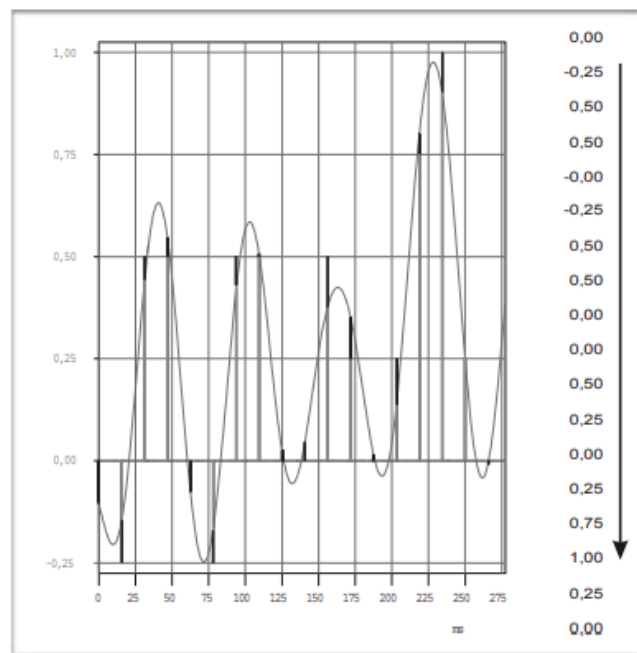
Sinyal analog kontinu baik dalam waktu dan nilai, yaitu memiliki nilai tertentu pada titik waktu tertentu dan melewati semua (jumlah tak terbatas) nilai antara antara nilai maksimum dan minimumnya.

Sebelum kuantisasi sinyal hanya diambil sampelnya secara teratur pada titik waktu diskrit yang cukup pasti. Setelah itu, pengukuran ini diubah menjadi bilangan (biner). Namun, stok Bilangan terbatas dan tidak besar tak terhingga. Alat ukur dengan tiga posisi dapat hanya menunjukkan nilai pengukuran 999. Gambar 148 menunjukkan perbedaan antara bentuk-bentuk sinyal ini. Sinyal analog kontinu dalam waktu dan nilai, sinyal sampel diskrit dalam waktu dan nilai kontinu dan akhirnya sinyal terkuantisasi – perbedaan antara dua nilai tetangga di sini 0,25 – diskrit dalam waktu dan nilai. Di sebelah kanan Anda melihat sinyal terkuantisasi sebagai rangkaian angka.

Metode yang sangat penting terutama dalam kasus konverter A / D adalah pengambilan sampel. Nilai sampel dipertahankan sampai sampel berikutnya diambil. kuantisasi berikutnya (Gambar 149) ketinggian langkah menjadi seragam. Setiap langkah sesuai dengan nilai diskrit.

Dalam analisis akhir, ada distorsi sinyal. Perbedaan ini direpresentasikan secara akurat di tengah. Seperti yang ditunjukkan oleh spektrum perbedaan, itu adalah semacam noise. Ungkapan "noise kuantisasi" digunakan.

Agar, misalnya dalam teknologi HiFi, untuk menjaga perbedaan ini sekecil mungkin sehingga kebisingan kuantisasi ini tidak terdengar, kurva langkah harus dibuat lebih kecil sampai tidak ada perbedaan yang terlihat atau terdengar di antara kedua sinyal.

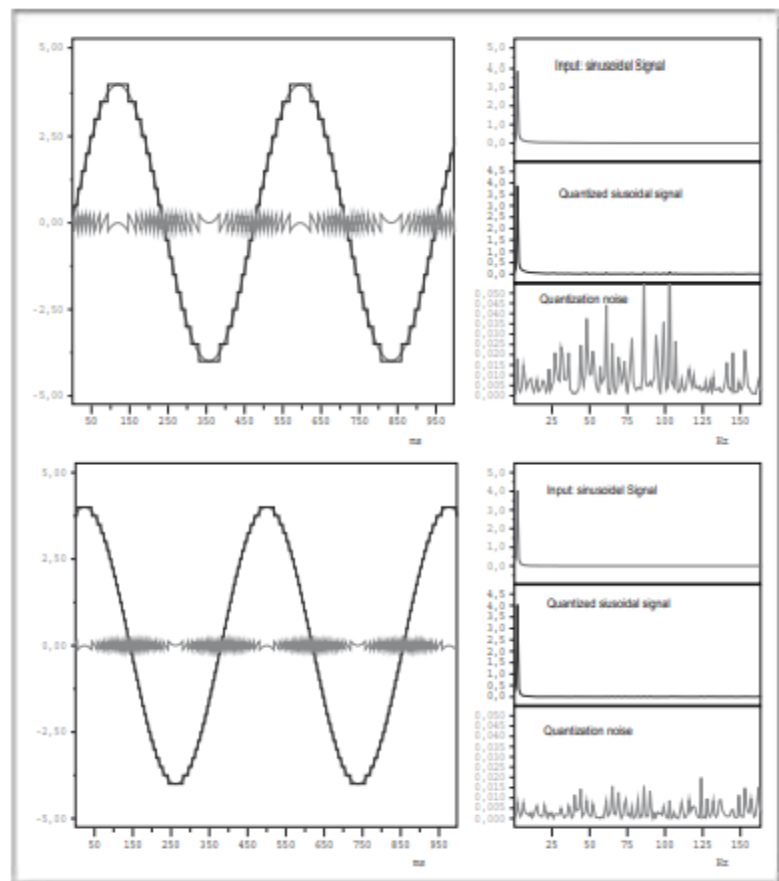


Gambar 148: Gambar proses kuantisasi

Untuk menggambarkan situasi secara lebih tepat, ketiga sinyal telah dimasukkan di atas satu sama lain. Pertama-tama ada segmen dari sinyal analog yang kontinu dalam waktu dan nilai. Sinyal sampel juga harus dilihat. Ini adalah sinyal diskrit waktu. Bilah lebar ini dengan demikian mewakili. Perbedaan antara sinyal sampling dan sinyal terkuantisasi diwakili oleh bilah lebar. Oleh karena itu, ini adalah sampel tepat dari sinyal analog. area kesalahan yang melekat pada sinyal digital.

Sampel sinyal terkuantisasi dimulai pada garis nol dan berakhir pada nilai yang diizinkan yang ditunjukkan di sini oleh penetasan. Sinyal terkuantisasi diwakili di sebelah kanan sebagai string angka. Kedua representasi tersebut dikuantisasi secara kasar sehingga tidak dapat diterima dalam pengertian teknis dan akustik.

Dalam teknologi HiFi, konverter A / D 16 bit digunakan. Mereka memungkinkan $2^{16} = 65536$ angka diskrit yang berbeda dalam rentang nilai. Teknologi konverter A / D akan dibahas dalam bab selanjutnya. Sebagai hasil dari sifat telinga kita kebisingan kuantisasi kemudian jatuh di bawah tingkat yang dapat didengar.



Gambar 149: Kuantisasi sinyal sampel

Ada tiga kurva sinyal yang dapat dilihat dalam domain waktu: sinyal analog sinusoidal kontinu dalam waktu dan nilai, sinyal sampel terkuantisasi waktu dan nilai diskrit (kurva langkah) dan sinyal perbedaan waktu dan nilai kontinu di tengah Gambar.

Di bagian atas Anda melihat sinyal terkuantisasi yang sangat tidak akurat. Coba tentukan jumlah nilai terkuantisasi yang diizinkan dalam wilayah terukur $-5V$ hingga $+5V$. Spektrum ketiga sinyal ditampilkan di sebelah kanan. Spektrum sinus menunjukkan perbedaan sinyal menggabungkan kebisingan kuantisasi. Amplitudo mencapai $0,05 V$. Dengan meningkatkan jumlah langkah kuantisasi yang mungkin (berapa banyak yang ada di sini?) Kurva langkah dari sinyal terkuantisasi tampaknya jauh lebih dekat dengan sinyal analog: Sebagai hasil perbedaan tegangan jauh lebih kecil. Kuantisasi kebisingan kurang dari $0.02V$.

Kedua representasi tersebut dikuantisasi secara kasar sehingga tidak dapat diterima dalam pengertian akustik teknis. Sampling dan kuantisasi selalu merupakan dua langkah awal dalam konversi sinyal analog menjadi sinyal digital. Kedua proses pada dasarnya non-linear.

Dalam pengambilan sampel spektrum periodik muncul sebagai akibat dari konvolusi. Informasi terkandung di dalamnya (secara teoritis) dalam jumlah tak terhingga, oleh karena itu bandwidth spektrum sampel sangat besar.

Konsekuensi kuantisasi adalah derau kuantisasi, yang dalam teknologi HiFi harus dikurangi hingga tidak terdengar, hal ini dilakukan dengan meningkatkan langkah kuantisasi yang sesuai.

Sebuah sinyal digital tentu berbeda dari sinyal analog asli. Hal ini mengakibatkan kebutuhan untuk membuat perbedaan ini sekecil mungkin, sehingga tidak terdengar atau hampir tidak terdengar.

Jendela

Sinyal non-periodik yang lebih panjang – misalnya, sinyal audio – harus diproses dalam segmen-segmen segera setelah domain frekuensi dilibatkan. Seperti yang telah dijelaskan secara rinci dalam Bab 3 (lihat Gambar 51 hingga Gambar 54) dan Bab 4 (lihat Gambar 68), sinyal sumber dikalikan dengan "jendela" yang sesuai, yang harus tumpang tindih sehingga tidak ada kehilangan informasi dibandingkan dengan sinyal sumber.

Gambar 51 menunjukkan konsekuensi jika "pemotongan" dilakukan dengan jendela persegi panjang. Segmen ini berisi frekuensi yang tidak terkandung dalam sinyal sumber. "Jendela" dengan demikian pada dasarnya adalah proses non-linier. Yang disebut "jendela optimal" "Seperti upaya jendela GAUSSian untuk meminimalkan frekuensi tambahan ini.

Sebagai hasil dari fungsi non-linier dari jendela ini, bahkan spektrum asli dari sinyal sumber terdistorsi. Dalam domain waktu, segmen pusat dari sinyal berjendela diberikan bobot yang lebih besar daripada dua sisi yang dimulai dan diakhiri dengan lembut.

Kesimpulan awal:

Dalam konversi sinyal analog menjadi sinyal digital, sinyal selalu disampel, dikuantisasi (dan dikodekan). Semua proses ini non-linier dan mendistorsi sinyal sumber. Yang penting adalah meminimalkan kesalahan ini sedemikian rupa sehingga berada di bawah tingkat pendengaran.

Sinyal digital memiliki spektrum periodik sebagai hasil sampling. Sinyal digital memiliki spektrum periodik sebagai hasil sampling.

Latihan pada Bab 7

Latihan 1

Dengan menggunakan DASyLab, rancang rangkaian uji yang sesederhana mungkin yang dengannya Anda dapat mendemonstrasikan dan mengukur linearitas atau non-linier dari suatu sistem atau proses.

Latihan 2

Apa kemungkinan konsekuensi dari perilaku non-linier dari "ruang terbuka" dan "kabel" media transfer?

Latihan 3

Jika urutan pulsa persegi panjang terhubung ke input kabel panjang, sinyal yang terdistorsi (semacam persegi panjang meleleh") muncul di ujung kabel yang jauh.

- a) Apa penyebab dari distorsi-distorsi tersebut?
- b) Apakah distorsi non-linier atau distorsi linier terlibat?

Catatan: Anda dapat mensimulasikan kabel sebagai rantai filter lowpass sederhana menggunakan DASyLab (lihat Gambar 116)

Latihan 4

Bagaimana jumlah dari dua perpindahan sinusoidal dengan frekuensi dan amplitudo yang sama berubah tergantung pada perpindahan fase bersama? Desain posisi uji kecil menggunakan DASyLab.

Latihan 5

Jelaskan bagaimana munculnya spektrum amplitudo dari dua pulsa yang berurutan pada Gambar 126) Bagaimana posisi nol dari spektrum amplitudo bergantung pada interval waktu antara pulsa ini?

Latihan 6

Dengan menggunakan DASyLab merancang sebuah konverter frekuensi tegangan VCO sesuai dengan Gambar 131 yang dengan tegangan input 27mV menghasilkan sinyal output sinusoidal sebesar 270 Hz. Karakteristiknya harus linier.

Anda akan memerlukan pengaturan khusus dari modul "Generator" dan rangkaian input untuk mengontrol generator ini.

Latihan 7

Apa keuntungan yang dimiliki pengkodean frekuensi nilai pengukuran melalui VCO dalam telemetri?

Latihan 8

Periksa tesis berikut dengan menggunakan DASYLab: urutan proses linier dalam sistem linier dapat diubah tanpa mengubah sistem.

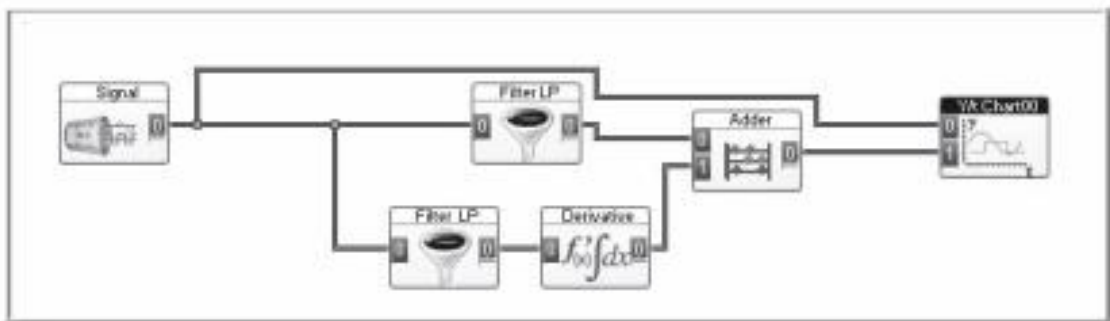
Latihan 9

Jelaskan mengapa diferensiasi pemrosesan menunjukkan perilaku filter highpass dan integrasi pemrosesan menunjukkan perilaku filter lowpass?

Latihan 10

Bagaimana sistem yang digambarkan dapat disederhanakan – misalnya dengan memotong jumlah modul – tanpa mengubah properti sistem? Periksa apakah solusi Anda benar menggunakan DASYLab.

Catatan: Filter harus benar-benar identic



Gambar 150: Mengoptimalkan sistem linier

Latihan 11

Kembangkan proses melalui modul "penerjemah rumus" di mana tegangan input sinusoidal dengan amplitudo IV dari frekuensi apa pun f selalu menghasilkan tegangan output sinusoidal dengan frekuensi empat kali lipat $4f$. Tegangan output harus memiliki amplitudo sebesar $1V$ dan tidak memiliki offset.

Latihan 12

Apa peran pengambilan sampel dan kuantisasi dalam pemrosesan sinyal modern?

Latihan 13

Jelaskan istilah "konvolusi" Dengan cara operasi apa yang dapat menyebabkan "belitan" dalam domain waktu? Petunjuk: Prinsip Simetri.

Latihan 14

Kembangkan rangkaian sederhana untuk pengambilan sampel murni (waktu diskrit dan nilai kontinu) melalui modul "Latch".

Latihan 15

Kembangkan melalui modul "penafsir rumus" sebuah sirkuit untuk kuantisasi sinyal input menurut Gambar 149. Seharusnya dimungkinkan untuk mengatur kuantisasi di mana saja dari halus hingga "kasar".

BAB 8

PROSEDUR MODULASI KLASIK

Semua proses yang menyiapkan sinyal sumber untuk jalur transmisi dimasukkan ke dalam istilah modulasi.

Sinyal dimodulasi untuk :

- mengeksplorasi secara optimal sifat fisik medium (misalnya pilihan rentang frekuensi),
- menjamin transmisi yang sebagian besar tidak terdistorsi,
- mengoptimalkan keandalan transmisi,
- menghormati perlindungan data dalam telekomunikasi
- mengeksplorasi saluran transmisi beberapa kali (multipleks frekuensi dan waktu) dan
- sinyal bebas dari informasi yang berlebihan.

Catatan: Di samping istilah modulasi, istilah pengkodean sering digunakan terutama dalam proses transmisi digital modern. Kedua istilah tersebut tidak dapat dibedakan secara tepat. Dalam hubungan ini lihat Bab 11-13. Ada juga perbedaan antara pengkodean sumber dan pengkodean saluran, Pengkodean sumber melayani pemusatan informasi atau kompresi data, yaitu sinyal dibebaskan dari informasi redundan yang tidak perlu Tugas pembuat kode saluran adalah untuk menjamin transfer yang cukup andal Hal ini dicapai melalui proses pengkodean yang mengenali dan memperbaiki kesalahan Elemen-elemen cek ditambahkan ke sinyal sebagai akibatnya kompresi oleh pengkodean sumber berkurang lagi sampai batas tertentu.

Media transmisi

Sebuah perbedaan dibuat antara

- transmisi "nirkabel", (misalnya melalui satelit) dan
- komunikasi kabel (misalnya melalui kabel kembar dan kabel koaksial) Media baru yang penting adalah pemandu gelombang optik, serat kaca

Modulasi dengan pembawa sinusoidal

Proses modulasi klasik dari teknologi analog menggunakan modifikasi berkelanjutan dari pembawa sinusoidal Proses ini masih standar dalam teknologi radio dan televisi Proses modulasi digital modern mulai berkembang di sini dan secara bertahap akan menggantikan proses modulasi klasik di masa depan.

Dalam kasus sinus, tiga besaran dapat divariasikan: amplitudo, frekuensi, dan fase. Dengan demikian, informasi dapat ditumpangkan pada "pembawa" sinusoidal melalui perubahan amplitudo, frekuensi, atau fase, atau dengan kombinasi dari ketiganya.

Catatan:

Dari sudut pandang fisik – lihat Prinsip Ketidakpastian – perubahan amplitudo, frekuensi, atau fase selalu menyiratkan ketidakpastian frekuensi dalam domain frekuensi; jadi peralihan tiba-tiba dari frekuensi sinus dalam domain waktu pada kenyataannya menyiratkan ketidakpastian frekuensi dalam domain frekuensi yang dinyatakan dalam pita frekuensi.

Sinyal termodulasi dengan pembawa sinusoidal dengan demikian hanya memiliki sesuatu seperti "sinus sesaat" atau "frekuensi sesaat" dalam domain waktu, dalam spektrum kita selalu melihat kumpulan frekuensi. Kumpulan frekuensi ini semakin lebar semakin pendek keberadaannya "frekuensi sesaat" ($\Delta f > 1 / t$) dalam domain waktu.

Dalam proses modulasi klasik hanya satu dari tiga besaran amplitudo, frekuensi atau fase yang divariasikan secara terus menerus “dalam irama” dari sinyal sumber.

Proses modulasi klasik dengan demikian :

- Modulasi amplitudo AM
- Modulasi frekuensi FM
- Modulasi fase PM

Dalam teknologi transmisi tradisional - misalnya radio dan televisi - AM dan FM terutama digunakan.

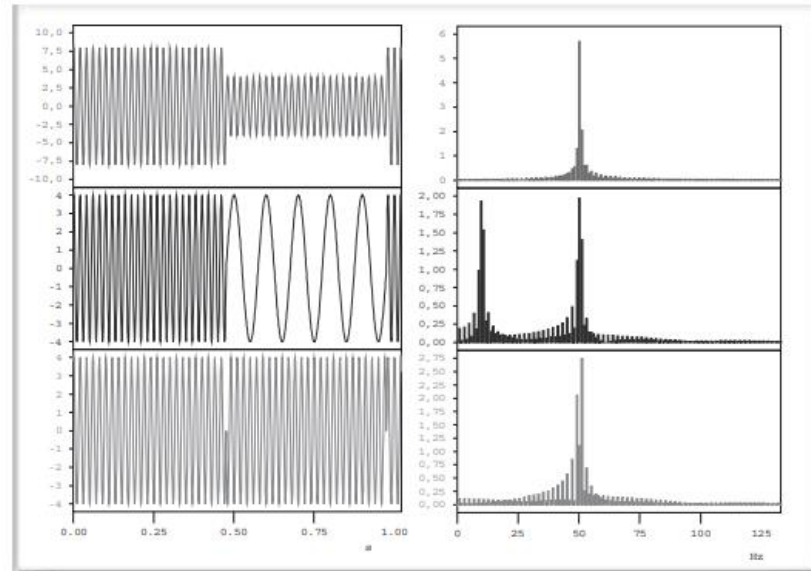
AM, FM dan PM digunakan untuk menggantikan atau mentransfer sinyal sumber ke dalam rentang frekuensi yang diinginkan. Semua proses modulasi merupakan proses non-linier karena sinyal termodulasi menempati rentang frekuensi yang berbeda dari sinyal sumber.

Modulasi dan demodulasi dalam pengertian tradisional

Setiap sinyal termodulasi harus didemodulasi di penerima, yaitu harus dikembalikan seakurat mungkin ke dalam bentuk sinyal sumber aslinya.

Dalam kasus stasiun radio, sinyal dimodulasi dalam pemancar, yaitu hanya satu modulator yang diperlukan, tetapi masing-masing dari ribuan penerima membutuhkan demodulator, pada hari-hari awal teknologi radio hanya mungkin untuk menggunakan proses modulasi yang membutuhkan demodulator sederhana dan murah di receiver.

Pada deret atas amplitudonya, pada deret tengah frekuensi dan pada deret bawah fasa osilasi pembawa sinusoidal berubah secara spontan. Tepatnya dalam kasus jenis modulasi dengan pembawa sinusoidal dalam domain waktu istilah “frekuensi sesaat” adalah sering digunakan.



Gambar 151: Apakah “frekuensi sesaat” ada?

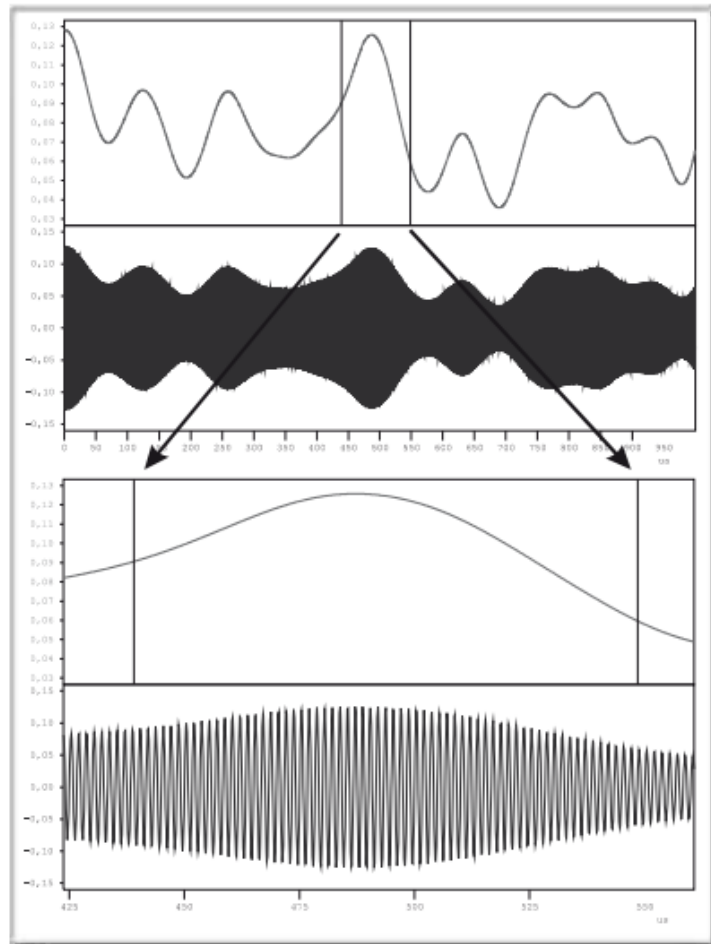
Sebuah analisis yang tepat dalam domain frekuensi menunjukkan bahwa karena Prinsip Ketidakpastian ini tidak dapat ada. Bagaimanapun, sinyal sinusoidal apa pun, (secara teoritis) bertahan dalam periode waktu yang tak terbatas. Di tengah hanya ada dua garis yang ada di (20 dan 50 Hz). Namun, kita melihat seluruh rangkaian frekuensi, bisa dikatakan seluruh pita frekuensi. Setiap perubahan dalam kuantitas sinyal sinusoidal menyebabkan ketidakpastian frekuensi – seperti yang dapat dilihat di sini. Dan di baris bawah fase hanya sebentar dipindahkan oleh.

Modulasi amplitudo dan demodulasi AM

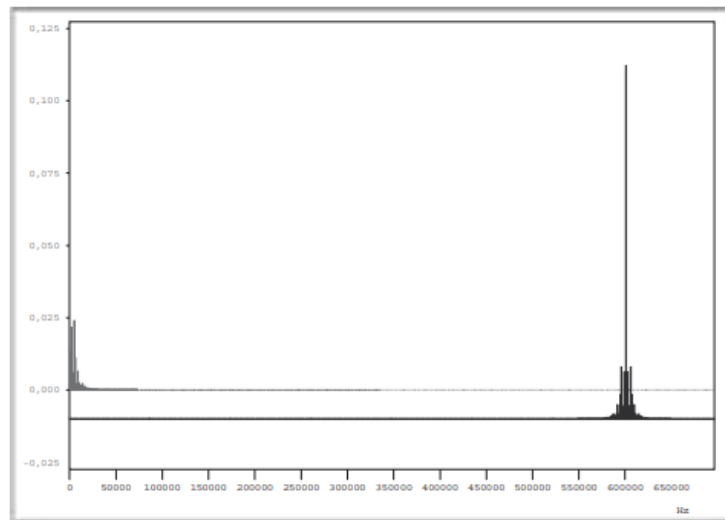
Sejarah teknologi radio awal pada saat yang sama adalah sejarah AM. Dari sudut pandang hari ini ada upaya rumit untuk melakukan pemrosesan sinyal yang paling mudah – misalnya perkalian dua sinyal – menggunakan cara yang tidak sesuai dan sirkuit yang kompleks. Masalah muncul karena sifat komponen analog yang sangat tidak memadai (lihat Bab 1, halaman 24) Upaya ini dan perkembangan selanjutnya akan diceritakan di sini.

Seperti dapat dilihat dari Gambar 152, informasi dari sinyal sumber – dari sudut pandang domain waktu – terletak pada selubung sinyal AM. Pemrosesan sinyal apa yang menghasilkan sinyal AM?

Jika Anda perhatikan dengan seksama Gambar 144 akan menemukan sinyal sinusoidal frekuensi rendah (kiri atas) dalam amplop sinyal yang dikalikan (kiri bawah), namun dengan satu perbedaan: amplop ini berubah terus-menerus dari wilayah positif ke negatif (dan sebaliknya). --universal) Meskipun demikian, perkalian muncul sebagai kandidat untuk modulasi AM. Namun, perubahan kecil pada sinyal sumber harus dilakukan terlebih dahulu.



Gambar 152: Representasi realistis dari sinyal AM



Gambar 153: Domain frekuensi sinyal AM

Hanya dengan menggunakan osiloskop penyimpanan yang sangat cepat, dimungkinkan untuk merepresentasikan sinyal AM yang sebenarnya dengan cara yang secara kualitatif sama seperti di sini. Di sini disimulasikan dengan menggunakan DASYLab. Di bagian atas Anda melihat sinyal LF seperti bahasa – yang dihasilkan oleh derau terfilter – di

bawah ini sinyal AM. Sinyal LF terkandung di dalamnya sebagai selubung sinyal. Di bawah ini ada segmen kecil dari sinyal di atas di mana pembawa sinusoidal harus terlihat dengan jelas. Lihat juga Gambar 153.

Pada garis horizontal atas Anda lihat di sebelah kiri domain frekuensi sinyal LF dari Gambar 151, di garis bawah pada 600 kHz dari sinyal AM. Sangat mencolok bahwa sinyal LF muncul ganda pada frekuensi pembawa, dicerminkan secara simetris. Konvolusi ini pada analisis akhir merupakan hasil perkalian dalam domain waktu.

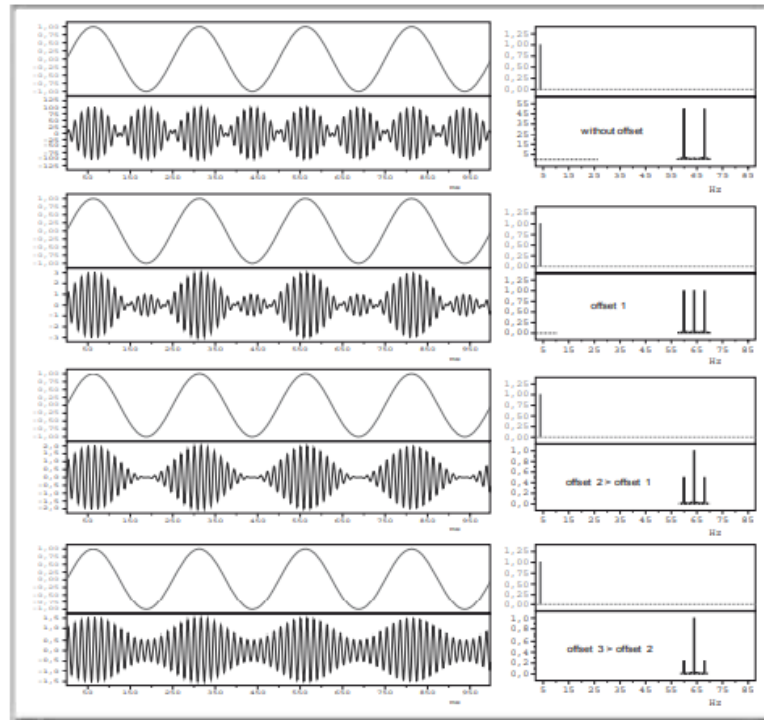
Secara tradisional pita sisi kanan disebut sebagai "pita sisi atas" dan pita sisi kiri sebagai "pita sisi bawah". Dari pengetahuan kita tentang Prinsip Simetri, istilah ini menyesatkan karena pada kenyataannya sinyal LF simetris dengan frekuensi 0 Hz. Setengah bayangan cermin dari domain frekuensi negatif juga merupakan bagian dari domain frekuensi LF (dalam hubungan ini lihat Gambar 90 dan Gambar 91). Perkalian sinyal dalam domain waktu oleh pembawa sinusoidal atau AM adalah metode yang paling sederhana. memindahkan domain frekuensi sinyal ke posisi yang diinginkan.

Perubahan kecil ini ditunjukkan pada Gambar 152 dan Gambar 154. Di sini tegangan searah (variabel) – sebuah "offset" – digandakan pada sinyal sumber sampai sinyal sumber sepenuhnya berada di wilayah positif. Jika sinyal ini sekarang dikalikan dengan pembawa sinusoidal kita memperoleh bentuk sinyal AM menurut Gambar 152. Selubung terletak secara eksklusif di wilayah positif atau terbalik di wilayah negatif.

Gambar 154 memberikan aturan praktis untuk offset. Tegangan searah U harus lebih besar dari atau setidaknya sama dengan amplitudo sinus frekuensi rendah atau nilai maksimum (negatif) dari sinyal sumber (lihat Gambar 154).

Jika sinyal sumber dipindahkan sepenuhnya ke wilayah positif (atau negatif) dengan penambahan tegangan searah U , selubung sinyal AM mewakili sinyal sumber asli setelah dikalikan dengan pembawa sinusoidal. Kemudian disebut derajat modulasi m lebih kecil dari 1 atau lebih kecil dari 100%.

Sinus frekuensi rendah dipilih di sini sebagai bentuk sinyal sumber yang paling sederhana. Tegangan searah (offset) yang menjadi semakin besar dimultipleks hingga sinus seluruhnya terletak di wilayah positif. Jika ini masalahnya, sinyal sumber asli terletak dalam amplop sinyal AM setelah perkalian oleh pembawa sinusoidal.



Gambar 154: Pembangkitan AM: perkalian sinyal sumber dengan pembawa sinusoidal

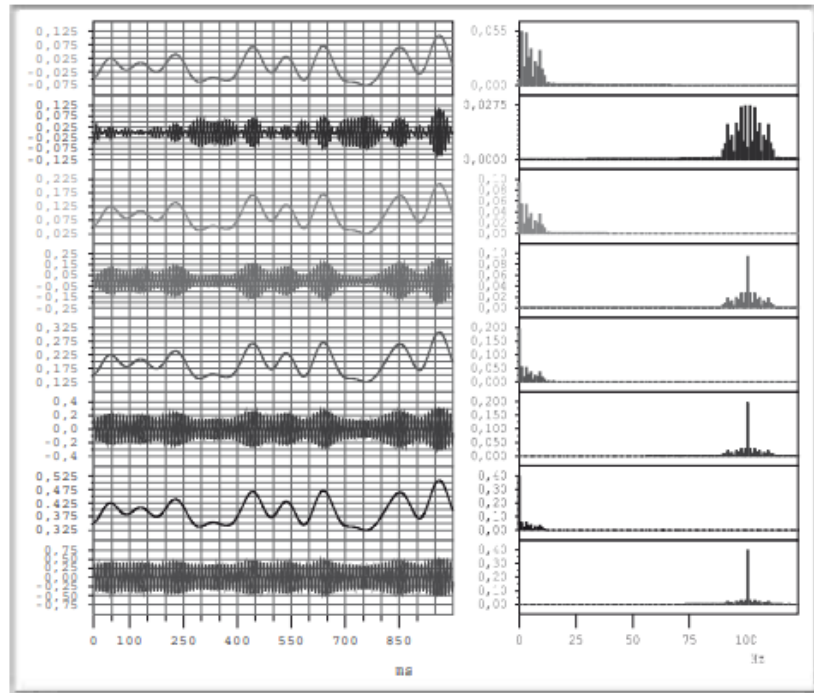
Dalam bentuk ini, sinyal AM dengan rangkaian di atas yang terdiri dari dioda D, resistansi R dan kapasitor C dapat didemodulasi, yaitu rangkaian ini memungkinkan untuk mengambil sinyal sumber aslinya. Namun, ada kelemahan yang terlibat dalam jenis modulasi amplitudo ini. ...

Catatan: Dalam kasus perkalian analog atau komputer (digital), derajat modulasi m yang sering disebutkan sering kali tidak masuk akal. Dalam teori, model matematika dari sinyal AM dijelaskan dengan rumus $u_{AM}(t) = (1 + m \sin(\omega_c t)) \cdot \sin(\omega_m t)$

Braket pertama mewakili tegangan sinyal sumber sinusoidal dengan tegangan searah ("1") ditumpangkan. Istilah terakhir menggambarkan tegangan pembawa sinusoidal.

Pada prinsipnya hal yang sama direpresentasikan di sini seperti pada Gambar 154, hanya dengan segmen sinyal frekuensi rendah yang khas sebagai sinyal sumber. Tegangan langsung, yang meningkat dari atas ke bawah juga digabungkan pada sinyal sumber.

Dalam domain frekuensi offset ini sesuai dengan pembawa sinusoidal yang dari atas ke bawah menjadi semakin dominan. Bagian utama dari energi sinyal AM dicatat oleh pembawa dan bukan bagian pembawa informasi dari sinyal AM.



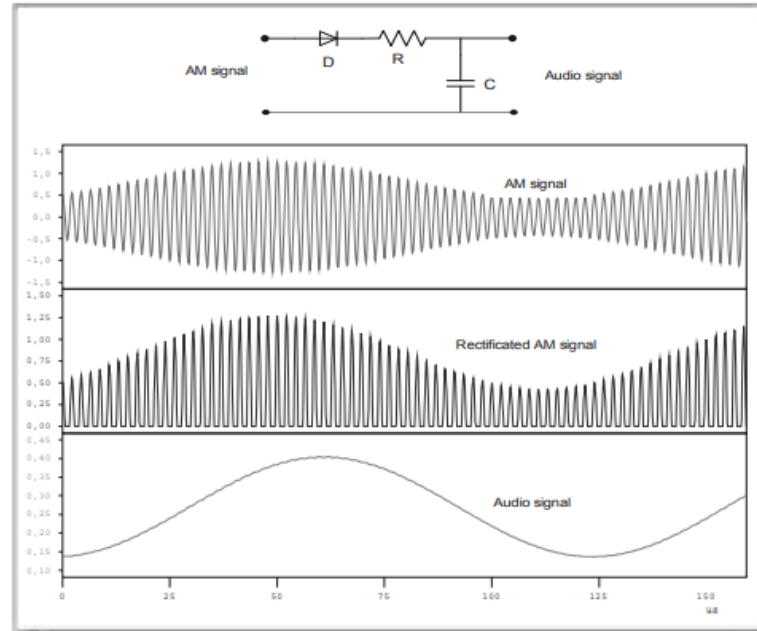
Gambar 155: AM dari kurva sinyal frekuensi rendah

Pada domain frekuensi yang disebut upper sideband dan lower sideband dari sinyal sumber asli dapat terlihat jelas di sebelah kanan dan kiri carrier, yaitu informasi hadir dua kali lipat. sebagai "AM sideband ganda".

Jika dua perintah dikalikan satu sama lain, unit ($V \cdot V$), yaitu hasil (V^2). Ini salah dalam arti fisik karena pada output penerima, tegangan muncul dengan unit (V). sedikit trik – istilah dalam kurung didefinisikan sebagai bilangan murni tanpa satuan M adalah derajat modulasi dan didefinisikan sebagai $m = LF / \text{carrier}$ (V) sekarang disederhanakan dan untuk $uAM(t)$ satuannya (V)) hasil.

Istilah $(1 + m \sin(2\pi LF t)) \cdot \text{pembawa}$ sekarang dapat diartikan sebagai "amplitudo tergantung waktu" yang mengubah ritme sinyal LF Jika amplitudo tergantung waktu ini selalu positif – istilah dalam kurung harus lebih besar dari 0, yaitu positif – amplitudo yang bergantung waktu (amplop!) terletak secara eksklusif di wilayah positif atau, terbalik di wilayah negatif.

Di bagian atas Anda melihat sinyal AM, amplop yang mewakili sinyal asli. Sinyal ini diperbaiki oleh dioda, yaitu bagian negatif dari sinyal AM terputus. Bagian RC bertindak seperti filter lowpass, yaitu begitu Cerdas dari waktu ke waktu bahwa ia tidak melihat perubahan "jangka pendek". Ia bertindak seperti "rata-rata mengambang".



Gambar 156: Demodulasi dua Sinyal AM dengan cara tradisional

Jika Anda melihat lebih dekat, Anda akan melihat dalam sinyal sumber yang diambil langkah-langkah kecil di bagian bawah yang berasal dari rata-rata mengambang (tidak sempurna) ini.

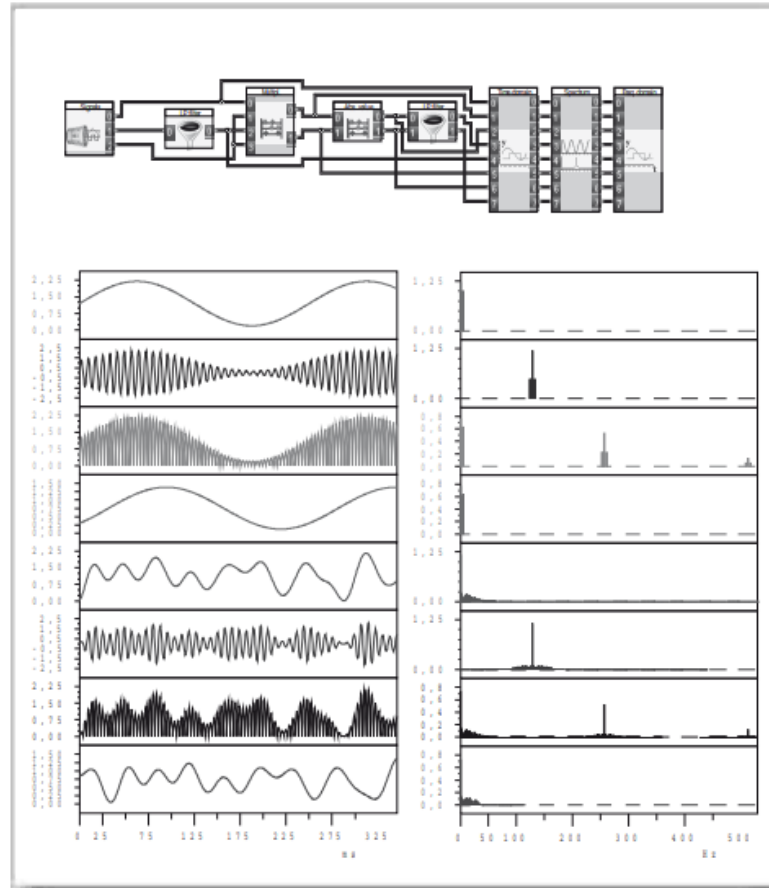
Untuk alasan ini, persyaratan $m < 1$ berlaku untuk bentuk AM tradisional ini. Selain itu, sebagai sinyal nyata tentu saja tidak sinusoidal, derajat modulasi m tidak dapat digambarkan secara bermakna sebagai hubungan antara dua amplitudo tegangan sinusoidal yang berbeda. Definisi offset kami di atas hanya lebih bermakna.

Jika sinyal sumber asli tidak dapat dikenali dengan jelas di dalam amplop, tidak akan sulit untuk mengambilnya dengan cara demodulasi. Sejak awal teknologi radio, demodulasi AM telah dilakukan melalui rangkaian yang sangat sederhana yang terdiri dari dioda D , resistansi R dan kapasitor C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 156. Sinyal AM pertama kali disearahkan oleh dioda, yaitu, wilayah negatif terputus.

Sebagai contoh sinyal sumber (atas) sinus (4Hz) dan bawah, kurva sinyal realistik dengan frekuensi batas atas 32 Hz telah dipilih di sini. Dengan demikian, pembawa terletak pada 128 Hz. Agar demodulasi dapat dilakukan di cara tradisional, kedua sinyal sumber harus terletak sepenuhnya di wilayah positif. Akibatnya amplop sinyal AM mewakili sinyal sumber.

Sebagai hasil dari proses nilai absolut (rektifikasi) dan penyaringan lowpass berikutnya (R - C -link) kedua sinyal sumber diambil. Sinyal-sinyal ini sedikit bergeser waktu dibandingkan dengan sinyal asli karena semua pemrosesan sinyal membutuhkan waktu.

Seperti dijelaskan secara lebih rinci dalam teks, demodulasi sinyal sesuai dengan perkalian sederhana dari sinyal AM oleh pembawa dengan nilai yang sama (di sini 32 Hz). ..



Gambar 157: Demodulasi dua sinyal AM dengan cara tradisional

Rangkaian R-C berikut adalah sesuatu seperti filter lowpass. Dalam bahasa domain waktu, rangkaian ini sangat lamban sehingga tidak dapat mengikuti perubahan cepat dari sinus yang diperbaiki. Mengingat dimensi waktu yang benar dari rangkaian RC ($= R \cdot C$) sesuatu yang menyerupai nilai rata-rata geser dari sinyal yang diperbaiki muncul pada output. Namun nilai rata-rata geser ini tidak lain adalah sinyal sumber.

Catatan:

Sebuah pesawat televisi memberikan contoh yang tepat. Ini menunjukkan 50 gambar setengah atau 25 gambar penuh per detik. Sebagai akibat dari kelesuan mata kita dalam waktu dan pemrosesan selanjutnya dari sinyal di otak kita tidak melihat 25 gambar individu per kedua tapi gambar yang berubah terus-menerus "nilai rata-rata geser" dari urutan gambar ini, sehingga untuk berbicara.

Dalam Gambar 157 alih-alih dioda, modul "nilai absolut" dipilih. Nilai absolut di sini sesuai dengan apa yang disebut penyearah gelombang penuh - wilayah negatif sinus juga direpresentasikan secara positif - dan mewakili proses non-linier yang kita harus melihat lagi lebih dekat pada titik ini.

Menurut Gambar 147, semacam penggandaan frekuensi terjadi dalam domain frekuensi sebagai akibat dari "proses nilai absolut" dari sinus murni, seperti pada perkalian sinus dengan dirinya sendiri dalam Gambar 143. Seperti yang dilakukan oleh pengganda

analog tidak ada 50 tahun yang lalu penyearah digunakan sebagai semacam penggandaan pengganti sinyal AM dengan sinyal pembawa dengan frekuensi yang sama.

Sama seperti pada Gambar 143, kita memperoleh melalui proses nilai absolut “-yang dilakukan dalam domain waktu – sinyal AM dalam domain frekuensi dengan frekuensi pembawa dua kali lipat dan satu dengan” frekuensi pembawa ω Hz, yaitu sumber aslinya sinyal ini tidak dapat dilihat dalam domain waktu.

Sekarang yang tersisa adalah menyaring sinyal AM dengan frekuensi pembawa dua kali lipat melalui filter lowpass dan demodulasi selesai (lihat Gambar 157).

Buang-buang energi: double sideband AM dengan carrier

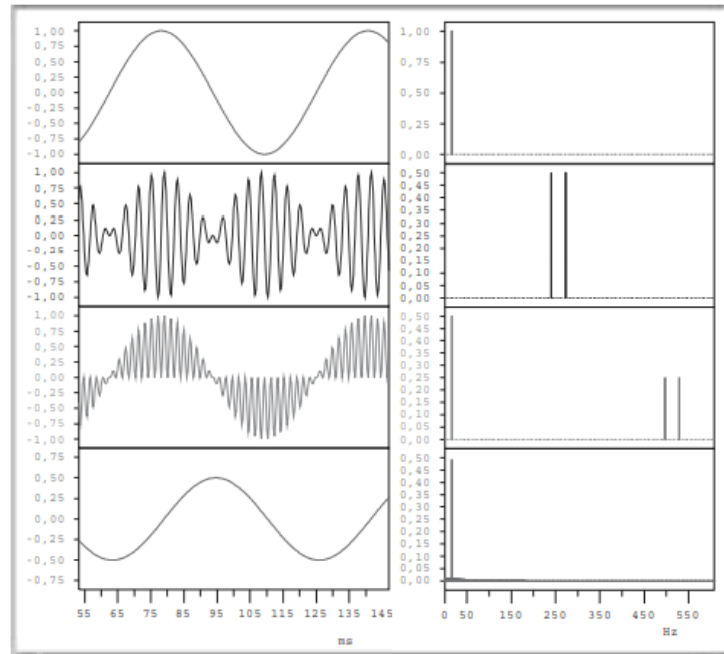
Proses klasik yang dijelaskan memiliki kelemahan serius yang menjadi jelas ketika spektrum AM diperiksa. Pada pemeriksaan lebih dekat, hasil berikut dari Gambar 154 dan Gambar 155:

- Sejauh ini, sebagian besar energi sinyal AM dicatat oleh pembawa, yang tidak mengandung informasi apa pun. Harap dicatat bahwa energi listrik sebanding dengan kuadrat amplitudo, yaitu ~ 2 .
- Informasi dari sinyal sumber tampaknya hadir dua kali, sekali di sideband atas dan sekali di sideband bawah, akibatnya domain frekuensi tidak perlu besar.

Oleh karena itu, pertama-tama kita akan mencoba untuk membangkitkan dan mendemodulasi sinyal AM pita sisi ganda tanpa pembawa dalam spektrum. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 158. Demodulasi sekarang dilakukan dengan metode yang didasarkan pada pernyataan di atas tentang perkalian dengan pembawa sinusoidal yang sama. Seperti pada Gambar 144 kita mengharapkan dua pita dalam rentang frekuensi penjumlahan dan selisih, yaitu pada frekuensi pembawa ganda dan pada 0 Hz.

Sebuah sinus 16 Hz (seri pertama) berfungsi sebagai sinyal sumber. Sinyal sumber ini tidak memiliki offset di sini dan terletak simetris dengan sumbu nol. Perkalian sinus ini dengan frekuensi pembawa 256 Hz menghasilkan sinyal AM pita sisi ganda tanpa pembawa di seri kedua.

Demodulasi terjadi di sini (di penerima) dengan mengalikan sinyal AM tanpa pembawa ini dengan sinus 256 Hz. Sebagai hasil dari perkalian, kami memperoleh frekuensi penjumlahan dan frekuensi perbedaan. Frekuensi penjumlahan $256 + 256 - 16$ Hz dan $256 + 256 + 16$ (kanan) disaring oleh filter lowpass, perbedaan frekuensi $256 - (256 + 16)$ dan $256 - (256 - 16)$ membentuk sinyal sumber yang diambil.

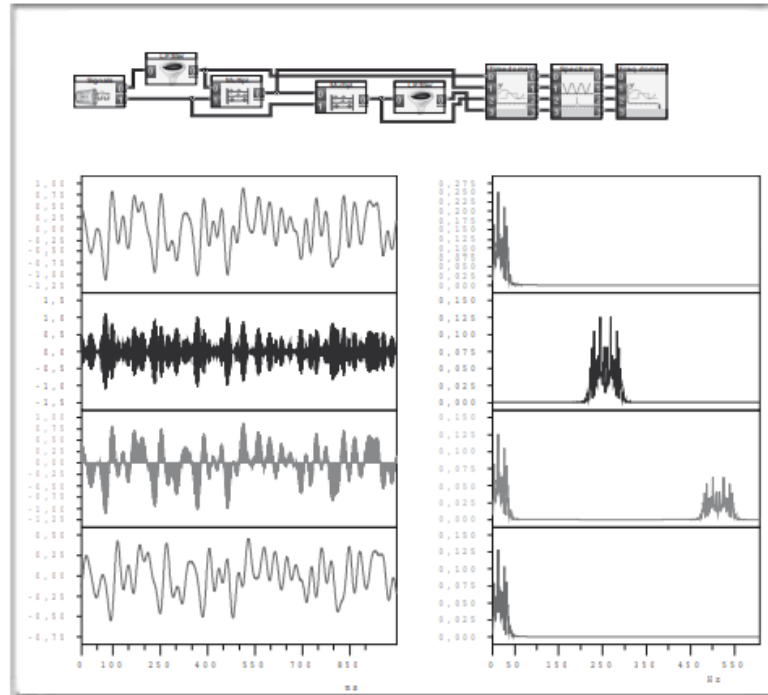


Gambar 158: Sinyal AM pita sisi ganda sederhana tanpa pembawa

Sinyal pada deret ketiga ini secara praktis merupakan penjumlahan dari sinyal sumber (terlihat tertinggal pada 0 Hz dalam domain frekuensi) dan sinyal AM, yang terletak simetris dengan frekuensi pembawa ganda 512 Hz. Jika sinyal AM ini difilter keluar melalui filter lowpass, kami memperoleh sinyal sumber yang dipindahkan waktu yang diambil dalam seri yang lebih rendah.

Modulasi sideband tunggal tanpa pembawa

Jaringan kabel publik Deutsche Telekom mungkin bernilai lebih dari 250 miliar euro. Pemasangan kabel sangat mahal karena jalan harus dirobek, poros kabel dipasang, dll. Akan membuang-buang uang jika tidak ada upaya untuk mentransmisikan sebanyak informasi sebanyak mungkin per unit waktu melalui kabel ini.



Gambar 159: Sinyal AM tanpa pembawa: modulasi dan demodulasi menggunakan DASYLab

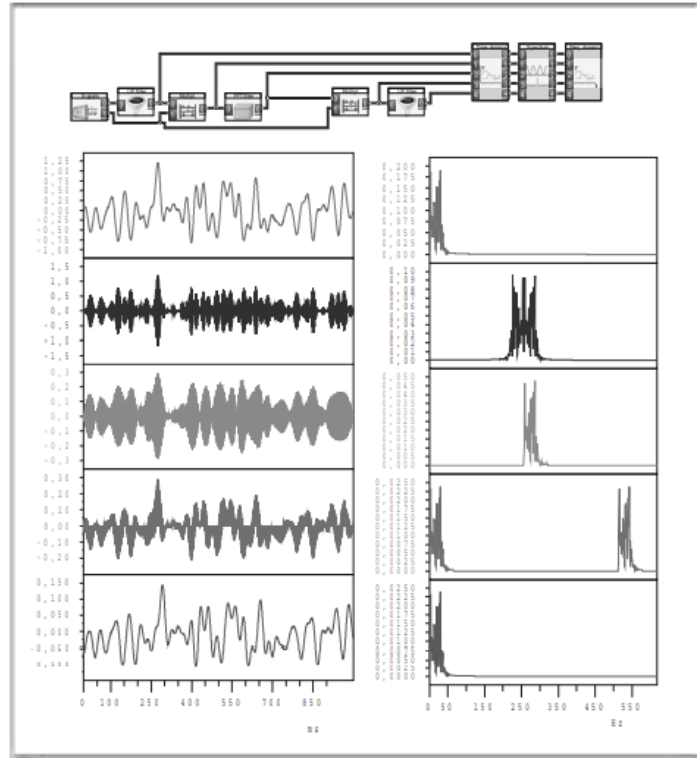
Titik awal di sini adalah sinyal sumber yang dibangkitkan melalui noise filter lowpass (berisi semua informasi tentang lowpass) Pada seri kedua Anda melihat sinyal AM pita sisi ganda yang sesuai tanpa pembawa. baris ketiga ada dalam domain frekuensi, di sebelah kiri sinyal sumber, dan di sebelah kanan sinyal AM dengan frekuensi tengah atau pembawa ganda.

Akhirnya, setelah difilter oleh lowpass kami mendapatkan sinyal sumber asli kembali (seri bawah).

Untuk alasan ini – seperti halnya dalam lingkup “nirkabel” – sangat penting untuk menggunakan pita frekuensi seefektif mungkin.

Oleh karena itu, modulasi AM pita sisi ganda tidak ekonomis karena semua informasi terkandung di masing-masing pita samping. Untuk waktu yang lama, secara teknis dimungkinkan untuk memuat ribuan saluran suara pita samping tunggal telepon yang berdekatan pada kabel koaksial untuk memanfaatkannya dengan lebih baik.

Proses ini sekarang akan diperiksa dan dianalisa secara tepat menggunakan DASYLab. Setelah sinyal AM pita sisi ganda tanpa pembawa dibangkitkan pada Gambar 160, pita sisi atas (posisi reguler) disaring dengan menggunakan filter pass-band presisi tinggi. Pada seri ketiga kita Dengan demikian memperoleh sinyal sideband tunggal.

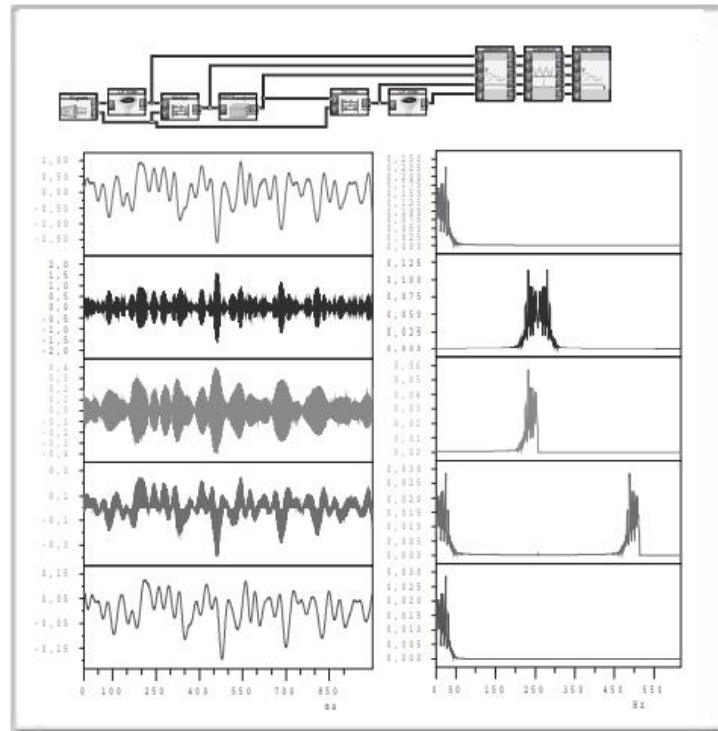


Gambar 160: Modulasi dan demodulasi dalam kasus single sideband AM

Pertama, sinyal sumber (seri pertama) dimodulasi amplitudo dengan perkalian sederhana oleh pembawa. Karena sinyal sumber tidak memiliki offset, sinyal AM sideband ganda tanpa hasil pembawa. Melalui sinyal jalur pita presisi tinggi di "kotak hitam" (Untuk rangkaian lihat Gambar 95) sideband atas – posisi reguler – disaring keluar (seri ke-3). Dengan demikian, kita memperoleh sinyal AM satu sideband.

Ini dikalikan dengan pembawa 256 Hz untuk demodulasi. Seperti sebelumnya kita memperoleh jumlah dua sinyal (lihat domain frekuensi seri ke-4), sinyal sumber dan sinyal AM satu sisi pada frekuensi pembawa ganda atau frekuensi tengah. Perhatikan bahwa Jika pita atas difilter dengan filter lowpass, kami memperoleh sinyal sumber yang diambil di seri bawah.

Modulasi sideband tunggal adalah satu-satunya proses modulasi (analog) di mana bandwidth tidak lebih besar dari sinyal sumber. Modulasi sideband tunggal dengan demikian merupakan proses transmisi analog yang paling efisien jika tingkat distorsi pada jalur transmisi berhasil dipertahankan .seminimal mungkin.



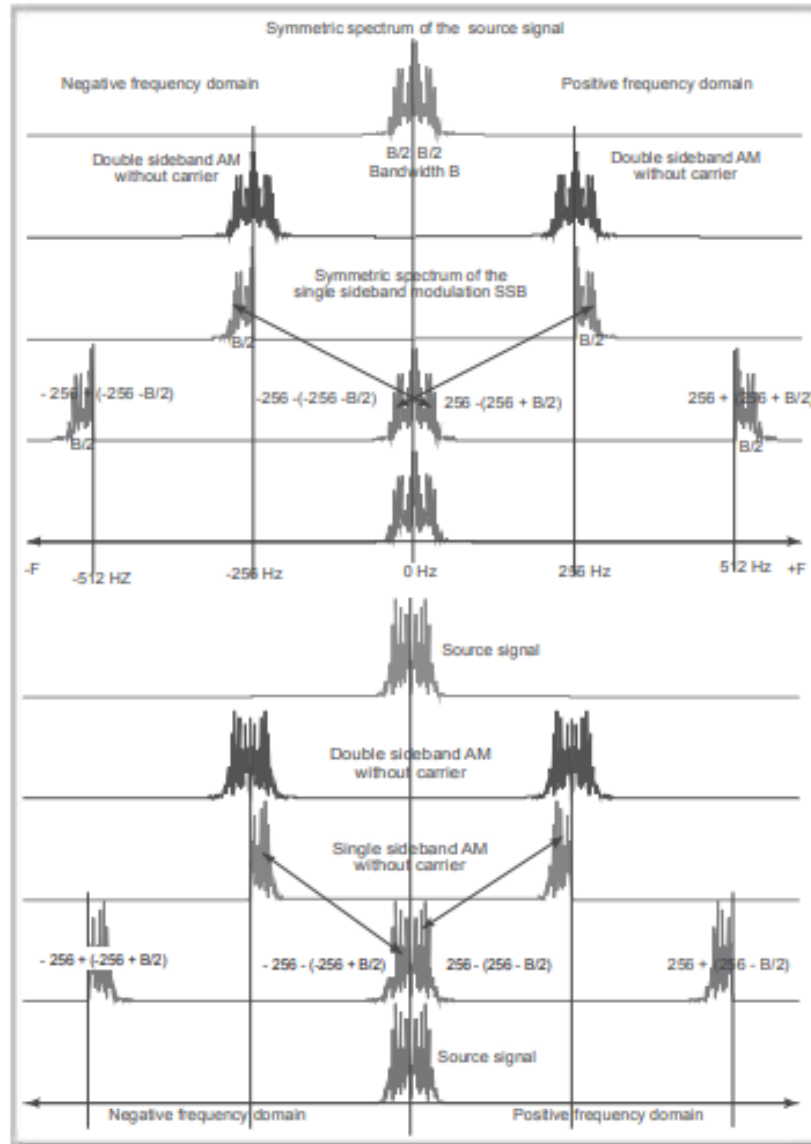
Gambar 161: Sideband tunggal di posisi sideband bawah

Tidak seperti Gambar 159 di sini, posisi pita sisi bawah disaring dari sinyal AM pita sisi ganda. Proses selanjutnya benar-benar identik dan, meskipun kami telah memproses sinyal yang sama sekali berbeda dari pada Gambar 159, kami memperoleh sinyal sumber dengan cara ini.

Demodulasi dimulai dengan perkalian sinyal ini dengan pembawa sinusoidal (256 Hz) yang dengannya sinyal AM awalnya dihasilkan. Spektrum pada deret keempat dihasilkan dari penjumlahan dan perbedaan pembentukan frekuensi pembawa ini dan pita frekuensi sideband tunggal. Band jumlah sideband tunggal dua kali lebih tinggi dari aslinya, pita perbedaan adalah pita frekuensi dari sinyal sumber.

Prosedur ini dilakukan lagi pada Gambar 161 tetapi di sini sideband bawah, posisi sebaliknya, disaring. Anehnya, sebagai hasil akhir kami, kami memperoleh sinyal sumber sebagai sinyal perbedaan dengan melanjutkan dengan cara yang sama – perkalian dengan pembawa 256 Hz meskipun perbedaannya seharusnya terletak pada domain frekuensi negatif.

Hanya mungkin untuk memahami hasil yang sama – pengambilan sinyal sumber yang sama – menggunakan posisi sideband atas dan bawah ketika kondisi lain konstan – dengan mengetahui Prinsip Simetri. Dalam kasus demodulasi atau rekonversi sideband bawah (bagian bawah diagram) pada kenyataannya pita samping dari domain frekuensi negatif dipindahkan ke domain frekuensi positif dan sebaliknya.

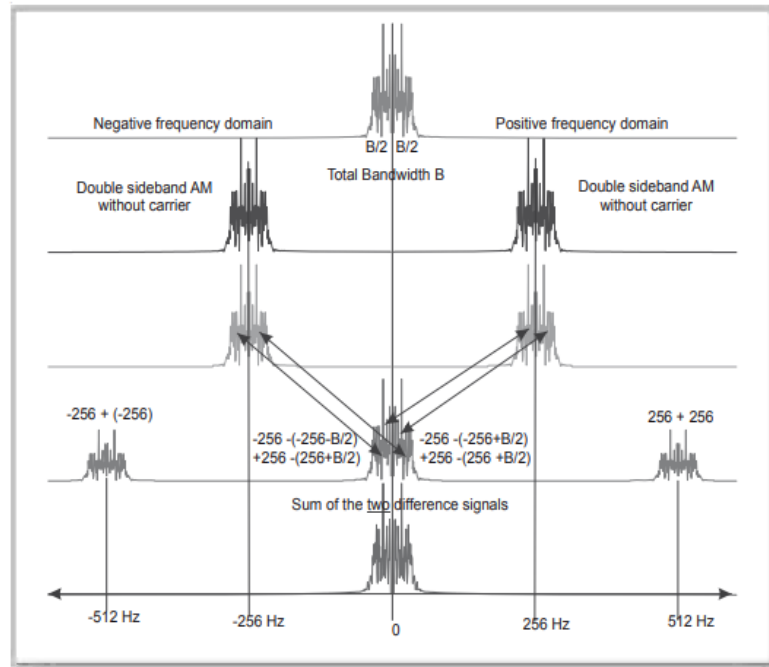


Gambar 162: Modulasi sideband tunggal: pembangkitan dan demodulasi

A

Dalam Gambar 159 spektrum sinyal sumber memiliki level yang sama seperti setiap sinyal penjumlahan. Namun, di sini sinyal yang diambil memiliki level dua kali. Hal ini tidak mengherankan karena kedua varian sideband tunggal dari Gambar 159 hanya ditambahkan. Frekuensi positif dan negatif masing-masing area memberikan kontribusi ke setiap sideband dari sinyal sumber yang diambil (bawah).

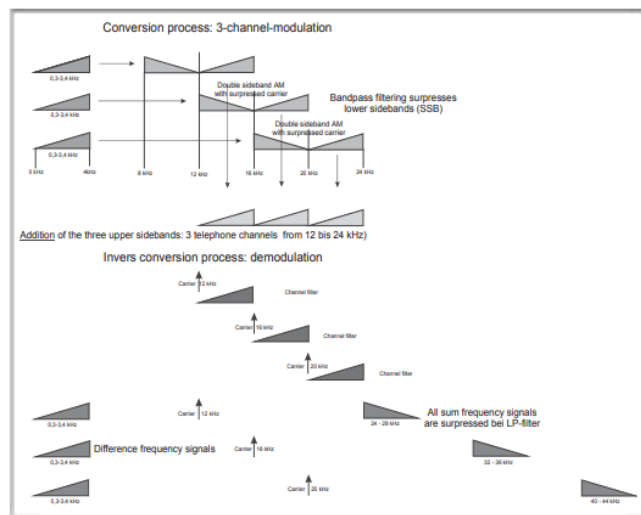
Untuk mendapatkan petunjuk lebih lanjut, kita periksa Gambar 159 lagi, di mana sinyal AM pita sisi ganda (tanpa pembawa) didemodulasi. Di sini kita memperoleh kontras dengan dua kasus terakhir spektrum sinyal sumber dengan dua kali intensitas dan dua kali lebih tinggi dari spektrum sinyal jumlah. Bagaimana hal ini muncul?



Gambar 163: Double sideband AM: modulasi dan pengambilan sinyal sumber

Prinsip Simetri memberikan penjelasan. Pada kenyataannya spektrum frekuensi memiliki domain positif dan negatif yang memiliki simetri bayangan cermin yang lengkap. Hanya jika fakta-fakta ini diperhitungkan, kita dapat menentukan bagaimana jumlah dan perbedaan fungsi respons dalam domain frekuensi sebagai hasil perkalian dalam domain waktu. Hal ini ditunjukkan secara rinci pada Gambar 162. Sedangkan pada Gambar 160 pembangkitan pita frekuensi sinyal sumber dapat dengan mudah dihitung, untuk Gambar 161 hasilnya adalah spektrum sinyal sumber telah muncul dari domain frekuensi negatif.

Gambar 162 memberikan rincian numerik. Lebar spektrum simetris dari sinyal sumber digunakan sebagai bandwidth B dari sinyal sumber. Panah menunjukkan bagaimana jumlah dan perbedaan frekuensi muncul.



Gambar 164: Multiplex frekuensi diGambarkan oleh pembentukan pra-grup di saluran telepon

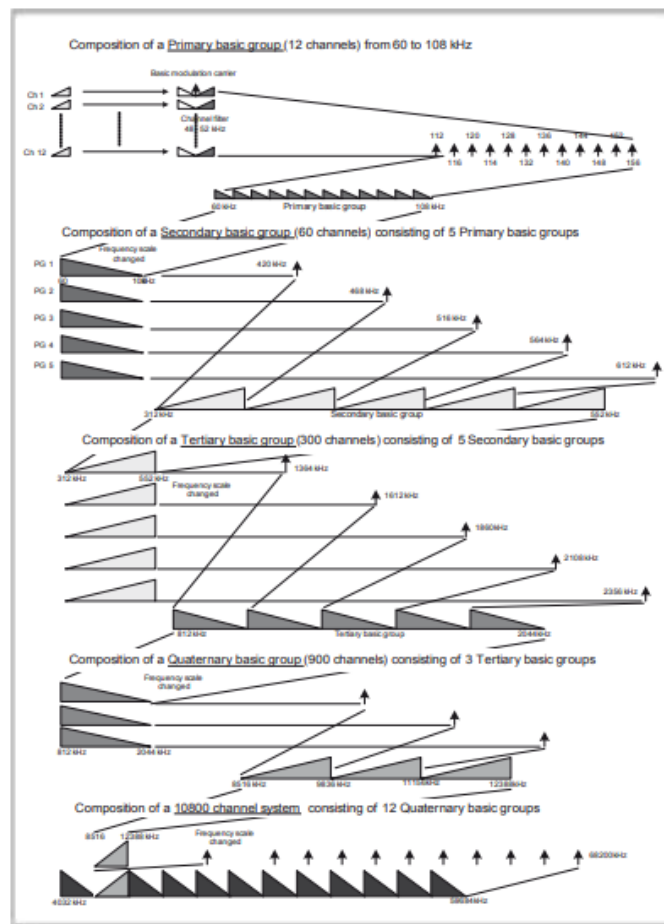
Lebih dari 10.000 saluran telepon dapat ditransmisikan secara bersamaan melalui kabel koaksial melalui: tradisional “teknologi komunikasi analog. Kelompok-kelompok kecil dan kelompok-kelompok besar yang terdiri dari beberapa kelompok kecil dll dibentuk oleh frekuensi yang mengejutkan.

Grup terkecil adalah yang disebut pra-grup. Tiga saluran telepon dikelompokkan untuk membentuk pra-grup yang selalu menempati kisaran 12 hingga 24 kHz. Contoh ini menggambarkan konversi frekuensi, pemrosesan, dan keteraturan saluran. Domain frekuensi negatif bayangan cermin yang bersama-sama dengan domain frekuensi positif membentuk spektrum simetris tidak ditampilkan di sini.

Baik dalam kasus AM dan penggandaan modulasi sideband tunggal adalah pemrosesan sinyal pusat. Dengan cara ini pita frekuensi dapat dipindahkan dalam spektrum sesuka hati.

Perlu dicatat bahwa dalam kasus perkalian kita memiliki frekuensi penjumlahan dan selisih, yaitu Umumnya (setidaknya) selalu muncul dua pita frekuensi yang disertai dengan “penggandaan informasi”.

Interpretasi pita frekuensi yang muncul hanya benar jika diasumsikan spektrum simetris dengan domain frekuensi positif dan negatif sehingga dalam perbedaan (pembentukan) pita frekuensi dapat mengubah domain tersebut.



Gambar 165: Prinsip frekuensi mengejutkan dengan membentuk kelompok dalam sistem TF

Representasi ini menunjukkan struktur sistem V 10800. Ini memungkinkan untuk mentransmisikan 10800 saluran telepon secara bersamaan melalui kabel koaksial dan pada saat yang sama mewakili titik tinggi dan kesimpulan dari teknologi transmisi analog. Sistem transmisi masa depan akan dibangun murni pada digital Mereka akan memanfaatkan kemungkinan fantastis pemrosesan sinyal digital (DSP), yang akan dibahas dalam bab-bab berikutnya.

Masalah sebenarnya dengan SSB modulasi sideband tunggal adalah filter presisi tinggi (bandpass) yang diperlukan untuk dapat menyaring salah satu side band yang berdekatan. Dalam teknologi analog ini (dan) hampir tidak mungkin menggunakan teknik filter normal (Filter RLC) Antara lain filter dengan sirkuit resonansi mekanis atau filter kristal kuarsa telah dan digunakan.

Dalam rentang frekuensi tinggi, filter gelombang permukaan menawarkan solusi yang sangat baik. Semua jenis filter ini memanfaatkan efek fisik akustik-mekanis dan fakta bahwa osilasi mekanis melalui efek listrik piezo dapat dengan mudah diubah menjadi osilasi listrik dan sebaliknya.

Multipleks frekuensi

Banyak pemancar radio dan TV mencapai penerima kita pada saat yang sama melalui udara atau kabel. Sampai sekarang radio dan TV telah bekerja dalam multipleks frekuensi, yaitu semua stasiun berada dalam frekuensi yang terhuyung-huyung atau terletak berdekatan di pita frekuensi. misalnya, dalam rentang radio gelombang menengah semua pemancar termodulasi sideband ganda (AM dengan pembawa), termodulasi frekuensi (FM) dalam rentang VHF.

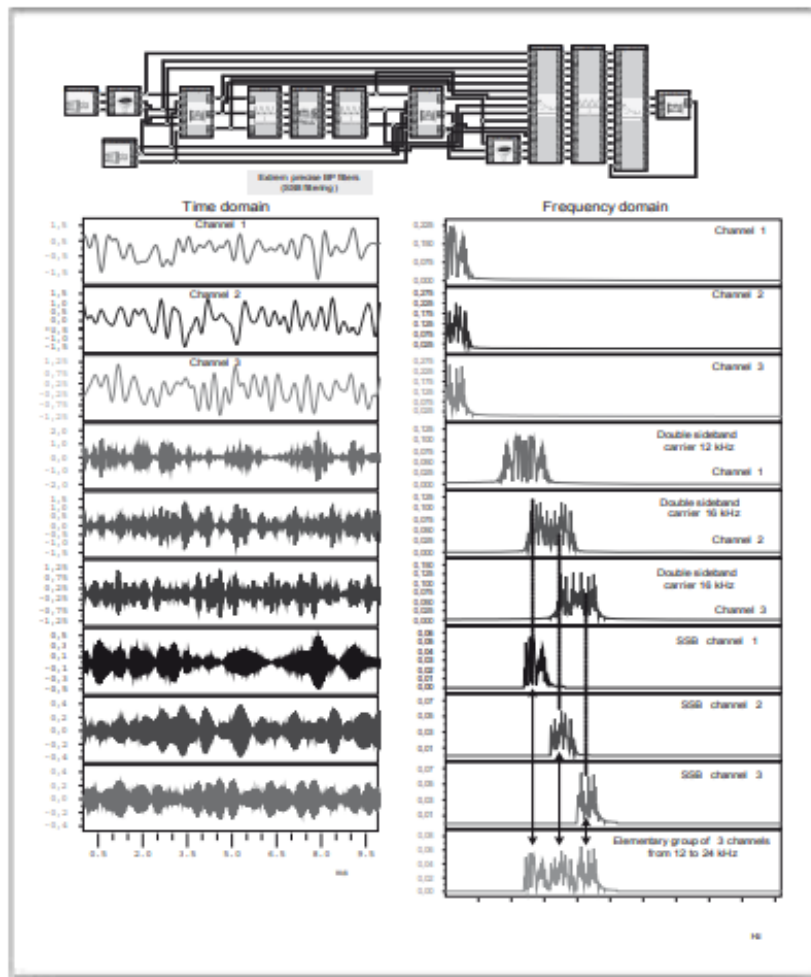
Dalam sistem multipleks frekuensi semua saluran ditransmisikan secara bersamaan dan terhuyung-huyung dalam frekuensi.

Tugas tuner adalah menyaring stasiun yang diinginkan dan kemudian mendemodulasi sinyal yang difilter. Karena sinyal udara sangat lemah maka harus diperkuat lagi.

Dalam kasus telepon Deutsche Telekom, saluran telepon diubah frekuensinya dengan cara yang sangat ekonomis melalui proses multipleks frekuensi. Di sini digunakan modulasi pita sisi tunggal yang bandwidthnya persis sama besar dengan sinyal sumber. 10.800 panggilan telepon dapat ditransmisikan secara bersamaan (sistem V-10800) melalui kabel koaksial tunggal – seperti yang digunakan sebagai koneksi antara antena dan tuner.

Teknik frekuensi pembawa ini bekerja berdasarkan prinsip berikut:

- 12 saluran telepon dengan bandwidth 300 – 3400 Hz dirakit untuk membentuk grup dasar, dan lima grup basis primer untuk membentuk grup basis sekunder dengan 60 saluran. Ini diGambarkan dengan jelas pada Gambar 165.
- Menurut prinsip ini, beberapa grup sekunder digabungkan untuk membentuk grup tersier dan beberapa grup tersier untuk membentuk grup kuartener, hingga 10.800 saluran digabungkan menjadi satu bundel, juga ditunjukkan pada Gambar 165.
- Dulu karena alasan teknis yang berkaitan dengan filter, pra-grup pertama dengan tiga saluran dibentuk, kemudian empat di antaranya digabungkan untuk membentuk grup dasar primer.

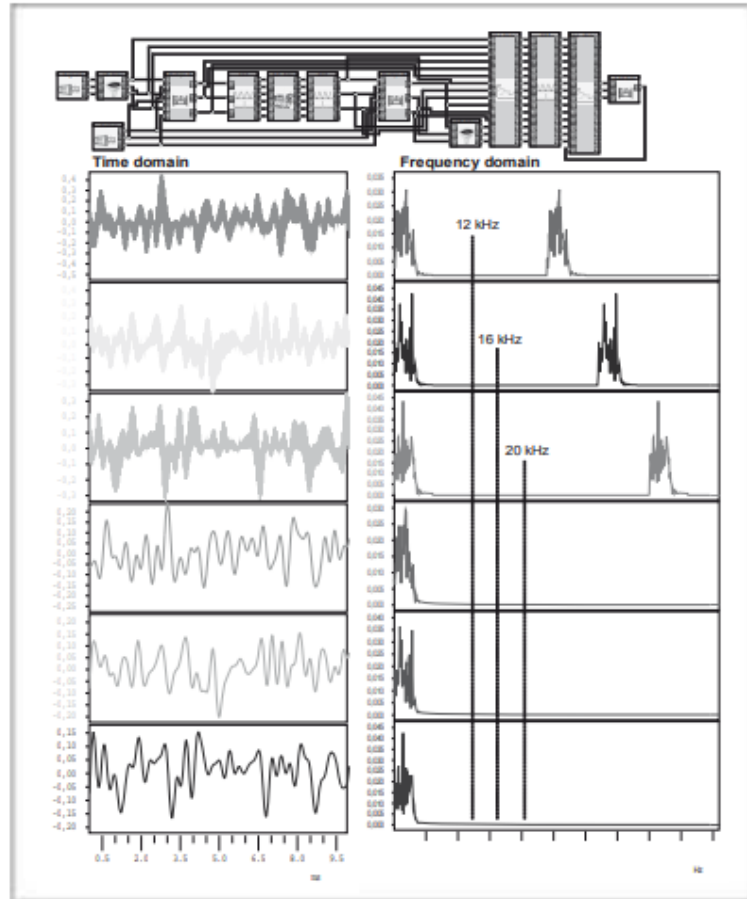


Gambar 166: Multipleks frekuensi: pembentukan pra-grup dengan tiga saluran telepon

Di sini pra-pengelompokan tiga saluran telepon dalam rentang 12 hingga 24 kHz dalam domain waktu dan frekuensi digambarkan secara realistis untuk pertama kalinya. Prinsip multipleks frekuensi, tentu saja, paling mudah diikuti dalam domain frekuensi, meskipun ini berbeda dan mencirikan kurva sinyal dalam domain waktu meskipun di sini kita memiliki operasi double sideband tanpa pembawa.

Di atas Anda melihat struktur rangkaian menggunakan DASYLab. Cobalah untuk membangun sistem sendiri, merakitnya sepotong demi sepotong dan memeriksa kurva sinyal dalam domain waktu dan frekuensi.

Petunjuk – untuk kembali dari frekuensi ke domain waktu dalam modul IFFT Anda harus memilih pengaturan “FOURIER synthesis” Terakhir, Anda harus mengumpulkan sinyal yang terdiri dari osilasi sinusoidal dalam domain waktu.



Gambar 167: Simulasi konversi ulang pra-grup di tiga saluran telepon

Simulasi realistis menggunakan DASYLab ini menunjukkan pemrosesan sinyal dalam seri bawah diagram blok Selain konfirmasi representasi pada Gambar 164 Anda juga melihat (bawah) secara kasar kurva sinyal sumber dalam domain waktu dari dua grup atas tiga.

Untuk menganalisis dan menjelaskan secara tepat prinsip multipleks frekuensi untuk modulasi dan demodulasi dalam modulasi pita sisi tunggal, pembentukan pra-grup yang ditunjukkan pada Gambar 164 akan dibentuk terlebih dahulu dan kemudian "didemodulasi" menjadi tiga saluran atau diubah melalui simulasi DASYLab (Gambar) 166 dan Gambar 167). Catatan: Dalam Gambar ini digunakan filter bandpass presisi tinggi dalam bentuk filter digital murni (berbasis komputer). Sinyal ditransformasikan melalui FT ke domain frekuensi di mana semua data frekuensi yang tidak diinginkan ditetapkan pada nol. Setelah itu transformasi ulang IFT ke dalam domain waktu dilakukan.

Percampuran

Seperti dapat dilihat dalam pembentukan pra-grup atau grup primer dasar, tuntutan tertinggi dibuat pada teknologi filter dalam hal modulasi sideband tunggal. Ini selalu menjadi masalah dalam sejarah teknologi radio, yaitu menyaring stasiun akurat dari pita frekuensi stasiun yang padat.

Sebenarnya filter yang dapat disesuaikan akan diperlukan. Namun, mereka tidak dapat, - juga karena alasan teoretis - direalisasikan dengan bandwidth dan kualitas yang

konstan. Ini hanya berhasil dalam rentang frekuensi tertentu dengan filter (filter bandpass) yang diberikan wilayah keadaan konduksi yang konstan.

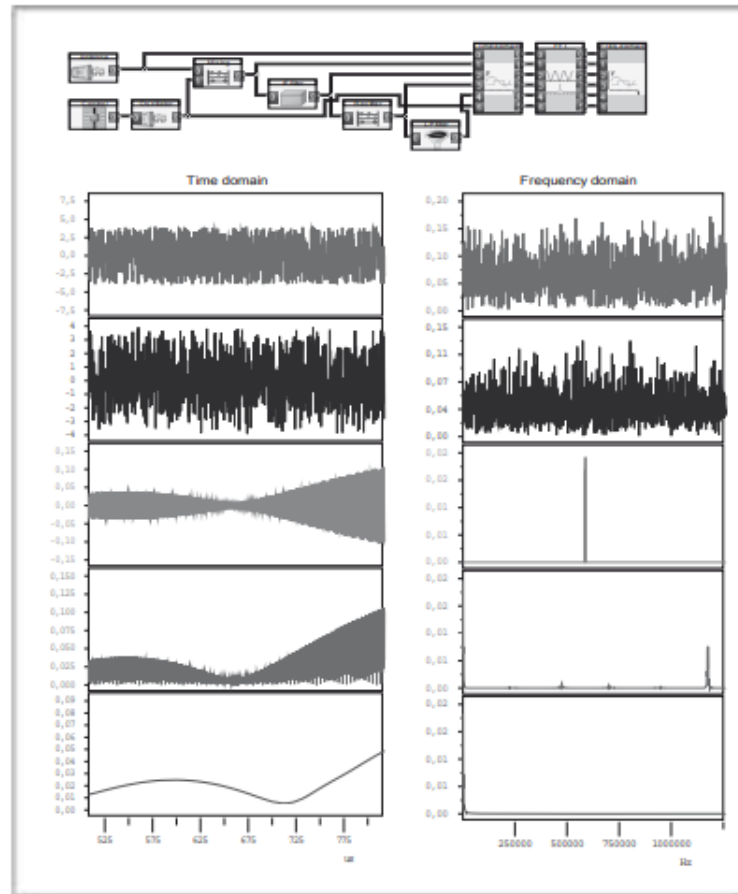
Dalam teknologi radio dan televisi tradisional – semuanya akan berbeda dengan teknologi radio dan TV digital – digunakan trik yang secara tidak langsung mengarah ke filter yang dapat disesuaikan, yang pada prinsipnya bekerja sebagai berikut:

- Dengan mengalikan (seluruh pita frekuensi oleh semua pemancar) dengan frekuensi osilator yang dapat disesuaikan (pembawa) pita frekuensi (pembentukan perbedaan) dapat dikonversi ke rentang yang lebih rendah sesuka hati (rentang frekuensi menengah)
- Pada saat yang sama pita frekuensi lengkap kedua "di bagian paling atas" muncul dengan pembentukan jumlah yang, bagaimanapun, diabaikan.
- Dalam pita frekuensi menengah ini (domain IF) ada filter bandpass kualitas yang relatif tinggi dipasang. Ini biasanya kristal kuarsa atau filter keramik. Dengan penyesuaian halus tertentu dari seluruh pita frekuensi menengah, pemancar yang diinginkan terletak tepat di wilayah negara filter IF dan dengan demikian dipilih. Hal ini kemudian didemodulasi dan diperkuat.
- Konversi frekuensi yang dapat dikontrol ke rentang frekuensi menengah ini disebut "pencampuran", tentu saja, juga perkalian dengan pembawa (yang dapat disesuaikan), misalnya tidak lain adalah proses konversi sinyal termodulasi menjadi rentang frekuensi yang berbeda (domain IF) dan oleh karena itu, telah diberi nama dalam teknologi radio dan televisi.

Gambar 168 menunjukkan simulasi tuner AM lengkap seperti yang digunakan dalam rentang gelombang menengah Demi kesederhanaan sinyal noise digunakan di sini sebagai sinyal udara yang berisi semua frekuensi.

Demi kesederhanaan sinyal noise digunakan sebagai sinyal udara, yang berisi semua frekuensi, yaitu dalam rentang gelombang menengah 300-3000 kHz (menurut CCIR). Dengan menggunakan pengatur tangan frekuensi osilator dapat dipilih sedemikian rupa sehingga "stasiun yang diinginkan" terletak persis di wilayah konduksi filter IF (kotak hitam). Filter IF ini adalah filter bandpass yang cerdas dari Gambar 166. Filter IF terletak pada 465 kHz dan filter yang lebih lebar adalah Filter lowpass juga melebihi lebar LF sebenarnya dari penerima AM.

Anehnya, rentang frekuensi tinggi juga dapat disimulasikan melalui DASYLab. Sumbu benar-benar diskalakan dengan benar. Dalam domain ini, sinyal nyata dapat secara efisien dan efisien melalui kartu A / D dan D / A yang sangat mahal. Operasi waktu nyata – Seperti halnya penerima radio biasa – saat ini hampir tidak dapat direalisasikan.



Gambar 168: Simulasi tuner AM untuk rentang gelombang menengah

Modulasi frekuensi FM

Selain amplitudo, frekuensi dan fase juga menawarkan kemungkinan memiliki makna yang digabungkan pada mereka, ini berarti mengubah frekuensi atau fase "dalam ritme" dari sinyal sumber.

Modulasi frekuensi FM dan modulasi fase PM hampir tidak berbeda pada pandangan pertama karena dengan setiap perpindahan fase (kontinu) "frekuensi sesaat" diubah secara bersamaan. Jika persimpangan nol pembawa sinusoidal dipindahkan, panjang periode T * dari operasi perubahan frekuensi.

Dalam kasus FM semuanya mudah pada awalnya. Dalam Bab 7 "Proses Linier dan Non-linier" VCO (Voltage Controller Oscillator) sudah ditangani sehubungan dengan telemetri. VCO ini hanyalah sebuah modulator FM.

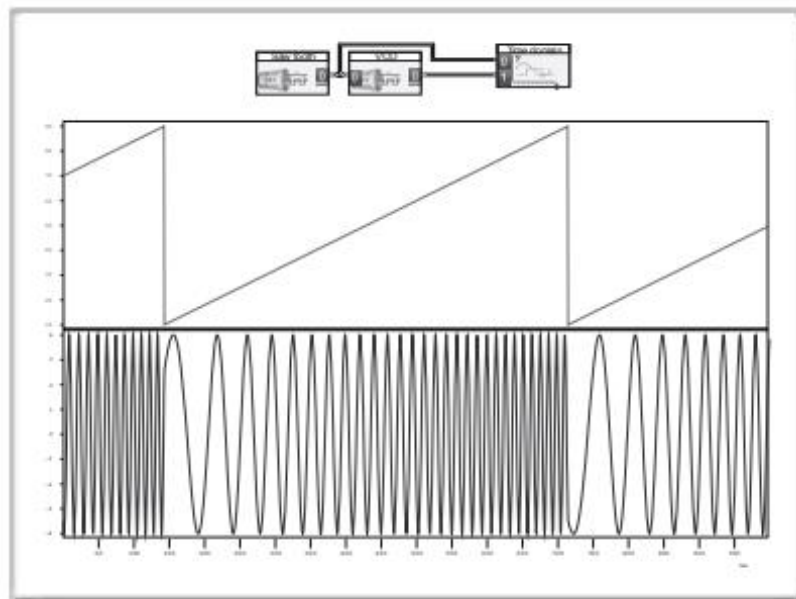
Seperti hampir selalu dalam mikroelektronika ada VCO analog dan digital dan berbagai perwakilan dalam dua kategori ini. Berikut adalah survei singkatnya:

- VCO analog untuk rentang 0 hingga 20 MHz

Ini adalah IC dengan tegangan internal - sumber arus yang dikendalikan. Kapasitor (eksternal) diisi dan kemudian dibuang secara linier melalui generator arus konstan yang dapat disesuaikan, demikian pula tegangan segitiga hampir periodik muncul. Semakin tinggi arus diatur, semakin cepat kapasitor. Tegangan segitiga ini terdistorsi oleh transistor atau rangkaian kapasitor sedemikian rupa sehingga tegangan seperti

sinus muncul. Mengingat muatan dan pelepasannya. Frekuensi tegangan segitiga ini sebanding dengan arus generator arus konstan. generator fungsi yang sesuai ini dapat dilihat pada sinyal output: sinus memiliki tikungan kecil di daerah atas dan bawah. Dalam analisis akhir kurva linier dari tegangan segitiga dibulatkan oleh distorsi non-linear.

- VCO analog untuk rentang 300 kHz hingga 200 MHz
Dioda kapasitas memiliki sifat mengubah kapasitasnya sedikit tergantung pada tegangan yang diberikan. Sifat ini dimanfaatkan dalam VCO analog frekuensi tinggi. Irama sinyal sumber. Akibatnya frekuensi resonansi / frekuensi alami dari rangkaian tegangan berubah minimal. Untuk dikatakan dengan jelas: kami memiliki sinyal FM.
- VCO digital dan modulator FM dengan DASYLab
DASYLab memiliki dua modul yang dengannya sinyal FM dapat dibangkitkan secara langsung. Sinyal ini dapat disimulasikan dengan menggunakan konverter D / A dari kartu multi-fungsi. Dengan kartu tradisional, sinyal FM hanya mungkin dibangkitkan dalam domain LF dalam arti sebenarnya. Kami menggunakan modul ini hanya untuk mensimulasikan, untuk menetapkan karakteristik penting dari sinyal FM.
Menggunakan contoh sinyal gigi gergaji periodik sebagai sinyal sumber, fungsi modul generator sebagai generator VCO atau FM ditunjukkan di sini. Dalam percobaan yang sesuai dengan diagram ini, "frekuensi instan" dapat diukur dengan menggunakan kursor Hasilnya adalah: tingkat frekuensi operasi sesuai persis dengan nilai operasi gigi gergaji Menurut ini frekuensi sesaat (kiri) adalah 100 Hz pada $t = 0$ ms dan pada nilai tertinggi gigi gergaji 250 Hz dll .



Gambar 169: DASYLab VCO sebagai modulator frekuensi

Seperti yang ditunjukkan contoh ini, sangat mudah untuk mengatur rentang frekuensi yang diinginkan. Nilai sinyal sumber - di sini dari 0 hingga 250 - tidak secara fisik mewakili tegangan dalam V; melainkan ini adalah sinyal digital, yaitu string angka

yang hanya ketika ditransmisikan ke modul D / A – keluaran melalui kartu multi-fungsi – memiliki rentang nilai yang realistis.

- Modul generator

Kemungkinan lebih lanjut untuk menghasilkan sinyal FM dapat dilakukan melalui modul “penerjemah rumus”, tetapi membutuhkan keterampilan matematika (model matematika dari suatu) yang mampu menghasilkan sinyal FM, sinyal AM atau sinyal campuran dari keduanya. (sinyal FM).

- Generator fungsi yang dapat diprogram: VCO digital untuk rentang 0 hingga 50 MHz: Menggunakan fungsi sinyal yang dipilih melalui menu, serangkaian angka – yaitu sinyal digital. Yang sesuai dengan sinyal FM yang dihasilkan dalam generator fungsi digital. Konverter D / A berikutnya menghasilkan sinyal FM analog dari ini. Dalam analisis akhir, sebuah program menghasilkan rangkaian angka FM melalui prosesor sinyal.

Frekuensi FM tertinggi terutama ditentukan oleh frekuensi pulsa clock maksimum dari konverter D / A. Perlu dicatat bahwa setidaknya 20 "posisi dukungan" (angka) per periode diperlukan untuk menghasilkan sinyal FM dengan sinyal sinus. seperti pembawa

Kasus frekuensi pembawa maksimum 50 MHz, frekuensi pulsa clock dari konverter D / A harus 1 GHz! Nilai ini hanya dapat dicapai saat ini dengan konverter D / A 8 bit. Fungsi FM yang dijelaskan hanya satu Dikendalikan oleh program mereka dapat menghasilkan sinyal apapun.

Dalam Gambar 169 dengan menggunakan contoh sinyal gigi gergaji periodik, hubungan sederhana dalam modul generator DASYLab antara nilai sesaat dari sinyal sumber dan frekuensi sesaat dari sinyal FM ditampilkan Dari Gambar 170 dan seterusnya, hanya sinyal sumber sinusoidal yang digunakan secara berurutan. Akhirnya, dalam Gambar 175 sebuah band terbatas, sinyal sumber "acak" dipilih untuk menunjukkan kurva spektrum FM yang realistis.

Dalam kasus sinyal sumber sinusoidal, muncul spektrum FM yang simetris sempurna dengan frekuensi menengah. Frekuensi tengah ini diatur secara tepat menggunakan DASYLab oleh tegangan DC (offset) yang digabungkan pada sinyal sumber (lihat di bawah).

Hal ini tidak mungkin untuk melihat aturan apapun untuk kurva amplitudo spektrum Kita lihat di sini di FM contoh proses non-linier yang khas dalam kasus prediksi spektrum frekuensi hanya mungkin untuk yang sangat terbatas Namun, dalam kasus FM, kita akrab dengan matematika (fungsi BESSEL) yang dengannya dimungkinkan untuk menghitung atau memperkirakan spektrum tegangan sumber sinusoidal – dan dengan demikian untuk semua sinyal terbatas pita (Prinsip FOURIER). Eksperimen nyata dengan sinyal FM dalam rentang VHF dan evaluasi Gambar 169 hingga Gambar 175 tetap memberikan beberapa petunjuk menarik:

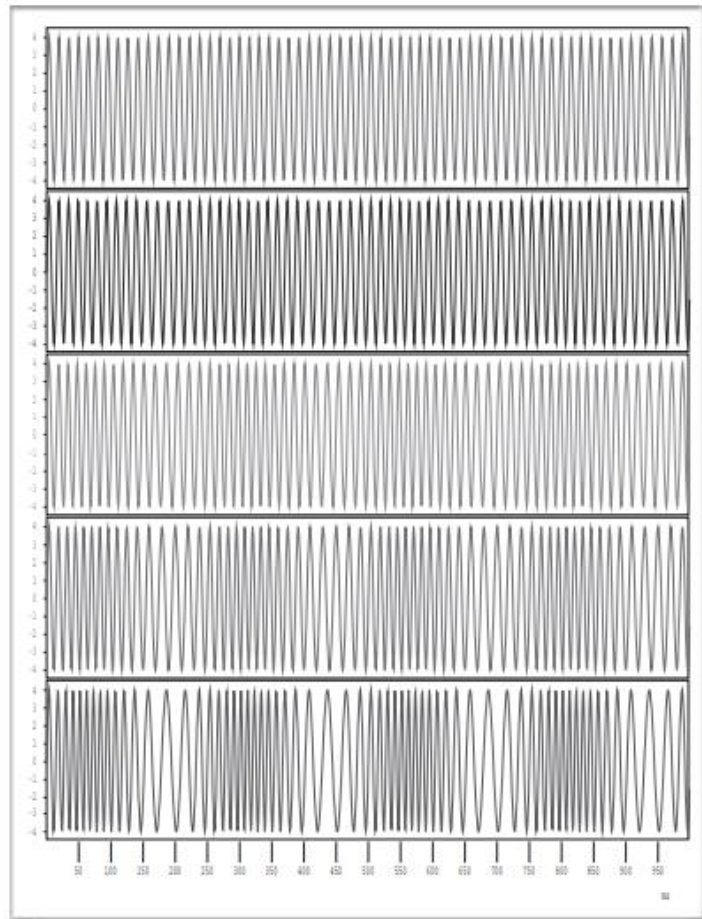
- Tidak seperti sinyal VCO frekuensi rendah (seperti dalam Gambar 169), sinyal FM nyata dengan frekuensi menengah frekuensi tinggi dalam domain waktu semua

terlihat hampir sama pada pandangan pertama, yaitu (tampaknya) semua sinusoidal. Lihat dalam hubungan ini juga Gambar 170.

Catatan: Dalam hal sinyal radio FM dalam rentang VHF sekitar 100 MHz, frekuensinya hanya berubah dalam urutan 0,1%, yaitu satu bagian per seribu.

- Pada Gambar 169 terlihat bahwa sinyal FM atau VCO mengubah frekuensi operasinya dalam ritme nilai operasi sinyal sumber. Apa yang umumnya berlaku adalah bahwa semakin tinggi nilai operasi sinyal sumber, semakin tinggi frekuensi operasi sinyal sumber. Sinyal FM Dalam kasus DASYLab, nilai sesaat dari sinyal kontrol yang dengannya generator FM diaktifkan sesuai persis dalam istilah numerik dengan "frekuensi sesaat" dari sinyal FM atau VCO.
- Untuk menghasilkan sinyal FM tipikal, sinyal sumber aktual memiliki pasangan offset (misalnya 1000) yang nilainya sesuai dengan frekuensi tengah (1000 Hz) Lihat dalam hubungan ini diagram blok pada Gambar 171 hingga Gambar 174.

Di seri atas sinyal FM memiliki ayunan frekuensi yang hampir tidak terlihat dan di seri bawah memiliki ayunan frekuensi yang sangat besar. Ayunan frekuensi setara dengan deviasi terbesar dari frekuensi operasi sinyal FM dari frekuensi menengah (di sini 500 Hz). Namun, ayunan frekuensi ganda tidak memberikan bandwidth yang tepat dari sinyal FM karena frekuensi sesaat adalah konsep yang tidak tepat.

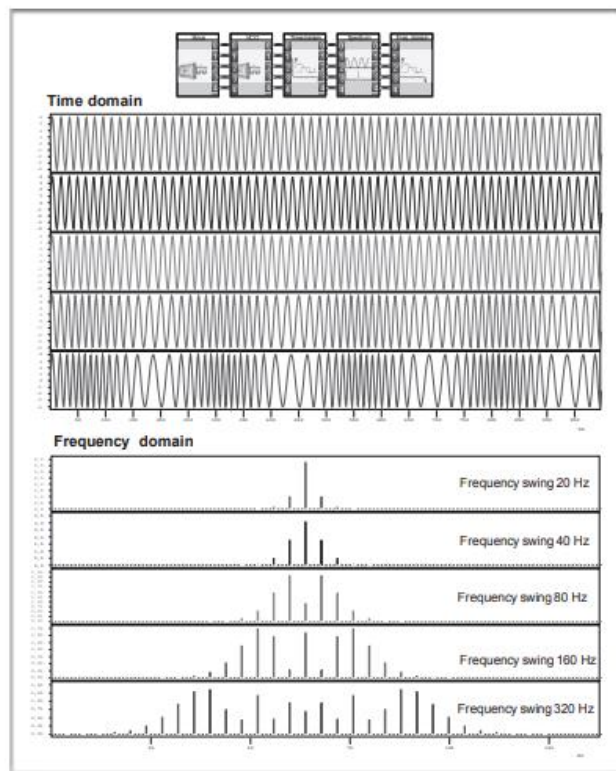


Gambar 170: Sinyal FM dengan perubahan frekuensi yang berbeda

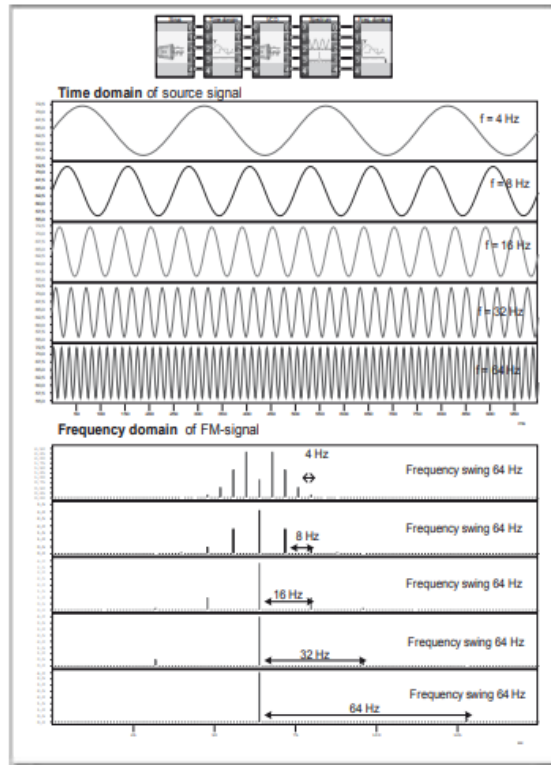
Semakin besar ayunan frekuensi, semakin besar bandwidth sinyal FM. Sinyal sumber adalah sinusoidal dalam semua kasus di sini dan sama persis dengan sinyal sumber dalam Gambar 171.

Dalam modul DASYLab "Generator" (modulasi frekuensi opsi) ada hubungan sederhana antara domain waktu dari sinyal sumber dan sinyal FM. Dalam diagram blok (atas) Anda melihat modul "Offset" yang menambahkan konstan - di sini 1000 – ke sinyal sumber. Dengan demikian, frekuensi tengah diatur pada 1000 Hz. Frekuensi operasi sinyal FM berfluktuasi di sekitar frekuensi tengah ini dan pada tingkat maksimum di sekitar amplitudo sinyal sumber sinusoidal.

Perubahan maksimum ini disebut ayunan frekuensi. Dalam kasus amplitudo 20 V (seri atas) ayunan frekuensi adalah 20 Hz, di bagian bawah, adalah 320 Hz dengan amplitudo 320 V. Sinyal FM selalu lebih besar dari dua kali ayunan frekuensi. Bentuk selubung spektrum FM tunduk pada hukum yang rumit (fungsi BESSEL).



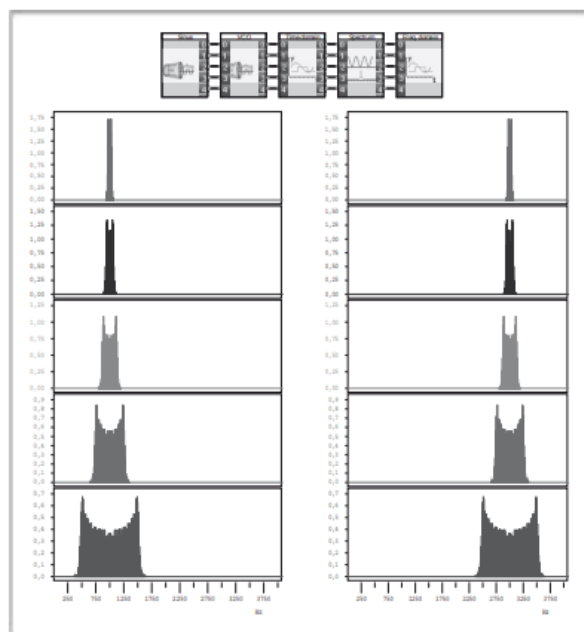
Gambar 171: Pengaruh ayunan frekuensi pada spektrum FM



Gambar 172: Pengaruh frekuensi sinyal sumber pada bandwidth spektrum FM

Selain ayunan frekuensi f_c , frekuensi sinyal sumber f_s juga memiliki pengaruh terhadap kurva dan lebar spektrum FM Hal ini ditunjukkan di sini untuk berbagai frekuensi sinyal sumber sinusoidal dengan ayunan frekuensi konstan $f_c = 80$ Hz ..

Yang tersisa sekarang adalah memeriksa apakah pilihan frekuensi menengah juga mempengaruhi kurva dan lebar pita spektrum FM (Gambar 173).

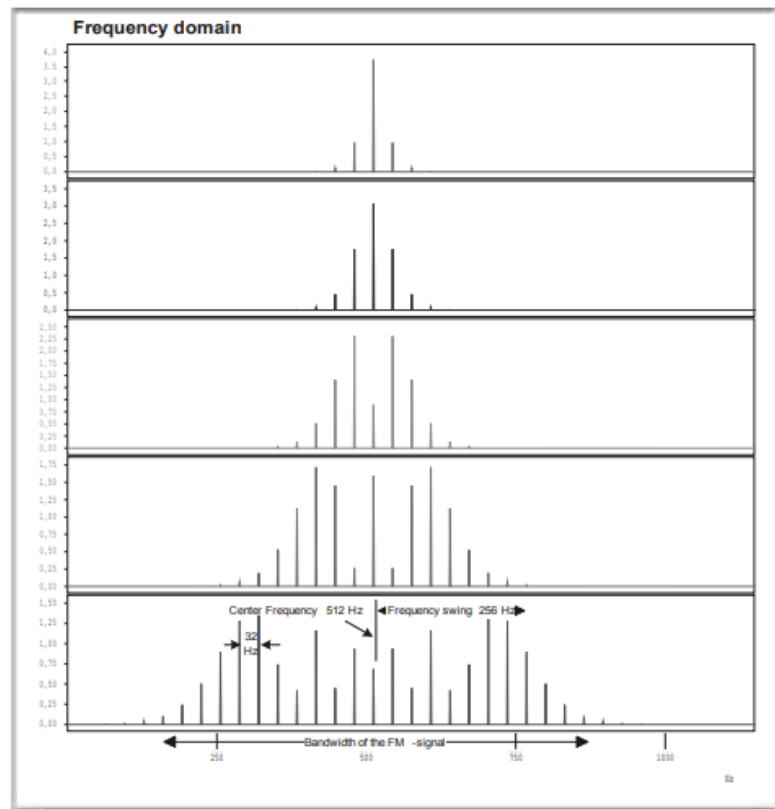


Gambar 173: Apakah frekuensi tengah mempengaruhi kurva dan lebar spektrum FM?

Kita lihat di sini pengaturan eksperimental yang sama dan di sisi kiri spektrum FM yang sama dengan frekuensi tengah yang sama 1000Hz seperti pada Gambar 170. Di sisi kanan frekuensi tengah ditetapkan pada 3000 Hz dan offset ditetapkan pada 3000. Semua besaran lain seperti ayunan frekuensi dan frekuensi sinyal tetap tidak berubah. Hasil: tidak ada pengaruh sama sekali dari frekuensi tengah pada kurva dan lebar spektrum FM yang akan direkam.

Spektrum FM bergantung sepenuhnya pada ayunan frekuensi f_c dan frekuensi sinyal sumber f_s . Sekarang seharusnya mungkin untuk menemukan rumus sederhana yang menggambarkan bandwidth sinyal FM melalui dua besaran ini. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 174.

- Semakin baik perubahan domain waktu dalam frekuensi sesaat dapat dilihat, semakin luas spektrum total sinyal FM (lihat Gambar 171 dan Gambar 172).
- Aturan untuk kurva amplitudo spektrum FM tidak mudah dilihat.



Gambar 174: Rumus untuk memperkirakan bandwidth sinyal FM

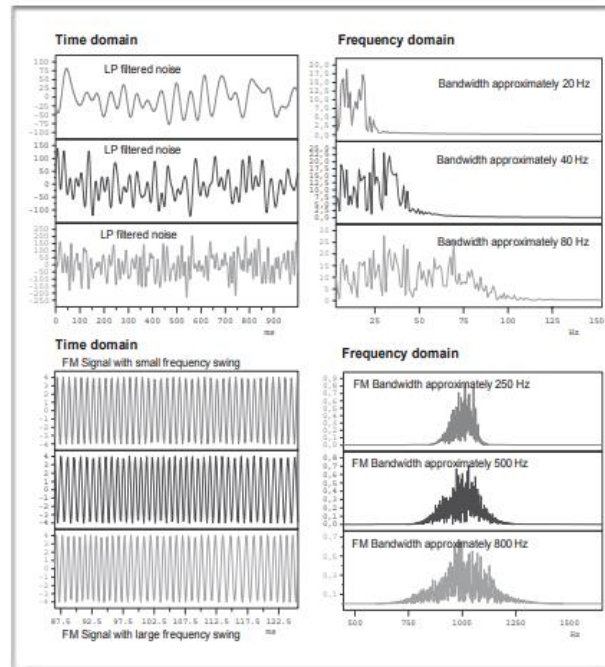
Berikut sekali lagi spektrum dari Gambar 171 dan Gambar 172. Interval antara garis sesuai dengan frekuensi sinyal sumber sinusoidal (di sini 32 Hz).. Sebuah ayunan frekuensi 320 – lihat Gambar 170 kiri bawah – menghasilkan setengah spektrum $(320 + 2 \cdot 32)$ Hz. Hasil total bandwidth yang sesuai pada $2 (320 + 2 \cdot 32)$ Hz. Untuk semua kasus lain berlaku: $B_{FM} = 2 (f_c + 2f_s)$.

Penyelidikan pengaruh ayunan frekuensi f_c , Sinyal f_s dan frekuensi tengah f_c pada bandwidth B sinyal FM pada Gambar 171 dan Gambar 172 memberikan hasil yang tidak

ambigu Hanya ayunan frekuensi f_C dan frekuensi sinyal f_s yang menentukan bandwidth BFM dari sinyal FM.

Gambar 174 akhirnya mengarah pada rumus untuk lebar pita sinyal FM.

$$B_{FM} = 2(\Delta f_C + 2f_s)$$



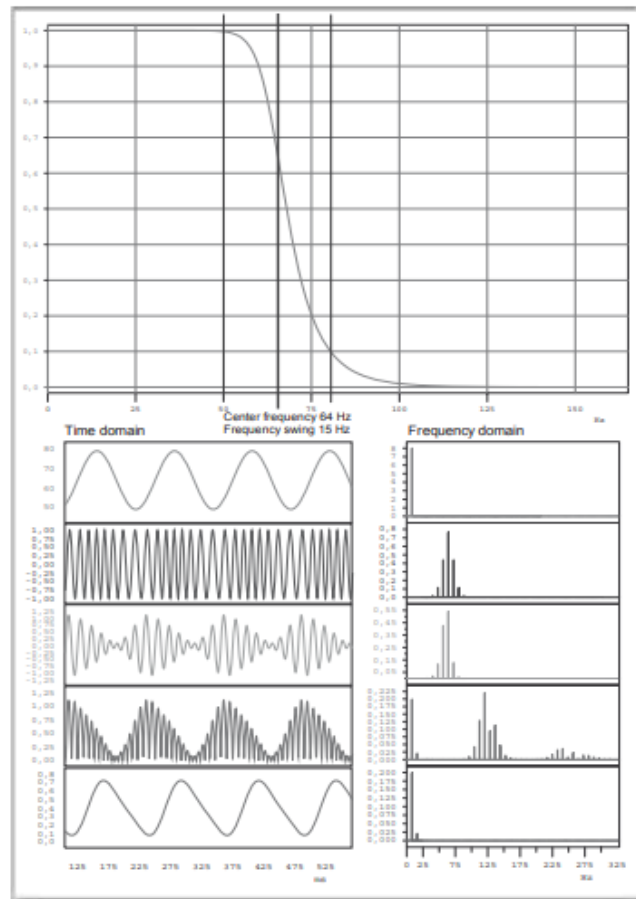
Gambar 175: Spektrum FM dari sinyal realistis

Sampai sekarang kami telah banyak menggunakan sinyal sumber sinusoidal untuk mendapatkan hasil yang dapat digunakan secara langsung. Sinyal realistis memiliki komponen stokastik, yaitu kurva masa depannya tidak dapat diprediksi secara tepat. Akibatnya spektrum memiliki ketidakteraturan tertentu yang mengingatkan pada a sinyal noise. Dalam domain waktu (kiri) ini tidak terlihat.

Di sini sinyal noise yang disaring dari berbagai bandwidth - lihat di atas - dimodulasi frekuensi. Dapat dilihat dengan jelas bahwa bandwidth sinyal FM tergantung pada bandwidth sinyal sumber.

Meskipun sinyal noise yang sama difilter lowpass, ayunan frekuensi sebenarnya tergantung pada Bandwidth sinyal sumber. Anda melihat alasan kiri atas ini di domain waktu: nilai operasi maksimum meningkat dengan bandwidth sinyal sumber karena energi juga meningkat seiring bandwidth. Semakin besar nilai ini, semakin besar ayunan frekuensi...

Berbeda dengan AM dan modulasi sideband tunggal, bandwidth FM setidaknya dua puluh kali bandwidth sinyal sumber. FM berperilaku boros dengan pita frekuensi. Jika meskipun demikian FM digunakan, misalnya dalam rentang VHF, ini proses modulasi harus menawarkan keuntungan yang cukup besar dibandingkan dengan AM dan modulasi sideband tunggal.



Gambar 176: Demodulasi sinyal FM di tepi filter

Di sini transisi filter lowpass dari daerah keadaan konduksi ke daerah keadaan pemblokiran digunakan sebagai konverter tegangan frekuensi sensitif (konverter f / U) untuk demodulasi sinyal FM. Karena karakteristik filter non-linier, sinyal yang diambil sangat terdistorsi (ayunan frekuensi terlalu besar).

Demodulasi sinyal FM

Informasi dari sinyal sumber sampai batas tertentu "kode frekuensi" dalam kasus FM. Bagaimana kita bisa mendapatkan informasi ini di penerima?

Pada rentang VHF – yaitu pada rentang sekitar 100 MHz – ayunan frekuensi kurang dari 0,1% (1 per seribu). Pada layar osiloskop cepat, sinyal tampak seperti sinyal pembawa sinusoidal murni. Ini adalah spektrum yang mengkhianati sinyal FM. Konverter tegangan frekuensi yang sangat sensitif (konverter f / U , lihat contoh Telemetris) Gambar 131) diperlukan, yang mencatat perubahan terkecil dalam frekuensi sebagai "deviasi tegangan".

Fisika tampaknya relevan di sini. Filter adalah petunjuk pertama. Filter memiliki tepi pada batas antara wilayah keadaan konduksi dan wilayah keadaan pemblokiran. Mari kita asumsikan bahwa tepi ini agak curam. Ini berarti bahwa jika bandwidth Sinyal FM terletak sepenuhnya di domain batas ini, perubahan kecil dalam frekuensi akan memutuskan apakah sinyal akan diizinkan untuk lewat - sehingga memiliki amplitudo yang lebih besar pada

output atau sebagian besar diblokir – yaitu memiliki amplitudo yang sangat kecil pada keluaran filter.

Tepi filter dengan demikian merupakan domain yang bereaksi sangat sensitif terhadap perubahan frekuensi Gambar 176 menyajikan fakta-fakta ini dalam bentuk grafik dan lebih ekspresif daripada seribu kata. Pada prinsipnya setiap tepi filter mewakili karakteristik non-linier.

Dengan demikian, distorsi non-linier yang tidak diinginkan sering terjadi pada tepi filter yang mereproduksi sinyal asli setelah demodulasi dalam sejak awal radio VHF di tahun lima puluhan, selama beberapa dekade tidak ada yang lebih baik tersedia. Untuk waktu yang lama pengembangan terdiri dari peningkatan sedikit demi sedikit proses yang pada dasarnya tidak cocok. Orang-orang berusaha untuk linierisasi tepi filter melalui trik dalam desain teknis sirkuit .

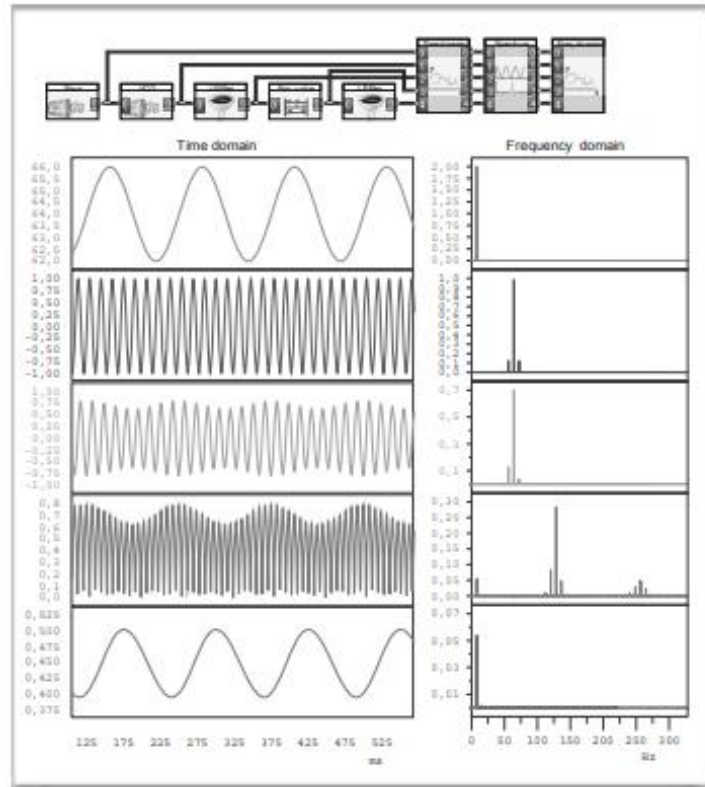
Diperlukan pendekatan baru untuk masalah ini. Kami memasuki bidang pemrosesan sinyal non-linier yang sangat topikal dengan pendekatan ini: umpan balik dari sebagian sinyal keluaran ke input sistem. Dengan kata lain: sistem umpan balik atau umpan balik teknologi kontrol.

Sistem loop tertutup adalah penemuan alam. Kami menemukannya di mana-mana, tetapi jarang mengenalinya seperti itu. Seperti yang akan kami bahas beberapa kali dalam bab selanjutnya dengan prinsip umpan balik, kami hanya menyebutkan di sini apa yang diperlukan dalam konteks demodulasi sinyal FM.

Fase terkunci loop PLL

Salah satu masalah utama teknologi transmisi sinyal adalah sinkronisasi (dalam waktu) pemancar dan penerima, jika misalnya gambar pada pesawat televisi yang rusak mulai berputar sehingga kaki seseorang menjuntai tak berdaya dari atas sementara kepalanya muncul di tanah. Jika Anda memutar kenop kanan, gambar berbunyi klik pada tempatnya lagi – pemancar dan penerima disinkronkan kembali.

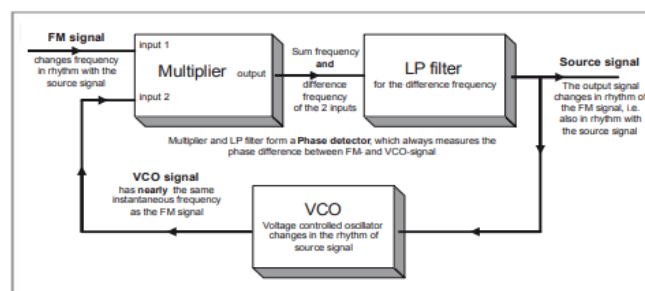
Penerima televisi memiliki tugas "memancing" pulsa clock yang tepat sehingga reproduksi gambar selaras dengan pemancar. Tidak ada yang dapat melakukan ini lebih baik daripada PLL - loop fase-terkunci.



Gambar 177: Demodulasi sinyal FM di tepi filter dengan ayunan frekuensi kecil

Jika ini dibandingkan dengan hati-hati dengan Gambar 148, ayunan frekuensi yang lebih kecil dapat dikenali dalam sinyal FM (seri atas), sinyal FM (tercermin) di tepi filter dan sinyal yang diperbaiki. Akibatnya sinyal FM hanya dicerminkan dalam Sinyal sumber yang diambil memiliki amplitudo yang jauh lebih kecil (ca 0,05 V) tetapi hanya sedikit terdistorsi secara non-linear. Hanya ada harmonik ke-2 yang sangat kecil yang terlihat di bagian bawah spektrum.

PLL telah dirakit dari komponen yang kita kenal: multiplier, lowpass filter dan VCO (voltage-controlled oscillator) Namun, mungkin terlalu sulit bagi Anda untuk menggambarkan fungsi PLL dari Gambar 178 dari awal. Ada dua alasan untuk ini. Pertama, pengali digunakan di sini untuk "tujuan khusus", kedua, ada umpan balik. Umumnya sulit untuk memprediksi sistem loop terkunci yang sudah dikenal karena semua sistem loop terkunci non-linear.



Gambar 178: Diagram blok sederhana dari PLL analog

Mari kita asumsikan bahwa sinyal VCO secara instan (hampir) memiliki frekuensi yang sama dengan sinyal FM yang diterima. Jumlah dan selisih frekuensi $f_{FM} + f_{VCO}$ dan $f_{FM} - f_{VCO}$ muncul pada output sebagai hasil perkalian. Filter lowpass menyaring keluar jumlah frekuensi.

Berapa frekuensi yang dimiliki oleh sinyal perbedaan karena kedua frekuensi f_{FM} dan f_{VCO} hampir sama besarnya? Pada keluaran filter lowpass, "arus searah yang berfluktuasi" muncul yang seharusnya memiliki tingkat yang tepat untuk menyesuaikan kembali VCO ke frekuensi operasi yang tepat dari sinyal FM: oleh karena itu sinyal kontrol adalah sinyal LF.

Jika Anda belum begitu mengerti – diagram berbicara lebih keras daripada kata-kata (lihat Gambar 179 -- Gambar 181).

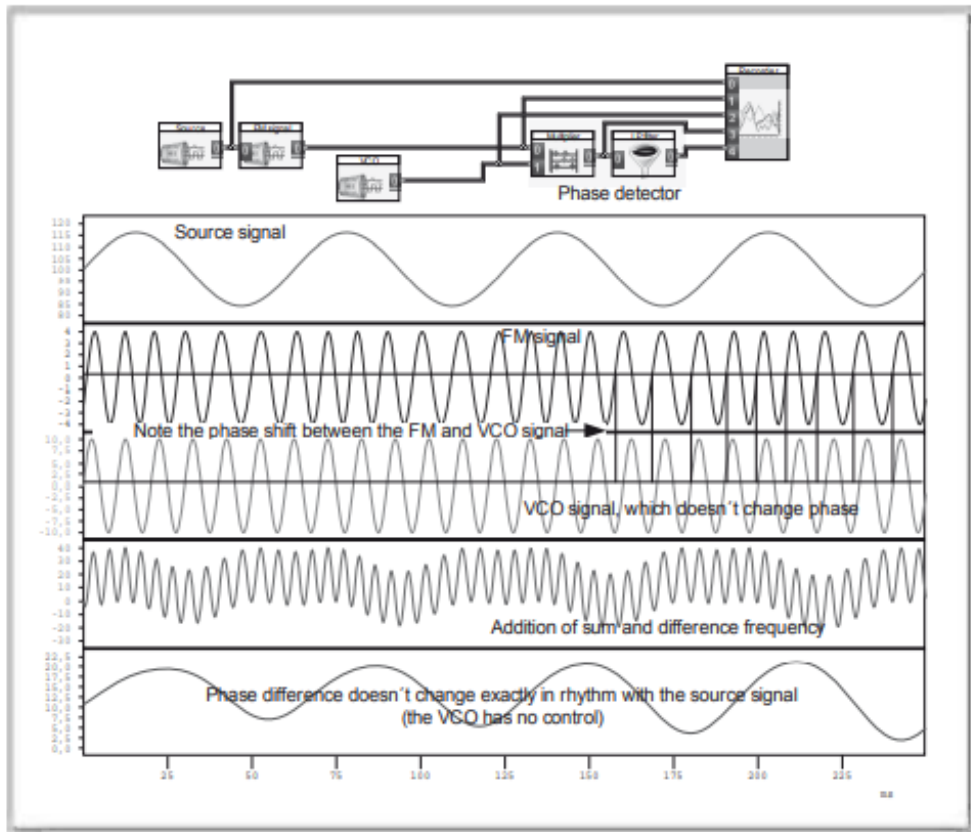
Dalam Gambar 178 pengali dan filter lowpass dimaksudkan untuk membentuk "detektor fase". Detektor fase membandingkan dua sinyal (dengan frekuensi yang sama) untuk melihat apakah mereka berada dalam fase yaitu benar-benar sinkron. Hal ini misalnya dapat dicapai dengan perbandingan zero crossing dari kedua sinyal. Jika zero crossing terus menerus dipindahkan ke arah satu sama lain, kedua sinyal hanya memiliki frekuensi yang kira-kira sama (lihat Gambar 179 dalam hubungan ini).

Mari kita mulai secara langsung dan mengabaikan umpan balik. Dalam Gambar 179, VCO harus diatur pada frekuensi yang kira-kira sesuai dengan frekuensi tengah sinyal FM. Sinyal FM memvariasikan frekuensinya dalam ritme bagian atas. (sinusoidal) LF Dalam diagram zero crossing dibandingkan Jumlah dan selisih frekuensi muncul pada output pengali. Filter lowpass menyaring jumlah frekuensi keluar dan "tegangan sisa" yang dimaksudkan untuk mengontrol Tegangan ini paling besar di mana perbedaan fasa dari zero crossing paling besar jika penundaan yang disebabkan oleh filter lowpass disertakan.

Kita sedikit curang. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 180, dimana tegangan kontrol atau sinyal LF yang diperoleh terlihat sangat berbeda dari aslinya. Domain frekuensi menunjukkan apa yang sebenarnya terjadi. Perkalian kedua sinyal dalam domain waktu menghasilkan konvolusi setelah penyaringan lowpass bukan sinyal LF asli yang tersisa, tetapi sinyal FM yang terletak pada "frekuensi menengah" $f_M = 0$.

Pada deret kedua dan ketiga, perpindahan fasa antara sinyal FM dan sinyal VCO diatur pada frekuensi konstan seperti perbedaan antara penyeberangan nol harus dilihat. Perbedaan fasa ini berisi perbedaan frekuensi yang muncul bersama-sama dengan jumlah frekuensi pada output dari pengganda. Lowpass menyaring frekuensi penjumlahan.

Tegangan output pada filter lowpass adalah tegangan kontrol untuk VCO dan perubahan ritme sinyal LF (atas) karena frekuensi sesaat sinyal FM berubah dalam ritme ini.

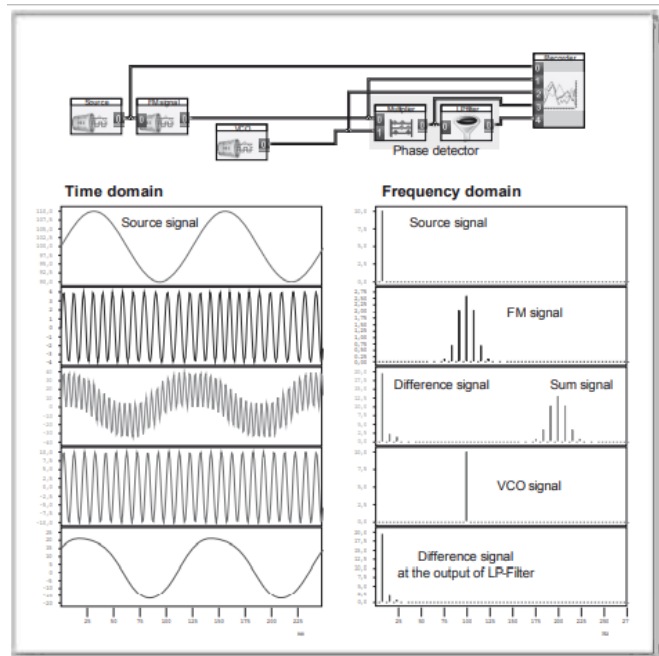


Gambar 179: Mode dasar fungsi detektor fasa

Tegangan kontrol ini tidak sesuai dengan sinyal FM asli karena VCO diatur pada frekuensi tetap dan tidak selalu disetel. Jika sistem kontrol ini disetel dengan sempurna, tegangan kontrol muncul pada output filter lowpass yang sesuai dengan tegangan kontrol sinyal LF asli.

PLL berusaha terus menerus untuk menyinkronkan pemancar (sinyal LF) dan penerima (sinyal VCO) Ketika sinyal FM berubah dalam ritme sinyal LF (sinyal sumber), tegangan kontrol untuk VCO juga harus berubah dalam ritme ini.

Sensitivitas sistem loop terkunci ini tercermin dalam penyesuaian tegangan kontrol yang sangat sensitif Hal ini ditunjukkan pada Gambar 181. Tegangan keluaran lowpass diperkuat ke tingkat yang tepat dan dilengkapi dengan offset yang benar. jumlah yang cukup untuk membuat sistem umpan balik stabil.

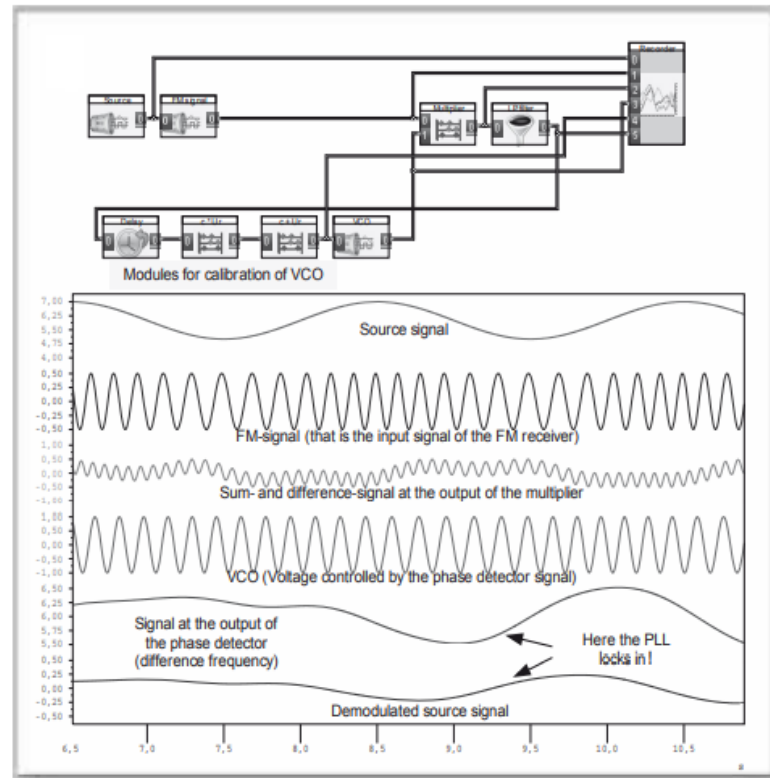


Gambar 180: PLL rusak tanpa VCO terkontrol

Apa yang terjadi jika dalam kasus PLL sistem umpan balik terganggu dan VCO digerakkan oleh "frekuensi pembawa" yang konstan? Analisis ini sangat sederhana. Kita berurusan dengan perkalian sederhana dalam domain waktu. Dalam domain frekuensi pada Jika jumlah sinyal disaring oleh sinyal lowpass ini tidak meninggalkan sinyal sumber asli; melainkan sebuah sideband dari "frekuensi menengah" $f = 0$ Hz muncul di domain frekuensi.

Hanya sistem umpan balik yang mengembalikan sinyal sumber karena memaksa VCO untuk menyinkronkan dirinya dengan frekuensi operasi sinyal FM Karena frekuensi sesaat FM ini berubah dalam ritme sinyal sumber, ini juga harus berlaku untuk tegangan kontrol (perbedaan tegangan pada keluaran filter lowpass).

Modul "penundaan" ditentukan dalam DASYLab untuk sistem umpan balik. PLL hanya mengklik pada tempatnya setelah waktu tertentu. Perubahan dalam desimal kedua. Kita melihat seberapa sensitif sistem umpan balik bereaksi terhadap perubahan terkecil dalam sinyal VCO. Kita lihat seberapa sensitif sistem umpan balik bereaksi terhadap perubahan terkecil dalam sinyal VCO.



Gambar 181: PLL sebagai demodulator untuk sinyal FM

Di diagram blok atas Anda akan menemukan beberapa komponen lebih banyak daripada di diagram blok default Gambar 178. Di kiri atas sinyal FM yang akan didemodulasi dihasilkan Detektor fase terdiri dari multiplier dan filter lowpass – menunjukkan perbedaan fasa antara sinyal FM dan VCO. Sinyal keluaran ini diproses untuk penyesuaian VCO (pengaturan frekuensi tengah VCO dengan offset $(C + UR)$ dan Ayunan frekuensi $(C \cdot UR)$. Sistem umpan balik beroperasi dengan penundaan tertentu. Anda akan melihat ini dengan membandingkan sinyal FM dan VCO. Umpan balik hanya dimungkinkan dengan DASYLab dengan menggunakan modul "penundaan".

Jika sinyal FM sementara untuk menunjukkan ayunan frekuensi yang lebih tinggi, PLL mungkin juga keluar dari langkah. Jarak frekuensi pemancar dan ayunan frekuensi oleh karena itu tetap dalam rentang VHF. Jarak frekuensi tengah adalah 300 kHz, ayunan frekuensi maksimum adalah 75 kHz, frekuensi LF tertinggi kira-kira 15 kHz ("HiFi") Dengan demikian, rumus bandwidth kami menghasilkan bandwidth pemancar kira-kira $B_{VHF} = 2 (75 \text{ kHz} + 2 \cdot 15 \text{ kHz}) = 210 \text{ kHz}$

Pentingnya PLL jauh melampaui demodulator FM. Hal ini umumnya digunakan di mana penting untuk menyinkronkan pemancar dan penerima karena dapat mengekstrapolasi pulsa clock dari sinyal yang diterima.

Modulasi fase

Ada hubungan yang jelas antara frekuensi dan fase sinyal sinusoidal yang akan dijelaskan secara singkat sekali lagi di sini Bayangkan dua sinyal sinusoidal, satu dari 10 Hz, yang lain dari 100 Hz.

Sine10Hz memiliki panjang periode

$$T_{10\text{Hz}} = 1 / f = 1/10 = 0,1 \text{ s,}$$

Sine100Hz memiliki panjang periode

$$T_{100\text{Hz}} = 1 / f = 1/100 = 0,01 \text{ s.}$$

Sekarang bayangkan penunjuk berputar pada Gambar 24. Penunjuk ini berputar sepuluh kali lebih cepat pada 100 Hz daripada pada 10 Hz. Ini berarti juga bahwa lingkaran penuh (fase) 2 (360 °) diselesaikan sepuluh kali lebih cepat pada 100 Hz daripada pada 10 Hz. Dengan demikian berlaku berikut.

Semakin cepat fase berubah (seketika), semakin tinggi frekuensi (seketika) dari sinyal sinusoidal.

Dalam kasus diferensiasi sebagai pemrosesan sinyal, kami selalu membutuhkan formulasi semacam ini:

Semakin cepat sinyal input berubah (secara instan) semakin besar sinyal yang terdiferensiasi (secara instan).

Di sisi lain dari Gambar 24 dan halaman 39 kita akrab dengan hubungan antara kecepatan sudut, fase dan frekuensi:

$$\omega = \varphi/t = 2\pi/T = 2\pi f$$

Hubungan ini hanya benar secara mutlak jika frekuensi tidak berubah dan penunjuk berputar dengan kecepatan sudut konstan. Dalam kasus FM dan PM hal ini tidak berlaku. Jadi, secara tepat, hal berikut berlaku.

$$\omega = d\varphi/dt$$

Atau dalam istilah matematis: diferensiasi sudut dalam waktu menghasilkan kecepatan sudut Yang secara sederhana - lihat di atas - mengatakan bahwa semakin cepat fase berubah, semakin tinggi frekuensi sesaat dari sinyal sinusoidal.

Oleh karena itu untuk frekuensi

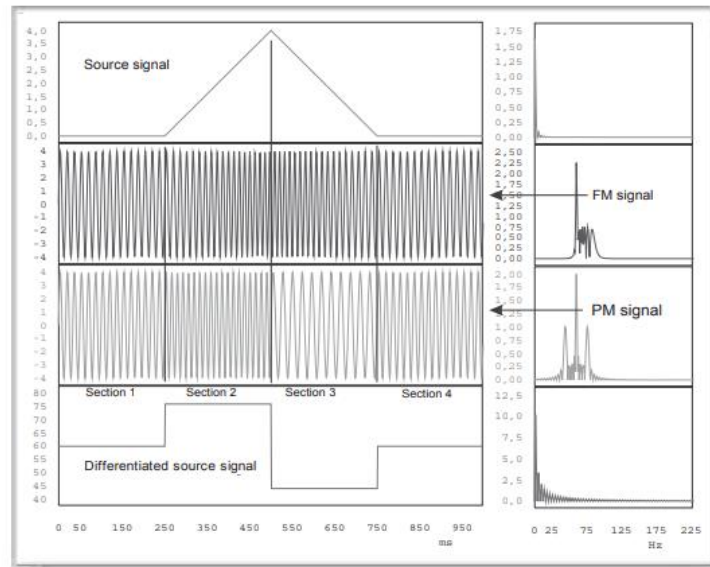
$$2\pi f = d\varphi/dt$$

Dan

$$f = 1/2\pi \cdot (d\varphi/dt) = 0.16 \cdot (d\varphi/dt)$$

berlaku.

Realisasi teknis dari modulasi fase tidak cukup mudah, tetapi pemahaman di atas memberikan metode sederhana meskipun hanya tersedia modul untuk modulasi frekuensi:



Gambar 182: Perbandingan PM dan FM

Sebuah sinyal dipilih sebagai sinyal sumber yang memiliki empat segmen: di segmen 1 tidak ada perubahan; di segmen 2 naik secara linier; di segmen 3 turun lagi secara linier dengan cara yang sama dan di segmen 4 akhirnya tidak berubah (seri atas). Setiap segmen waktu panjangnya 250 ms.

Di seri kedua Anda melihat sinyal FM yang sesuai. Jadi di segmen 2 frekuensinya meningkat secara linier, dll.

Dalam seri ini Anda melihat sinyal PM Untuk ini – lihat teks untuk alasan – sinyal sumber dibedakan (seri bawah) dan dihubungkan dengan modul "Fm generator". Dalam kasus sinyal PM, frekuensi seketika melompat menjadi tiga kali pada batas segmen dengan nilai, yang tergantung pada gradien sinyal sumber.

PM dengan demikian bereaksi jauh lebih kritis terhadap perubahan sinyal sumber, yang sebenarnya mengikuti dari wawasan: semakin cepat fase berubah seketika, semakin tinggi frekuensi sesaat dari sinyal sinusoidal. Hal ini juga ditunjukkan oleh domain frekuensi pada benar. Spektrum sinyal FM lebih lebar daripada sinyal PM. Seolah-olah sinyal sumber telah dimodulasi frekuensi dengan pita frekuensi yang lebih lebar – bagian bawah sinyal sumber yang berbeda – tanpa pada saat yang sama meningkatkan kecepatan pemrosesan dari informasi.

Karena modulasi fase terlibat, sudut fase (t) harus berubah dalam ritme sinyal sumber. Jika (t) sekarang dibedakan, selanjutnya dikalikan dengan 0,16 dan kemudian diarahkan ke modul "modulasi frekuensi" kami memperoleh sinyal termodulasi fase uPM (t).

Hal ini ditunjukkan pada Gambar 182. PM tidak berhasil dibandingkan dengan FM dalam teknologi transmisi analog. Salah satu alasannya adalah modulasi yang lebih sulit secara teknis. Ini hanya mencapai kepentingan nyata dengan munculnya proses modulasi digital modern.

Kekebalan terhadap gangguan proses modulasi

Transmisi informasi yang aman merupakan kriteria optimasi dalam teknologi informasi dan transmisi. Bahkan dalam sistem transmisi (kabel, relai radio, telepon seluler, telepon satelit) yang terhambat oleh kebisingan atau gangguan lainnya, transmisi informasi yang aman harus dijamin dalam kondisi tertentu. Kondisi yang ditentukan – misalnya dalam mobil yang bergerak. Konsep grafis kekebalan terhadap gangguan “) berasal dari definisi Lange (FH Lange: Störfestigkeit in der Nachrichten- und Messtechnik, VEB-Verlag, Berlin 1983).

Catatan:

Perbedaan umum dibuat antara interferensi aditif dan interferensi perkalian. Interferensi aditif dapat "diperlakukan" dengan relatif mudah ketika mempengaruhi sistem linier. Tidak ada frekuensi interferensi tambahan yang muncul dalam komponen sistem.

Situasinya berbeda dalam kasus konversi non-linier (misalnya modulasi). Di sini – misalnya, sebagai hasil perkalian – produk campuran, yaitu sumber interferensi multiplikasi terjadi pada frekuensi yang paling bervariasi. Di atas segalanya dalam frekuensi sistem multiplex (lihat, misalnya sistem V-10800 pada Gambar 165) komponen non-linier yang rusak dapat menyebabkan interferensi yang sangat kompleks yang sulit ditemukan dan dihilangkan dengan pengukuran.

Perbedaan resistensi terhadap interferensi dapat dijelaskan dengan menggunakan contoh radio AM pada rentang gelombang menengah dan radio FM pada rentang VHF.

Tampaknya ada solusi sempurna – kekuatan sinyal harus sebesar mungkin dibandingkan dengan kekuatan interferensi daya sinyal PSSinyal dan daya interferensi PIF ternyata menjadi persyaratan dasar ketahanan terhadap interferensi Hal ini tampaknya memungkinkan penerimaan bebas interferensi dengan semua jenis modulasi.

Tetapi hal-hal tidak sesederhana itu. Dengan demikian, kinerja transmisi ponsel tidak dapat ditingkatkan begitu saja. Selain itu, dalam konteks AM double sideband dengan pembawa, energi pemancar yang terbuang disorot. Bahkan jika tidak ada sinyal untuk transmisi hampir seluruh energi pemancar diperlukan – hanya sebagian kecil dari energi pemancar yang dicadangkan untuk informasi aktual (lihat Gambar 154 kanan bawah).

Sejak tahun 1936 Armstrong, penemu penerimaan radio dengan tahap mixer (lihat Gambar 168), meningkatkan kekebalan terhadap interferensi FM dibandingkan dengan AM, namun dengan harga bandwidth yang jauh lebih besar. digunakan dalam rentang MW (535 – 1645 kHz) karena dalam pita frekuensi yang relatif sempit ini lebarnya sekitar 1,1 MHz jumlah saluran radio bagaimanapun juga relatif kecil. Dengan jarak 9 kHz antara pemancar ini menghasilkan 119 saluran radio yang berbeda di Eropa.

Namun, kesulitan ini hilang dengan eksploitasi teknis dari rentang frekuensi yang sangat tinggi setelah 1945. Dalam rentang VHF, jarak frekuensi menengah pemancar 300 kHz ditentukan cukup untuk FM. Selain resistensi yang lebih besar terhadap interferensi FM di rentang frekuensi yang sangat tinggi terdapat lebih sedikit sumber interferensi eksternal Berkat keterbatasan rentang oleh cakrawala – sebagai akibat dari propagasi gelombang elektromagnetik kuasi optik garis lurus dalam rentang VHF, pemancar jauh hanya menghasilkan interferensi di bawah ekstrim kondisi.

Penyelidikan teoretis mengejar strategi yang benar dalam permintaan mereka untuk sebesar mungkin peningkatan pergeseran fase yang dapat digunakan dari PM untuk meningkatkan ketahanan terhadap interferensi. Sekarang harus ditentukan berapa banyak bandwidth tambahan di PM yang diperlukan dan apa efeknya pada FM akan.

Perbedaan antara kedua jenis modulasi FM dan PM dapat dilihat dari Gambar 182. Dalam kasus FM amplitudo LF dan nilai operasi dari sinyal sumber dan kenyaringan sesaat sebanding dengan pergeseran fasa. kasus FM ini tidak berlaku. Dengan kenyaringan yang sama, dalam kasus FM resistensi terhadap interferensi sebanding dengan pergeseran fasa memburuk semakin tinggi frekuensi rendah sesaat dari sinyal sumber. Ini berarti bahwa dalam kasus FM resistensi terhadap interferensi berada dalam hubungan timbal balik dengan frekuensi rendah modulasi. Hal ini terbesar dengan frekuensi modulasi terendah.

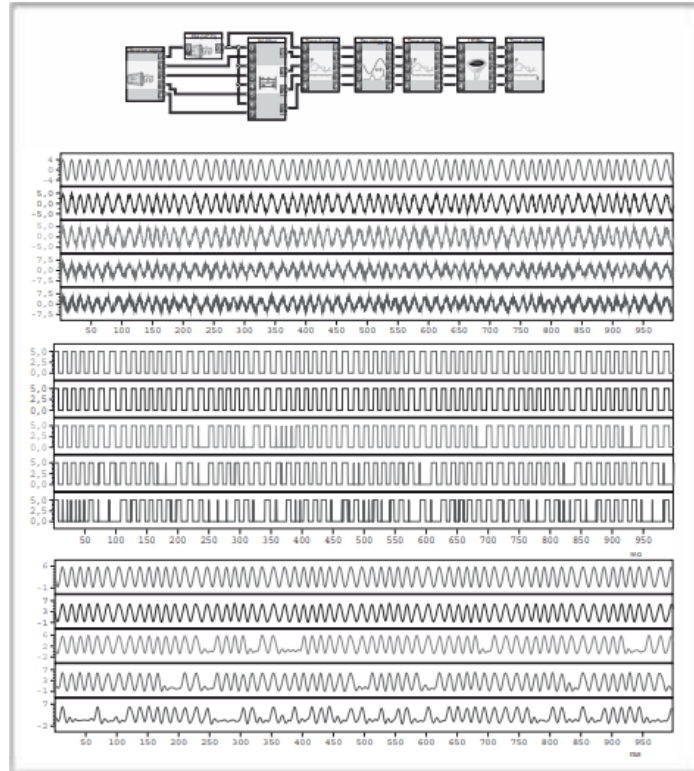
Cacat ini dapat dihilangkan dengan meningkatkan frekuensi modulasi tinggi dalam amplitudo dengan koreksi respons frekuensi menggunakan filter highpass. Hal ini dikenal sebagai preemphasis. Di penerima, ukuran ini dibalik menggunakan filter lowpass. Hal ini disebut deemphasis.

Tapi interferensi industri seperti pulsa juga berhasil ditekan. Namun, segera setelah kekuatan medan yang dapat digunakan mendekati kekuatan medan interferensi, kualitas transmisi turun dengan cepat. Dalam kasus radio VHF, interferensi sinyal transmisi terlihat di built-in - daerah perkotaan. Beberapa sinyal yang dipantulkan dari dinding bangunan tumpang tindih di antena mobil-motor sedemikian rupa sehingga kekuatan medan yang dapat digunakan cenderung nol. Pada lampu lalu lintas seringkali hanya perlu memindahkan kendaraan beberapa kaki untuk mendapatkan penerimaan yang jauh lebih baik.

Dalam kasus FM dan PM seluruh informasi terletak pada persilangan nol dari sinyal pembawa. Selama ini dipertahankan dalam kasus interferensi penghapusan lengkap interferensi dapat dilakukan. Segera setelah interferensi berubah nol distribusi perlintasan sinyal termodulasi secara nyata, aliran informasi yang dapat digunakan hancur. Lihat Gambar 183 dalam hubungan ini.

Catatan:

Mikroelektronika modern menciptakan solusi yang jauh lebih baik melalui pemrosesan sinyal digital. Dengan teknologi radio digital baru (Digital Audio Broadcasting DAB) penerimaan kualitas HiFi yang praktis bebas gangguan akan dimungkinkan selain banyak kemungkinan teknis baru berkat proses modulasi baru.



Gambar 183: PM dan FM: informasi terletak pada titik nol penyeberangan

Tesis ini segera menyarankan sebuah eksperimen. Ini harus ditunjukkan bahwa seluruh informasi terletak pada persimpangan nol. Juga: jika interferensi (di sini noise) meningkat, semakin banyak informasi yang hilang.

Seperti diagram blok dan blok sinyal teratas (segmen waktu 1) menunjukkan sinyal PM atau FM murni pertama kali dihasilkan (sinyal mana yang benar-benar hanya dapat diputuskan ketika sinyal sumber tersedia). Pada empat saluran tambahan, jumlah sinyal yang meningkat noise ditambahkan ke sinyal ini.

Modul "posisi nol" sekarang memicu pada posisi nol dari lima sinyal ini ke tepi naik dan turun secara bergantian. Seluruh blok sinyal tengah hanya menampilkan informasi yang terkandung dalam posisi nol. Distorsi informasi yang dihasilkan oleh interferensi dapat Pada blok sinyal ketiga (segmen waktu 3) hasilnya dapat dilihat. Pada rangkaian atas sinyal tidak terdistorsi lengkap diambil sepenuhnya (waktu dipindahkan). Dengan demikian, tesis terbukti. Dalam kasus empat sinyal berikutnya gangguan – seperti kebisingan – meningkat dari atas ke bawah.

Dengan metode yang lebih cerdas, akan sangat mungkin untuk menghilangkan gangguan-gangguan ini juga.

Teori informasi praktis

Untuk meringkas dapat dikatakan bahwa FM dan PM adalah contoh yang baik dari prinsip teori informasi bahwa peningkatan bandwidth sinyal pemancar meningkatkan ketahanan terhadap interferensi.

Penerjemahan hasil teoretis ke dalam praktik dengan cara pemrosesan sinyal digital dalam beberapa tahun terakhir telah membuka jalan bagi telepon seluler, telepon satelit, penyiaran audio digital (DAB) dan teknologi televisi digital (penyiaran video digital DVB).

Prinsip dasar teori informasi yang disebutkan di atas dihasilkan dari perhitungan matematis yang sangat kompleks berdasarkan statistik dan kalkulus probabilitas. Dalam analisis akhir, hasilnya jelas sejak awal jika kita mempertimbangkan Prinsip Simetri SP (Bab 5) dan kesetaraan dari domain waktu dan frekuensi.

Resistensi terhadap interferensi transmisi dapat ditingkatkan dengan meningkatkan periode transmisi, misalnya informasi yang sama dapat ditransmisikan beberapa kali berturut-turut atau berulang. Karena interferensi pada dasarnya stokastik, sinyal sumber dapat diregenerasi dengan sukses dengan membentuk nilai rata-rata sebagai nilai rata-rata kebisingan (putih) adalah nol.

Meningkatkan panjang transmisi dengan mengulang informasi beberapa kali dalam domain waktu (time multiplex) dengan bandwidth transmisi yang sama meningkatkan kekebalan terhadap interferensi.

Karena Prinsip Simetri, kebalikannya juga harus benar Kita hanya perlu mengganti kata waktu dengan kata frekuensi dan kata panjang transmisi dengan bandwidth transmisi dan sebaliknya.

Meningkatkan bandwidth transmisi dengan mengulang informasi beberapa kali dalam domain frekuensi (multiplex frekuensi) dengan panjang transmisi yang sama meningkatkan kekebalan terhadap interferensi.

Model penjelasan yang dipilih dengan multiplex waktu dan frekuensi, yaitu waktu dan frekuensi yang mengejutkan saluran tidak penting. Kekebalan terhadap interferensi umumnya meningkat dengan "peregangan" waktu dan frekuensi

- karena "kecenderungan konservasi" dari sinyal pembawa informasi antara dua segmen waktu atau frekuensi yang berdekatan meningkat (lihat Kebisingan dan Informasi, halaman 58 dan Gambar 40)
- interferensi yang memiliki efek stokastik dalam domain waktu juga stokastik dalam domain frekuensi.

Latihan pada Bab 8

Latihan 1 Modulasi amplitudo AM

- (a) Kembangkan sirkuit yang sesuai dengan Gambar 151 melalui modul "Potong".
- (b) Selidiki spektrum frekuensi sesuai dengan Gambar 151 secara eksperimental menggunakan DASYLab. Atur nilainya sehingga frekuensi operasi dimulai pada $t = 0$ s dan yang lainnya berakhir pada $t = 1$ s. Oleh karena itu, pilih $f = 2,4,8$ Hz dan Panjang blok dan laju pengambilan sampel harus diatur seperti sebelumnya pada pengaturan standar 1024.
- (c) Buat sirkuit yang sesuai dengan Gambar 152 dan Gambar 153. Sebagai sinyal sumber, ambil noise terfilter lowpass.
- (d) Kembangkan generator AM yang dengannya melalui regulator manual pembawa frekuensi pembawa, amplitudo sinyal LF dan offset dapat diatur.

- (e) Kembangkan generator AM melalui modul “penerjemah rumus” yang mengimplementasikan rumus AM yang diberikan pada halaman 236 dan dengannya derajat modulasi m , f_{LF} dan $f_{carrier}$ dapat diatur Pilih $LF = 1$ V.

Latihan 2 Demodulasi sinyal AM

- (a) Kembangkan rangkaian demodulasi yang sesuai dengan Gambar 154. Penyearahan harus ditunjukkan oleh proses "nilai absolut" (modul "aritmatika"), rangkaian RC dengan penyaringan lowpass Lihat juga Gambar 155.
- (b) Variasikan offset dan periksa spektrum sinyal termodulasi menurut Gambar 155.
- (c) Mengapa pita sisi ganda dengan pembawa merupakan proses yang tidak menguntungkan.

Latihan 3 Modulasi sideband tunggal EM

- (a) Rancang sirkuit untuk EM sesuai dengan Gambar 160.
- (b) Atur parameter sesuai dengan Gambar 160. Pilih seperti biasa laju sampling dan panjang blok pada 1024. Pembawa yang sama digunakan di sini untuk modulasi dan rekonversi atau demodulasi.
- (c) Mengapa waktu sinyal sumber yang didemodulasi terhuyung-huyung?
- (d) Rancang sirkuit untuk sideband atas dan bawah sesuai dengan Gambar 160 dan Gambar 161.

Latihan 4 Proses multipleks frekuensi

- (a) Rancang sirkuit untuk pembentukan pra-kelompok dan konversi ulang sesuai dengan Gambar 166 dan Gambar 167. Bandwidth sinyal sumber – noise yang disaring – sesuai dengan bandwidth sinyal telepon 300 -3400 Hz.
- (b) Lakukan tes akhir Anda dalam penggunaan DASYLab dan rancang sirkuit yang sesuai untuk: pembentukan kelompok dasar primer menurut Gambar 166. Apa batasan program DASYLab untuk simulasi dengan mengacu pada pembuatan kelompok dasar sekunder, tersier dan kuarterner?

Latihan 5 Mencampur

- (a) Rancang dan simulasikan tuner AM sesuai dengan Gambar 168. Anda harus menyetel laju sampling kira-kira 2 MHz dan panjang blok setidaknya 1024.
- (b) Setelah itu buat sinyal AM yang realistis dalam rentang gelombang menengah dari 525 hingga 1645 kHz yang Anda tambahkan pada noise. Cobalah untuk mengambil dan mendemodulasi sinyal AM yang sesuai. Tip: pastikan ada hubungan yang menguntungkan antara sinyal dan level kebisingan.

Latihan 6 Modulasi frekuensi FM

- (a) Biasakan diri Anda dengan fungsi generator FM sesuai dengan Gambar 169.
- (b) Bagaimana Anda mengatur frekuensi tengah FM dan ayunan frekuensi dalam modul "sinyal sumber" (tanpa menggunakan regulator manual)? Dalam percobaan ini pilih sinyal sumber sinusoidal.
- (c) Variasikan ayunan frekuensi dan frekuensi tengah sesuai dengan Gambar 169 menggunakan regulator manual. Perpanjang sirkuit.
- (d) Periksa komposisi dan pengaruh domain frekuensi ayunan frekuensi, frekuensi sinyal sumber dan frekuensi tengah FM terhadap lebar spektrum FM.

Latihan 7 Demodulasi sinyal FM

- (a) Cobalah untuk mendemodulasi sinyal FM di tepi filter lowpass
- (b) Cobalah untuk mendemodulasi sinyal FM dengan frekuensi cutoff yang sama seperti (a) di tepi filter highpass. Bagaimana hasilnya berbeda?
- (c) Ulangi (a) dan (b) dengan sinyal sumber realistis (noise terfilter).
- (d) Rancanglah detektor fasa menurut Gambar 179.
- (e) Cobalah untuk meniru percobaan yang dilakukan pada Gambar 180.
- (f) Pada desain Anda sendiri PLL seperti pada Gambar 181 dan coba atur tegangan kontrol untuk VCO sedemikian rupa sehingga PLL bekerja.

Latihan 8 Perbedaan PM dan FM

- (a) Kembangkan sirkuit yang sesuai dengan Gambar 182 dan lakukan perbandingan PM dan FM sendiri.
- (b) Berikan alasan perbedaan kekebalan terhadap interferensi PM dan FM.
- (c) Mengapa preemphasis dan deemphasis digunakan dalam kasus FM.

Latihan 9 FM dan PM: zero crossing sebagai pembawa informasi

Periksalah tesis ini secara eksperimental yang menyatakan bahwa seluruh informasi dari sinyal PM dan FM terkandung dalam zero crossingnya Lihat Gambar 183.

Latihan 10 Ketahanan terhadap gangguan

Berikan alasan mengapa pelebaran pita frekuensi sambil mempertahankan panjang transmisi dapat meningkatkan ketahanan terhadap interferensi sebagai aturan umum.

BAB 9 DIGITALISASI

Anda mungkin akan berpikir, sekarang kita akan memiliki 'Pengenalan teknologi digital'. Bahkan pada pelatihan tingkat pertama di bidang kejuruan teknik elektro mata pelajaran ini merupakan elemen yang sangat diperlukan dalam program pelatihan.

Ini adalah subjek yang menarik karena dapat didekati tanpa pengetahuan sebelumnya. Ada banyak bahan ajar spesialis, kit konstruksi eksperimental, dan program simulasi untuk PC yang tersedia.

Teknologi Digital Tidak Selalu Berarti Sama

Menghidupkan dan mematikan proses, yaitu dua kondisi – hidup atau mati! Tidak ada gunanya mengikuti jalan yang dilalui dengan baik ini. Namun, ada alasan yang jauh lebih penting untuk melampaui jenis teknologi digital ini. Ini sangat penting untuk kontrol teknis dan masalah pemantauan dari semua jenis tetapi pada dasarnya hanya melakukan satu hal menyalakan atau mematikan lampu atau relai atau kadang-kadang mengaktifkan motor stepper.

Mari kita ambil satu set lampu lalu lintas sebagai contoh – tentu saja aplikasi penting. Hal ini terbatas – seperti semua contoh yang dibahas dalam teknologi digital sebagai mata pelajaran sekolah sampai sekarang

Baik menggunakan komponen digital standar (misalnya seri TTL), sirkuit digital yang dapat diprogram secara bebas seperti GAL (Generic Array Logic) atau FPGA (Field Programmable Gate Arrays) atau bahkan sirkuit mikrokontroler – teknologi digital tradisional di sekolah hingga saat ini membatasi dirinya untuk menyalakan dan mematikan proses.

Dalam Bab 1 kami menjelaskan secara rinci mengapa pendekatan kami memiliki tujuan yang sama sekali berbeda:

Dalam buku ini dan dalam praktik masa kini, hal utama adalah pemrosesan sinyal nyata berbasis komputer melalui "sistem virtual" (yaitu program) yang sejauh mungkin harus seperti DASYLab yang dihasilkan oleh pemrograman grafis dalam bentuk blok diagram.

Pemrosesan Digital Sinyal Analog

Sinyal nyata dalam pengukuran, teknik kontrol otomatis, teknologi audio dan video pertama-tama selalu sinyal analog. Trennya jauh dari pemrosesan sinyal analog oleh sistem analog. Seperti yang telah disebutkan beberapa kali teknologi analog sekarang hanya penting di mana tidak dapat dihindari.

Teknologi sirkuit analog semakin banyak ditemukan di tempat yang tidak dapat dihindari pada sumber dan saluran informasi analog dan pada transisi ke media fisik jalur transmisi.

Contoh terbaik dari tren ini adalah internet, jaringan jaringan komputer yang tak terhitung banyaknya di seluruh dunia. Di mana kita masih menemukan teknologi analog di sini? Kartu suara biasanya merupakan sumber informasi dan saluran untuk sinyal analog

nyata. Ini berisi minimal teknologi analog. Kalau tidak, kita hanya menemukan teknologi analog pada transisi ke dan dari media transmisi kabel Cu, pemandu gelombang optik, radio relai terestrial, dan telepon satelit.

Segala jenis komunikasi (analog) dapat dilakukan melalui internet. Telepon web video, yaitu telepon video di seluruh dunia dengan tarif lokal, adalah langkah terbaru dalam perkembangan ini.

Di sekolah kita memasuki wilayah baru dengan pemrosesan digital sinyal analog nyata. Saat ini tidak ada pedoman atau kurikulum kementerian yang hanya menyebutkan subjek terpenting teknologi informasi modern, yaitu DSP atau pemrosesan sinyal digital.

Saat ini teknologi digital berakhir di sekolah dengan konverter A/D atau D/A, yaitu titik di mana sinyal analog diubah menjadi sinyal digital dan sebaliknya. Ini harus diubah secepat mungkin.

DSP telah memungkinkan sistem pemrosesan sinyal yang benar-benar baru dan fantastis. Sebuah contoh yang sangat baik datang dari bidang diagnosa medis di tomografi komputer, khususnya NMR-tomography (Nuclear Magnetic Resonance). Manusia yang hidup direkam segmen demi segmen dengan menggunakan teknologi pengukur dan disajikan secara bergambar. Dengan menghubungkan data dari setiap "segmen" menggunakan komputer, dimungkinkan diberikan kapasitas komputer yang cukup untuk menavigasi melalui tubuh orang yang hidup, untuk mewakili tulang dan jaringan secara terpisah dan mengenali serta mendefinisikan tumor tertentu secara tepat.

Sangat tidak mungkin untuk mencapai prestasi luar biasa ini dengan menggunakan teknologi sirkuit analog atau teknologi komputasi analog. Contoh lain adalah DASYLab yang kami gunakan. Sistem pemrosesan sinyal yang sangat kompleks dapat diprogram secara grafis dan sejumlah besar detail dapat "divisualisasikan", yaitu diwakili secara gambar.

Pemrosesan digital sinyal analog (DSP) memungkinkan penerapan teknologi informasi (TI) baru, yang tidak dapat direalisasikan dengan menggunakan teknologi analog. Menggunakan komputer, pemrosesan sinyal murni dapat dilakukan secara virtual sesuka hati dengan tingkat presisi yang berbatasan dengan batas alam seperti yang didefinisikan oleh fisika.

DSP juga mengarah pada standarisasi proses pensinyalan. DAB dan DVB (Digital Audio Broadcasting and Digital Video Broadcasting) menggunakan proses pensinyalan yang juga digunakan dalam teknologi modern lainnya, misalnya telepon seluler. Teknologi informasi modern pada akhirnya akan menjadi lebih sederhana dan tidak rumit.

Chip standar tidak hanya mencirikan perangkat keras, proses standar akan mencirikan perangkat lunak sistem pemrosesan sinyal.

Gerbang Ke Dunia Digital: Konverter A/D

Jika DSP membuka perspektif yang begitu mengesankan, kita masih harus memasuki wilayah ini. Masalah utamanya adalah membuat sinyal digital yang setara – rangkaian angka – dari sinyal analog. Istilah konversi A/D telah digunakan untuk menunjuk proses ini.

Ada banyak proses dan varian yang berbeda untuk proses konversi ini. Pada titik ini, hal utama adalah memahami prinsip konverter A/D.

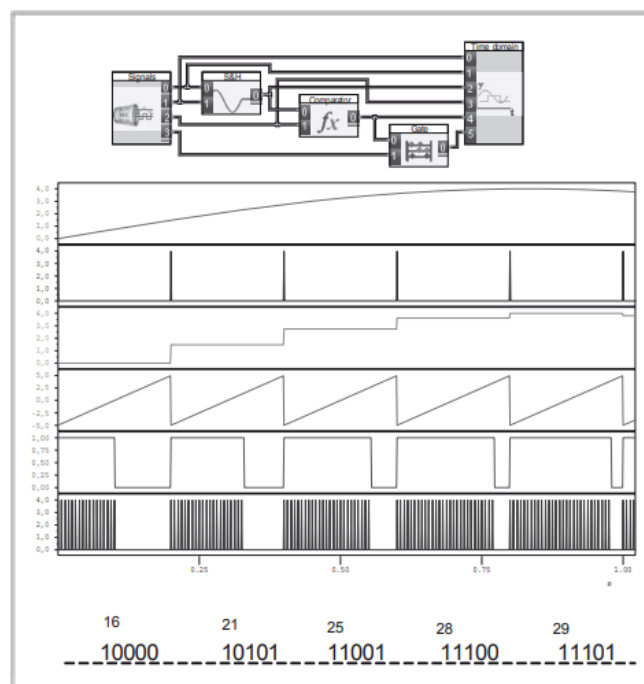
Konverter A/D (dan D/A) selalu merupakan komponen perangkat keras tempat serangkaian proses pensinyalan analog dan digital berlangsung. Berbeda dengan hampir semua proses pensinyalan lain dalam sistem DSP, konversi A/D (dan D/A) tidak dapat dilakukan menggunakan komputer melalui sistem virtual – yaitu program. Pada input konverter A/D terletak sinyal analog (nyata) dan pada output sinyal digital muncul sebagai rangkaian angka.

Angka-angka dikeluarkan dalam sistem angka ganda dan diproses lebih lanjut. Proses konversi berlangsung dalam tiga langkah: pengambilan sampel, kuantisasi, dan pengkodean. Prinsip konverter A/D sekarang disimulasikan menggunakan DASYLab. Proses yang dipilih bekerja sesuai dengan "prinsip pengkodean counter" (lihat Gambar 184).

Di seri atas segmen kecil dari sinyal LF (misalnya, sinyal suara) harus dilihat, di bawahnya pulsa waktu yang "sampel pengukuran" dapat diambil. Ini dan dua sinyal lainnya dihasilkan oleh komponen dan modul "generator fungsi". Dua sinyal atas terhubung dengan modul "Sampel & Tahan". Fitur dari proses ini dapat dilihat pada baris ketiga – pengukuran pada titik waktu pulsa jarum (lihat pulsa waktu pada seri kedua) dihitung dan disimpan, yaitu, "ditahan" hingga pengukuran berikutnya diambil sampelnya.

Masing-masing nilai pengukuran ini harus diubah menjadi angka diskrit dalam waktu antara dua pengukuran. Pada deret keempat terlihat kurva gigi gergaji periodik yang berjalan sinkron dengan pulsa waktu (frekuensi sampling).

Dalam "komparator" berikutnya, sinyal Sample & Hold seperti langkah dibandingkan dengan gigi gergaji periodik ini. Pada keluaran "komparator" terdapat sinyal level 1 („high“) selama tegangan gigi gergaji ini lebih kecil dari nilai Sample & Hold sesaat. Jika tegangan gigi gergaji melebihi nilai Sample & Hold sesaat, sinyal output dari sinyal output komparator melompat ke 0 ("rendah").



Gambar 184: Prinsip Konverter A/D

Di sini proses pengambilan sampel dan kuantisasi ditampilkan secara rinci. Pengkodean sebagai rangkaian angka ganda dapat ditemukan di bagian bawah. Dalam bentuk serial sinyal keluaran digital diwakili frekuensi pulsa clock adalah 5 kali frekuensi sampling karena setiap pengukuran dikodekan dengan 5 bit.

Di seri atas Anda melihat segmen kecil dari sinyal input analog. Anda akan menemukan rincian lebih lanjut dalam teks. Perhatikan bahwa ini simulasi murni.

Informasi ukuran pengukuran sesaat terletak pada panjang pulsa pada keluaran komparator. Dapat dilihat dengan jelas bahwa panjang pulsa meningkat (linier) sesuai dengan peningkatan ketinggian "kurva langkah". Bentuk penyimpanan informasi ini disebut modulasi durasi pulsa (PDM) atau modulasi panjang pulsa (PLM). Harap dicatat bahwa sinyal ini adalah sinyal diskrit nilai tetapi kontinu waktu. Informasi ini hadir dalam bentuk analog.

Sinyal PDM mewakili jendela waktu persegi panjang yang panjang pulsanya tergantung pada nilai terukur seketika. Sinyal ini membuka dan menutup gerbang. Pada input gate terdapat urutan pulsa jarum periodik dengan frekuensi 32 kali dari proses sampling di atas. Tergantung pada panjang pulsa lebih atau lebih sedikit pulsa melewati gerbang dan, tepatnya, antara (minimum) 0 dan (maksimum) 32. Jumlah pulsa selalu diskrit, yaitu 16 atau 17 tetapi tidak pernah 16.23 Sekarang informasi tentang instan pengukuran neo tidak lagi hadir dalam bentuk kontinu analog tetapi dalam bentuk diskrit. Ini adalah proses kuantisasi, seperti yang dijelaskan pada Gambar 148 dan Gambar 149.

Dalam kasus ini, maksimum 32 pengukuran yang berbeda dapat diambil dan didaftarkan. Kelompok pulsa di seri bawah – tidak ditampilkan di sini – dihubungkan dengan pencacah biner yang memberikan jumlah impuls sebagai angka ganda, misalnya 13 pulsa setara dengan angka ganda 01101. Ini adalah proses pengkodean.

Catatan:

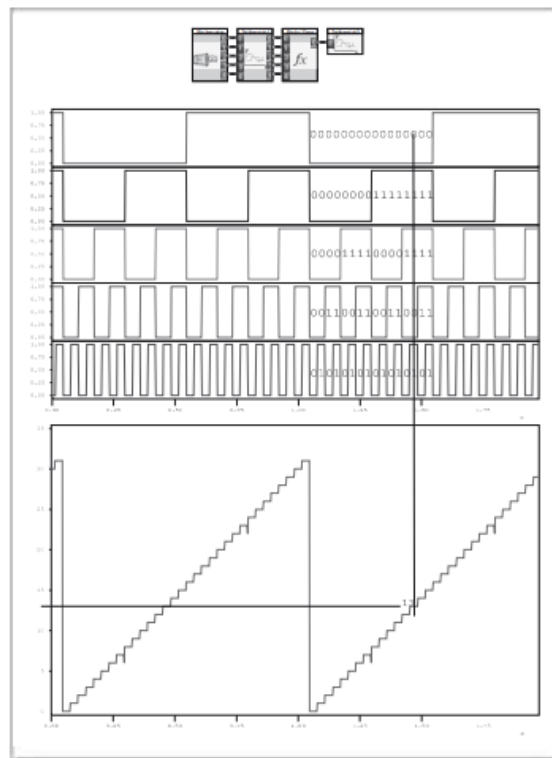
- Dalam praktiknya, "gerbang" yang dijelaskan di sini hanyalah rangkaian AND yang disetel pada "tinggi" pada output ketika (secara instan) kedua input berada pada "tinggi".
- Simulasi ini adalah konverter A/D 5 bit ($2^5 = 32$) untuk 32 nomor berbeda yang dapat dikodekan menggunakan kombinasi 5 bit yang setara.
- Proses pengkodean angka yang dijelaskan di sini sangat sederhana tetapi hampir tidak pernah digunakan dalam praktik. Dalam kasus konverter A/D 16 bit seperti yang digunakan dalam teknologi audio, frekuensi pulsa harus $2^{16} = 65536$ kali lebih tinggi dari frekuensi sampling.
- Ada dua kemungkinan dalam kasus A/D keluaran string angka ganda:
- Output paralel: di sini ada output untuk setiap bit. Dalam kasus kombinasi 5 bit akan ada 5 output. Output paralel biasanya internal dalam chip atau sistem, misalnya antara konverter A/D dan prosesor sinyal.
- Output serial: menggunakan register geser, kombinasi bit dihubungkan dengan saluran tunggal. Akibatnya frekuensi pulsa pada contoh di atas meningkat menjadi lima kali frekuensi sampling. Dalam teknologi transmisi, keluaran serial digunakan hampir secara eksklusif.
- Sinyal digital hadir dalam bentuk serial pada CD audio, yaitu seluruh musik terdiri dari urutan 0 dan 1 ("rendah" dan "tinggi") yang kurang lebih terkesan acak.

Prinsip Konverter D/A

Pada input konverter D/A terdapat angka ganda yang diubah secara internal menjadi nilai analog diskrit. Sinyal keluaran dari konverter D/A dengan demikian, tepatnya, sinyal seperti langkah. Dalam kasus konverter D/A 5 bit, 32 “langkah” yang berbeda akan dimungkinkan.

"Tinggi lompatan" di tepi anak tangga selalu merupakan kelipatan bilangan bulat dari nilai minimum yang ditentukan oleh proses kuantisasi (lihat dalam hubungan ini Gambar 148 dan Gambar 149).

Lima sinyal retangular membentuk generator pola biner dalam simulasi ini yang meningkat dari 00000 ke 11111 dan dari 0 ke 31. Dari atas ke bawah frekuensi dua kali lipat dalam setiap kasus. Ini menghasilkan kurva langkah naik linier atau gigi gergaji periodik. Persis seperti dalam praktiknya, ada beberapa puncak pulsa interferensi yang terlihat. Konverter D/A dirancang murni menurut formula di mana setiap bit dikalikan 1, 2, 4, 8 atau 16 tergantung pada bobotnya.



Gambar 185: Prinsip Konverter D/A (Simulasi DasyLab)

Pengingat: Notasi Posisi Sistem Numerik

Orang Babilonia memiliki sistem bilangan dengan 60 (!) angka yang berbeda . Kita masih membutuhkannya hari ini dalam pengukuran waktu : 1 jam = 60 menit dan 1 menit = 60 detik

Sistem desimal kami menggunakan 10 angka yang berbeda dari 0 hingga 9. Misalnya angka 4096 adalah singkatan dari

$$4 \cdot 1000 + 0 \cdot 100 + 9 \cdot 10 + 6 \cdot 1 = 4 \cdot 10^3 + 0 \cdot 10^2 + 9 \cdot 10 + 6 \cdot 100$$

Jadi angka 10 merupakan dasar dari sistem numerik kita. Posisi angka menunjukkan "nilainya", maka "notasi posisi sistem numerik"!

Sistem desimal memiliki sekumpulan nilai yang berkisar dari 0 hingga 9. Himpunan dasar ini diulangi lagi dan lagi untuk membuat bilangan besar.

Dalam pemrosesan sinyal digital, Sistem Bilangan Biner digunakan. Ada berbagai alasan untuk ini:

- Komponen dan sirkuit elektronik dengan dua kondisi switching ("on" dan "off") dapat diimplementasikan dengan paling sederhana .
- Sinyal dengan dua status adalah yang paling tahan terhadap noise , karena hanya perlu membedakan antara "on" dan "off"
- Dasar matematikanya sangat mudah. Tabel dasar untuk bilangan biner sangat sederhana:

$$0 \cdot 0 = 0; 1 \cdot 0 = 0; 1 \cdot 1 = 1$$

Berapa tahun sekolah yang dibutuhkan untuk mempelajari tabel perkalian kita?

Basis dari sistem bilangan ini adalah 2. Bilangan biner 101101 yang ditulis lengkap adalah setara

$$1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = \\ 1 \cdot 32 + 0 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 45$$

Jadi : $101101_2 = 45_{10}$

Dengan kata-kata: "101101 ke basis 2 sesuai dengan 45 ke basis 10"

Sebuah tes kecil: berapakah angka 4510 dalam "sistem tiga angka", yaitu di basis 3?

Gambar 186: Sistem Bilangan Penting

Satu-satunya hal yang diperlukan dalam buku ini pada prinsipnya adalah empat operasi aritmatika dasar. Namun, Anda juga harus mahir dalam sistem bilangan biner.

Dalam Gambar 185, urutan periodik bilangan ganda yang dimulai dari 0 dan berakhir pada 31 dihubungkan dengan konverter D/A – murni berbasis komputer. Dengan demikian, ini menghasilkan gigi gergaji periodik dan kurva sinyal seperti langkah pada output. Untuk nilai sesaat 011012 pada input nilai 1310 hasil pada output. Lihat dalam hubungan ini Gambar 159 (sistem angka penting)

Konverter D/A yang disimulasikan di sini adalah modul yang dapat memasukkan rumus-rumus matematika. Rumus yang dimasukkan dalam contoh ini adalah

$$IN(0) \cdot 16 + IN(1) \cdot 8 + IN(2) \cdot 4 + IN(3) \cdot 2 + IN(4) \cdot 1$$

atau sebagai alternatif

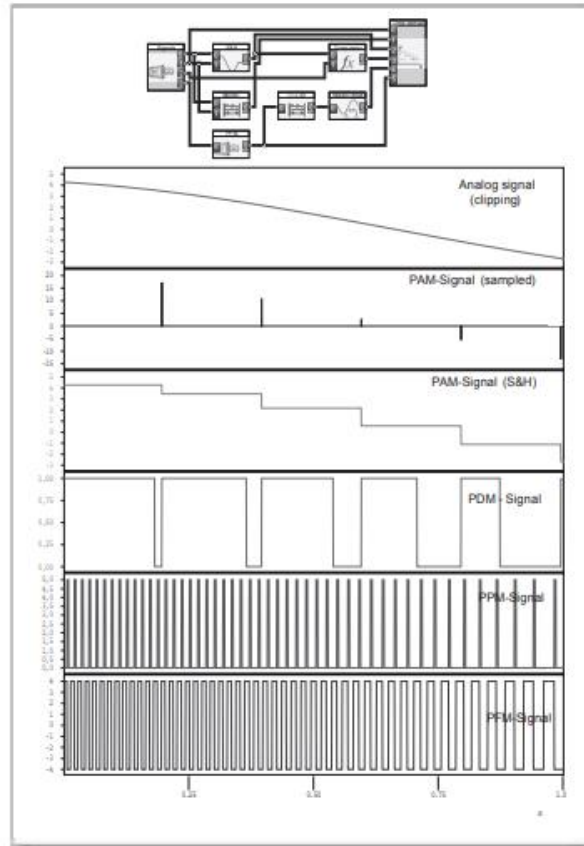
$$IN(0) \cdot 2^4 + IN(1) \cdot 2^3 + IN(2) \cdot 2^2 + IN(3) \cdot 2^1 + IN(4) \cdot 2^0$$

Dengan demikian bit dengan bobot tertinggi terletak pada input IN(0) dan terendah pada IN(4). Harap dicatat bahwa ini adalah simulasi murni yang dimaksudkan untuk menunjukkan prinsip yang mendasarinya.

Proses modulasi pulsa analog

Modulasi durasi pulsa dalam kasus konverter A/D yang ditunjukkan pada Gambar 187 sangat penting dalam pengukuran mikroelektronika dan teknologi kontrol otomatis. Bersamaan dengan proses modulasi pulsa analog ini – sebagai akibat dari panjang pulsa yang dapat dimodifikasi secara terus menerus, informasi tersebut hadir dalam bentuk analog – ada proses modulasi pulsa analog penting lainnya dalam kerangka teknologi pengukuran dan kontrol otomatis, yaitu sebagai berikut

- Modulasi amplitudo pulsa PAM
- PDM modulasi durasi pulsa
- Modulasi frekuensi pulsa PFM
- PPM modulasi fase pulsa



Gambar 187: Proses modulasi pulsa analog yang berbeda

Proses modulasi pulsa ini praktis tidak penting dalam teknologi transmisi. Mereka biasanya berfungsi sebagai proses perantara dalam konversi "nilai pengukuran" analog menjadi sinyal digital.

PAM hanya menjelaskan sampling sinyal analog seperti yang ditunjukkan pada Gambar 184. Proses Sample & Hold hanyalah varian dari PAM.

Ciri dari ketiga proses modulasi pulsa analog lainnya adalah konversi nilai pengukuran analog menjadi panjang waktu analog. Karena unit waktu yang sangat kecil dan presisi tersedia dalam mikroelektronika berkat teknologi kuarsa, perbandingan waktu dapat dilakukan dengan sangat akurat menggunakan instrumen mikroelektronika.

Dalam Gambar 187 proses modulasi pulsa analog yang berbeda diperlihatkan. Konversi A/D menurut Gambar 184 telah dimodifikasi dan ditambahkan ke:

- Sinyal PPM diperoleh dengan memicu pada tepi negatif sinyal PDM. Lebar pulsa sinyal PPM diatur dalam menu modul pemacu.
- Sinyal PFM diperoleh dengan modulator frekuensi. Untuk tujuan ini offset dan amplitudo sinyal LF keluaran 5 dari modul generator fungsi – diubah sesuai.

Untuk mendapatkan sinyal yang ditampilkan, rangkaian simulasi konverter A/D dimodifikasi dan ditambahkan.

DasyLab Dan Pemrosesan Sinyal Digital

Kami telah bekerja dengan DASYLab dari bab pertama dan seterusnya, yaitu dalam analisis akhir kami telah melakukan pemrosesan sinyal berbasis komputer. Dalam bab-bab yang membahas prinsip-prinsip dasar, hal ini tidak disebutkan secara khusus. Untuk alasan pendidikan, kesan yang diberikan adalah bahwa kita berurusan dengan sinyal analog. Hampir semua Gambar yang sesuai muncul untuk menunjukkan sinyal analog.

Sekarang, bagaimanapun, saat kebenaran telah datang. Pemrosesan sinyal berbasis komputer selalu pemrosesan sinyal digital (DSP). Berikut adalah pengingat singkat tentang apa artinya ini.

Gambar 188 sekali lagi menunjukkan situasi melalui sebuah contoh. Sinyal audio digital dibaca dari disk dan ditampilkan di layar. Secara optik tampaknya merupakan sinyal analog kontinu. Namun, jika menggunakan fungsi lensa, segmen kecil diperbesar, titik pengukuran individual dapat dilihat yang dihubungkan oleh garis lurus. Garis lurus ini dibuat oleh program untuk memudahkan melihat arah (dari sinyal analog asli ini). Mereka tidak hadir untuk pemrosesan sinyal.

Titik-titik pengukuran ini dapat ditampilkan dengan lebih jelas, jika diinginkan. Dengan demikian, setiap titik dapat diwakili tambahan oleh salib kecil atau segitiga. Representasi titik-titik sebagai batang vertikal sangat grafis. Ketinggian batang setara dengan pengukuran. Perlu kita tekankan sekali lagi:

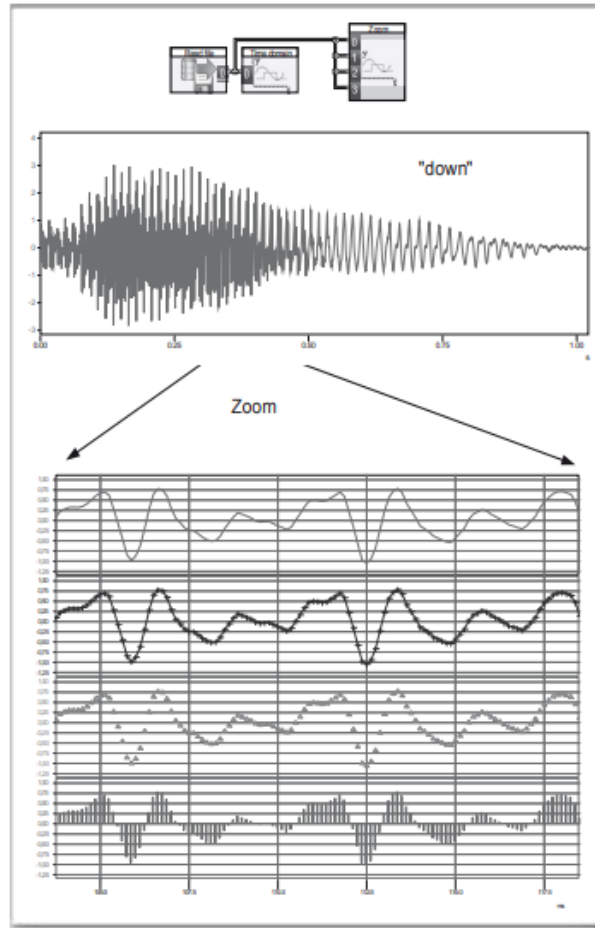
Sinyal digital terdiri secara piktorial dalam domain waktu dari urutan pengukuran diskrit yang berjarak sama yang mereproduksi kurva sinyal analog kontinu (asli) lebih atau kurang akurat.

Dengan cara yang kurang bergambar Gambar 189 menggambarkan sinyal digital ini dengan lebih akurat. Untuk tujuan ini modul "daftar" digunakan. Disini bisa terlihat dengan jelas

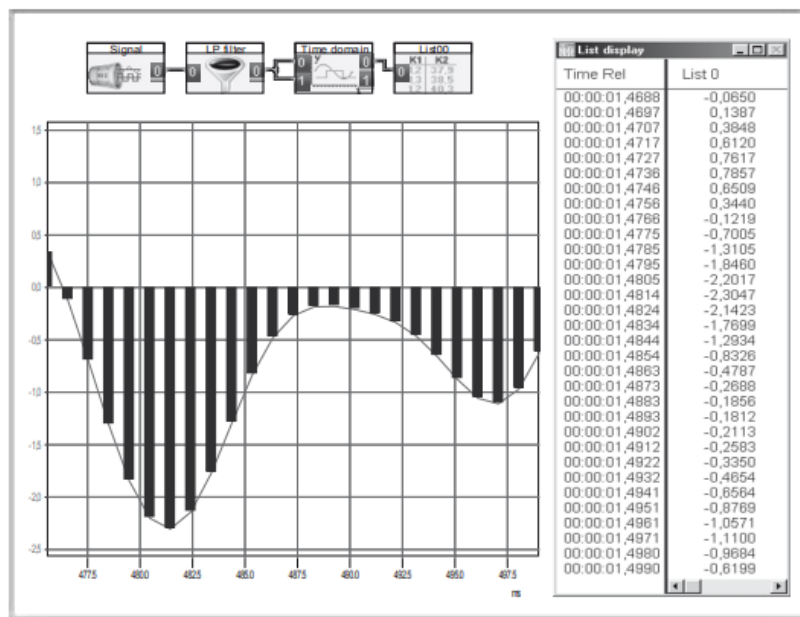
- pada interval waktu berapa pengukuran (sampel) sinyal analog diambil dan
- dengan tingkat akurasi pengukuran apa yang didaftarkan (kuantisasi – lihat Gambar 149).

Sebagai hasil dari kuantisasi, pengukuran adalah diskrit nilai, yaitu hanya sejumlah terbatas pengukuran "bertahap" yang dapat terjadi (lihat juga Gambar 148).

Sinyal digital adalah waktu dan nilai diskrit berbeda dengan waktu dan nilai sinyal analog kontinu. Ini menghasilkan persyaratan khusus yang harus diperhitungkan dalam pemrosesan sinyal digital. Tanpa latar belakang pengetahuan yang diperlukan, kesalahan tidak dapat dihindari.



Gambar 188: Kemungkinan Penyajian Sinyal Audio Digital Menggunakan DasyLab



Gambar 189: Sinyal Digital Sebagai Rangkaian Angka

Penting meskipun representasi visual untuk pemahaman (fisik) pemrosesan sinyal mungkin, pemrosesan sinyal digital DSP dalam domain waktu dan frekuensi hanyalah pemrosesan oleh komputer dari serangkaian angka. Untungnya, komputer menyajikan semua hasil perhitungannya dalam bentuk grafik yang sempurna. Dan sebagaimana manusia berpikir dalam gambar, proses dapat dipahami dan dianalisis tanpa matematika.

Ketepatan representasi deret bilangan dapat dilihat dengan jelas di sini. Informasi waktu diberikan ke empat tempat desimal, angka kelima dibulatkan ke atas. Sampel sinyal audio analog diambil kira-kira setiap s. Pengukuran itu sendiri akurat hanya sampai empat tempat desimal karena konverter A/D 12 bit digunakan untuk perekaman yang hanya memungkinkan $2^{12} = 4096$ pengukuran berbeda. Seseorang seharusnya tidak mempercayai semua yang ditampilkan layar hingga lima tempat desimal.

Sinyal Digital Dalam Domain Waktu Dan Frekuensi

Sinyal digital hanya terdiri dari "sampel" sinyal analog yang diambil secara teratur, biasanya dengan interval yang sangat singkat.

Pertanyaan yang paling penting adalah – bagaimana komputer tahu tentang kurva sinyal antara titik-titik pengukuran mengingat bahwa, setidaknya secara teoritis, sinyal analog bahkan antara dua segmen waktu kecil memiliki jumlah nilai yang tak terbatas?

Perbandingan berikut memberikan indikasi pertama dari jawaban yang lebih tepat:

- Setiap foto atau gambar yang dicetak terdiri dari sejumlah titik yang terbatas. Ukuran partikel film menentukan resolusi foto dan dalam analisis akhir konten informasinya
- Sebuah gambar televisi dan film apapun menyampaikan kesan perubahan "analog" terus menerus dalam urutan gerakan meskipun hanya 50 gambar individu (setengah) yang ditransmisikan per detik dalam kasus televisi.

Ini adalah ide yang baik – seperti pada Bab 2 – untuk memulai dengan sinyal digital periodik. Fitur dasar sinyal digital dan sumber kesalahan dalam pemrosesan sinyal digital berbasis komputer sekarang akan dieksplorasi langkah demi langkah menggunakan eksperimen yang sesuai.

Panjang Periode Sinyal Digital

Bagaimana prosesor atau komputer mengetahui apakah sinyal sebenarnya periodik atau non-periodik karena hanya menyimpan data atau pengukuran dari "panjang blok" yang diberikan? Bisakah dia merasakan seperti apa sinyal awalnya dan seperti apa nanti? Tentu saja tidak. Untuk alasan ini sekarang kita akan memeriksa secara eksperimental tanpa banyak menduga sebelumnya bagaimana komputer atau DASYLab mengatasi masalah ini.

Catatan:

- Panjang blok n tidak menunjukkan waktu tetapi hanya jumlah pengukuran yang disimpan antara
- Hanya penyertaan frekuensi sampling f_s yang menghasilkan sesuatu seperti "panjang sinyal" t .

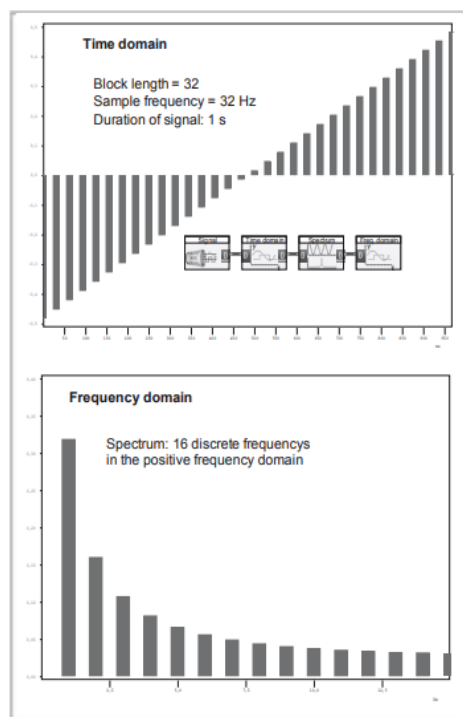
Jika TS adalah periode waktu antara dua nilai sampling, berlaku $f_s = 1/TS$. Karenanya "Panjang sinyal" $t = n \cdot TS = n/f_s$

Untuk Gambar 190 misalnya "panjang sinyal" $t = n \cdot TS = n/f_s = 32/32 = 1$ s

- Panjang blok dan laju pengambilan sampel diatur dengan DASyLab oleh item menu A/D
- Panjang sinyal t akan selalu 1 detik jika laju pengambilan sampel dan panjang blok diatur pada level yang sama di item menu A/D
- Sangat mencolok bahwa panjang blok n dalam item menu A/D selalu dipangkatkan 2 mis. $n = 24, 25, \dots, 210, \dots, 213$ atau $n = 16, 32, \dots, 1024, \dots, 8192$. Ada alasan penting untuk ini. Hanya spektrum frekuensi yang dapat dihitung dengan sangat cepat melalui algoritma FFT (FFT: Transformasi FOURIER Cepat).

Dalam Gambar 190 panjang blok n dan frekuensi sampling f_s diatur pada 32. Sebuah gigi gergaji (berkala) 1 Hz dipilih sebagai sinyal karena kita sangat akrab dengan spektrumnya dari Bab 2. Di atas sinyalnya adalah untuk terlihat pada domain waktu dan paling bawah pada domain frekuensi.

Panjang sinyal t sama dengan periode panjang.



Gambar 190: Sinyal Digital Dalam Domain Waktu Dan Frekuensi (Gigi Gergaji 1Hz)

Panjang blok pendek ($n = 32$) sengaja dipilih di sini. Nilai individu dapat direpresentasikan sebagai kolom dan sifat waktu diskrit sinyal digital dengan demikian lebih jelas. Selain itu, semua perubahan atau kemungkinan cacat dibandingkan dengan pemrosesan sinyal analog dapat dikenali dengan lebih mudah. Tolok ukur untuk penyelidikan ini diberikan oleh tiga fenomena mendasar yang sejauh ini telah kita perkenalkan: Prinsip FOURIER FP, Prinsip Ketidakpastian UP dan Prinsip Simetri SP.

Dalam domain waktu dua waktu yang berbeda dapat dilihat:

- Panjang sinyal $t (= 1 \text{ s})$,
- Interval waktu antara dua pengukuran $TS (= 1/32 \text{ s})$

Akibat dari Prinsip Ketidakpastian UP dua kali ini harus mempengaruhi spektrum frekuensi:

- Panjang sinyal $t = 1 \text{ s}$ dihasilkan karena Prinsip Ketidakpastian dalam ketidakpastian frekuensi (setidaknya) 1 Hz . Ini menjelaskan mengapa garis atau frekuensi spektrum amplitudo dalam Gambar 190 memiliki jarak 1 Hz . Komputer tidak mengetahui bahwa sinyal tersebut benar-benar periodik.

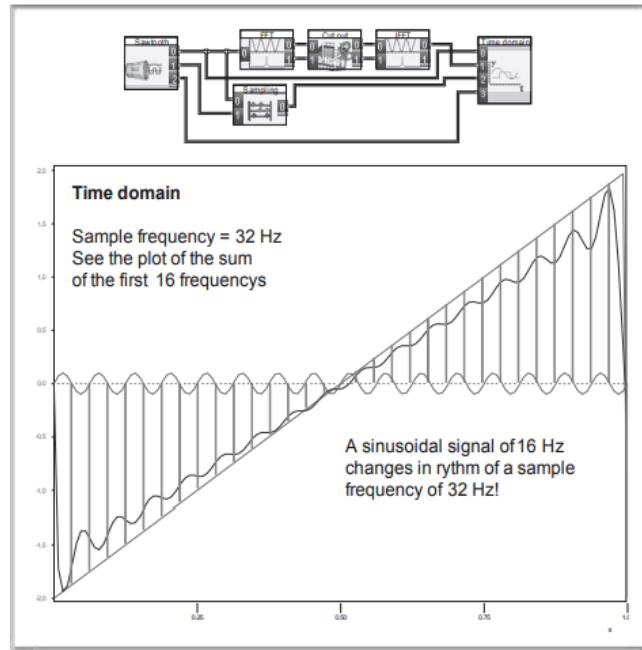
Catatan:

DASYLab menggambarkan ketidakpastian frekuensi ini secara grafis dengan lebar kolom. Dalam hal ini spektrum garis lebih dari sekadar "spektrum kolom".

- Interval waktu antara dua pengukuran – di sini $1/32$ detik – memberikan rentang waktu terpendek di mana sinyal dapat berubah. Pada spektrum amplitudo frekuensi tertinggi yang ditampilkan adalah 16 Hz . Sebuah sinus 16 Hz berubah dua kali per periode. Di babak pertama positif, di babak kedua negatif. Seperti Gambar 191 sangat jelas menunjukkan sinus 16 Hz mampu berubah 32 kali per detik dari daerah positif ke daerah negatif. Ini adalah penjelasan awal mengapa hanya 16 frekuensi pertama dari gigi gergaji yang diberikan.

Penting bahwa Anda harus memeriksa semua gambar ini dalam Gambar yang relevan (atau melalui eksperimen interaktif pada CD). Inilah sebabnya mengapa diagramnya besar dan berisi angka-angka yang dapat diverifikasi.

Pertanyaan yang paling penting – lihat di atas – sejauh ini hanya disinggung. Hasil percobaan sistematis akan ditampilkan pada beberapa halaman berikutnya yang akan memberikan klarifikasi tentang apa yang sebenarnya dirasakan oleh komputer atau program pemrosesan sinyal digital (DSP) dari sinyal analog yang sebenarnya. Gambar bersama dengan teks keterangan benar-benar cukup jelas. Tetapi Anda harus memeriksanya dengan cermat. Sebagai ringkasan teks tambahan dan temuan awal mengikuti. Kesimpulan penting pertama dalam konteks ini disebutkan lagi di bawah ini.

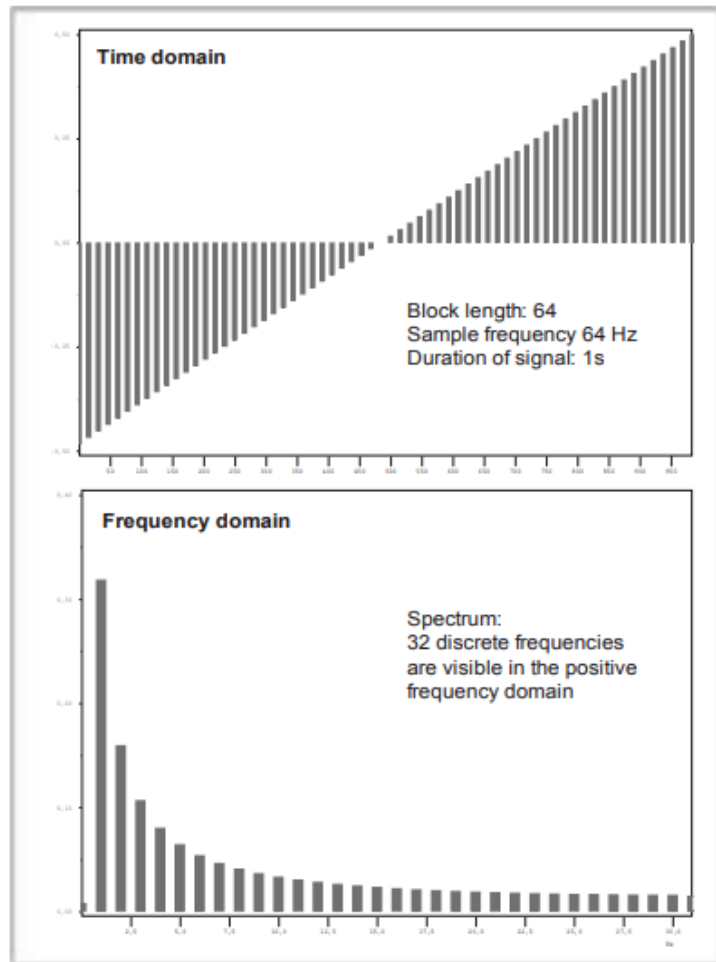


Gambar 191: Panjang Blok, Frekuensi Sampling Dan Bandwidth Spektrum Ditampilkan

Dalam domain waktu, sinyal digital (waktu dan nilai diskrit) berbeda dari sinyal analog nyata (waktu dan nilai kontinu) karena hanya berisi "sampel" sinyal nyata yang diambil secara berkala.

Menggunakan rangkaian yang agak cerdas akan ditunjukkan mengapa dalam Gambar 190 dengan frekuensi sampling 32 Hz frekuensi tertinggi dari spektrum yang ditampilkan adalah 16 Hz. Untuk tujuan ini gigi gergaji dihubungkan dengan filter lowpass yang hampir ideal 16 Hz pada diagram rangkaian di atas. Frekuensi tertinggi 16 Hz seperti dalam spektrum – berada pada keluaran lowpass.

Jumlah dari 16 frekuensi pertama memiliki sinyal input yang ditumpangkan (gigi gergaji 1 Hz) dan 32 nilai sampling gigi gergaji ini. Dapat dilihat dengan jelas bahwa sinyal gigi gergaji 16 Hz mampu memodelkan perubahan waktu tersingkat pada sinyal sampel 1/32 detik. Dengan kata lain, karena sinus berubah dua kali per periode, sinus 16 Hz mengubah polaritasnya 32 kali per detik.

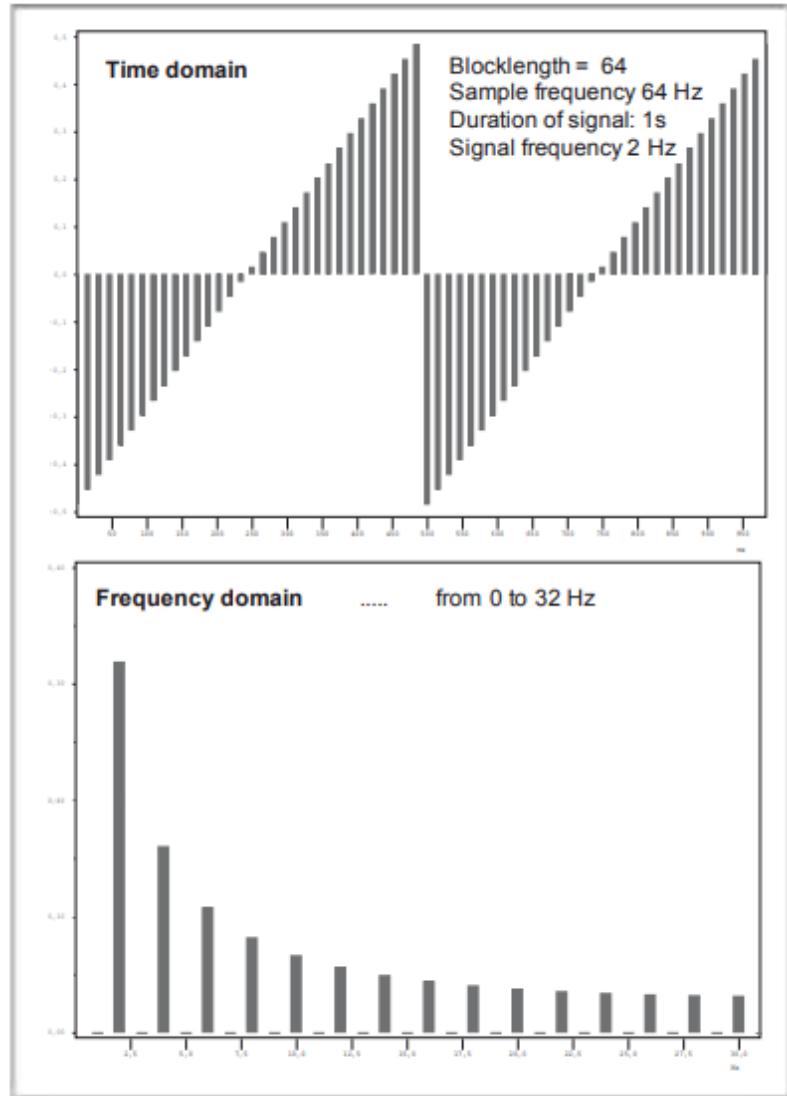


Gambar 192: Panjang Blok Dan Jumlah Frekuensi Spektrum

Ini segera menyarankan pertanyaan-pertanyaan berikut:

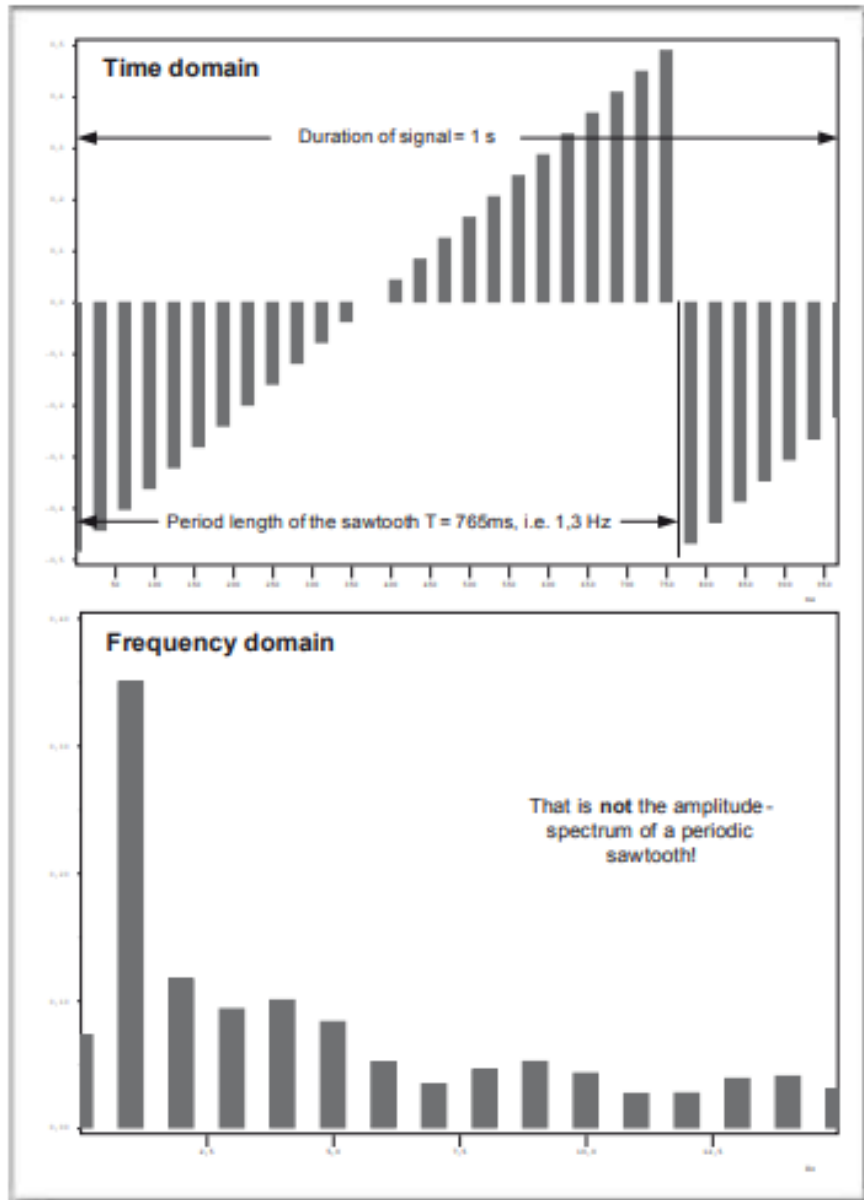
- Dapatkah sinyal asli yang asli disusun kembali secara retrospektif dari potongan-potongan sinyal digital?
- Apakah itu terkandung persis dalam sinyal digital atau hanya sebagian informasi yang ada?

Sebagai perluasan dari Gambar 190, laju pengambilan sampel digandakan ($n = 64$) pada Gambar 192, dan pada Gambar 193 frekuensi gigi gergaji digandakan menjadi 2 Hz dengan laju pengambilan sampel pada $n = 64$. Kesimpulan awal berikut dapat ditarik dari tiga Gambar.



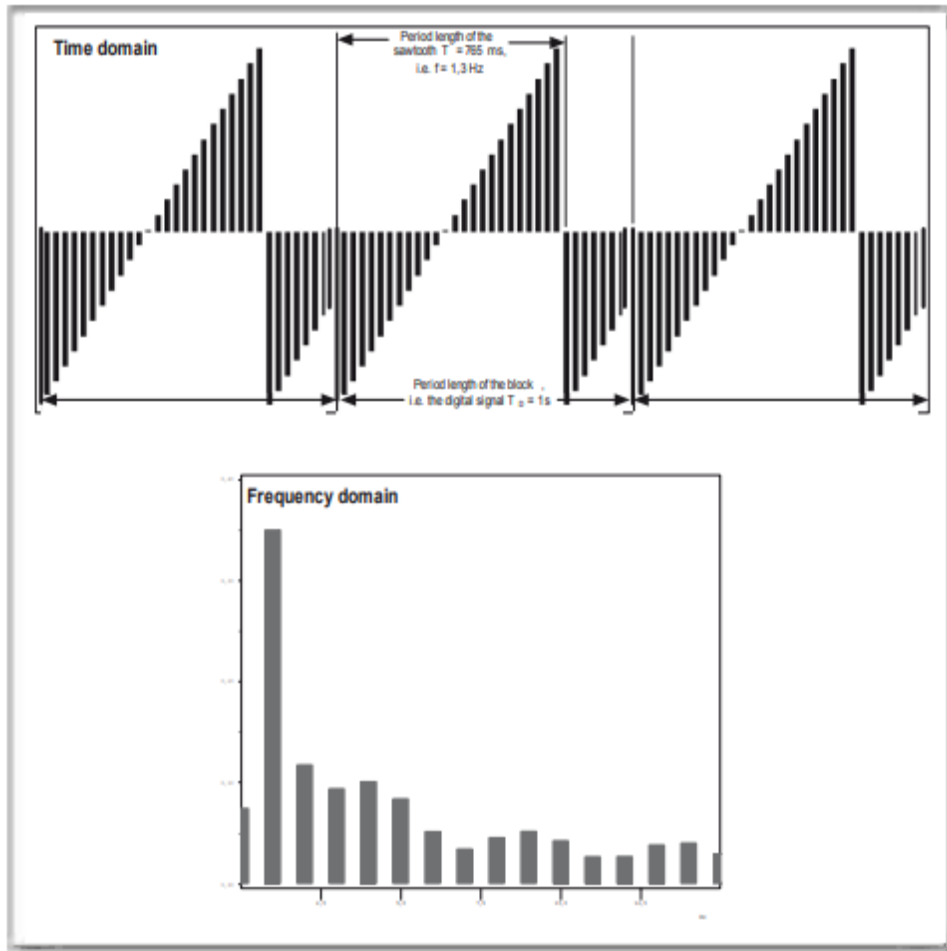
Gambar 193: Domain Waktu Dan Frekuensi Gigi Gergaji 2Hz Disampel Untuk Tepat 1s

Seperti pada Gambar 192, spektrum dalam Gambar ini terdiri dari 32 frekuensi pada $n = 64$. Karena frekuensi gigi gergaji 2 Hz, spektrum hanya berisi kelipatan bilangan bulat dari 2, yaitu 2,4,6,8,Hz. Lebar kolom hanya setengah dari Gambar 190 karena resolusinya berlipat ganda.



Gambar 194: Non-Periodisitas Digital

Di sini juga panjang sinyal adalah 1 s dan frekuensi sampling 32 Hz dengan panjang blok $n = 32$. Namun, frekuensi gigi gergaji adalah 1,3 Hz di sini dan sebagai hasilnya tidak sesuai dengan grid waktu segmen sinyal. Spektrum amplitudo memiliki kurva yang benar-benar tidak beraturan dan tidak identik dengan gigi gergaji periodik. Di sisi lain, ini adalah spektrum garis diskrit dan karenanya harus termasuk dalam sinyal periodik.

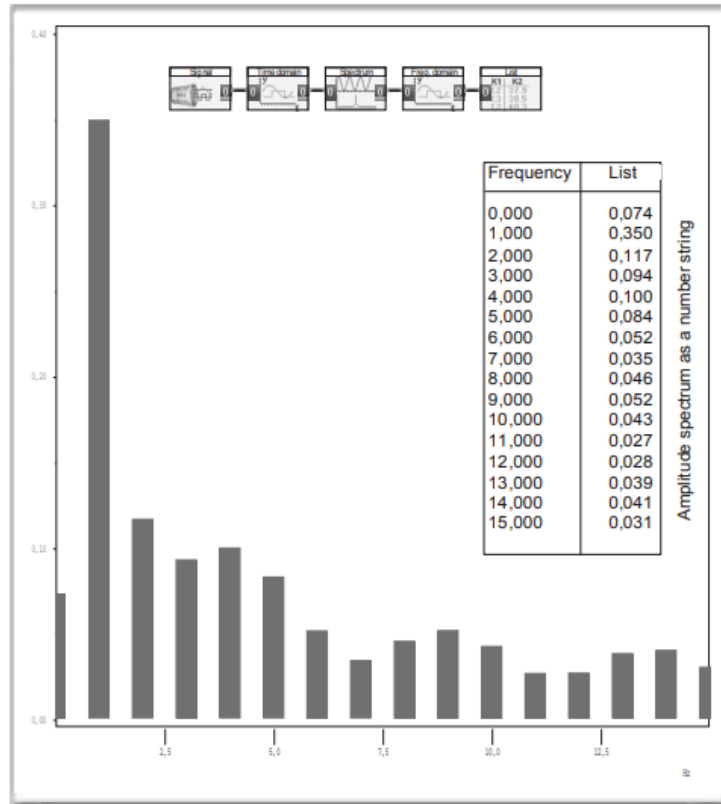


Gambar 195: Panjang Periode Digital

Gambar di atas mengungkapkan bagaimana "kekacauan" dalam domain frekuensi dalam Gambar 194 muncul. Dalam pemrosesan sinyal digital, segmen sinyal yang akan dianalisis selalu dianggap periodik. Panjang segmen sinyal selalu sama dengan panjang periode.

Justru karena alasan ini spektrum sinyal digital selalu merupakan spektrum garis dan jika Anda melihat lebih dekat jarak frekuensi adalah nilai kebalikan dari panjang periode TD. Jadi $f = 1/TD$ berlaku. Dalam Gambar 190 hingga Gambar 194 panjang sinyal selalu 1 s dan dengan demikian jarak frekuensi atau "kolom frekuensi" tepat 1 Hz.

Jumlah frekuensi tampak (positif) dalam spektrum selalu tepat setengah laju sampling n . Ingat bahwa ada $n/2$ informasi lain – yaitu frekuensi negatif atau posisi fase frekuensi (spektrum fase).



Gambar 196: Spektrum Sinyal Digital Sebagai String Angka

Di sini spektrum dari Gambar 195 ditampilkan sekali lagi bersama dengan string angka yang sesuai, yang ditunjukkan oleh "daftar" modul berdasarkan permintaan.

Sebenarnya spektrum frekuensi dijelaskan oleh dua string angka: Daftar frekuensi dan daftar amplitudo osilasi gelombang sinus yang ada.

Panjang periode sinyal digital selalu sama dengan panjang seluruh segmen sinyal yang dianalisis dan diproses. Ini hasil dari panjang blok dibagi dengan frekuensi sampling (sampling rate):

Panjang sinyal

$$\Delta t = n \cdot T_S = n/f_S$$

Ini juga menjelaskan mengapa sinyal digital memiliki spektrum garis diskrit. Jarak frekuensinya adalah

$$\Delta f = 1/T_S$$

Alasan sebenarnya jauh lebih mudah:

Sinyal digital yang akan diproses oleh prosesor secara umum harus dianggap periodik dalam domain waktu karena data domain frekuensi – deretan angka – terdiri dari sejumlah angka diskrit. Sebagai hasil dari karakteristik ini spektrum sinyal digital harus dilihat sebagai spektrum garis dan dengan demikian jarak garis spektrum ini tergantung langsung pada panjang blok dan frekuensi sampling.

Pertimbangan berikut penting untuk beberapa percobaan berikutnya:

- Jika panjang blok dan frekuensi sampling sama, panjang sinyal adalah 1s
- Pada $n = 32 = fS$ spektrum yang ditampilkan berkisar antara 0 hingga 16 Hz, Pada $n = 64 = fS$ spektrum yang ditampilkan berkisar antara 0 hingga 32 Hz
- Pada $n = 256 = fS$ spektrum yang ditampilkan berkisar dari 0 hingga 128 Hz usw.

Spektrum Periodik Sinyal Digital

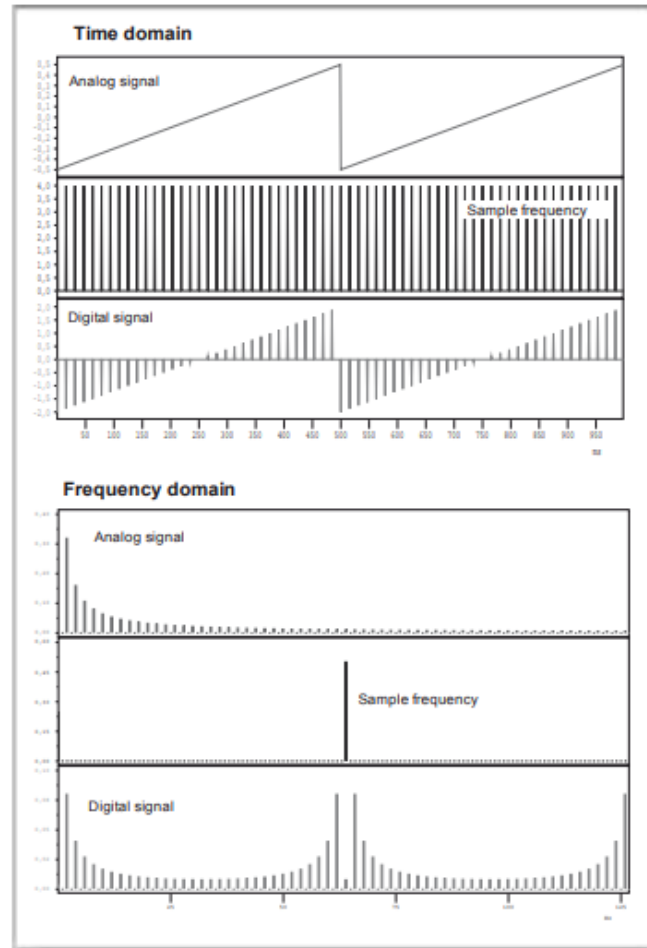
Sebuah fenomena penting sekarang akan dibahas secara lebih rinci yang dijelaskan dalam Gambar 92 melalui Prinsip Simetri SP.

Tidak hanya dalam domain waktu setiap sinyal digital harus dianggap sebagai periodik – panjang periode TD hanyalah panjang dari sinyal yang disimpan sementara – sinyal juga periodik dalam domain frekuensi. Berikut ini sekali lagi alasannya:

Sinyal periodik nyata selalu memiliki spektrum garis. Jarak antar baris adalah konstan. Sebagai hasil dari Prinsip Simetri SP, kebalikannya juga harus benar: garis (pada interval yang sama) dalam domain waktu harus menyiratkan periodisitas dalam domain frekuensi. Karena semua sinyal digital terdiri dari "garis" seperti itu sebagai hasil pengambilan sampel, sinyal tersebut harus memiliki spektrum periodik. Spektrum periodik ini terdiri dari pergantian garis atau nilai diskrit (rangkaian angka) yang sekali lagi menjelaskan periodisitas dalam domain waktu.

Jadi: garis (pada interval yang sama) di satu domain menghasilkan periodisitas di domain lainnya. Jika kedua domain terdiri dari garis (pada interval yang sama) dari sudut pandang komputer, kedua domain harus dianggap periodik.

Menggunakan trik – lihat teks – area di atas spektrum Gambar 193 ditampilkan di sini. Pada pandangan pertama, ini tampak sebagai bisnis yang aneh, tetapi ini hanyalah konsekuensi yang diperlukan dari satu properti sinyal digital – mereka terpisah di kedua domain.



Gambar 197: Visualisasi Spektrum Periodik Sinyal Digital

Prinsip Pengambilan Sampel

Kami belum berada di ujung terowongan karena masalah baru muncul sebagai akibat dari periodisitas sinyal digital dalam domain frekuensi. Di mana spektrum periodik ini dapat dilihat dalam Gambar sebelumnya dari bab ini? Dengan menggunakan eksperimen cerdas yang sistematis, kita harus mencoba melihat bagaimana masalah ini dapat diselesaikan. Itu akan membawa kita ke ujung terowongan.

Gambar 197 di seri atas menunjukkan gigi gergaji periodik analog 2 Hz dan di bawah ini sinyal sampling (urutan pulsa periodik) dan di bawah sinyal digital, di atas dalam domain waktu dan di bawah dalam frekuensi domain.

Jika Anda perhatikan lebih dekat, Anda akan melihat bahwa ada domain frekuensi 0 hingga 128 Hz, berbeda dengan Gambar 193, yang hanya diperpanjang dari 0 hingga 32 Hz.

Namun sinyal digital dari Gambar 193 dan Gambar 197 setuju dalam domain waktu (terlepas dari tingkat pengukuran). Di sisi lain, spektrum sinyal digital terlihat sangat berbeda. Spektrum dari Gambar 193 muncul sebagai kuartal pertama spektrum dari Gambar 197 dari 0 hingga 32 Hz.

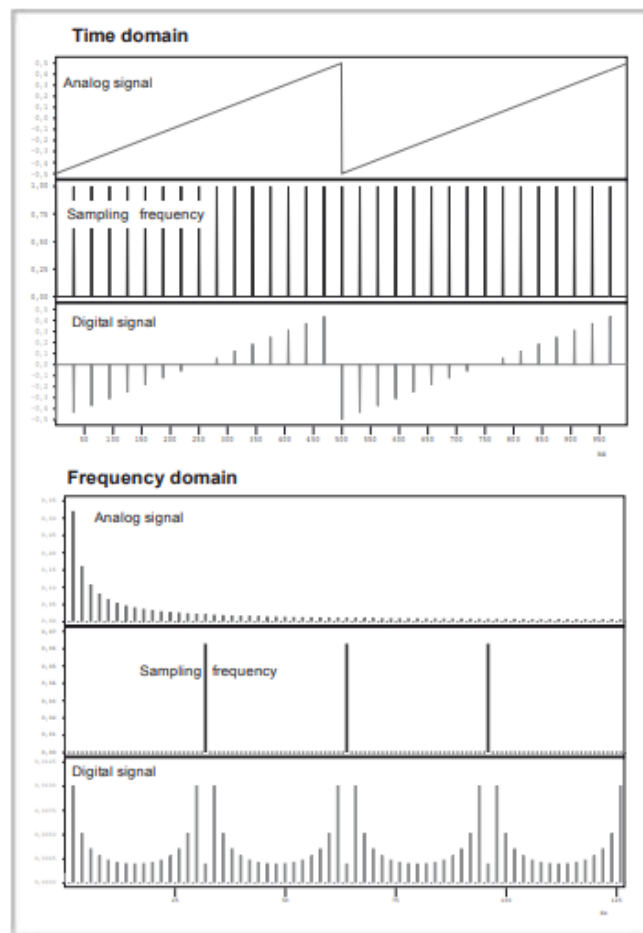
Sekarang untuk trik yang telah kita gunakan. Dalam kasus percobaan pada Gambar 197, panjang blok $n = 256$ dan frekuensi pengambilan sampel 256 Hz dipilih di bagian atas item menu A/D. Seperti yang sudah dijelaskan domain frekuensi hasil 0 sampai 128 Hz.

Dalam rangkaian simulasi yang ditunjukkan di sana, panjang blok $n = 32$ ditetapkan “secara artifisial” oleh periodic urutan pulsa 32 Hz. Hingga saat ini hanya rentang frekuensi dari 0 hingga 16 Hz yang ditunjukkan dengan nilai ini.

Sebagai hasil dari trik ini sekarang kita dapat melihat apa yang ada di atas (dan secara tidak langsung sebagai akibat dari Prinsip Simetri juga di bawah) pita frekuensi Gambar 193, yaitu di atas 32 Hz. Spektrum dari Gambar 193 diulang terus-menerus, kadang-kadang dalam posisi "terbalik" (pita sisi bawah), terkadang dalam posisi reguler (pita sisi atas) berbelit-belit atau dicerminkan dari frekuensi urutan pulsa periodik. Dalam hubungan ini lihat juga Gambar 146. Secara keseluruhan spektrum dari Gambar 193 terkandung dalam Gambar 197 (bawah) sebanyak empat kali ($4 \cdot 32 \text{ Hz} = 128 \text{ Hz}$).

Namun ada masalah. Seperti yang ditunjukkan oleh spektrum sinyal analog, gigi gergaji memiliki spektrum yang sangat luas. Seperti yang sudah kita ketahui dari Bab 2, bandwidth ini cenderung menuju tak terhingga. Untuk alasan ini pita frekuensi saling tumpang tindih dimana pengaruh pita yang berbatasan langsung adalah yang terbesar.

Artinya spektrum pada Gambar 190. Gambar 197 pasti mengandung kesalahan. Ini juga menyiratkan: Jika sebuah sinyal dipalsukan dalam domain frekuensi, hal yang sama juga terjadi dalam domain waktu karena kedua domain terhubung secara tak terpisahkan.



Gambar 198: Tumpang Tindih Pita Frekuensi Spektrum Periodik

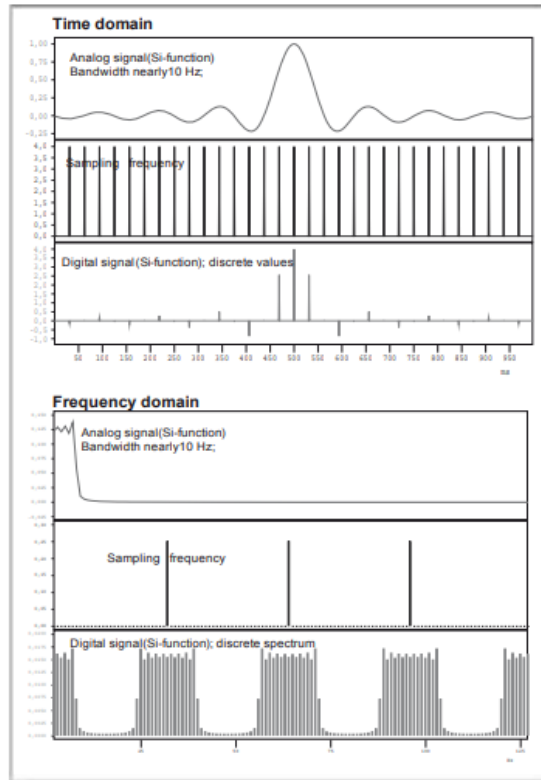
Dibandingkan dengan Gambar 197, laju pengambilan sampel "buatan" dibelah dua. Anda akan menemukan interpretasi dalam teks.

Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 198 jika Anda membandingkan spektrum amplitudo sinyal analog dengan 16 frekuensi pertama sinyal digital. Di bawah garis atau amplitudo lebih tinggi dalam kaitannya dengan frekuensi pertama, terutama di tengah antara dua pita frekuensi. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 198, kesalahan menjadi semakin jelas semakin kecil frekuensi sampling f_s (di sini frekuensi urutan pulsa periodik). Perbandingan Gambar 197 dan Gambar 198 menunjukkan hal berikut: jika frekuensi sampling digandakan, interval antara pita frekuensi menjadi dua kali lipat. Tapi masih ada tumpang tindih tetapi pada tingkat yang lebih rendah.

Cara yang baik untuk menyembuhkan kesalahan tersebut adalah dengan meningkatkan frekuensi sampling dan panjang blok pada saat yang sama (ini berarti bahwa panjang sinyal tidak berubah). Sekarang aspek yang sangat menarik muncul. Seberapa jauh jarak pita frekuensi ini jika frekuensi sampling dan panjang blok secara bertahap cenderung menuju tak terhingga. Benar – mereka akan terpisah "jauh tak terhingga". Tapi kemudian kita hanya akan memiliki sinyal analog dengan kurva kontinu dalam kasus di mana semua nilai sampling akan sangat berdekatan. Dan spektrumnya akan terlihat persis sama seperti pada dua Gambar di seri teratas.

Dari sudut pandang teoretis, sinyal analog mewakili kasus pembatas dari sinyal digital di mana frekuensi sampling dan panjang blok cenderung menuju tak terhingga.

Kemungkinan apa yang dapat dilakukan untuk menghindari distorsi oleh tumpang tindih pita frekuensi dalam pemrosesan sinyal digital? Gambar 199 menunjukkan solusinya. Di sini fungsi S_i (bandwidth frekuensi terbatas) digunakan sebagai sinyal analog. Bandwidth sinyal ini ditunjukkan dalam Gambar adalah 10Hz (di wilayah positif) dan frekuensi sampling adalah 32 Hz. Di antara pita frekuensi sekarang ada celah yang cukup besar dan hampir tidak ada tumpang tindih. Setiap pita frekuensi berisi informasi lengkap yang tidak terdistorsi pada sinyal analog asli dengan panjang 1 detik. Dengan demikian hasil awal selanjutnya adalah:



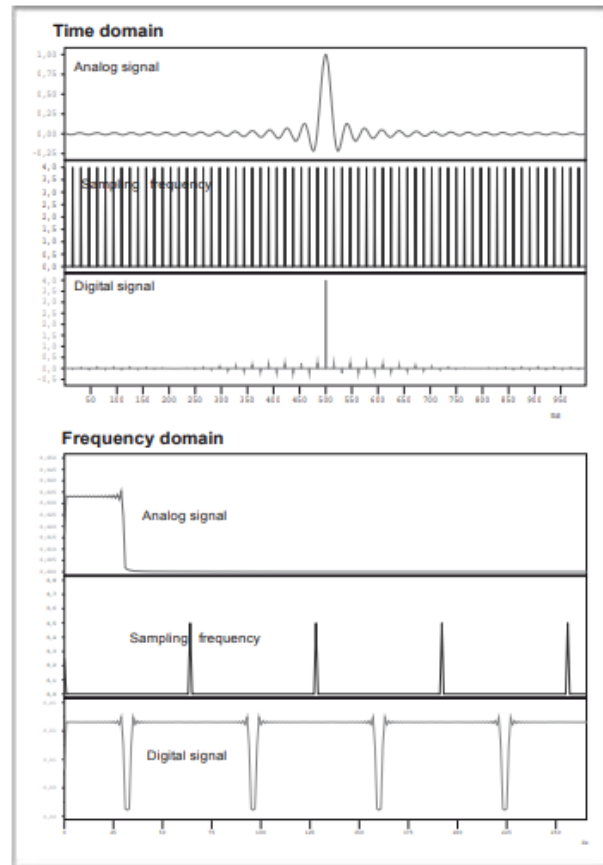
Gambar 199: Spektrum Periodik Dari Sinyal Terbatas Pita Frekuensi

Agar sinyal analog dapat diproses secara digital tanpa distorsi spektrumnya harus dibatasi bandwidth. Dengan kata lain: sebelum sinyal analog didigitalkan, bandwidth harus dibatasi melalui filter analog. Ini terjadi melalui apa yang disebut "filter antialiasing", sebagai aturan sirkuit lowpass analog.

Contoh praktis dari filter antialiasing seperti itu adalah mikrofon. Frekuensi cutoff mikrofon murah praktis di bawah 20 kHz. Akibatnya sinyal listrik yang dihasilkan atau diubah olehnya secara langsung bandwidth terbatas. Jadi untuk eksperimen, mikrofon adalah sumber sinyal yang sangat cocok. Filter antialiasing khusus sangat mahal.

Filter antialiasing (akan lebih baik untuk menulisnya anti-aliasing) mencegah tumpang tindih pita frekuensi sinyal digital yang berdekatan.

Di bagian atas Anda melihat sinyal analog (fungsi Si) dengan pita frekuensi terbatas pada kira-kira 10 Hz. Dengan laju sampling 32 Hz hampir tidak ada tumpang tindih pita frekuensi yang berdekatan.



Gambar 200: Prinsip Pengambilan Sampel: Pada Garis Batas Tumpang Tindih Pita Frekuensi Yang Berdekatan

Di sini bandwidth sinyal analog kira-kira 30 Hz, frekuensi sampling 64 Hz. Dapat dilihat dengan jelas bahwa kasus pembatas "tidak tumpang tindih" spektrum periodik secara praktis diberikan di sini.

Gambar 200 mengeluarkan kucing dari karung. Ini dengan jelas menunjukkan hubungan apa yang harus ada antara frekuensi sampling f_s dan frekuensi tertinggi dari sinyal analog dan frekuensi cutoff dari filter antialiasing, sehingga pita frekuensi sinyal digital hanya menghindari tumpang tindih. Hubungan ini merupakan dasar untuk keseluruhan pemrosesan sinyal digital DSP dan dengan demikian mewakili prinsip keempat buku ini.

Prinsip Sampling (disebut "teorema sampling" dalam literatur): frekuensi sampling f_s harus setidaknya dua kali lebih besar dari frekuensi f_{max} tertinggi yang terjadi di dalam sinyal analog.

Dengan demikian berikut ini memegang:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max}$$

Alasan untuk ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 199 dan Gambar 200. Karena spektrum sinyal analog berbelit-belit dalam posisi terbalik dan teratur (pita sisi bawah dan atas) pada setiap garis frekuensi sinyal sampling, garis frekuensi sampling sinyal harus setidaknya dua kali lebih lebar dari lebar spektrum sistem analog.

Dalam Gambar 200 frekuensi tertinggi dari sinyal analog kira-kira 30 Hz. Frekuensi pengambilan sampel adalah 64 Hz. Pita frekuensi yang berdekatan tidak tumpang tindih atau sedikit tumpang tindih. Hanya selama mereka tidak tumpang tindih sinyal analog dapat diambil dari sinyal digital.

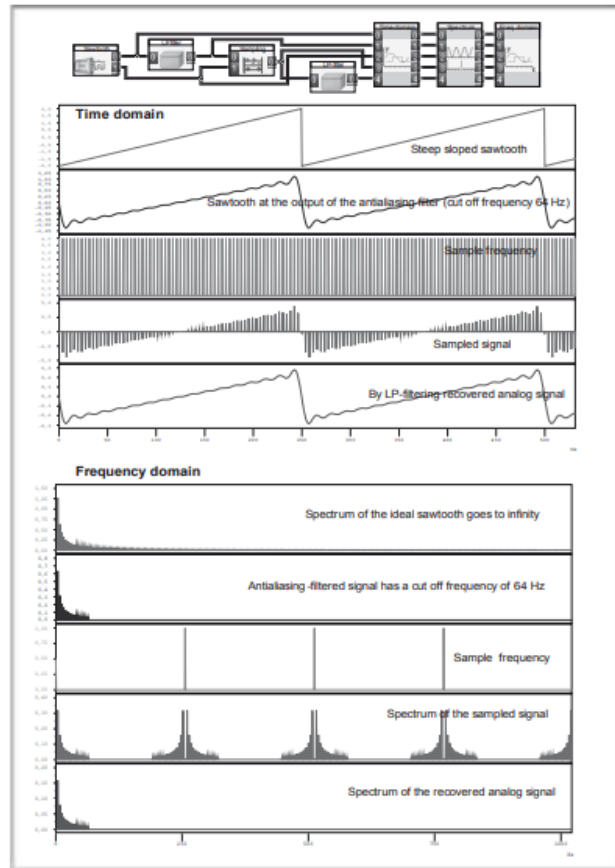
Untuk memeriksa prinsip pengambilan sampel sekali lagi, nilai yang sama harus dipilih untuk frekuensi pengambilan sampel f_S seperti untuk frekuensi f_{max} tertinggi yang terjadi pada sinyal analog. Semua sideband – terdiri dari sideband bawah 'terbalik' dan sideband atas 'reguler' – adalah sebagai hasil dari tumpang tindih hanya setengah lebar yang seharusnya.

Pengambilan Sinyal Analog

Gambar 201 menunjukkan bagaimana sinyal analog asli dapat diambil pada output konverter D/A dari sinyal digital – selama Prinsip Pengambilan Sampel SP dipatuhi – dalam kasus sinyal gigi gergaji terbatas non-frekuensi. Ini terjadi dengan cara yang sangat sederhana. Semua pita frekuensi selain dari pita frekuensi terendah harus disaring oleh filter lowpass (sesuai dengan filter antialiasing). Kemudian hanya spektrum sinyal analog yang tersisa dan dengan demikian sinyal analog dalam domain waktu.

Pengambilan sinyal analog dari sinyal digital yang sesuai terjadi melalui penyaringan lowpass karena dengan cara ini spektrum sinyal analog dan pada saat yang sama sinyal dalam domain waktu dapat diambil.

Tepatnya, konverter D/A menghasilkan kurva seperti langkah (lihat Gambar 185) yang sebagian besar mereproduksi kurva sinyal analog. Filter lowpass berhubungan dengan penyesuaian halus.



Gambar 201: Prinsip Pemrosesan Sinyal Digital Dengan Filter Antialiasing Analog

Dalam contoh ini semuanya berjalan sebagaimana mestinya. Gigi gergaji dengan bandwidth frekuensi tidak terbatas dibatasi melalui filter antialiasing hingga 64 Hz. Sampling rate (virtual) atau frekuensi sampling f_s adalah pada 256 Hz. Dalam hubungan ini kedua nilai tersebut harus berada dalam praktik. Alih-alih filter antialiasing analog, filter digital dibuat menggunakan DASYLab.

Non-Sinkronisitas

Ada jebakan lain, beberapa di antaranya agak tersembunyi, yang dapat menyebabkan hasil yang salah. Mereka terjadi misalnya dengan pemilihan parameter yang salah panjang blok n dan frekuensi sampling f_s . Gambar 202 menunjukkan kasus semacam ini. Awalnya, semuanya

tampaknya baik-baik saja. Sinyal analog dibatasi pada pita kira-kira 30 Hz, frekuensi sampling dan panjang blok ditetapkan pada 512, yaitu sinyal berlangsung tepat 1 detik. Biarkan sinyal yang tersimpan ini sekarang diambil sampelnya dengan mengalikan dengan urutan pulsa yang setara dengan frekuensi pengambilan sampel (lebih kecil) f_s dari 96 Hz, yang menurut prinsip pengambilan sampel seharusnya sudah cukup.

Tetapi spektrum urutan pulsa periodik atau frekuensi pengambilan sampel (virtual) f_s menunjukkan ketidakkonsistenan. Sebenarnya seharusnya hanya berisi frekuensi 96 Hz dan kelipatan bilangan bulatnya. Namun, ini berisi – meskipun dengan amplitudo yang jauh lebih kecil – frekuensi 32 Hz, 64 Hz dll, yaitu semua kelipatan bilangan bulat dari 32 Hz. Pada

masing-masing frekuensi ini spektrum sinyal analog berbelit-belit atau dicerminkan, dimana amplitudo frekuensi ini menunjukkan seberapa kuat sidebands (yang tidak diinginkan) terjadi ke kiri dan kanan.

Akibatnya prinsip pengambilan sampel praktis tidak berlaku, karena sidebands tumpang tindih di sini. Dalam Gambar 202 tumpang tindih sideband kecil ini dan yang besar dapat terlihat dengan jelas. Pada semua peristiwa, pengukuran yang salah hampir tidak dapat dijelaskan terjadi karena ini adalah efek non-linear.

Catatan:

Pertanyaan tentang dari mana “frekuensi menengah” 32 Hz, 64 Hz dll dalam Gambar 202 berasal harus terlebih dahulu diklarifikasi. Ini adalah konsekuensi dari ketidaksinkronan antara panjang blok n (di sini $n = 512$) dan frekuensi sampling f_s dari 96 Hz. Frekuensi pulsa 96 Hz tidak “cocok” di grid 512 yang ditentukan oleh panjang blok. Ini adalah non-periodik dalam grid sebagai $512/96 = 5$ dan 32 tersisa.

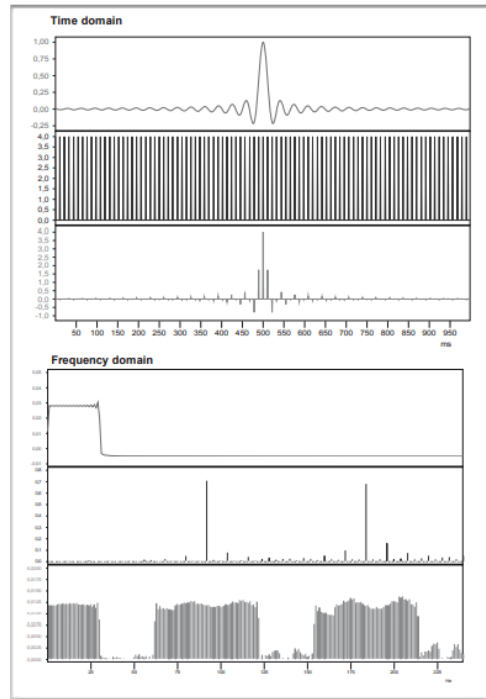
Non-sinkronisasi atau non-periodisitas ini menimbulkan frekuensi kombinasi dengan frekuensi 96 Hz, 192 Hz dll yang sebenarnya dapat diterima. Hasil penjumlahan dan selisih frekuensi dengan bentuk 0 ± 32 Hz, 96 ± 32 Hz dst serta dengan bentuk $(n \cdot 96 \pm m \cdot 32$ Hz) dengan $n, m = 0,1,2,3,\dots$

Bagaimana seseorang bisa mencegah sisa dari yang tersisa di divisi? Nilai apa yang harus dipilih untuk frekuensi sampling f_s ? Panjang blok harus selalu merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi sampling f_s . Karena panjang balok telah ditentukan sebelumnya dan selalu merupakan pangkat 2, yaitu 32, ..., 512, 1024 dll pangkat dua juga hanya mungkin untuk frekuensi sampling.

Contoh:

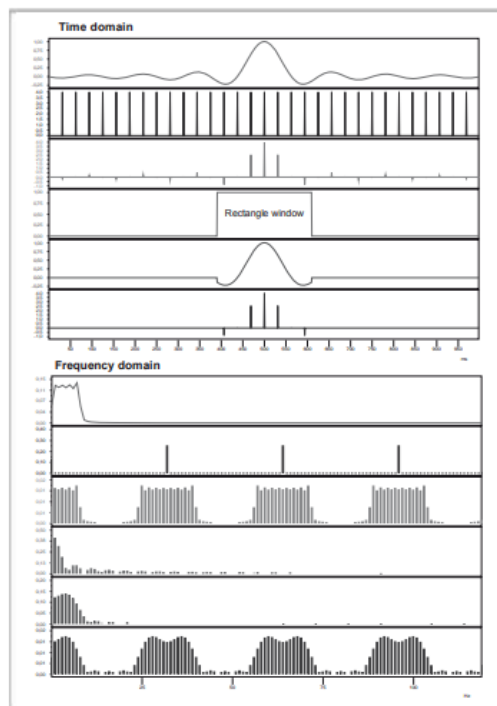
Dalam hal panjang blok 1024 hanya laju pengambilan sampel berikut yang harus dipilih: ...32 (=25), 64, 128, 256, 512, 1024 (=210)

Laju sampling/frekuensi sampling f_s dan panjang blok n harus selalu dalam hubungan bilangan bulat satu sama lain. Kasus yang paling mudah adalah ketika kedua kuantitas dipilih dengan ukuran yang sama.



Gambar 202: Non-Sinkronisitas

Non-sinkronisitas muncul ketika panjang blok bukan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi sampling.



Gambar 203: Distorsi Sinyal Sebagai Akibat Dari Windowing Sinyal

Dalam hal sinyal yang lebih panjang, sinyal harus diproses dalam segmen-segmen. Hal ini menimbulkan masalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 51. Dengan menggunakan contoh jendela persegi panjang, kami menunjukkan sekali lagi bagaimana

spektrum dapat diubah atau terdistorsi. Khas jendela persegi panjang adalah "efek riak" dari spektrum (bawah) dibandingkan dengan spektrum yang benar di seri ketiga (bawah).

Distorsi Sinyal Sebagai Akibat Dari Windowing Sinyal

Sebagai kesimpulan, kami ingin kembali ke pemrosesan digital sinyal analog yang tahan lama – misalnya sinyal audio. Pemrosesan digital dari sinyal analog nyata yang tahan lama selalu menyiratkan – seperti dalam proses pendengaran – pemrosesan sinyal dari segmen sinyal yang tumpang tindih yang sama panjangnya.

Berikut adalah ringkasan singkat berdasarkan uraian di Bab 3 (lihat Gambar 51 – Gambar 54) dan di Bab 4 (lihat Gambar 68 – Gambar 72):

- Sinyal tahan lama harus dianalisis dan diproses dalam blok. Panjang blok ini harus selalu terlihat sebagai pangkat dua (misalnya $1024 = 2^{10}$) karena FFT hanya dioptimalkan untuk panjang blok ini.
- Panjang blok dan laju pengambilan sampel – sesuai dengan Prinsip Pengambilan Sampel – sedapat mungkin harus disinkronkan satu sama lain agar tidak bertentangan dengan panjang periode TD sinyal digital. Ini selalu berlaku jika pemrosesan sinyal di-
- termasuk domain frekuensi. Ingat bahwa hanya kelipatan bilangan bulat dari dasar
- frekuensi $f_D = 1/TD$ dapat ditampilkan dalam spektrum. Pilih laju pengambilan sampel f_S jika memungkinkan sebagai pangkat 2.
- Jendela harus sangat tumpang tindih jika tidak informasi hilang yang terkandung dalam segmen waktu yang terpisah. Informasi tersebut terkandung dalam sinyal keseluruhan.
- Masalahnya dapat diselesaikan dengan menggunakan prinsip-prinsip dasar kita. Seperti yang Anda ketahui, sinyal pembawa informasi dapat, menurut Prinsip FOURIER, dipahami sebagai hanya terdiri dari sinyal sinusoidal dengan bandwidth tertentu. Jika transmisi sinyal sinusoidal ini dijamin, ini juga berlaku untuk informasi yang mereka transpor.
- Untuk sinyal yang tahan lama, hanya mungkin menggunakan fungsi jendela di mana sinyal berjendela dimulai dan diakhiri dengan lembut. Jendela persegi panjang menghasilkan langkah sinyal yang tidak ada hubungannya dengan kurva asli (lihat Gambar 203). Jendela GAUSSian adalah contoh yang tepat.
- Tumpang tindih yang diperlukan dapat divisualisasikan dan dinilai melalui lanskap frekuensi-waktu. Jadi dapat dilihat dari Gambar 73 bahwa tumpang tindih jendela yang lebih pendek tidak akan memberikan informasi lebih lanjut tentang lanskap frekuensi-waktu. Dalam Gambar 72 ada kebutuhan untuk informasi lebih lanjut. Rupanya tumpang tindih jendela masih terlalu jauh.
- Tumpang tindih yang diperlukan dapat lebih tepat diperkirakan dengan menggunakan Prinsip Ketidakpastian:
 - Sebuah jendela dengan panjang t selalu menghasilkan ketidakpastian frekuensi $1/t$. Pemilihan "panjang jendela" menentukan resolusi frekuensi – terlepas dari bandwidth B sinyal!

- ↪ Fungsi transfer filter antialiasing selalu mempengaruhi atau mengubah sinyal Anda. Semakin tinggi kualitasnya – yaitu semakin “segi empat” filter, semakin kecil pengaruhnya.
- Pilih laju pengambilan sampel setinggi mungkin sehingga prinsip pengambilan sampel terlalu terpenuhi.
 - ↪ Dengan cara ini, pita samping berjauhan dalam spektrum seperti pada Gambar 201
 - ↪ Dalam hal ini Anda tidak memerlukan filter antialiasing kualitas tertinggi dengan tepi hampir persegi panjang (sangat mahal) tetapi mungkin dapat menggunakan filter kualitas lebih rendah – misalnya rangkaian RC. Tepi filter terletak di luar bandwidth sinyal (analog) jika frekuensi cutoff dipilih sesuai.
- Jika ada sinyal tahan lama yang harus diproses dalam segmen, aturan berikut berlaku:
 - ↪ Anda mengatur resolusi frekuensi (“ketidakpastian”) dengan “panjang jendela” antara sumber sinyal dan papan multifungsi.
 - ↪ $f \propto 1/T$ berlaku.
 - ↪ Bandwidth B dari sinyal analog atau filter antialiasing menentukan interval waktu dengan jendela yang harus tumpang tindih. $= 1/B$

Catatan:

Dengan kartu suara dengan dua input analog dan dua output analog, frekuensi pengambilan sampel tidak dapat dipilih sesuka hati. Frekuensi pengambilan sampel kartu suara tertinggi adalah 44100 Hz, diikuti oleh 22050, 11025, 8000, 4000, 2000 Hz ...dst. Jika frekuensi pengambilan sampel yang salah dipilih, koreksi otomatis akan memberi tahu Anda.

Karena rentang frekuensi hanya mencapai 20 kHz bahkan untuk mikrofon berkualitas tinggi, frekuensi pengambilan sampel dijamin hingga 44100 Hz. Mikrofon dan kartu suara memberi Anda sistem berkualitas tinggi dan murah untuk penerimaan, pemrosesan, dan reproduksi sinyal analog nyata dalam audiosphere.

Latihan pada Bab 9

Latihan 1

- (a) Mengapa tidak ada perangkat lunak berbasis - yaitu konversi berbasis komputer dari sinyal analog nyata menjadi sinyal digital?
- (b) Apa isi file sinyal digital semacam ini dan bagaimana informasi tersebut dapat disajikan secara gambar?

Latihan 2

- (a) Transformasikan simulasi rangkaian konverter A/D pada Gambar 184 dengan menggunakan DASYLab sedemikian rupa sehingga akurasinya adalah 4 bit atau 6 bit, bukan 5 bit ($2^5 = 32$).
- (b) Alih-alih proses AND gunakan "Relay".
- (c) Bagaimana string angka dalam sistem biner dapat diwakili oleh DASYLab? Apa yang harus ditambahkan ke sirkuit dalam Gambar 184.

Latihan 3

- (a) Jelaskan prinsip pengubah D/A pada Gambar 185, yaitu suku dan rumus dalam modul matematika (biner/deka).
- (b) Jelaskan pengubahan bilangan dalam sistem desimal menjadi bilangan dari sistem yang berbeda dengan basis 2, 3 dan 4 berdasarkan Gambar 186

Latihan 4

- (a) Di mana proses modulasi pulsa analog digunakan dalam praktik?
- (b) Mengapa proses-proses ini begitu penting dalam teknologi pengukuran?
- (c) Bandingkan sinyal modulasi pulsa dalam Gambar 187 dengan mengacu pada bandwidth mereka.

Latihan 5

- (a) Jelaskan perbedaan umum antara sinyal analog dan digital dalam domain waktu
- (b) Kemungkinan grafik apa yang disediakan DASYLab untuk sinyal digital (lihat Gambar 188 dan Gambar 189)?
- (c) Sinyal digital hanya dapat dianalisis dalam segmen. Masalah apa yang dihasilkan dari ini?
- (d) Jelaskan pengaruh dari dua besaran panjang blok n dan laju sampling f_s pada representasi sinyal digital dalam domain waktu. Bagaimana seharusnya kuantitas ini
- (a) ikatan dipilih sehingga sinyal digital pada layar semirip mungkin dengan sinyal input analog?
- (e) Jelaskan istilah “panjang periode digital TD”
- (f) Kapan spektrum sinyal analog periodik direproduksi dengan benar melalui pemrosesan sinyal digital melalui FFT?

Latihan 6

- (a) Mengapa tidak mungkin memproses sinyal dengan langkah-langkah – mis. sinyal gigi gergaji – benar menggunakan pemrosesan digital?
- (b) Mengapa sinyal analog harus dibatasi bandwidth sebelum diproses secara digital?
- (c) Apa pengaruh bandwidth sinyal analog terhadap frekuensi sampling yang diperlukan?
- (d) Merumuskan prinsip pengambilan sampel untuk sinyal analog terbatas pita yang akan diproses secara digital?

Latihan 7

- (a) Jelaskan mengapa sinyal digital harus memiliki spektrum periodik.
- (b) Mengapa setiap sinyal digital – yang disimpan pada panjang blok n – harus dipahami sebagai periodik dalam domain waktu pada panjang blok n ?
- (c) Sinyal analog dapat diartikan sebagai kasus pembatas dari sinyal digital. Seperti apa kasus pembatas ini?
- (d) Dengan cara apa menggunakan DASYLab domain frekuensi pada Gambar 197 – Gambar 203 diperluas sedemikian rupa dibandingkan dengan Gambar 190 – Gambar 196 sehingga periodisitas spektrum dapat dikenali.

Latihan 8

- (a) Sumber kesalahan apa yang dapat muncul jika panjang blok dan frekuensi sampling tidak saling berhubungan bilangan bulat?
- (b) Potong segmen pendek dari sinyal suara yang lebih panjang, misalnya, dengan panjang 0,07 detik dan batasi lebar pita segmen ini karena prinsip pengambilan sampel. Analisis domain frekuensi sinyal ini dengan laju sampling dan panjang blok yang berbeda. Diskusikan perbedaan dalam representasi spektral. Manakah dari berikut ini yang dengan jelas menunjukkan kesalahan? Ada apa di balik ini?

Latihan 9

Anda ingin menganalisis sinyal audio yang tahan lama (bandwidth terbatas) secara spektral tanpa kehilangan informasi melalui lanskap Frekuensi-waktu.

- (a) Bagaimana Anda mendefinisikan resolusi frekuensi lanskap frekuensi-waktu ini?
- (b) Bagaimana bandwidth sinyal dijamin dalam representasi ini?
- (c) Jelaskan pemilihan fungsi jendela yang Anda sukai.

BAB 10 FILTER DIGITAL

Filter sangat penting dalam pemrosesan sinyal. Filter sudah dibahas di Bab 7 – sebagai contoh proses linier. Meskipun fokusnya adalah pada filter analog, filter digital juga ditangani. Keuntungan dari pemrosesan sinyal digital dibandingkan dengan pemrosesan sinyal analog dapat ditunjukkan dengan menggunakan contoh filter digital.

Filter – baik analog atau digital – dianggap dari sudut pandang teoretis sangat rumit. Praktisi cenderung menggunakan buku tabel untuk memilih sirkuit dan dimensi komponen yang digunakan (misalnya resistansi dan kapasitor termasuk toleransi yang diizinkan untuk filter analog yang mereka butuhkan). Dalam hal filter digital, hal ini terlihat serupa pada pandangan pertama: tergantung pada jenis filter, "koefisien filter" yang sesuai diperlukan.

Tujuan dari bab ini adalah untuk menjernihkan kesulitan-kesulitan ini terutama untuk filter digital, untuk menjelaskan dengan jelas cara kerjanya dan pemrosesan komputer. Adapun proses pemrosesan sinyal digital lainnya, hal berikut juga berlaku untuk filter digital: sinyal – dalam bentuk rangkaian angka – diproses oleh komputer. Anda harus dapat merancang dan menggunakan filter digital dengan kualitas terbaik dengan bantuan DASYLab.

Perangkat Keras Versus Perangkat Lunak

Filter analog sangat berbeda dari filter digital baik dalam pendekatan maupun bentuknya meskipun keduanya dimaksudkan untuk melakukan hal yang sama: untuk menyaring rentang frekuensi tertentu dan secara efektif menekan yang lainnya.

Satu perbedaan langsung terlihat:

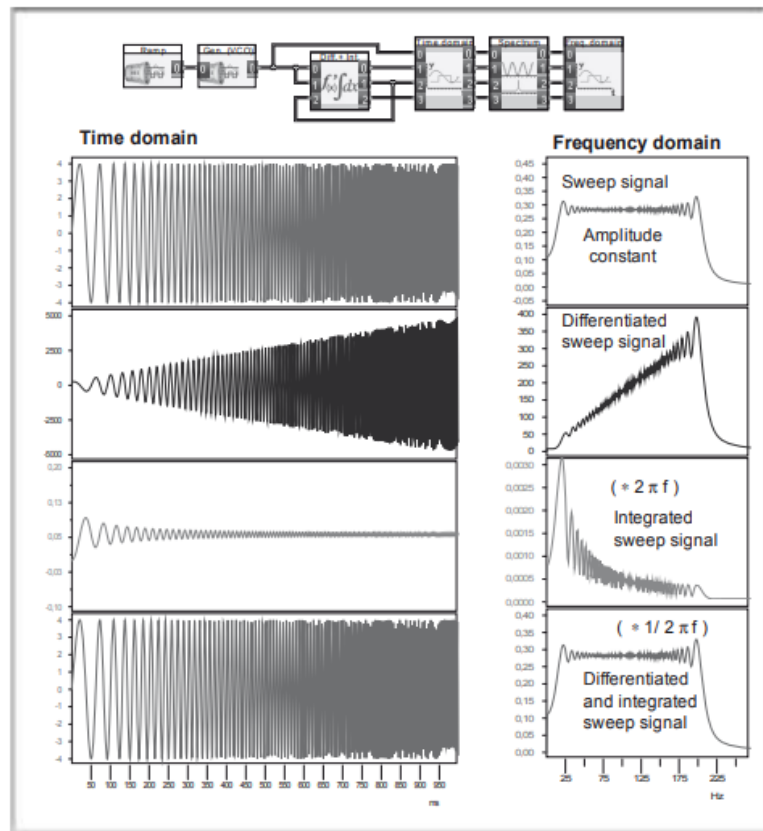
Filter analog adalah rangkaian – biasanya dengan penguat operasional, dan komponen diskrit seperti resistansi, kapasitor (“perangkat keras”).

Sebaliknya filter digital bersifat virtual, sebuah program (“perangkat lunak”) yang menghitung dari rangkaian angka yang sesuai dengan sinyal input rangkaian angka lain yang sesuai dengan sinyal yang disaring.

Catatan: jenis filter khusus seperti filter gelombang permukaan, kristal kuarsa dan filter keramik serta filter dengan resonator mekanis (seperti yang digunakan dalam teknologi frekuensi pembawa) tidak akan dibahas di sini.

Cara Kerja Filter Analog

Fungsi filter analog didasarkan pada perilaku yang bergantung pada frekuensi dari komponen kapasitor C dan induktivitas L (kumparan). Dari sudut pandang matematis, hubungan antara tegangan u dan arus yang mengalir melalui i dalam dua komponen ini digambarkan dengan diferensiasi atau integrasi. Perilaku fisik dapat digambarkan lebih sederhana dan lebih mudah dipahami sebagai berikut:



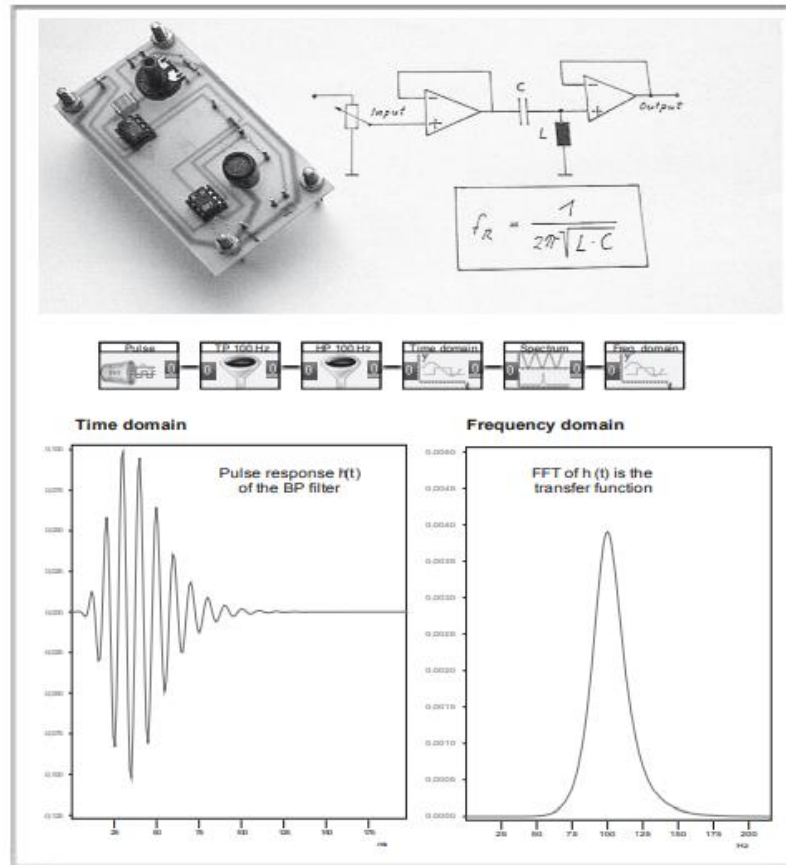
Gambar 204: Filter analog: diferensiasi dan integrasi sebagai proses yang bergantung pada frekuensi

Dalam diferensiasi sinyal sapuan, amplitudo meningkat secara linier (sebanding) dengan frekuensi dan dalam kasus integrasi berbanding terbalik dengan frekuensi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar baik dalam domain waktu maupun frekuensi. Perhatikan efek dari Prinsip Ketidakpastian dalam domain frekuensi (lihat dalam hubungan ini Gambar 104).

Dalam kasus rangkaian resonansi analog yang terdiri dari kumparan dan kapasitor atau bandpass analog, tegangan u dan arus i dihubungkan oleh dua proses diferensiasi dan integrasi ini. Hanya dengan cara ini efek rangkaian resonansi dapat dicapai.

Semakin cepat arus i dalam kumparan berubah semakin besar tegangan induksi sesaat u (hukum induksi).

Semakin cepat tegangan u berubah pada kapasitor, semakin besar arus i yang dikeluarkan atau diisi oleh kondensator (hukum kapasitas).



Gambar 205: Bandpass analog (filter resonansi) dan representasinya menggunakan DASYLab

Di atas Anda melihat rangkaian bandpass analog (filter resonansi) di mana rangkaian resonansi seri L-C bersama dengan dua penguat operasional membentuk filter. Penguat operasional dihubungkan sebagai "konverter impedansi". Di sini resistansi input cenderung menuju tak terhingga (sebagai akibatnya koil tidak "memperhatikan" bahwa sinyalnya "ditarik") dan impedansi output cenderung ke nol (ini berarti tidak ada resistansi tambahan yang dialihkan ke rangkaian). kasus frekuensi resonansi f_R resistansi (atau "impedansi") terkecil, akibatnya arus terbesar dan penurunan tegangan pada koil dan kapasitor mencapai nilai maksimumnya, yang mungkin jauh lebih besar daripada tegangan input. dipilih pada nilai yang sangat kecil melalui pembagi tegangan input sehingga penguat operasi tidak over-drive.

Ini semua adalah masalah yang tidak ada pada DASYLab atau pemrosesan sinyal digital. Di bawah ini Anda melihat rangkaian DASYLab yang setara dengan filter resonansi analog. Filter resonansi diwakili oleh rangkaian rangkaian lowpass dan highpass dengan frekuensi cutoff 100 Hz. Respons pulsa $h(t)$ adalah "sinyal sinusoidal pendek" 100 Hz yang sebagai akibat dari Prinsip Ketidakpastian berjalan seiring dengan "ketidakpastian spektral" sekitar 100 Hz dari kurva filter.

Seperti yang telah dibahas secara rinci dalam Bab 7 (lihat Gambar 130) dalam kasus sinyal input sinusoidal, sebuah sinus muncul pada output diferensiator yang amplitudonya

sebanding dengan frekuensi. Dalam kasus integrasi – sebagai kebalikan dari diferensiasi amplitudo berbanding terbalik dengan frekuensi.

Rangkaian resonansi sederhana sangat selektif frekuensi, yaitu sensitif terhadap perubahan frekuensi. Ini adalah rangkaian serial atau paralel yang terdiri dari kumparan dan kapasitor atau induktivitas L dan kapasitas C . Dalam Gambar 205 terdapat filter resonansi analog (bandpass) yang cukup baik dalam hubungannya dengan dua penguat operasional.

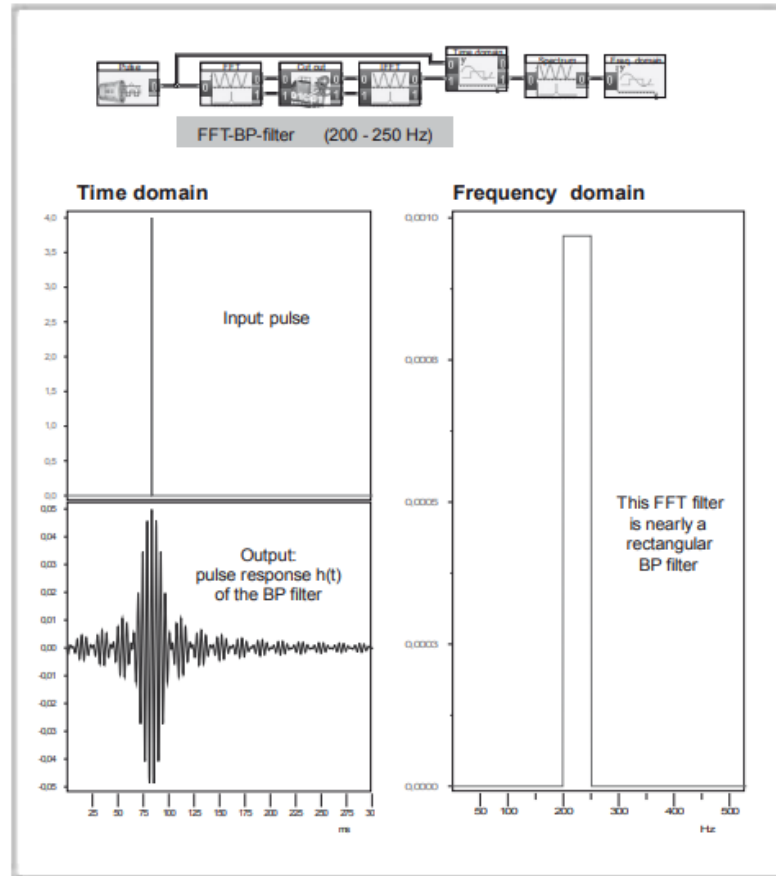
Jadi kita sampai pada masalah sebenarnya: tidak ada filter analog yang bagus. Mereka mungkin cukup baik dalam satu hal atau mewakili kompromi antara kecuraman tepi, efek riak di wilayah keadaan konduksi dan (non-) kurva fase linier di wilayah keadaan konduksi. Alasan untuk ini dijelaskan sepenuhnya dalam Bab 1 („Klarifikasi tujuan“, di bawah komponen Analog). Antara lain hal-hal berikut ini berlaku:

- Resistansi nyata, kapasitor dan khususnya kumparan menunjukkan perilaku campuran. Jadi sebuah kumparan terdiri dalam istilah fisik murni dari rangkaian serial induktivitas L dan resistansi ohmik R dari kawat kumparan. Dalam kasus frekuensi yang sangat tinggi kapasitor C antara kumparan kawat paralel menjadi jelas.
- Komponen analog hanya dapat diproduksi dengan akurasi terbatas dan selain itu komponen tersebut bergantung pada suhu, dll.
- Untuk meringkas, filter analog tidak melakukan apa yang seharusnya secara teoritis mungkin karena "efek kotor" membuat ini tidak mungkin. Jadi perilaku resonansi bandpass pada Gambar 205 sangat bergantung pada kualitas koil. Semakin kecil resistansi kumparan semakin tajam pemilihan frekuensi.
- Tiga jenis filter analog mendominasi yang kelebihan dan kekurangannya dijelaskan dalam Bab 7 dan khususnya dalam Gambar 141. Di masa depan, filter tersebut hanya akan digunakan jika tidak dapat dihindari:
- Filter analog akan selalu digunakan untuk membatasi frekuensi sinyal analog sebelum diproses secara digital. Catatan: pembatasan frekuensi ini juga dapat dipengaruhi oleh lowpass "alami", misalnya, melalui mikrofon. Suara manusia jelas dibatasi frekuensinya.
- Sinyal frekuensi tinggi dan tertinggi saat ini tidak dapat difilter secara digital karena terbatasnya kecepatan konverter A/D.

Filter FFT

Kita sering menggunakan filter digital murni pertama – yaitu komputer – dengan DASYLab (Gambar 25 – Gambar 27, Gambar 119, Gambar 120, Gambar 161, Gambar 162, Gambar 166 – Gambar 168, Gambar 191, Gambar 201).

Prinsip yang mudah dipahami ini – tetapi dari sudut pandang komputer rumit – ditampilkan sekali lagi pada Gambar 206. Sinyal atau blok data diubah menjadi domain frekuensi melalui transformasi FFT.



Gambar 206: Bandpass sebagai filter FFT

Anda dapat melihat di sini dalam contoh filter bandpass bagaimana filter FFT berkualitas tinggi. Kriteria untuk sangat baik – yaitu filter hampir persegi panjang – dapat dilihat dalam domain waktu – respons pulsa secara kasar terlihat seperti fungsi Si – dikalikan dengan frekuensi tengah filter dalam kasus bandpass.

Kecuraman tepi hanya dibatasi oleh Prinsip Ketidakpastian, yaitu oleh panjang sinyal input (rangkaiannya angka, atau blok data) dalam domain waktu. Itu 1 s di sini (Gambar di atas hanya menunjukkan segmen waktu 250 ms).

FFT kompleks dari sinyal nyata harus dipilih melalui menu. Modul FFT memiliki satu input, tetapi dua output. Kedua output memberikan bagian nyata dan imajiner dari spektrum (lihat Bab 5 di bawah “Transformasi FOURIER terbalik IFT dan bidang GAUSSI”).

Dalam pengertian fisik, ini berarti bahwa dua informasi penting untuk setiap frekuensi dan sinyal sinusoidal apa pun: yaitu amplitudo dan fase.

Selanjutnya frekuensi "dipotong" menggunakan modul cutout (yaitu disetel ke nol) yang tidak boleh lewat. Nilai yang sama harus ditetapkan pada kedua saluran (nyata dan imajiner).

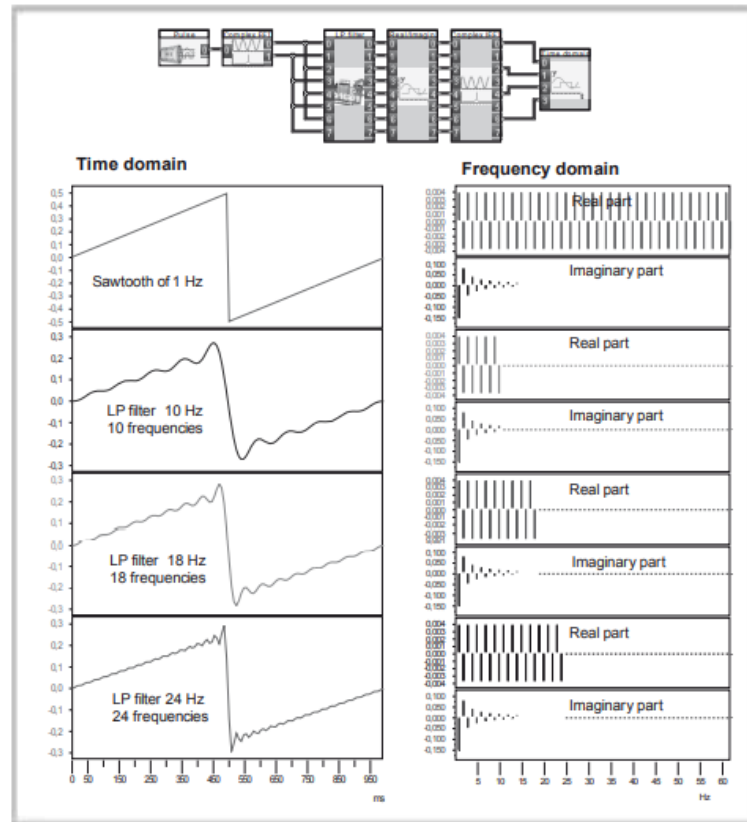
Catatan:

Dalam modul potongan Anda akan menemukan nilai 0 hingga 8192 yang telah ditetapkan di bawah "data sampel". 8192 memberikan panjang blok data terbesar yang mungkin untuk pemrosesan FFT. Bagaimana rentang frekuensi yang diinginkan dapat diatur? Perhatikan baik-baik Gambar 119, misalnya. Jika Anda memilih frekuensi pengambilan sampel yang sama dengan panjang blok (mis. 1024), rentang angka – mis. dari 0 hingga 40 – memberikan wilayah konduksi filter dalam Hz. Dalam hal ini panjang waktu blok data tepat 1 detik dan ini adalah keadaan yang paling mudah. Jika tidak, Anda harus sangat berhati-hati. Jika Anda memilih frekuensi di atas area yang diizinkan oleh Prinsip Pengambilan Sampel (dalam contoh ini di atas 512 Hz!), Anda mungkin menemukan posisi filter pada titik yang sama sekali berbeda dalam rentang frekuensi. Cobalah ini dengan menggunakan rangkaian pada Gambar 206.

Setelah itu Anda kembali ke domain waktu melalui IFFT (FFT terbalik). Di sini "FFT kompleks dari sinyal kompleks" harus dipilih dari opsi menu. Selain itu, Anda juga harus menunjukkan bahwa Anda ingin kembali ke domain waktu. Akhirnya, sinyal harus terdiri dari frekuensi yang telah diizinkan untuk melewati (osilasi sinusoidal), yaitu Sintesis FOURIER harus dilakukan. Sinyal yang difilter hanya ada dalam bentuk yang benar pada setiap output atas.

Keuntungan dari filter FFT:

- Seberapa baik filter FFT semacam ini bekerja dapat dilihat dari Gambar 120. Frekuensi individu disaring dari sinyal noise, bandwidthnya adalah 1 Hz dengan panjang blok tanggal 1s dan mewakili batas fisik absolut yang dihasilkan dari Prinsip Ketidakpastian KE ATAS. Kecuraman tepi filter dengan demikian tergantung pada panjang sinyal atau blok data.
- Keuntungan lebih lanjut adalah linearitas fase absolut, yaitu bentuk atau simetri sinyal dalam domain waktu tidak berubah. Bandingkan dalam konteks ini properti filter analog di Gambar 141 dengan filter FFT di Gambar 206
- Kekurangan filter FFT
- Besarnya perhitungan yang dibutuhkan untuk FFT dan IFFT. FFT berarti "Transformasi FOURIER Cepat". Algoritma ini diterbitkan pada tahun 1965 dan jauh lebih cepat daripada DFT biasa (Digital FOURIER Transformation) dengan menggunakan Prinsip Simetri. FFT dan – selain itu – IFFT masih terikat komputasi dibandingkan dengan proses pensinyalan lainnya.

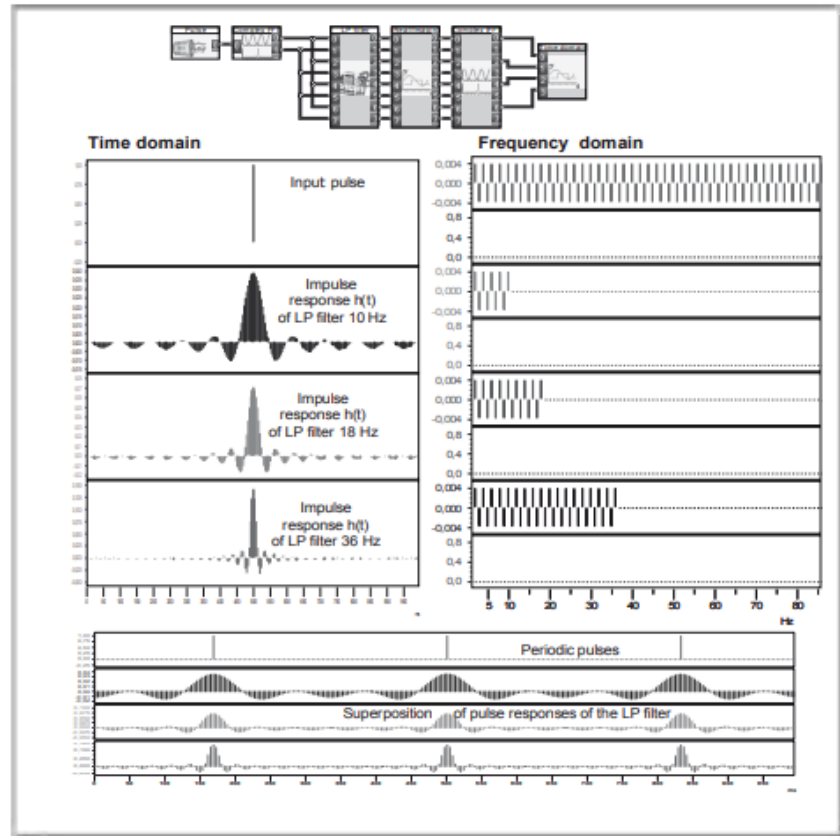


Gambar 207: Penyaringan FFT dari Sinyal Gigi Gergaji

Ini menunjukkan dengan jelas betapa sederhananya filter FFT pada prinsipnya: rentang frekuensi yang menarik secara harfiah dipotong menggunakan modul "cutout". Setelah transformasi ulang ke dalam domain waktu melalui IFFT, sinyal yang disaring muncul.

- Tidak cocok untuk sinyal yang tahan lama. Seperti yang ditunjukkan pada Bab 3 di bawah judul "Pengukuran frekuensi dalam kasus sinyal non-periodik" dan dalam Bab 4 "Bahasa sebagai pembawa informasi" ini harus dipotong menjadi segmen menggunakan jendela yang sesuai, kemudian diatur dengan tumpang tindih dan tersaring. Ini akan terlalu rawan kesalahan dan terikat komputasi untuk tidak lebih dari pemfilteran.

Inkonsistensi (jelas) dari filter FFT harus dijelaskan. Dalam Gambar 206 filter muncul sebagai "non-kausal" sebagai hasil dari representasi. Sinyal output hadir di layar sebelum sinyal input tiba di input!



Gambar 208: Respons pulsa $h(t)$ dari filter lowpass FFT

Sekali lagi dapat dilihat dengan jelas bagaimana dalam kasus filter "seperti persegi panjang" respons pulsa $h(t)$ mirip dengan hasil fungsi Si. "Efek riak" dari fungsi Si sesuai dengan frekuensi tertinggi yang diizinkan oleh filter.

Karena kita berurusan di sini dengan sinyal digital yang selalu diskrit dalam domain waktu dan frekuensi dan karena itu juga periodik (lihat Bab 9), "segmen" dari fungsi Si pada kenyataannya adalah segmen dari fungsi Si periodik. Tepatnya, sebagai respons pulsa Anda melihat panjang periode respons pulsa lengkap.

Alasan untuk ini dijelaskan dalam Bab 9 di bawah judul "Spektrum periodik sinyal digital". Sinyal digital dalam domain waktu dan frekuensi terdiri dari garis dan diskrit waktu dan frekuensi. Sebagai hasil dari prinsip simetri, sinyal yang diproses dianggap dan direpresentasikan sebagai periodik dalam domain waktu dan frekuensi. Tepatnya, apa yang difilter pada input sistem pengukuran berbeda dari segmen sinyal analog, yaitu sinyal periodik yang meluas ke masa lalu. Di bawah aspek ini filter bersifat kausal.

Catatan: Dalam Versi DASYLab ini ada yang disebut filter FFT yang (saat ini) tidak sesuai dengan prosedur yang ditunjukkan di sini. Itu hanya membuat "memotong" dalam domain frekuensi lebih mudah.

Pemfilteran Digital Dalam Domain Waktu

Semoga Anda tidak kehilangan kemampuan untuk merasa takjub pada hal yang tidak terduga! Anda sekarang akan diperkenalkan dengan filter digital yang

- memerlukan sedikit perhitungan,
- menghindari rute melalui domain frekuensi (FFT – IFFT),
- Pada prinsipnya dan dalam praktiknya tidak memiliki panjang blok/panjang sinyal yang tetap,
- untuk alasan ini dapat menyaring sinyal dengan panjang berapa pun secara langsung,
- sepenuhnya fase-linear,
- dapat dirancang dengan kecuraman tepi yang diinginkan (Prinsip Ketidakpastian adalah satu-satunya batas fisik) dan
- puas dengan tiga proses pensinyalan (linier) yang paling dasar: penambahan, perkalian dengan konstanta dan penundaan.

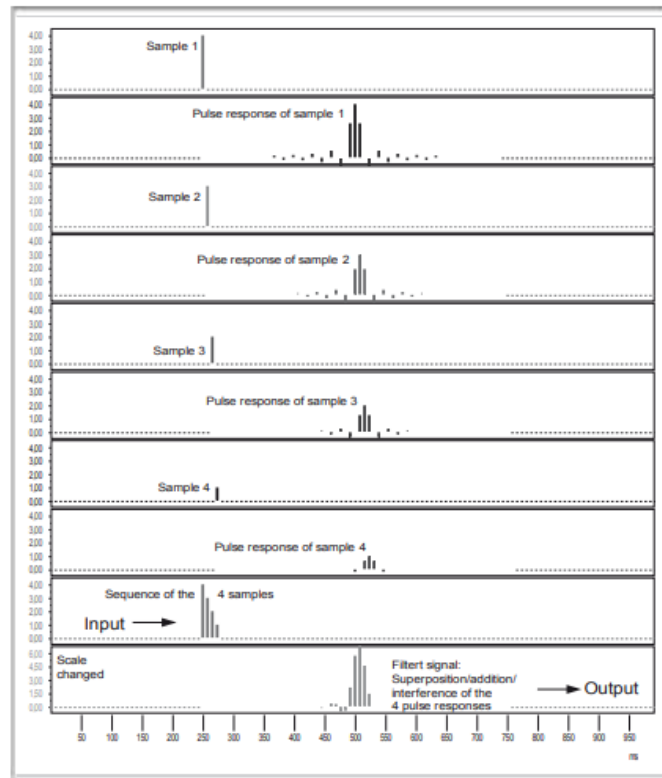
Mungkin Anda sudah merasakan bagaimana hal itu mungkin terjadi. Sinyal input dalam kasus karakteristik lowpass hanya harus "diubah bentuk" sedemikian rupa sehingga memiliki "efek riak" yang, misalnya, dalam kasus filter lowpass setara dengan frekuensi (cutoff) tertinggi. lowpass ini (lihat dalam hubungan ini misalnya Gambar 49 dan Gambar 201). Semua prasyarat untuk ini, tentu saja, sudah ditangani. Mereka diringkas secara singkat sebagai berikut:

Semua sinyal digital mewakili urutan diskrit dari (berbobot) -pulsa (lihat dalam konteks ini Gambar 188 dan Gambar 189).

- Respons pulsa dari filter lowpass persegi panjang yang hampir ideal harus terlihat kira-kira seperti fungsi Si (lihat, misalnya, Gambar 48 dan Gambar 49).
- Respons pulsa dari filter bandpass persegi panjang yang hampir ideal selalu kira-kira merupakan fungsi-si termodulasi amplitudo (lihat Gambar 119 dan Gambar 206). Frekuensi tengah bandpass ini setara dengan frekuensi pembawa dari Bab 8, di bawah judul "Modulasi amplitudo".
- Sebuah sampel fungsi Si dapat dilihat sebagai respon pulsa dari lowpass digital (dengan spektrum periodik, hampir persegi panjang) (lihat Gambar 215 dan Gambar 216). Prinsip Sampling harus dipatuhi untuk menghindari spektrum yang tumpang tindih.

Berikut hasil kesimpulannya:

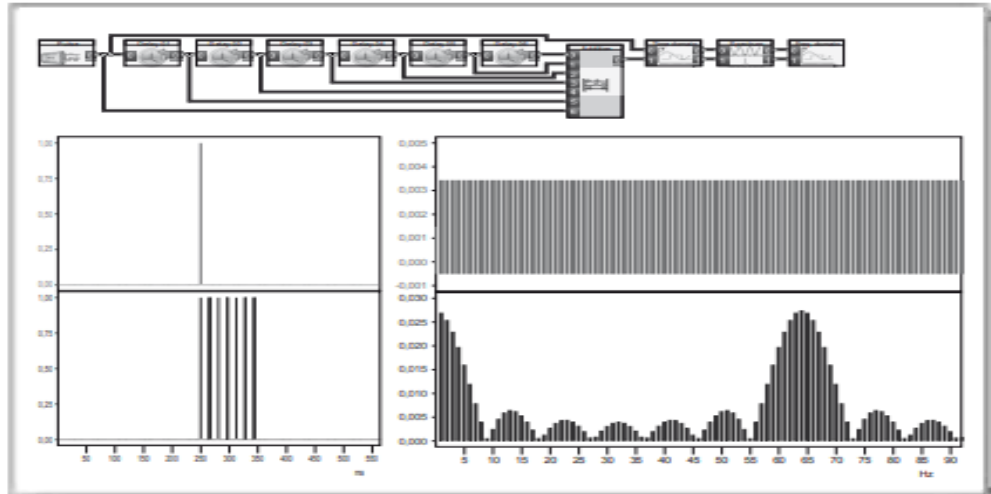
Karena sinyal digital murni terdiri dari pulsa berbobot, proses pensinyalan diperlukan yang menghasilkan urutan pulsa diskrit namun terbatas waktu yang semirip mungkin dengan fungsi Si dari masing-masing pulsa ini.



Gambar 209: Pemfilteran Digital Dalam Domain Waktu Dengan Tumpang Tindih Respons Pulsa

Sinyal digital atau rangkaian angka terdiri dari "pengukuran" diskrit yang mereproduksi kurva sesaat dari sinyal. Setiap pengukuran adalah pulsa tertimbang, respons pulsa yang dalam kasus kurva filter seperti persegi panjang memiliki kurva berbentuk Si. Sebagai tumpang tindih (penambahan) dari pengukuran diskrit sesuai dengan kurva sesaat dari sinyal, penambahan respon pulsa mereka harus memberikan kurva sesaat dari sinyal disaring.

Gambar 209 menunjukkan hal ini dengan cara yang sangat lugas. Di sini ada empat pulsa yang berjarak sama dengan amplitudo yang berbeda dan – di bawah masing-masing – respons pulsa sinusoidal diskrit. Yang pertama dimaksudkan untuk mewakili tiga "pengukuran" dari sinyal saat ini pada masukan dari lowpass digital dengan respons pulsa diskritnya pada keluaran.



Gambar 210: Pembangkitan Respons Denyut Nadi Yang Lebih Tahan Lama

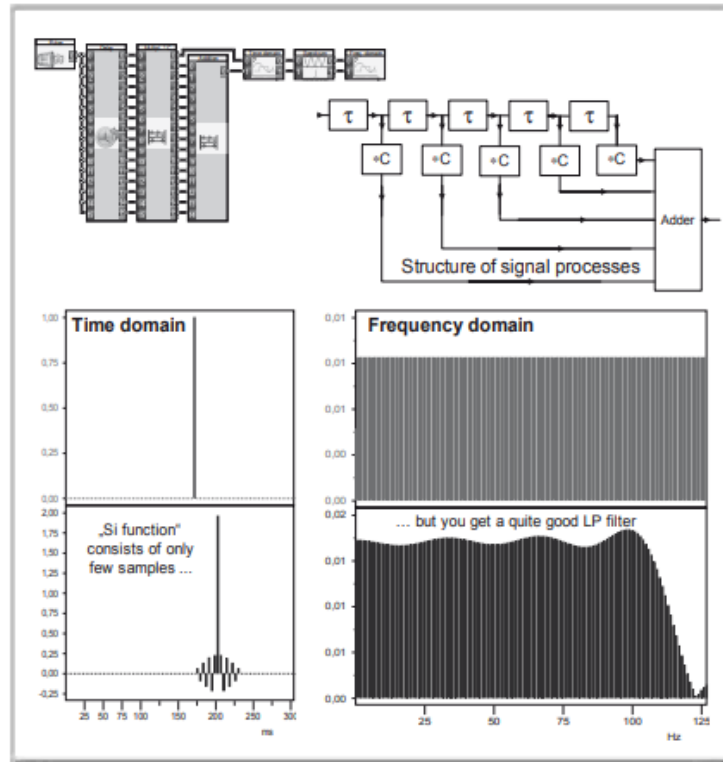
Melalui rangkaian yang sangat sederhana dengan dua proses penundaan dan penambahan sinyal dasar, sinyal digital dengan panjang berapa pun dapat dihasilkan dari satu pulsa. Pulsa terakhir telah melewati semua 6 proses penundaan dll. Penambahan tujuh pulsa perpindahan waktu menghasilkan sinyal bawah.

Dalam kasus sinyal keluaran persegi panjang dalam domain waktu, kita tidak akan terkejut dengan kurva berbentuk Si (berkala) dalam domain frekuensi. Tetapi pada kenyataannya kami menginginkan hal sebaliknya: kurva persegi panjang dalam domain frekuensi (difilter). Seperti apa respons pulsa untuk alasan simetri dan bagaimana kita harus menyelesaikan rangkaian?

Di bawah ini Anda melihat jumlah sebagai superposisi dari ketiga respons pulsa ini. Ini memberikan kurva sesaat yang disaring dari sinyal input. Frekuensi cutoff lowpass dapat disimpulkan dari "efek riak" ini.

Penambahan (atau penjumlahan) dari – waktu-perpindahan – respon pulsa berbentuk Si dari jenis filter tertentu menghasilkan sinyal keluaran yang difilter.

Omong-omong, Anda menemukan filter digital tipe khusus ("filter sisir") dalam Gambar 126, Gambar 88 dan Gambar 89. Di sana Anda melihat peran apa yang dimainkan proses penundaan dalam kasus filter digital. Alih-alih spektrum amplitudo konstan dari satu pulsa spektrum dalam kasus dua pulsa berbentuk kosinus. Anda akan menemukan penjelasannya dalam teks Gambar 88. Frekuensi-frekuensi tertentu pada interval reguler ("struktur seperti sisir") tidak boleh lewat.



Gambar 211: Membuat Respons Pulsa Menjadi Fungsi Si

Di bagian atas Anda melihat rangkaian yang membuat sesuatu seperti fungsi Si (diskrit) dari pulsa, pertama sebagai rangkaian DASYLab dan kemudian sebagai diagram blok prinsip di sebelah kanan. Di bawah ini Anda melihat fungsi Si dalam domain waktu dan di sebelah kanan spektrum yang sudah menunjukkan sifat lowpass yang cukup masuk akal.

Dengan kata lain - sirkuit skema (kanan atas) mewakili struktur sirkuit teknis filter digital dan diisi dengan tiga proses dasar (linier) - penambahan, perkalian dengan konstanta dan penambahan. Jenis filter apa, kualitas filter apa dan hasil region state konduktor apa, bergantung pada jumlah penundaan dan perkalian (di sini $n=5$) dan dari koefisien filter yang sesuai dengan nilai konstanta C_n yang berbeda. Ada pengaruh penting lainnya: frekuensi/laju sampel berperan sebagai "faktor penskalaan bandwidth" (lihat Gambar 215).

Filter digital juga mematuhi Prinsip Ketidakpastian: semakin kecil bandwidth filter, semakin lama pulsa bertahan dan sebaliknya. Dalam kasus filter, respons pulsa tentu lebih lama dari sinyal pada input. Ini harus dimungkinkan secara teknis dengan sirkuit. Pertama sirkuit langsung harus dikembangkan yang membuat beberapa -pulsa dengan tingkat yang sama dari satu -pulse yaitu membuat respon pulsa lebih lama dari satu pulsa dan karena itu harus berfungsi seperti filter. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 210. Anda akan akrab dengan jalannya spektrum amplitudo. Kurva didasarkan pada respons fungsi Si seperti dalam banyak contoh di Bab 2 (misalnya Gambar 38), tetapi di sini periodik karena diskrit dalam domain waktu.

Prinsip simetri memberi tahu kita bahwa respons pulsa yang hampir seperti fungsi Si harus menghasilkan kurva filter seperti persegi panjang. Tetapi bagaimana respons pulsa

berbentuk Si dapat dihasilkan oleh rangkaian yang dimodifikasi dibandingkan dengan Gambar 210. Hal ini pada prinsipnya ditunjukkan oleh Gambar 211. Dengan mengalikan masing-masing pulsa dengan konstanta tertentu ("koefisien filter") respons pulsa adalah ditransformasikan sejauh mungkin ke dalam bentuk seperti fungsi Si.

Sirkuit ini memiliki struktur yang sangat sederhana dan hanya berisi tiga proses sinyal dasar (linier) – penambahan, perkalian dengan konstanta, dan penundaan.

Tapi bagaimana kita sampai pada koefisien yang tepat? Kemungkinan potensial tetapi rumit adalah – seperti yang ditunjukkan pada Gambar 199 dan Gambar 200 – untuk mengambil sampel fungsi Si dengan urutan pulsa periodik dan menyimpan nilai-nilai ini sebagai daftar. Dengan cara ini konstanta yang benar untuk setiap modul dapat dimasukkan tetapi dengan cara yang sangat melelahkan.

Perhatikan pada Gambar 210 dan Gambar 211 bahwa pada keluaran penambah (penjumlahan) pulsa tertimbang pada masukan terendah adalah yang pertama muncul pada keluaran penambah dan pulsa paling atas yang melewati semua penundaan muncul terakhir.

Lilitan

Pulsa berbobot 5 atau 15 menurut Gambar 211 dan Gambar 212 tidak cukup untuk menghasilkan kurva berbentuk Si. 256 -pulsa akan lebih baik. Maka sirkuitnya akan sangat rumit sehingga tidak muat di layar. Dan pengaturan 256 koefisien secara manual akan menjadi kerja paksa.

Tetapi ini tidak perlu karena rangkaian skema menurut Gambar 211 mewujudkan proses pensinyalan penting – konvolusi – yang tersedia dengan DASYLab, juga dalam versi pendidikan, sebagai modul khusus.

Konvolusi sebagai proses pensinyalan telah disebutkan dalam Bab 7 di bagian "Perkalian dua sinyal sebagai proses non-linear". Lihat di atas semua Gambar 146 dan teks yang relevan. Dalam kasus ini, bagaimanapun, itu adalah pertanyaan tentang konvolusi dalam domain frekuensi sebagai konsekuensi dari perkalian dalam domain waktu. Ini adalah perkalian dalam domain frekuensi ("filter persegi panjang") dan – sebagai akibat dari prinsip simetri, sebuah konvolusi dalam domain waktu.

Hasil berikut harus diperhatikan:

Perkalian dalam domain waktu menghasilkan konvolusi dalam domain frekuensi.

Contoh penting: Pengambilan sampel sinyal analog dengan urutan pulsa periodik seperti pada Gambar 146. Spektrum sinyal analog "berbelit-belit" pada setiap frekuensi urutan pulsa-.

Untuk alasan simetri, berikut ini harus berlaku:

Perkalian dalam domain frekuensi (seperti halnya filter) menghasilkan konvolusi dalam domain waktu.

Membuat filter yang baik berarti dari sudut pandang matematis perkalian spektrum frekuensi dengan fungsi seperti persegi panjang. Namun ini berarti bahwa dalam waktu, konvolusi domain harus terjadi dengan fungsi Si yang didekati (di atas semua waktu terbatas)

karena persegi panjang dan fungsi Si dihubungkan secara tak terpisahkan oleh transformasi FOURIER (lihat Gambar 91).

Sementara perkalian adalah operasi matematika yang sudah dikenal, ini tidak benar untuk konvolusi. Oleh karena itu penting untuk mengGambarkannya dengan proses visualisasi yang sesuai. Dasar untuk ini adalah kombinasi dari tiga proses linier dasar penundaan, penambahan dan perkalian dengan konstanta. Aliran sinyal dalam konvolusi menghasilkan diagram blok dengan struktur yang sangat sederhana yang sekali lagi digarisbawahi dalam Gambar 212.

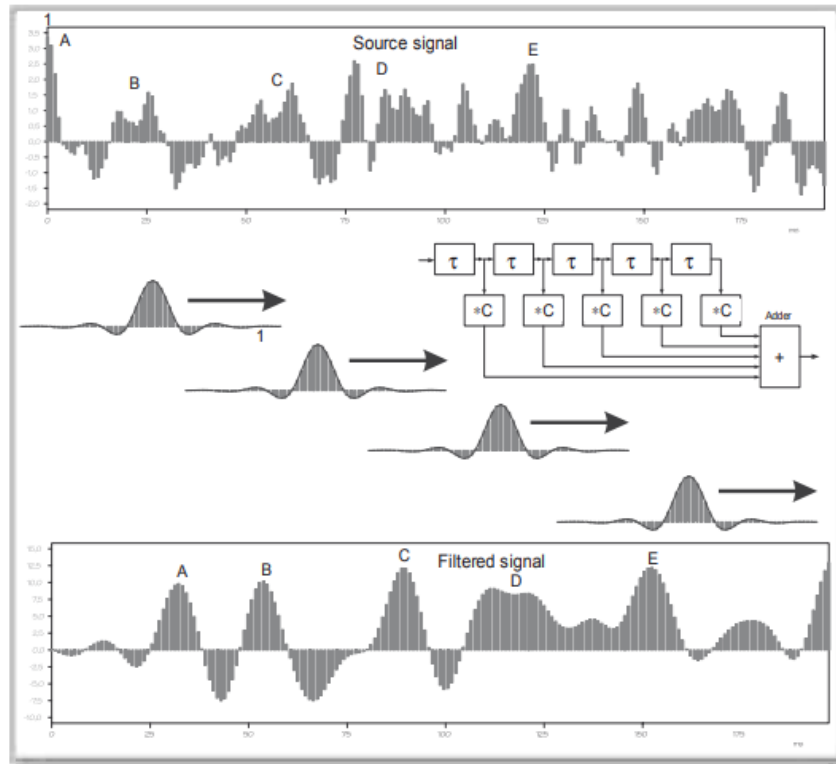
Catat penundaan antara sinyal input dan sinyal output yang difilter (lihat penunjukan A, B....., E). Dapat dilihat bahwa semua perubahan cepat dalam sinyal input "ditelan" oleh filter atau menghilang melalui rata-rata tertimbang.

Tidak seperti filter FFT, sinyal keluaran di sini benar-benar kausal, yaitu sesuatu yang hanya muncul pada keluaran setelah sinyal dihubungkan dengan masukan. Secara keseluruhan, ada keuntungan berikut dibandingkan dengan filter FFT:

- Proses filter berlangsung dalam domain waktu dan sebagai hasil dari proses dasar yang terlibat tidak memerlukan banyak perhitungan. Akibatnya penyaringan waktu nyata di bidang audio sekarang sangat mungkin. Jumlah perhitungan yang diperlukan meningkat "linier" dengan panjang blok fungsi Si atau dengan presisi atau kualitas filter.
- Dimungkinkan untuk memfilter secara terus menerus – yaitu tidak dalam blok. Akibatnya semua masalah yang terjadi dengan "jendela tumpang tindih" (lihat Bab 4: "Lanskap frekuensi-waktu") segmen sinyal tidak muncul.
- Filter berfungsi secara kausal seperti sinyal analog.

Catatan:

Jenis filter yang dijelaskan di sini disebut filter FIR (respon impuls terbatas) dalam literatur. Jenis filter ini menghasilkan respons pulsa dengan panjang yang terbatas (misalnya dalam kasus panjang blok $n = 64$ atau $n = 256$). Selain itu yang disebut filter IIR (respon impuls tak terbatas) juga digunakan. Di sini proses dasar yang sama digunakan tetapi sebagai akibat dari efek umpan balik, lebih sedikit proses – yaitu lebih sedikit perhitungan – yang diperlukan secara keseluruhan untuk desain filter. Namun, kurva fase tidak lagi linier. Filter IIR tidak dibahas di sini.



Gambar 212: MengGambarkan Proses Konvolusi Dalam Domain Waktu

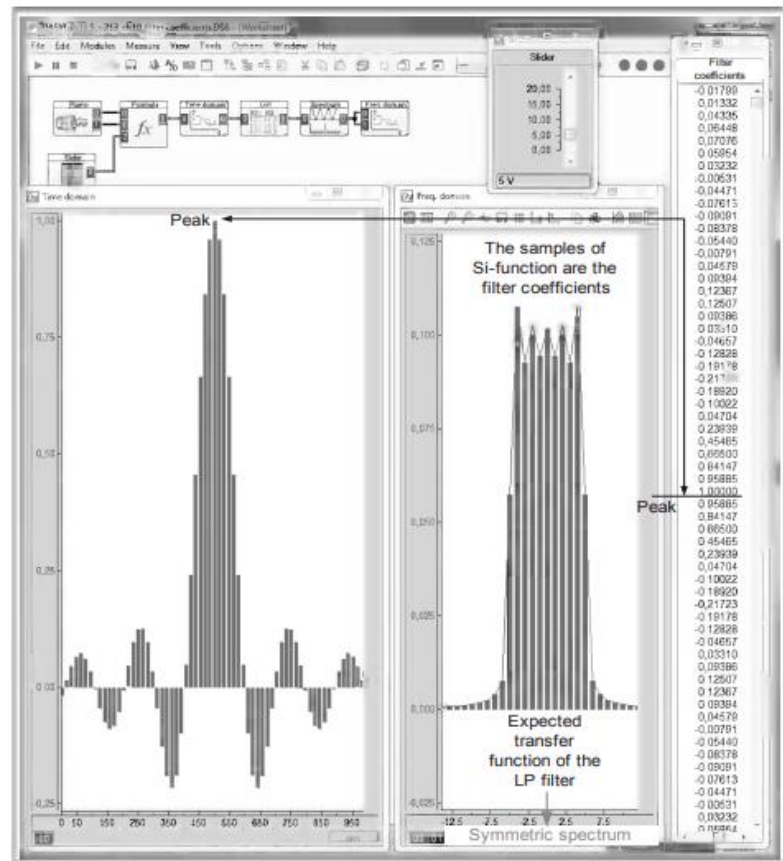
Diagram blok menunjukkan perkembangan proses konvolusi tetapi sulit untuk menginternalisasi ini secara gambar. Bayangkan fungsi Si (diskrit) yang didekati sebagai templat yang bergerak dari paling kiri ke paling kanan oleh sinyal atas, berhenti sebentar di setiap langkah dari pengukuran ke pengukuran. Pada setiap posisi templat, operasi konvolusi yang diwakili oleh rangkaian blok dilakukan.

Pada awalnya hanya dua nilai pertama dari sinyal dan "templat" yang tumpang tindih, ditunjuk dalam representasi dengan menggunakan "1". Kemudian pada langkah selanjutnya 2. 3 ... hingga maksimal 64 nilai (panjang template disini $n = 64$). Pada setiap langkah semacam "perhitungan nilai rata-rata tertimbang" dilakukan, yaitu dalam domain frekuensi proses penyaringan lowpass. Maksimal 64 nilai yang berbeda ditambahkan untuk menghitung nilai rata-rata, yaitu 64 pengukuran yang berbeda secara bersamaan dalam diagram rangkaian blok.

Perhatikan awal berbentuk Si dari sinyal yang difilter. Ini adalah hasil dari awal seperti pulsa dari sinyal tanpa filter. Huruf-huruf tersebut menunjukkan segmen yang sebanding dari kedua sinyal.

Studi Kasus: Desain Dan Penerapan Filter Digital

Instrumen yang tepat tampaknya tersedia dalam modul konvolusi untuk menerapkan filter digital yang efektif. Karena pemfilteran sesuai dengan perkalian dalam domain frekuensi, operasi yang setara dalam domain waktu mewakili konvolusi. Kedua proses tersebut sepenuhnya ekuivalen sejauh efeknya diperhatikan jika fungsi konvolusi adalah IFFT dari fungsi filter.



Gambar 213: "Situs Pengembangan Filter"

Jumlah maksimum koefisien filter di sini $n = 1024$. Angka yang diinginkan harus diatur di bagian atas menu di bawah A/D. Dalam hal ini $n = 16$ dipilih untuk menghindari daftar menjadi terlalu panjang dan untuk menunjukkan bahwa bahkan dengan jumlah yang kecil ini hasilnya (dalam kasus filter TP yang relatif broadband) cukup dapat diterima. 16 koefisien filter ini dapat dilihat di bagian bawah diagram sebagai saran samar dari fungsi Si. FFT menunjukkan karakteristik lowpass ini dalam domain frekuensi di bagian tengah diagram.

Nilai dari $n = 64$ direkomendasikan untuk mendapatkan lowpass yang baik dan dari 256 untuk bandpass. Semakin sempit rentang frekuensi filter, semakin lama respons pulsa berbentuk Si harus bertahan sesuai dengan Prinsip Ketidakpastian, dan semakin banyak koefisien yang biasanya diperlukan.

Poin-poin berikut sangat penting:

- Jangan pernah memilih bandwidth filter lebih tinggi dari setengah frekuensi pengambilan sampel akhir (lihat teks), jika tidak, Anda akan melanggar Prinsip Pengambilan Sampel.
- Semakin jauh jarak pita spektrum periodik total, semakin tinggi frekuensi pengambilan sampel yang dipilih.

Berbagai alternatif desain yang ditawarkan oleh DASYLab membuat orang ingin merancang alat pengembangan yang nyaman untuk filter digital di mana rentang filter dapat

diatur di layar dan koefisien filter dari respons pulsa berbentuk Si muncul dengan satu sentuhan tombol.

Larutan:

- Generator fungsi-Si dibuat melalui modul rumus di mana fungsi Si dapat dipilih "sesuai keinginan" pada input modul menggunakan modul penggeser.
- Kemungkinan mengalikan fungsi Si dengan frekuensi tengah bandpass harus disediakan. Modul "daftar" terhubung dengan output dari modul rumus. Ini menunjukkan koefisien filter yang ditetapkan. Ini dapat disalin dari daftar ke clipboard.
- Karena sulit untuk mengalokasikan rentang frekuensi yang relevan untuk setiap fungsi Si pada keluaran daftar, FFT dilakukan dengan
- indikasi selanjutnya dari domain frekuensi. Sekarang dapat dikenali dengan jelas dalam domain frekuensi bagaimana perubahan yang diatur oleh penggeser membuat dirinya terasa (lihat Gambar 213).

Rangkaian angka dari koefisien filter harus direpresentasikan dalam bentuk tertentu sebagai "file vektor". Untuk tujuan ini Editor digunakan yang dapat ditemukan di bawah Aksesoris di bawah Program di menu Mulai:

1. Daftar ditempatkan di Clipboard melalui menu (dengan mengklik tombol kiri mouse pada opsi daftar) Edit dan Daftar ke Clipboard.
2. Mulai Editor – di bawah Aksesoris di ikhtisar Program Windows.
3. Aktifkan menu modul Convolution dan kemudian Bantuan. Desain file vektor dijelaskan di sini. Periksa contoh dan perhatikan struktur file vektor.
4. Tulis header file (lihat Gambar 214), salin koefisien filter dari clipboard, hapus semuanya selain "string angka" dan tambahkan EOF (akhir file) di akhir.
5. Simpan file vektor terlebih dahulu sebagai file *.txt dalam folder filter. Kemudian ubah akhiran file dari "txt" menjadi "vec" di Explorer.
6. Sekarang muat file vec ini ke modul Convolution dan filter digital selesai.

Dalam merancang filter, fakta-fakta berikut yang dihasilkan dari Prinsip Ketidakpastian (UP) dan Prinsip Pengambilan Sampel (SP) sangat penting:

- Jika Anda memilih misalnya panjang blok dan frekuensi pengambilan sampel $n = 128$ untuk respons pulsa dari filter yang direncanakan ($n = 128$ koefisien filter), Anda awalnya hanya dapat memilih bandwidth filter maksimum 64 Hz (lebih tepatnya, dari -64 hingga $+64$) karena Prinsip Pengambilan Sampel. Karena panjang blok dan frekuensi pengambilan sampel di lokasi percobaan filter harus selalu dipilih sama, maka respons pulsa berlangsung tepat 1 detik. 8192 waktu untuk respons pulsa yang digunakan untuk konvolusi dipersingkat dengan $64/8192 = 1/128$ s. Menurut Prinsip Ketidakpastian pita frekuensi melebar hingga maksimum $128 \cdot 17 \text{ Hz} = 2176 \text{ Hz}$. Oleh karena itu, lebar pita filter dari filter digital bergantung pada frekuensi pengambilan sampel akhir sistem.
- File vektor ini ditetapkan ke modul konvolusi melalui menunya.

Jumlah koefisien filter harus antara 16 dan 1024. Semakin tinggi angkanya, semakin besar kualitas filter dan/atau interval antara pita spektrum periodik dan semakin besar jumlah perhitungannya. Awalnya Anda harus dalam desain Anda memilih laju pengambilan sampel dan panjang blok sebagai sama.

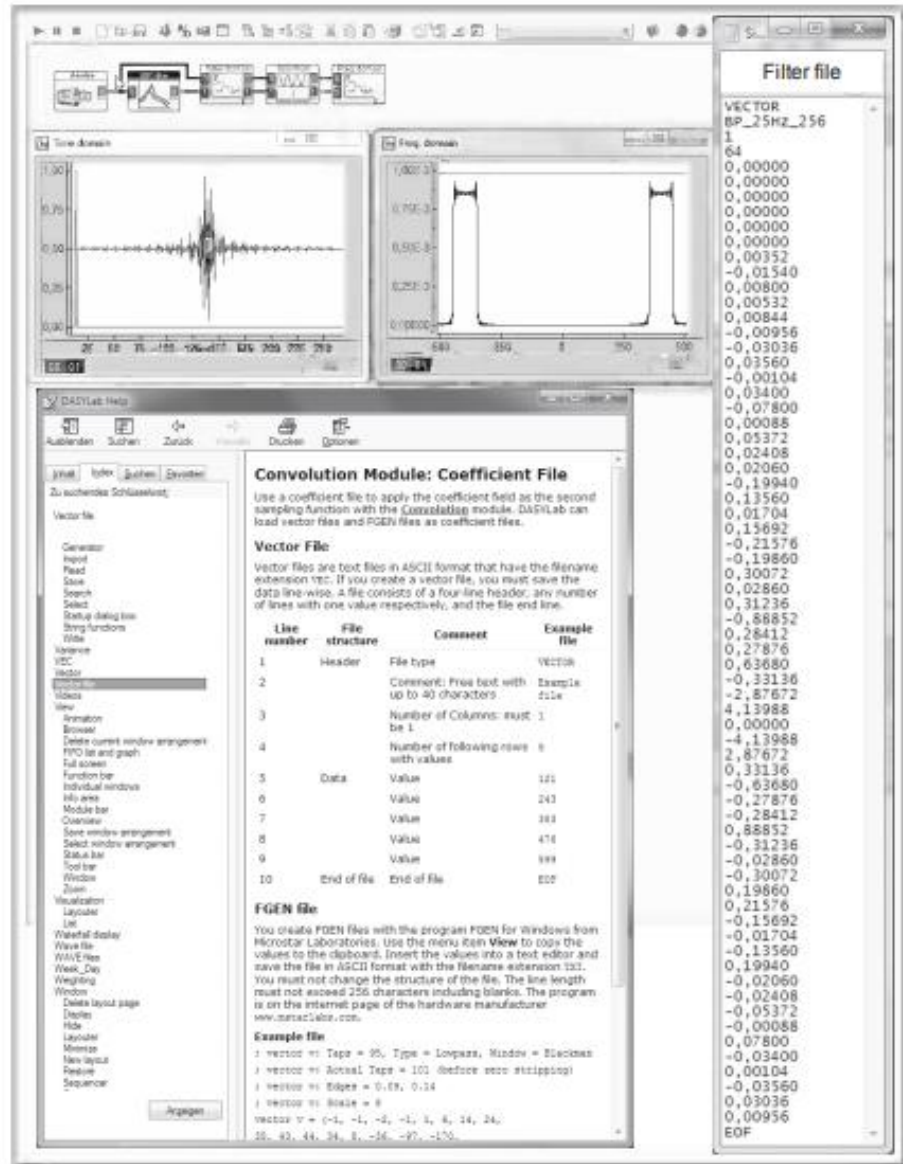
Dalam perancangan filter digital harus diketahui dari awal berapa tingkat akhir dari frekuensi sampling sistem yang akan dibuat. Jika laju pengambilan sampel sistem di mana filter digital akan digunakan adalah n kali lebih besar daripada laju pengambilan sampel daripada pengaturan awal koefisien filter, fungsi S_i yang diwakili oleh koefisien filter juga akan hilang n kali lebih cepat. Jadi bandwidth B dari filter ditingkatkan dengan faktor n .

Menghindari Konten Riak Di Wilayah Negara Bagian Yang Melakukan

Representasi sebelumnya dengan jelas menunjukkan konten riak di wilayah konduktor filter. Efek ini dapat dilihat dengan jelas, misalnya pada Gambar 49. Penyebabnya tidak sulit ditebak. Meskipun dicoba untuk mereproduksi fungsi S_i seakurat mungkin melalui koefisien filter, ini hanya berhasil untuk segmen fungsi S_i yang dibatasi waktu. Secara teoritis, fungsi S_i meluas "tak terbatas" ke arah kiri dan kanan, ke masa lalu dan masa depan. Dengan segmen ini, fungsi S_i yang sebenarnya terpotong seolah-olah dengan jendela persegi panjang (lihat juga Gambar 51) dan sebagai hasilnya langkah-langkah tidak muncul. Fungsi S_i spesifik ini harus dimulai dengan lembut dari nol dan berakhir di akhir segmen.

Tidak ada masalah untuk mencapai ini. Untuk tujuan ini, jendela waktu dibangun sebagai tambahan ke "situs pengembangan filter" yang memungkinkan awal dan akhir nol ini menjadi mungkin. Keberhasilan tindakan ini menunjukkan bahwa itu tepat. Sekarang dimungkinkan untuk mencapai kurva yang sangat mulus di wilayah negara bagian konduksi. Namun, tepi filter sekarang tampak sedikit kurang curam.

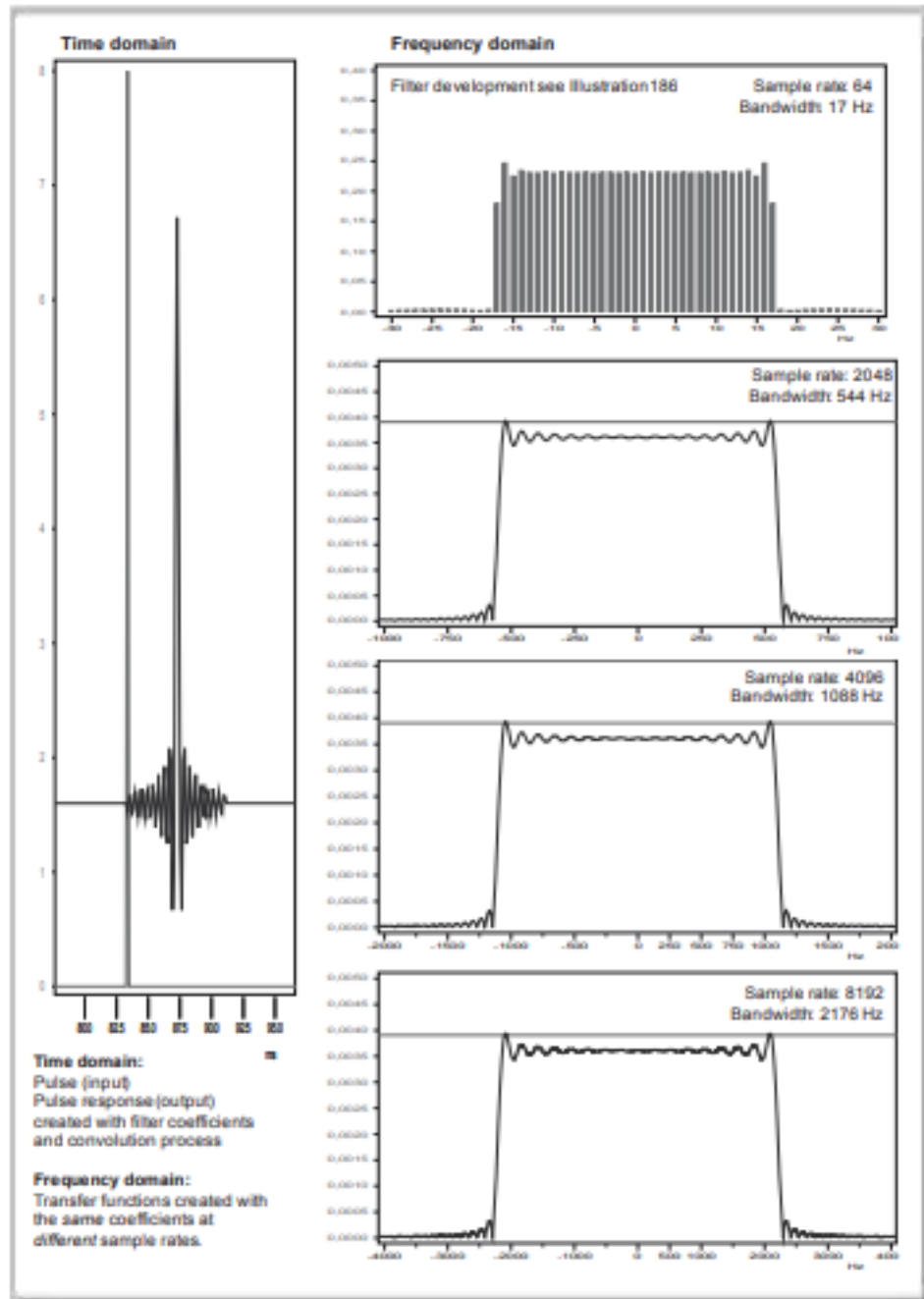
Secara keseluruhan, "situs pengembangan filter" ini memungkinkan untuk mengembangkan lowpass dan bandpass digital dengan kualitas yang diinginkan (melalui sejumlah besar koefisien yang sesuai dan jumlah perhitungan yang wajar). Filter digital ini dapat digunakan secara langsung melalui modul konvolusi di DASYLab.



Gambar 214: Membuat File Vektor Dari Koefisien Filter

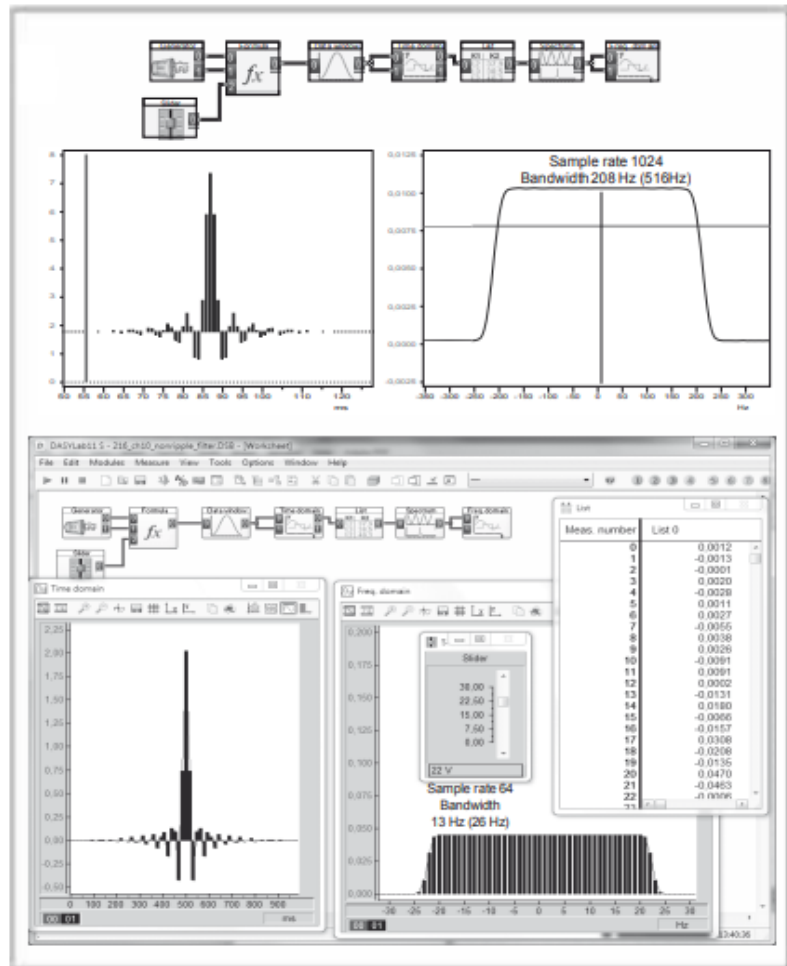
Seperti halnya modul DASyLab, fungsi Bantuan menyediakan deskripsi prosedur untuk membuat filter – “file vektor”. Biasakan diri Anda dengan cara kerja editor dan bagaimana file .txt dapat diganti namanya menjadi .vec di Explorer.

Tepatnya, koefisien filter dan filter digital ini dapat digunakan dengan sistem komputer apa pun. Anda hanya perlu mentransmisikan sirkuit skematik dari sinyal digital atau modul konvolusi ke dalam program kecil dalam bahasa pemrograman yang diberikan.



Gambar 215: Bandwidth Sinyal Digital

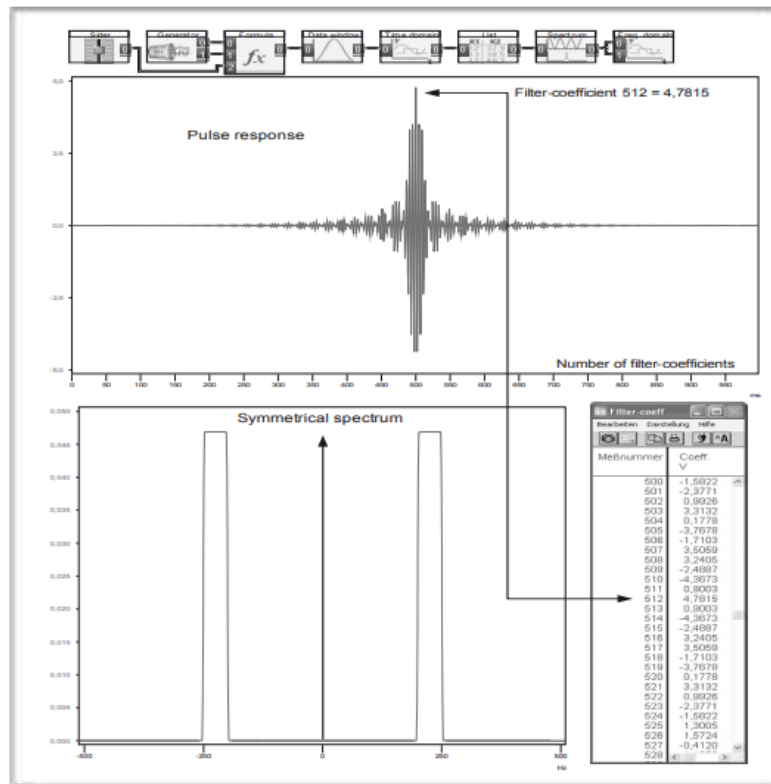
Dalam kasus “lokasi pengembangan filter”, panjang blok dan frekuensi pengambilan sampel setara dengan jumlah koefisien filter. Sebaliknya, frekuensi pengambilan sampel modul konvolusi jauh lebih tinggi dalam praktiknya. Bandwidth sebenarnya dari hasil filter dari hubungan antara kedua frekuensi, di sini misalnya $8192/64 = 128$ di bagian bawah ($128 \cdot 17$ (atas) = 2176 Hz bandwidth).



Gambar 216: Lowpass digital dengan wilayah keadaan konduksi “halus”

Dengan menambahkan jendela yang sesuai (misalnya jendela "HAMMING") fungsi Si dimulai dan diakhiri dengan lembut, yaitu tidak ada langkah di awal atau akhir segmen waktu (di sini) 1s. Tetapi kurva fungsi Si berubah sebagai hasilnya, karena seluruh segmen sinyal “dibobot” olehnya. Efeknya adalah membuat kurva di daerah konduksi menjadi lebih lurus dan kecuraman tepi agak berkurang.

Sementara bandwidth lowpass di bagian atas adalah 13 Hz, di sirkuit di bagian bawah adalah 64 Hz meskipun koefisien filter yang sama digunakan. Alasannya adalah tingkat pengambilan sampel yang jauh lebih tinggi dari 1024 dibandingkan dengan 64 atas). Respons pulsa filter (fungsi Si) sebagai hasilnya berjalan 16 kali lebih cepat, hanya berlangsung 1/16 dari waktu aslinya. Menurut Prinsip Ketidakpastian bandwidth harus 16 kali lebih besar: $16 \cdot 13 = 208$ Hz.



Gambar 217: Pengembangan Filter Bandpass Digital

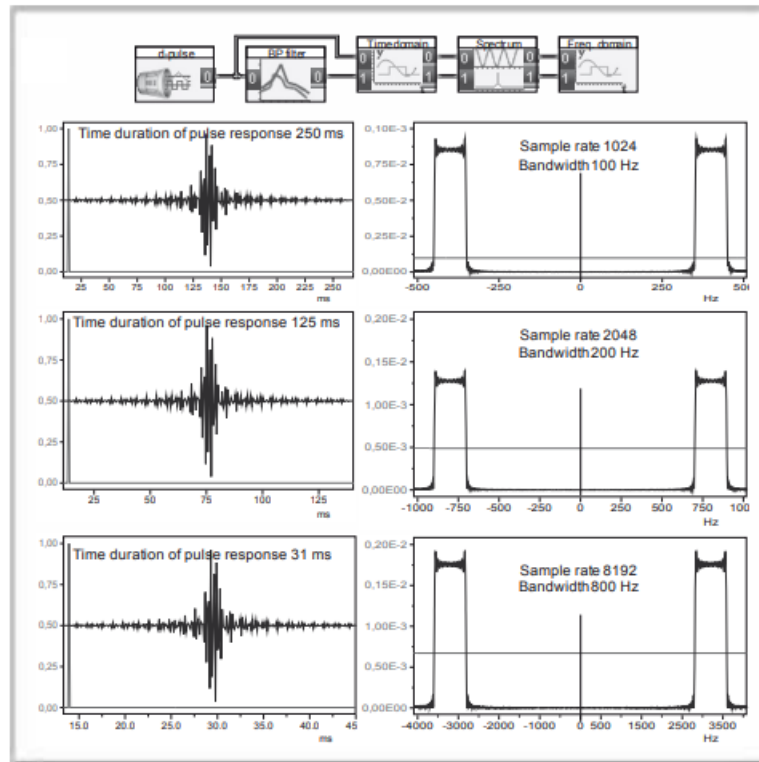
Ini menunjukkan bagaimana respon pulsa bandpass berbeda dari lowpass. Dalam analisis terakhir, ini adalah respons pulsa dari lowpass (simetris) yang dikalikan dengan frekuensi tengah bandpass.

Pertama buat respons pulsa untuk lowpass yang harus memiliki bandwidth yang sama dengan bandpass. Bandwidth dalam kasus di atas berubah dari kira-kira -12 Hz hingga + 12 Hz. Di sini kita melihat betapa pentingnya representasi simetris dari domain frekuensi di "situs pengembangan filter".

Kemudian pilih pada Saluran 1 generator sinyal sinusoidal dengan frekuensi tengah bandpass (di sini 100 Hz) dan amplitudo 1 alih-alih offset 1. Kemudian Anda akan melihat keadaan seperti yang ditunjukkan di atas. Gambar 219 menunjukkan ciri-ciri umum ini secara lebih rinci.

Prasyarat untuk keberhasilan pengembangan filter digital adalah kondisi dasar yang benar:

- Pertama-tama tentukan seberapa tinggi frekuensi sampling dalam sistem DSP yang direncanakan dapat dipilih. Semakin tinggi semakin baik. Anda kemudian memiliki kesempatan untuk membuat interval antara spektrum filter periodik dari sinyal digital sebesar mungkin.

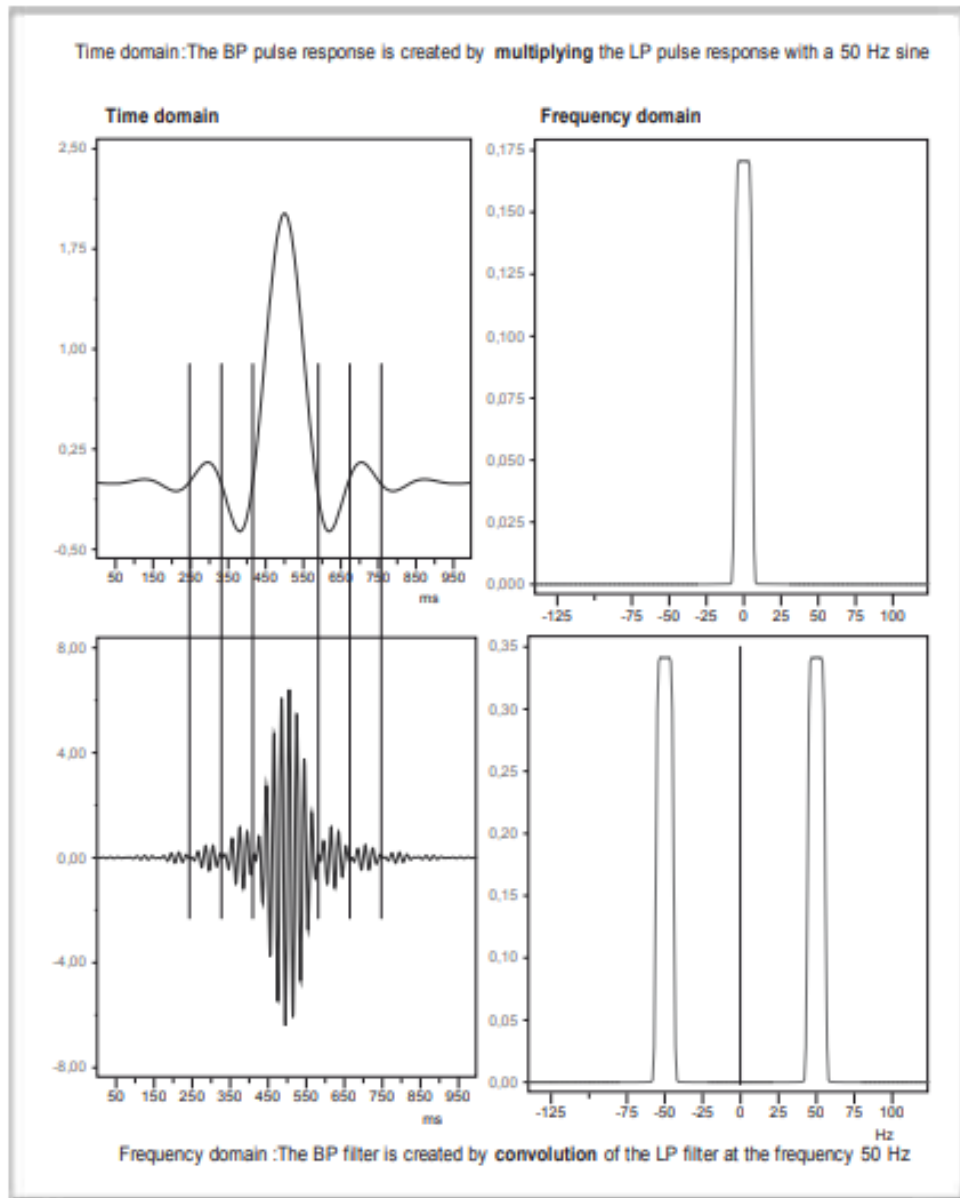


Gambar 218: Pentingnya Laju Sampling Untuk Kurva Filter

Hubungan tersebut sekali lagi digambarkan menggunakan contoh bandpass. Dalam rangkaian di atas, file koefisien yang sama digunakan untuk bandpass dalam modul konvolusi atau filter digital. Respons pulsa atas dan kurva filter atas sesuai dengan keadaan dalam "sistem pengembangan filter". Dalam kasus bandpass, panjang blok minimal 256 harus dipilih.

Jika pada rangkaian di atas laju pengambilan sampel ditingkatkan menjadi 8192 (dibandingkan dengan 256) bandwidth dan frekuensi tengah meningkat dengan faktor 8. Namun "bentuk filter" tidak berubah. Karena ditentukan secara eksklusif oleh koefisien filter.

- Jumlah koefisien filter adalah ukuran kualitas filter. Dengan DASYLab, maksimum 1024 koefisien filter dimungkinkan dalam modul konvolusi. Jika jumlahnya lebih besar, begitu juga jumlah perhitungan yang diperlukan. Ini dapat menyebabkan kesulitan dalam pemrosesan waktu nyata.
- Frekuensi pengambilan sampel juga harus setidaknya dua kali lipat frekuensi cutoff tertinggi dari bandpass. Prinsip Sampling juga berlaku di sini, tentu saja. Frekuensi sinyal tertinggi yang melewati bandpass dan bukan bandwidth sangat menentukan.



Gambar 219: Dari Lowpass Ke Bandpass

Bandpass ekuivalen – yaitu dengan bentuk filter yang sama direalisasikan dari lowpass di atas dengan mengalikan respons pulsa lowpass dengan frekuensi tengah bandpass. Hubungan ini dapat dilihat pada respon pulsa dari bandpass. Amplop respons pulsa ini adalah fungsi Si di atas.

Atur frekuensi tengah bandpass pada Saluran 1 generator. Pilih tegangan sinusoidal dengan frekuensi tengah yang ekuivalen daripada konstanta $c = 1$ sehingga bandpass tidak memperkuat sinyal yang difilter.

Fungsi Transfer Filter Digital

Pada prinsipnya, konvensi yang sama dipilih untuk filter analog (lihat Bab 6, "Analisis Sistem"):

- Fungsi transfer, seperti yang ditunjukkan dalam dua gambar: amplitudo - dan respons fase.
- Fungsi alih dalam satu representasi: Kurva lokal pada bidang GAUSSI.

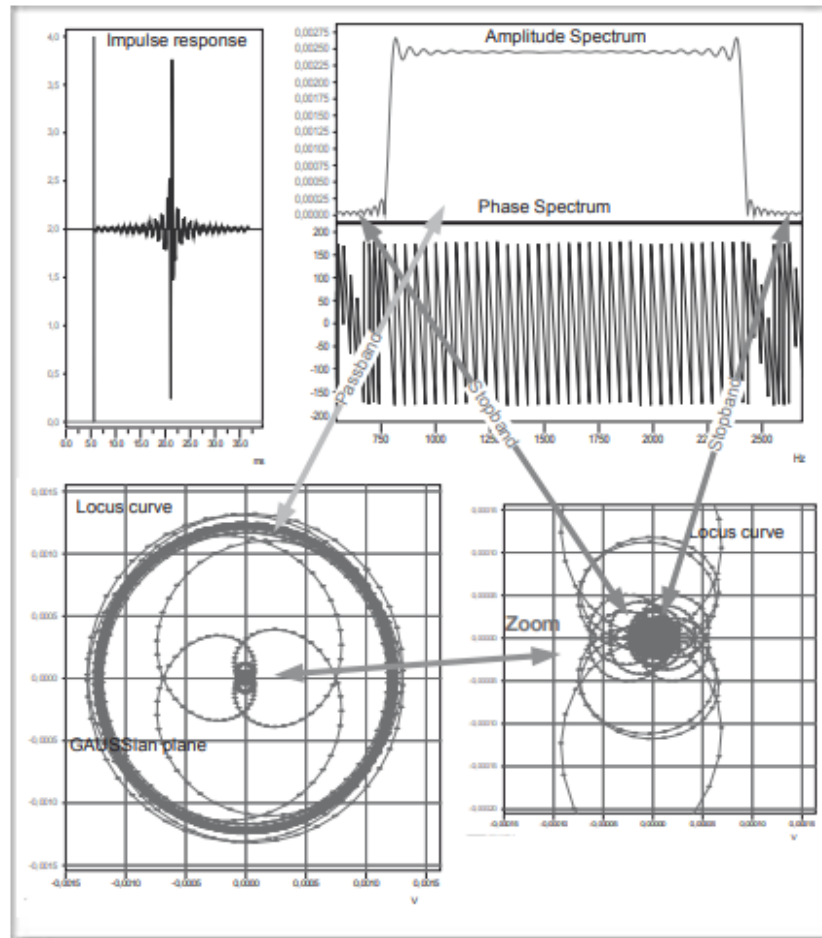
Pada Gambar 220, fungsi transfer filter bandpass ditunjukkan dalam dua jenis presentasi:

- a. Stop band filter bandpass dicirikan oleh banyak lompatan fase "tidak teratur" sebesar 1800 atau rad pada nol dari grafik filter. Karena amplitudo kecil, seluruh area pemblokiran tampak terkonsentrasi di pusat lokus (lihat "rentang zoom").
- b. Di dalam pita lintasan riak, terdapat respons fase linier yang sepenuhnya teratur, sebuah keuntungan penting dari filter FIR digital. Di dalam passband, kurva fase berputar sekitar 24 kali di sekitar roda dengan sudut penuh 3600 dan 2π . Oleh karena itu, "loncatan" dalam respons fase kanan atas disebabkan oleh representasi dan tidak nyata dalam arti fisik, karena nilainya identik -1800 atau $-\pi$ dan rad atau 1800 rad!
- c. Jarak antara titik pengukuran atau persilangan pengukuran di lokus di bawah ini tepat 1 Hz karena nilai laju sampling dan panjang blok dipilih sama (8192).
- d. Orbit melingkar dari lokus tidak tumpang tindih secara tepat, karena respons amplitudo pada pita sandi bergelombang. Oleh karena itu, lebar "tabung" adalah ukuran riak.
- e. Pada pita lintasan, jarak antara titik pengukuran individu adalah yang terbesar, sedikit lebih kecil di tepi filter, dan akhirnya kecil di pita penghenti. Hal ini khas dari lokus, bahwa mereka mewakili area yang diinginkan, seolah-olah bertambah besar ukurannya dengan kaca pembesar!

Perbandingan fungsi transfer filter analog "miskin" dengan filter digital "kualitas tinggi" memberikan hasil berikut secara keseluruhan:

Filter berkualitas pasti memiliki respons impuls yang tahan lama (t) (Prinsip ketidakpastian!). Ini "peregangan waktu" dalam bahasa gelombang sinus menyiratkan pergeseran fase "raksasa" dari $n \cdot 2\pi$ rad.

Filter digital yang sangat baik - tepi curam dan tanpa riak - karena itu memiliki lokus annular yang sangat sempit untuk area lintasan dan rentang titik tengah yang kecil (untuk wilayah pemblokiran). Tepi filter membentuk garis simetris yang relatif pendek yang menghubungkan cincin dan pusat.



Gambar 220: Bentuk Representasi Dari Fungsi Alih Filter Digital

Kiri atas Anda pertama-tama akan melihat -pulsa dan respons impuls dari filter bandpass pada input filter, kanan atas amplitudo dan respons fase dari fungsi transfer. Kedua representasi ini mengandung informasi yang sama dengan representasi fungsi alih sebagai lokus (bawah), asalkan frekuensi setiap titik pengukuran diketahui.

Di dalam pita lolos filter, sudut penuh 360° atau 2π dilalui sekitar 24 kali. Ini dapat dilihat dari kurva fase ke kanan atas, di mana jumlah "lompatan" yang sesuai dari 180° hingga -180° , atau hingga $-\pi$ dapat diidentifikasi (kedua sudutnya identik!). Jadi, lokus melintasi sudut penuh ini sebanyak 32 kali. Karena riak kurva filter, kurva tidak sepenuhnya melingkar, tetapi sedikit berfluktuasi. Lebar "tabung" ini menunjukkan riak grafik filter.

Lokus selalu mewakili pita frekuensi positif dan negatif, yang mencerminkan (horizontale) simetri sumbu? Informasi lebih rinci tentang Gambar ini dapat ditemukan dalam teks.

Latihan pada bab 10

Latihan 1

Apa perbedaan antara filter analog dan digital yang langsung mencolok?

Latihan 2

- (a) Komponen mana dalam filter analog yang menentukan perilakunya yang bergantung pada frekuensi dan bagaimana hal ini dapat dijelaskan?
- (b) Mengapa tidak ada filter analog berkualitas tinggi?
- (c) Di mana dapat dipastikan bahwa filter analog akan digunakan di masa mendatang?

Latihan 3

- (a) Jelaskan struktur dan cara kerja filter FFT yang terdiri dari tiga komponen (modul)
- (b) Apa yang harus diperhatikan dalam kasus filter FFT untuk memastikan bahwa daerah konduksi yang diinginkan dari filter diatur dengan benar.
- (c) Mengapa selektivitas atau kecuraman tepi filter FFT meluas ke batas fisik yang ditentukan oleh Prinsip Ketidakpastian?
- (d) Apa kelebihan dan kekurangan filter FFT?

Latihan 4

Percobaan dengan sirkuit bandpass seperti pada Gambar 206 dan tentukan bagaimana selubung (fungsi Si) dan frekuensi tengah berubah dengan respons pulsa. Bagaimana sifat filter bandpass dapat dilihat dengan jelas dari respon pulsa dalam domain waktu?

Latihan 5

Sepintas filter FFT tampak tidak "kausal" karena sinyal keluaran – respon pulsa – tampak muncul sebelum sinyal masukan – pulsa – muncul pada keluaran. Mengapa komputer tidak dapat melakukan hal ini secara berbeda?

Latihan 6

- (a) Ide apa yang mengarah ke sinyal digital yang menyaring langsung dalam domain waktu dan dengan demikian menghindari transformasi ke dalam domain frekuensi dan kembali lagi ke FFT saya?
- (b) Jelaskan prinsip filter digital berdasarkan tumpang tindih respons pulsa berbentuk Si dari semua pengukuran diskrit (lihat Gambar 209).
- (c) Filter membatasi lebar pita dan untuk alasan ini respons pulsa diskrit yang tahan lama juga terjadi dalam kasus filter digital. Proses pensinyalan apa yang diperlukan untuk menghasilkan respons pulsa diskrit yang lebih tahan lama "secara artifisial" dari pulsa-?

Latihan 7

- (a) Rancanglah diagram sirkuit skematik dari filter digital (FIR).
- (b) Bagaimana respons pulsa berbentuk Si dapat dipangkas melalui rangkaian skematik.
- (c) Apa peran koefisien filter dari sinyal digital (FIR)?

Latihan 8

- (a) Mengapa konvolusi merupakan proses pensinyalan yang penting? Mengapa memungkinkan pemfilteran dalam domain waktu?
- (b) Bagaimana pemfilteran digital dari sinyal yang lebih tahan lama dapat dijelaskan secara grafis dengan konvolusi (lihat Gambar 212)?

Latihan 9

- (a) Jelaskan konsep "situs pengembangan" untuk filter digital.
- (b) Bagaimana filter digital berkualitas tinggi diproduksi dengan DASYLab menggunakan modul konvolusi?
- (c) Koefisien filter tidak mengatakan apa-apa tentang bandwidth sebenarnya dari sinyal digital. Informasi apa yang menentukan dalam hal ini?

Latihan 10

- (a) Bagaimana konten riak muncul di daerah konduktor filter digital dan bagaimana menghindarinya?
- (b) Bagaimana bandpass digital dapat dibuat melalui "situs pengembangan" untuk sinyal digital?
- (c) Mengapa highpass digital tidak dapat dibuat dengan mudah melalui DASYLab?

Latihan 11

Jelaskan kondisi kerangka kerja apa yang berlaku untuk pengembangan filter digital.

BAB 11

TEKNOLOGI TRANSMISI DIGITAL I: PENYANDIAN SUMBER

Mikroelektronika modern menawarkan aplikasi dalam pemrosesan sinyal digital (DSP) yang beberapa tahun lalu tidak pernah terpikirkan. Telepon seluler hanyalah salah satu contoh, internet global lainnya. Masyarakat umum tidak begitu menyadari aplikasi menarik dari teknologi medis dan teknologi radio dan televisi di masa depan: DAB Penyiaran Audio Digital dan DVB Penyiaran Video Digital.

Satu perkembangan baru semacam ini dapat sepenuhnya mengubah pasar, menghancurkan perusahaan, atau melontarkan mereka ke depan. Ambil contoh ADSL.

ADSL (asymmetric digital subscriber line) adalah pengembangan baru dari jenis ini yang membuat jalan raya data dari kabel kembar tembaga lama dari kabel bawah tanah. ADSL mengangkut melalui saluran telepon tradisional hingga 125 kali dari saluran ISDN, yaitu hingga 8 Mbit/s dari jaringan ke pelanggan dan sekitar 700 kBit/s dari pelanggan ke jaringan. Saluran ISDN asli pada saluran ini tetap ada dan dapat digunakan sebagai tambahan. Ini cukup untuk 4 saluran televisi digital yang dapat menjangkau pelanggan secara bersamaan secara real time.

Saluran telepon lama yang baik telah dinyatakan mati. Investasi oleh Deutsche Telekom dalam skala 250 miliar euro akan diperlukan untuk menghubungkan setiap rumah tangga dengan serat kaca sebagai media transmisi. ADSL akan membuat investasi besar ini tidak diperlukan di masa mendatang dan para pesaing Deutsche Telekom akan menghadapi kesulitan. Itu memiliki "mil terakhir" - saluran telepon - ke pelanggan.

Gambar 221 menunjukkan keinginan besar aplikasi multimedia untuk kapasitas transmisi di mana gambar, animasi, ucapan, dan musik selain teks digunakan. Aplikasi video memiliki selera terbesar. Yang disebut sinyal video CCIR 601 membutuhkan 250 Mbit/s untuk aliran data video saja. Bandwidth yang dibutuhkan bahkan lebih dari yang dapat diatasi oleh jaringan berkecepatan tinggi. Teknologi ATM yang paling banyak digunakan saat ini data dari pemancar dipecah menjadi paket data kecil 53 Byte dan dimasukkan ke saluran transmisi sesuai urutan kedatangannya (mode transfer asinkron) – biasanya hanya menyediakan 155 Mbit/s.

DSP (pemrosesan sinyal digital) memberikan solusi. (Matematika) teori sinyal telah menciptakan prosedur yang memungkinkan kompresi data yang efektif. Selain itu, ia menawarkan solusi tentang bagaimana data dapat dilindungi secara efisien dari gangguan seperti kebisingan. Kedua proses – kompresi dan pengkodean perlindungan kesalahan – dapat diterapkan pada sinyal nyata menggunakan komputer. Mereka misalnya memungkinkan untuk mengirimkan gambar video setajam jarum dari bintang terjauh tata surya kita selama jutaan kilometer. Pemancar wahana antariksa hanya memiliki kekuatan 6 W.

Kapasitas memori dari berbagai media
(pada resolusi 640 • 480 piksel)

Teks : Simbol mewakili pola $8 \cdot 8$ piksel

(diperlukan ASCII encoded 2 Bytes)

Memori per halaman layar = $2 \text{ Bytes} \cdot 640 \cdot 480 / (8 \cdot 8) = 9,4 \text{ kBytes}$

Gambar piksel : Misalnya gambar terbuat dari 256 warna, mis.

1 Byte per piksel

Kapasitas memori per gambar : $640 \cdot 480 \cdot 1 \text{ Byte} = 300 \text{ kByte}$

Bahasa : Bahasa dalam kualitas telepon disampel dengan 8 kHz dan dikuantisasi dengan 8 bit. Aliran data hasil 64 kBit/s . Itu menunjukkan

Kapasitas memori 8 kByte/s

Stereo-audio-signal : Diperlukan data rate $2 \cdot 44100 \cdot 16 \text{ bit} / 8 = 176,4 \text{ kByte}$.

Kapasitas memori dihasilkan dari 172 kByte/s (1kByte adalah 1024 byte)

Urutan video: Sebuah film video terdiri dari 25 gambar lengkap per detik. Luminance dan chrominance (informasi kecerahan dan warna) dari setiap piksel dikodekan bersama dalam 24 bit atau 3 Bytes. Luminance disampel dengan 13,5 MHz dan chrominance dengan 6,75 MHz.

Pengkodean 8 bit menunjukkan: $(13,5\text{MHz} + 6,75 \text{ MHz}) \cdot 8 \text{ bit} = 216 \text{ Mbit/s}$ Kecepatan data:
 $640 \cdot 480 \cdot 25 \cdot 3 \text{ Bytes} = 23,04 \text{ MByte}$

Ini menghasilkan kapasitas memori per detik:

$(23,04 \text{ MByte})/1.024 = 22,5 \text{ MByte}$ yaitu 22,5 MByte/s

Gambar 221: Kecepatan transmisi aplikasi multimedia penting

Pidato, musik, dan video ternyata membutuhkan banyak ruang penyimpanan dan bandwidth. Bagaimana sinyal nyata dapat dikompresi? Bagaimana mungkin untuk membangun dan menghapus redundansi sinyal nyata sambil menjaga informasi penting?

Jawabannya kompleks dan komentar berikut berhubungan dengan strategi dan beberapa proses yang digunakan dalam teknologi transmisi modern.

Encoding Dan Decoding Sinyal Dan Data Digital

Ekspresi umum untuk representasi numerik dari simbol (misalnya huruf atau pengukuran) dan untuk modifikasi sistematis sinyal digital atau data adalah istilah "pengkodean".

Gambar 222 menunjukkan contoh penting pengkodean. Dalam "pengkodean ASCII" ini semua tanda (simbol) penting dalam komunikasi tertulis diberi nomor antara 0 dan 127. 128 (= 2⁷) tanda yang berbeda hanya dapat dikodekan dengan cara ini. Kode 7- Bit sudah cukup untuk tujuan ini. Sejak 1963 jenis pengkodean ini telah menjadi standar dunia untuk komputer.

Catatan:

Lebih dari 128 tanda yang berbeda masih tidak dapat ditransmisikan melalui internet dan semua jaringan komputer lainnya. Umlaut Jerman (misalnya) dan tanda "ß" tidak disertakan. Jika hanya satu bit lebih yang diambil pada awalnya (8 Bit = 1 Byte), jumlah tanda yang mungkin akan menjadi dua kali lebih besar. Kode 2 byte (16 bit) (65.536 tanda) akan menghasilkan kode yang benar-benar universal untuk jaringan elektronik di seluruh dunia. Tapi itu adalah ASCII 7 bit lama yang bagus yang berhasil menembus jaringan.

Sinyal kode (digital) dapat sebagian atau seluruhnya diubah kembali menjadi bentuk aslinya di penerima. Kedua proses ini sering disebut encoding dan decoding. Kode kata digunakan untuk proses pengkodean yang sebenarnya.

Dalam teknologi transmisi digital, istilah pengkodean digunakan terutama sehubungan dengan proses-proses berikut:

- Konverter A/D dan D/A (benar-benar enkoder A/D)
- Kompresi data
- Pengkodean perlindungan kesalahan
- Pengkodean data digital

Kompresi

Kompresi sinyal digital adalah ekspresi umum untuk proses (algoritma) atau program yang mengubah format data sederhana menjadi format kompak yang optimal. Dalam analisis akhir, jumlah bit dan byte harus dikurangi sejauh mungkin. Dekompresi membalikkan proses ini.

Dalam hal ini pengkodean ASCII – lihat Gambar 222 – dikodekan dengan buruk. Masing-masing dari banyak simbol memiliki panjang 7 bit yang sama, tidak peduli apakah itu sering terjadi atau sangat, sangat jarang. Jadi, dalam teks, spasi yang memisahkan dua kata adalah yang paling sering. Huruf kecil lebih sering daripada huruf kapital. Huruf "e" tentu lebih sering daripada "x".

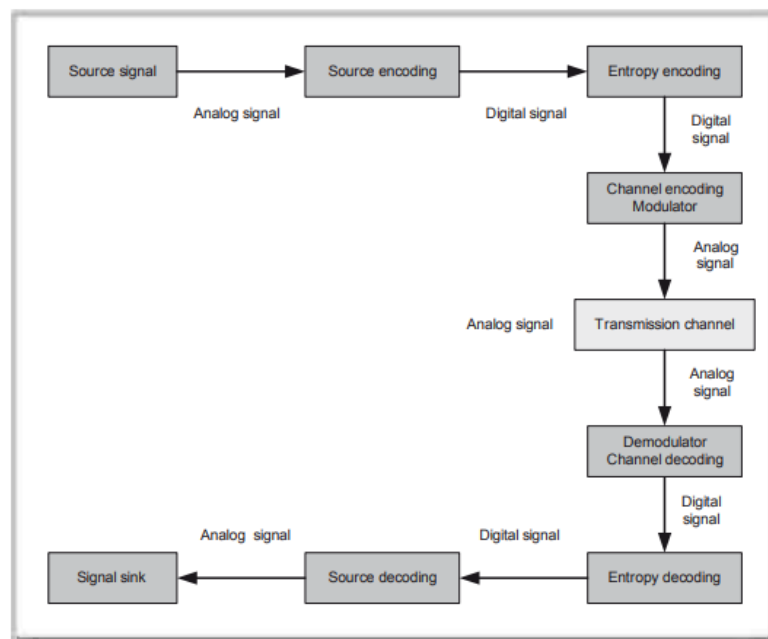
0	null	32	space	64	@	95	`
1	start heading	33	!	65	A	97	a
2	start of text	34	"	66	B	98	b
3	end of text	35	#	67	C	99	c
4	end of xmit	36	\$	68	D	100	d
5	enquiry	37	%	69	E	101	e
6	acknowledge	38	&	70	F	102	f
7	bell, beep	39	'	71	G	103	g
8	backspace	40	(	72	H	104	h
9	horz. tab	41	)	73	I	105	i
10	line feed	42	*	74	J	106	j
11	vert. tab, home	43	+	75	K	107	k
12	form feed, cl	44	,	76	L	108	l
13	carriage return	45	-	77	M	109	m
14	shift out	46	.	78	N	110	n
15	shift in	47	/	79	O	111	o
16	data line esc	48	0	80	P	112	p
17	device control 1	49	1	81	Q	113	q
18	device control 2	50	2	82	R	114	r
19	device control 3	51	3	83	S	115	t
20	device control 4	52	4	84	T	116	t
21	negative ack	53	5	85	U	117	u
22	synck idle	54	6	86	V	118	v
23	end xmit block	55	7	87	W	119	w
24	cancel	56	8	88	X	120	x
25	end of medium	57	9	89	Y	121	y
26	substitute	58	:	90	Z	122	z
27	escape	59	;	91	[	123	{
28	file separator	60	<	92	\	124	|
29	group separator	61	=	93	]	125	}
30	record separator	62	>	94	^	126	~
31	unit separator	63	?	95	_	127	del

Gambar 222: Pengkodean ASCII

Ini adalah standar lama untuk representasi tanda, huruf, dan angka khusus dalam bentuk digital (sebagai angka atau pola bit). Setiap simbol yang dapat dicetak memiliki nomor antara 32 dan 127 yang dialokasikan untuknya, sedangkan angka dari 0 hingga 31 adalah nomor kontrol untuk bentuk teknologi komunikasi yang sudah usang dan praktis tidak lagi diperlukan.

Biasanya semua tanda ASCII disimpan dengan satu byte (8 bit). Nilai non-standar dari 128 hingga 255 sering digunakan untuk huruf Yunani, simbol matematika, dan berbagai pola geometris.

Program kompresi yang baik untuk teks harus terlebih dahulu menentukan frekuensi kemunculan simbol dan mengkategorikannya sesuai dengan kemungkinan kemunculannya. Dalam urutan ini simbol yang paling sering harus memiliki pola bit terpendek (yaitu angka terpendek) dan yang paling langka harus memiliki yang terpanjang. Ini akan menghasilkan file data keseluruhan yang jauh lebih kecil tanpa kehilangan informasi.



Gambar 223: Jalur Transmisi Dari Sudut Pandang Pengkodean

Diagram blok menunjukkan tiga coders dan decoder yang berbeda. Encoder sumber dapat berupa konverter A/D yang kode keluarannya sudah "sangat efisien" (lihat konverter delta dan sigma-delta (encoder)). Encoder entropi (lihat pengkodean HUFFMAN) mencoba untuk mengoptimalkan kode ini dalam hal kekompakan tanpa kehilangan informasi. Kekompakan ini agak berkurang lagi oleh encoder saluran sebagai akibat dari redundansi dalam bentuk bit tambahan yang ditambahkan. Tujuannya adalah untuk menjaga perlindungan kesalahan untuk sinyal. Penerima harus dapat mengenali tanda yang salah dan memperbaikinya secara mandiri.

Kompresi Kerugian Rendah Dan Lossy

Mengingat banyaknya proses kompresi yang digunakan saat ini, tidak mengherankan bahwa proses yang universal dan optimal tidak dapat terjadi. Proses yang paling cocok tergantung dalam setiap kasus pada sinyal atau jenis data.

Sinyal atau data tertentu harus dikompresi tanpa kehilangan apapun, yaitu sinyal yang diperoleh kembali oleh penerima harus benar-benar identik dengan aslinya. Tidak sedikit pun harus berubah. Ini berlaku untuk perangkat lunak dan file data pengujian.

Di sisi lain, penurunan kualitas tertentu dan oleh karena itu informasi dapat ditoleransi dalam kasus, misalnya, sinyal audio dan video. Ini juga disebut reduksi data. Dengan demikian

ada informasi yang terkandung dalam sinyal audio yang tidak dapat kita rasakan. Ini tidak relevan. Dalam konteks ini, ungkapan pengurangan ketidakrelevanan digunakan. Kita sudah terbiasa dengan gambar televisi yang "berkualitas buruk". Proses kompresi lossy digunakan di sini.

Perbedaan antara kedua jenis kompresi ini juga penting. Proses lossy kompres jauh lebih efisien daripada prosedur low-loss. Dari sudut pandang pensinyalan dan teoretis, kompresi yang lebih lossy ditandai dengan elemen noise yang lebih besar. Kebisingan di sini mewujudkan "disinformasi", yaitu hilangnya informasi yang ditoleransi.

Konversi A/D dengan bagiannya memproses sampling, kuantisasi, dan encoding dapat dilihat sebagai metode kompresi lossy (lihat Gambar 145, Gambar 149 dan Gambar 184). Pemilihan laju sampling, jumlah langkah kuantisasi dan metode pengkodean memiliki pengaruh besar pada kualitas dan kekompakan sinyal digital.

Untuk mengetahui sinyal atau tipe data apa, proses kompresi tertentu menguntungkan, beberapa strategi kompresi akan dijelaskan dengan menggunakan contoh.

Pengkodean RLE

RLE (run length encoding) mungkin yang paling sederhana tetapi terkadang merupakan proses kompresi yang optimal.

Prinsip:

lebih dari tiga Byte berurutan identik dikodekan dengan nomor mereka.

Contoh:

"A-Byte" A; AAAAAA dikodekan sebagai MA6. M adalah byte penanda dan menunjukkan "singkatan" semacam ini. Dalam contoh ini ada pengurangan 50%. Byte penanda tidak boleh ada dalam teks sumber sebagai tanda, jika tidak maka akan memiliki arti "ganda".

Aplikasi:

RLE sangat cocok untuk kumpulan data dengan urutan panjang dari tanda yang sama, misalnya, gambar hitam putih. Oleh karena itu sering digunakan untuk format faks di mana area putih besar hanya sesekali diinterupsi oleh huruf hitam.

Catatan:

File data dengan byte yang sering berubah sangat tidak cocok untuk proses ini.

Pengkodean HUFFMAN**Prinsip:**

itu didasarkan pada prinsip alfabet morse. Kode terpendek dialokasikan ke simbol yang paling sering muncul (misalnya huruf) dan yang terpanjang ke yang paling jarang. Simbol dari sumber dikodekan dan bukan data yang akan dikirimkan. Ini disebut entropi-encoding. Ini bebas kerugian.

Prosedur:

Pertama-tama harus ditentukan simbol apa yang muncul (misalnya, dalam teks). Kemudian dengan frekuensi apa (atau lebih tepatnya, probabilitas apa) mereka terjadi. NS

Algoritma HUFFMAN menghasilkan "pohon kode" yang dihasilkan dari probabilitas simbol individu. Pohon kode digunakan untuk menetapkan kata-kata kode untuk masing-masing simbol.

Proses ini dijelaskan secara rinci dalam Gambar 224.

Dekode:

agar penerima dapat mengenali data asli dari urutan byte, pohon HUFFMAN juga harus ditransmisikan. Saat "turun dari atas" Anda selalu mendarat di salah satu dari 7 simbol berbeda yang dipilih dalam Gambar 224. Kemudian Anda harus melompat kembali ke atas dan bercabang ke kiri dan kanan hingga sinyal berikutnya tercapai.

Catatan:

Semakin panjang misalnya teks, semakin sedikit ruang yang diambil oleh transmisi selain pohon HUFFMAN.

Pengkodean LZW

Proses ini dinamai menurut pencetusnya LEMPEL, ZIV dan (kemudian) WELCH. Ini mungkin proses yang paling umum digunakan untuk kompresi serba guna. Oleh karena itu digunakan dalam kompresi file ZIP dan banyak format grafik (misalnya GIF). Faktor kompresi 5:1 adalah biasa.

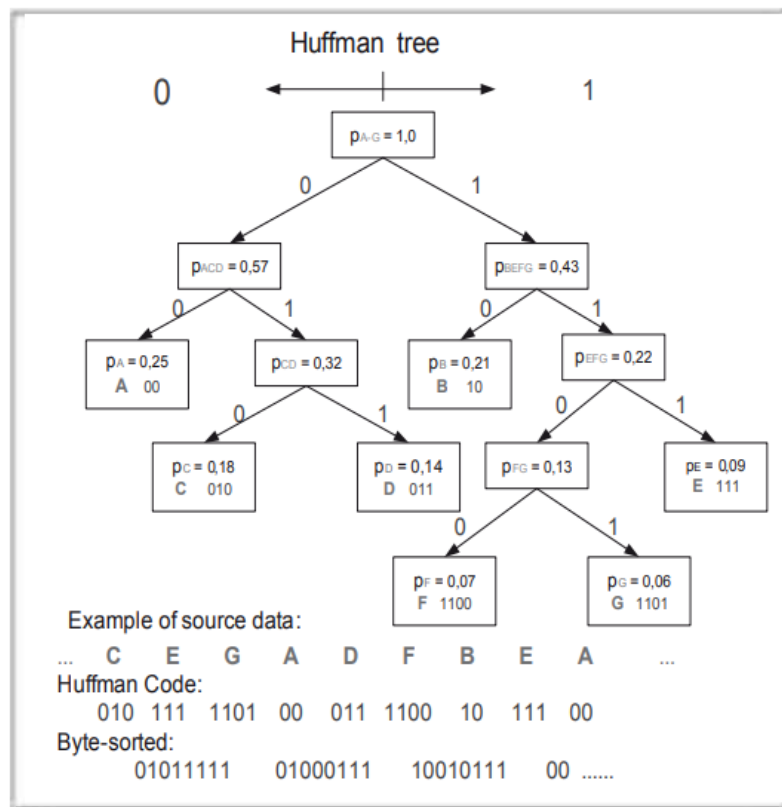
Gambar 225 menunjukkan kiri atas isi rangkaian angka sebelum dan sesudah setiap langkah dalam proses penyandian. Pada langkah pertama, pola terpanjang yang ditemukan hanya akan berupa satu huruf yang dapat ditemukan dalam kamus standar. Dalam contoh kita ini adalah "L". Pada langkah yang sama huruf selanjutnya yang akan diperiksa adalah "Z" dan dilampirkan pada L.

Rantai tanda yang dihasilkan dengan cara ini jelas tidak ada dalam kamus dan dimasukkan untuk pertama kalinya di bawah Indeks (256). Setelah ini pada langkah terakhir, rantai tanda "terpanjang" yang ditemukan - yaitu "L" - dihapus dan dikeluarkan pada saat yang sama (lihat "Pola yang dikenali"). Dengan cara ini "Z" menjadi tanda pertama dari string baru.

Di sini semuanya dimulai lagi dari awal. "Z" sekarang merupakan pola terpanjang yang diketahui. "ZW" disimpan di bawah Indeks (257) dalam leksikon. "Z" sekarang dihapus, dikeluarkan dan babak baru dimulai. "W" sekarang adalah rantai tanda terpanjang yang masuk dalam leksikon sejauh ini. "WL" sekarang termasuk di bawah nomor indeks (258), "W" dihapus dari entri dan dikeluarkan.

Baru sekarang sesuatu yang menarik terjadi sehubungan dengan kompresi yang diinginkan. Pola terpanjang yang diketahui sekarang menjadi urutan tanda yang sebelumnya dimasukkan dalam leksikon untuk pertama kalinya ("LZ" dengan nomor indeks 256). Pada langkah selanjutnya, indeks pola dari leksikon dikeluarkan dan bukan hanya dua tanda individu.

Karena kamus berisi 4096 (= 212) entri menjadi lebih panjang dan lebih panjang dalam kasus string entri yang sangat panjang (ini adalah file yang akan dikompresi). Semakin sering urutan tanda yang lebih panjang di mana indeks pendek ditransmisikan menjadi milik indeks yang lebih tinggi.



Gambar 224: Pengkodean HUFFMAN

7 simbol yang berbeda, di sini ditunjuk oleh huruf A sampai G, akan muncul dalam sebuah file. Misalkan A paling sering muncul dengan probabilitas 25% atau 0,25. B mengikuti dengan 0,21, C dengan 0,18, D dengan 0,14, E dengan 0,09, F dengan 0,07 dan G dengan 0,06. Idanya sekarang adalah untuk mengalokasikan kode terpendek ke A dan yang paling panjang ke G. Karena A dan B hampir sama kemungkinannya, akan masuk akal untuk memberi mereka panjang kode yang sama.

Algoritma HUFFMAN menghasilkan pohon HUFFMAN. Dalam "daun" pohon HUFFMAN, probabilitas p untuk simbol yang relevan dimasukkan. Pada simpul percabangan Anda melihat jumlah probabilitas. Di atas ada probabilitas p = 1 atau 100%, karena salah satu dari 7 simbol harus dipilih!

Jika – bergerak dari atas ke bawah – Anda bercabang ke kiri, 0 hasil, dan ke kanan 1 dalam setiap kasus. Dengan mengurutkan simbol menurut probabilitas kemunculannya, algoritma mengetahui urutan percabangan yang mengarah ke simbol A ke G.

Diurutkan menurut byte sinyal terkompresi tiba di penerima. Sekarang decoding berlangsung, dimulai setiap kali di atas. Setelah 00 A tercapai. Pointer melompat kembali ke atas lagi, setelah 111 E tercapai, dll. Prasyaratnya adalah transmisi pohon HUFFMAN selain dokumen terkompresi.

LZW encoding

The standard dictionary contains the 256 different Byte-pattern. Every symbol occurring here in the input corresponds to one specific pattern among these byte-patterns !

Input	Recognized pattern	New dictionary entry
LZWLZ78LZ77LZCLZMWLZAP	L	LZ (=256)
ZWLZ78LZ77LZCLZMWLZAP	Z	ZW (=257)
WLZ78LZ77LZCLZMWLZAP	W	WL (=258)
LZ78LZ77LZCLZMWLZAP	LZ	LZ7 (=259)
78LZ77LZCLZMWLZAP	7	78 (=260)
8LZ77LZCLZMWLZAP	8	8L (=261)
LZ77LZCLZMWLZAP	LZ7	LZ77 (=262)
7LZCLZMWLZAP	7	7L (=263)
LZCLZMWLZAP	LZ	LZC (=264)
CLZMWLZAP	C	CL (=265)
LZMWLZAP	LZ	LZM (=266)
MWLZAP	M	MW (=267)
WLZAP	WL	WLZ (=268)
ZAP	Z	ZA (=269)
AP	A	AP (=270)
P	P	

Standard dictionary

0
1
-
-
254
255
255

Output: LZW(256) 78 (259) 7 (256) C (256) M (258) ZAP

LZW decoding

Input symbol	C	New dictionary entry	P
L	Z	LZ (=256)	L
Z	W	ZW (=257)	Z
W	L	WL (=258)	W
(256)	7	LZ7 (=259)	LZ
7	8	78 (=260)	7
8	L	8L (=261)	8
(259)	7	LZ77 (=262)	LZ7
7	L	7L (=263)	7
(256)	C	LZC (=264)	LZ77
C	L	CL (=265)	LZ
(256)	M	LZM (=266)	LZ
M	W	MW (=267)	M
(258)	Z	WLZ (=268)	MW
Z	A	ZA (=269)	WLZ
A	P	AP (=270)	Z
P			A
			P

Gambar 225: Pengkodean LZW

Pengkodean LZW dan variannya menjadi sangat penting untuk kompresi sinyal dan data digital sehingga harus dijelaskan di sini secara detail. Tanpa mengetahui pesan yang akan dikompresi, kompresi dilakukan secara efisien dan bebas kerugian. Algoritme dekompresi secara otomatis mengenali kode, membuat leksikon identik baru dan menggunakannya untuk merekonstruksi sinyal sumber. Jika Anda melihat Gambar cukup lama, seringkali mungkin untuk memahami prosesnya secara intuitif.

Decoding juga dimulai dengan leksikon standar yang dijelaskan. Ini lagi berisi entri dari 0 hingga 255. Dalam contoh kita "L" lagi-lagi merupakan "rantai tanda" terpanjang yang diketahui. Oleh karena itu diberikan dan disimpan dalam variabel P (seperti dalam "awalan"). Entri berikutnya juga dikenal sebagai tanda "Z". Ini pertama kali disimpan sebagai variabel C.

Sekarang isi P dan C di dalam kurung dan hasilnya "LZ" dimasukkan dalam leksikon di bawah nomor indeks (256). Semuanya berjalan dengan cara ini dan leksikon dan urutan tanda input asli dibuat melalui algoritma decoding.

Coba encode dan kemudian decode rantai tanda input yang berbeda sesuai dengan prinsip LZW. Baru setelah itu Anda akan melihat bahwa rantai tanda input harus memiliki bentuk khusus agar kompresi dapat dilakukan dengan cepat dan efisien ("hujan di Spanyol terutama turun di dataran").

Pengkodean Sumber Sinyal Audio

Konversi A/D dan D/A sudah dibahas di Bab 7 (bagian "Kuantisasi") dan terutama di Bab 9. Gambar 184 menunjukkan prinsip konverter/enkoder A/D, yang mengeluarkan "pengukuran" secara serial sebagai urutan 5 bit string angka. Dari sudut pandang teknis saat ini, konverter A/D dan D/A 8 bit hingga 24 bit sudah biasa.

Proses ini umumnya disebut sebagai PCM (modulasi kode pulsa). Setiap pengukuran dialokasikan – seperti dalam pengkodean ASCII – sebuah kode dengan panjang yang sama terlepas dari frekuensi kemunculannya. Menurut Gambar 221, tingkat transmisi 172 kbyte/s (kira-kira 620 Mbytes per jam) menghasilkan sinyal audio-stereo.

Strategi kompresi yang dijelaskan sampai sekarang harus dapat diterapkan pada sinyal audio. Bagaimanapun, ini tersedia sebagai urutan pola bit. Biasanya proses digunakan dalam konversi A/D yang memiliki "efek kompresi". Selain itu, dengan proses ini bagian sirkuit analog berkurang dan digantikan oleh DSP (pemrosesan sinyal digital).

Pengkodean Delta Atau Modulasi Delta

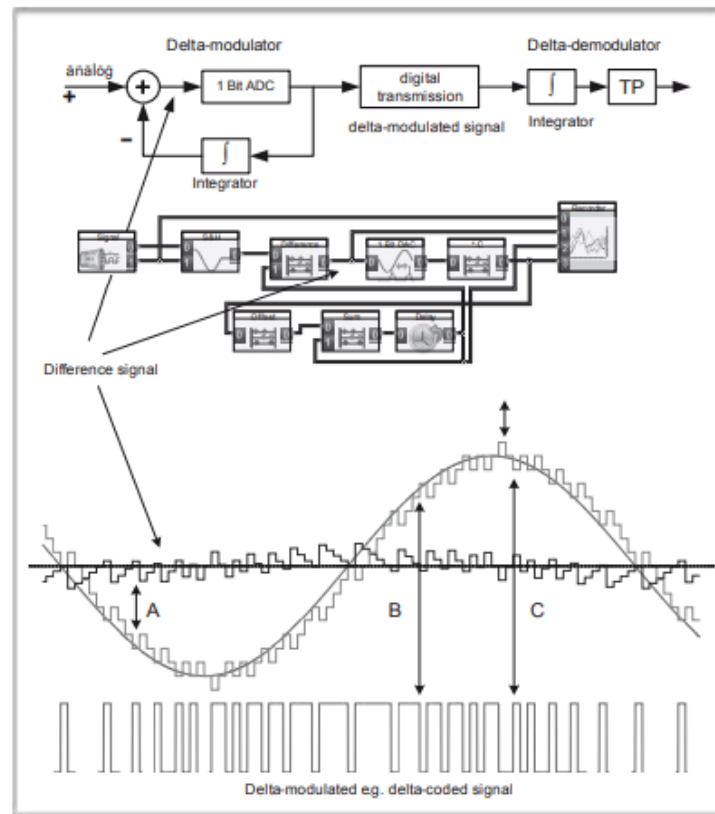
Yang disebut video screencam sangat populer misalnya untuk merekam instalasi atau penggunaan suatu program dalam bentuk video layar. Ini juga sering digunakan pada CD yang menyertai naskah ini. Sebagian besar waktu kursor dengan item menu yang diklik hanya bergerak di sekitar layar.

Tidak masuk akal di sini untuk menyimpan seluruh konten layar 25 kali per detik.

Catatan:

dalam matematika dan di bidang teknis dan ilmiah huruf kapital Yunani digunakan untuk menggambarkan perbedaan atau perubahan. Jadi, t adalah selisih waktu antara dua titik t_1 dan t_2 .

Notasi -modulasi lebih umum daripada modulasi delta.



Gambar 226: Diagram Blok Skematis, Sirkuit DasyLab, Dan Sinyal Dalam –Encoding

Dalam bentuk pengkodean atau modulasi ini hanya perubahan sinyal audio yang ditransmisikan. Dengan cara sinyal asli dibedakan secara digital, yaitu gradien diukur. Cara fungsi sirkuit dijelaskan secara rinci dalam teks.

Diferensiasi (digital) harus dibalik di penerima dengan integrasi (digital). Anda ingat: integrasi membalikkan diferensiasi dan sebaliknya (lihat Gambar 133 dan Gambar 134).

Dalam hal video screencam, cukup untuk mencatat perubahan pada gambar yaitu gerakan kursor dan perubahan gambar. Untuk ini hanya diperlukan sebagian kecil dari kapasitas penyimpanan dibandingkan dengan menyimpan semua gambar.

Pengkodean ini dapat digunakan secara efisien jika sinyal hanya berubah sedikit antara dua pengukuran atau dalam segmen waktu $t = TS = 1/f_s$ (f_s adalah frekuensi sampling).

Dalam hal ini sinyal berkode memiliki amplitudo yang lebih kecil dari sinyal aslinya. Dengan kata lain: probabilitas untuk pengukuran di sekitar nol meningkat. Pengukuran yang jauh lebih sedikit akan jauh dari nol.

Ini adalah kondisi yang menguntungkan untuk pengkodean HUFFMAN seperti yang dijelaskan di atas. Jika sinyal asli tidak berubah atau naik secara linier, sinyal berkode memiliki urutan pola bit yang sama. Mereka paling sering terjadi. Oleh karena itu, prosedur yang khas adalah setelah (lossy) encoding untuk menggunakan pengkodean HUFFMAN atau RLE sebagai pengkodean entropi bebas kerugian.

Dalam Gambar 226 diagram blok skematik dari -encoder (sering juga disebut modulator), rute transmisi dan -decoder ditampilkan. -encoder terdiri dari loop umpan balik. ADC 1 bit (konverter digital analog) hanya memiliki dua status: + dan -. Jika perbedaan sinyal pada input dari 1 bit ADC lebih besar dari nol pada output, misalnya +1, sebaliknya -1 (sesuai dengan rendah dan tinggi). Dalam analisis akhir, ADC 1 bit hanyalah sebuah komparator khusus.

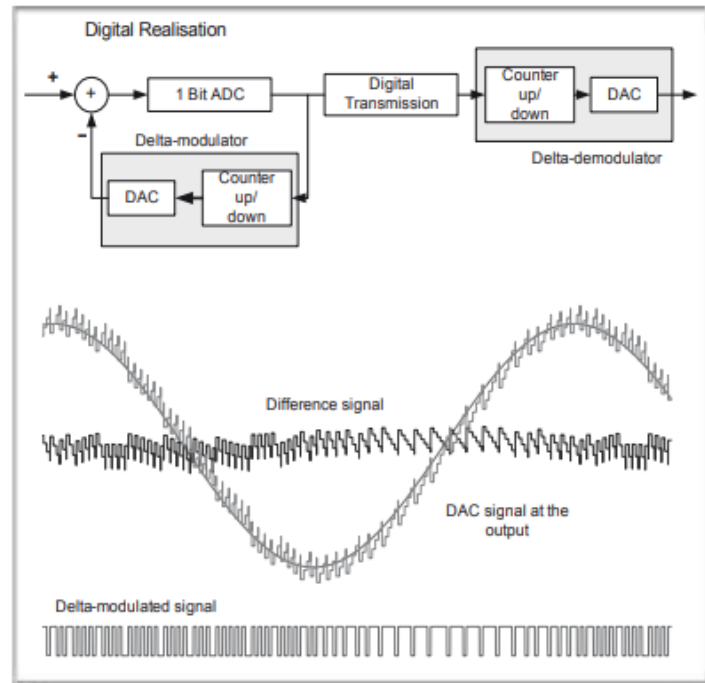
Dalam Gambar 226, "garis keputusan nol" dapat dilihat di sekitar sinyal perbedaan yang berfluktuasi. Dapat dikenali dengan jelas (lihat panah A, B, dan C) bahwa: segera setelah sinyal perbedaan berada di atas garis nol, sinyal berkode menjadi "tinggi"; jika tidak, itu rendah.

Apa yang – di sini sinusoidal – sinyal input dibandingkan dengan? Dalam hubungan ini Anda harus merkapitulasi apa yang dilakukan integrator (lihat Gambar 137 dan Gambar 139). Jika ada segmen sinyal positif pada input integrator – di sini di sebelah kanan – integrator bergerak ke atas, sebaliknya ke bawah. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 226 dan Gambar 227. Dimana sinyal berkode memiliki nilai +1 step naik; dalam kasus -1 mereka mengarah ke bawah.

i tengah Gambar 226, realisasi diagram blok skematik menggunakan DASYLab harus dilihat. "Integrator digital" adalah penambah analog umpan balik. Dalam nilai keluaran terakhir +1 ditambahkan atau -1 dikurangi. Ini menghasilkan kurva seperti langkah. Dalam kasus DASYLab dan program serupa, penundaan adalah bagian dari semua rangkaian umpan balik. Ini memastikan bahwa prinsip kausal dipatuhi. Reaksi suatu proses pada output hanya dapat diumpankan kembali ke input dengan penundaan (pertama penyebabnya, kemudian hasilnya). Sebelum penambah analog, dua modul aritmatika (membuat konstanta perkalian dan aditif) memastikan bahwa kurva sinyal input dan kurva perbedaan sinyal kira-kira berada di area yang sama. ADC 1 bit yang sebenarnya adalah pemicu atau pembanding. Komponen berikutnya melayani pengaturan sinyal yang benar dari -encoder.

Karena sinyal keluaran hanya memiliki dua status, semacam modulasi panjang pulsa terjadi. Kesalahan kuantisasi yang terjadi dalam hubungan ini dapat dikurangi hampir sesuka hati dengan oversampling. Semakin kecil interval antara dua nilai sampling semakin kecil pula selisihnya.

Karakteristik -modulasi atau -encoding adalah oversampling. Faktor n penting dimana frekuensi sampling terletak di atas batas yang ditentukan oleh Prinsip Sampling. Seperti saat ini dalam kasus prosedur ini frekuensi sampling 1 MHz dan lebih digunakan, n mungkin memiliki nilai sekitar 25. Sebagai hasil dari oversampling, noise didistribusikan pada rentang frekuensi yang lebih besar (Gambar 231).



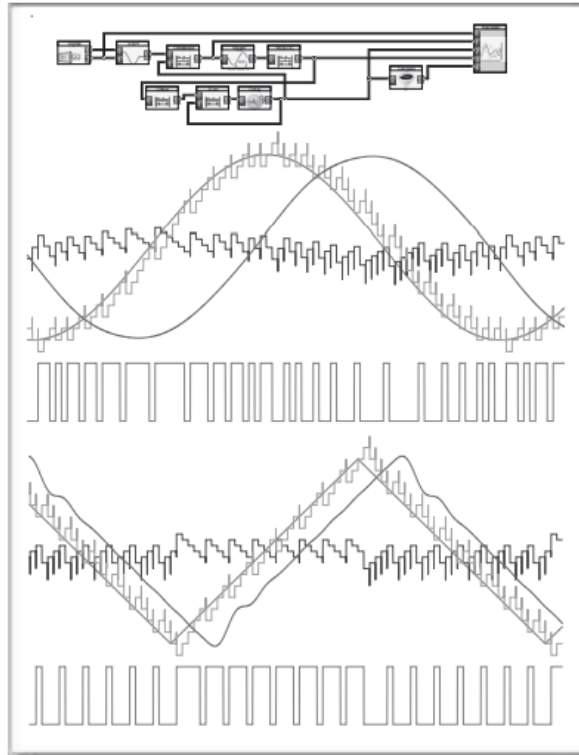
Gambar 227: Realisasi -Encoder Dan Kurva Sinyal Dalam Hal Laju Pengambilan Sampel Yang Lebih Tinggi

Dalam representasi diagram blok skema digital ini dapat dilihat dengan jelas di mana teknologi analog masih digunakan: pada input pemancar, output penerima dan – ini selalu berlaku – pada rute transmisi. Integrator digital diskrit waktu dan nilai diwujudkan melalui pencacah maju-mundur diikuti oleh DAC (digital analog converter).

Catatan untuk Gambar berikut identitas teknis cabang umpan balik negatif dan rangkaian penerima. Keduanya adalah encoder atau modulator. Sinyal referensi yang diumpangkan ke dalam modul perbedaan sesuai persis dengan waktu dan nilai sinyal input diskrit (di sini sinusoidal) yang diterima di penerima. Perbedaan antara keduanya, yaitu perbedaan sinyal setara dengan "derau kuantisasi".

Dalam kurva sinyal yang ditunjukkan di bagian bawah, laju pengambilan sampel yang lebih tinggi dipilih. Pengkodean dapat dilihat dengan jelas. Nilai maksimum dan minimum dari sinyal deltamodulated terletak di mana gradien ke atas atau ke bawah paling besar. Rata-rata mengambang akan mereproduksi kurva gradien dari sinyal asli, yaitu sinyal input yang dibedakan.

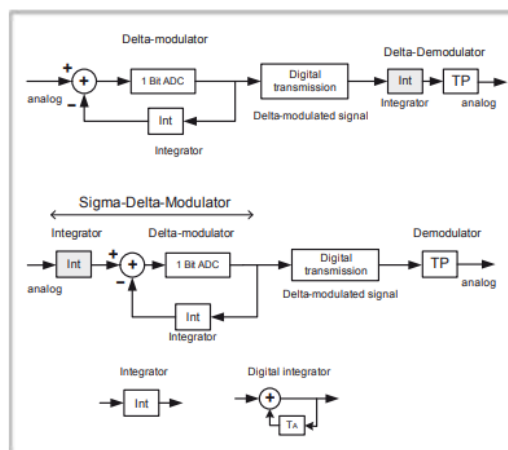
Sinyal yang dikodekan di bagian bawah kira-kira setara dengan sinyal termodulasi panjang pulsa (lihat Gambar 187). Berbeda dengan sinyal termodulasi panjang pulsa waktu kontinu di sini kita memiliki semacam sinyal diskrit waktu termodulasi panjang pulsa.



Gambar 228: -Demodulasi Atau Decoding

Di sini Anda melihat selain sinyal yang ada di -modulator, sinyal analog akhir yang diperoleh kembali di penerima. Seperti dijelaskan dalam teks Gambar 227, sinyal keluaran integrator digital dan sinyal diskrit waktu dan nilai yang diperoleh kembali di penerima harus sama. Untuk alasan ini tidak ada penerima di sirkuit DASYLab. Sinyal yang terakhir hanya boleh dilewatkan ke lowpass analog.

Catatan: sinyal input segitiga harus terlihat seperti sinyal yang dipulihkan (difilter). Seharusnya band-terbatas (Prinsip Pengambilan Sampel).



Gambar 229: Dari Modulator Delta Ke Modulator Sigma-Delta

Di bagian atas diagram blok saluran transmisi delta-modulator dan demodulator ditampilkan. Di bawah ini hanya integrator demodulator yang ditempatkan di awal saluran transmisi. Ini hampir tidak berpengaruh pada sinyal keluaran karena urutan proses linier – seperti integrasi – dapat diubah-ubah (lihat Bab 7 dari Gambar 134).

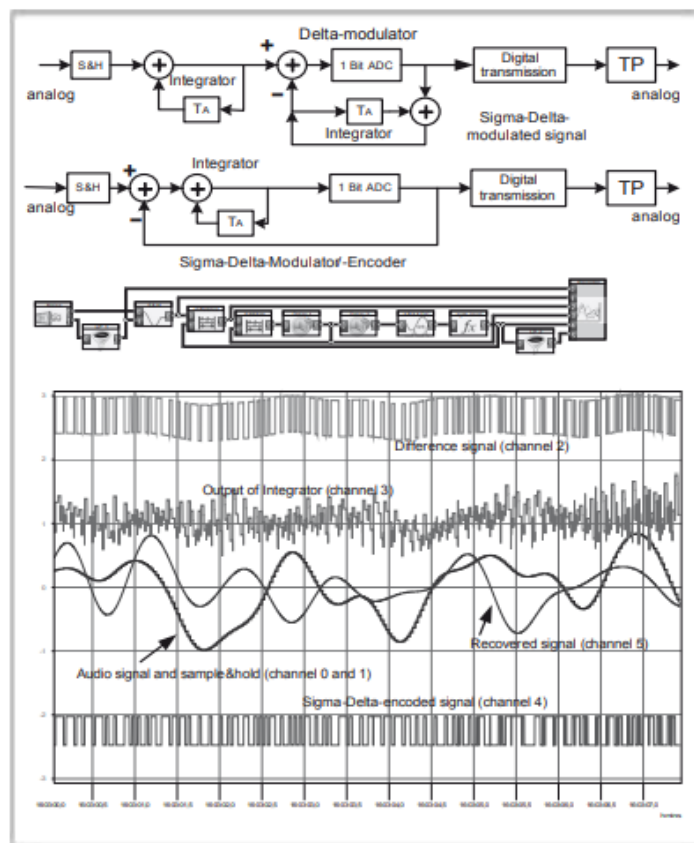
Karena interferensi juga dapat terjadi pada rute transmisi, hal ini menghasilkan keuntungan yang akan dijelaskan lebih rinci dalam teks.

Kedua integrator dapat digantikan oleh integrator tunggal setelah pembeda (lihat Latihan 10 pada Bab 7). Dengan demikian modulator/encoder selesai. Demodulator sekarang hanya terdiri dari lowpass analog. Ini berfungsi seperti "rata-rata mengambang" dan memulihkan sinyal input analog dari sinyal termulasi sigma-delta digital.

Di bagian bawah integrator diwujudkan dengan menggunakan penambah umpan balik yaitu nilai output sesaat ditambahkan (dengan penundaan) ke nilai input berikut. Varian sirkuit ini juga digunakan dalam simulasi DASYLab pada Gambar 229.

Modulasi Atau Penyandian Delta Sigma ($\Sigma\text{-}\Delta\text{-M}$)

Kerugian dari Δ -modulator adalah bahwa kesalahan bit yang terjadi dalam transmisi menyebabkan "offset" yaitu ke offset pada sinyal yang diterima. Apa yang disebut modulasi sigma-delta (modulasi) di mana peningkatan signifikan dapat dicapai dengan putaran perubahan komponen yang terampil adalah solusi di sini.



Gambar 230: Dari Modulator Delta Ke Modulator Sigma-Delta

Bentuk integrator yang digunakan di sini dihasilkan dari rangkaian DASYLab pada Gambar 228 dan Gambar 229: sebuah penambah yang menambahkan nilai keluaran terakhir dari ADC 1 bit ke nilai masukan berikutnya. Jika integrator semacam ini dihubungkan tambahan sebelum delta-modulator dapat dilakukan tanpa di penerima. Sirkuit di bawah ini di mana dua integrator (sebenarnya, penambah, yang menggunakan huruf Yunani (σ)) digantikan oleh integrator tunggal sebelum ADC 1 bit kemudian setara. Oleh karena itu, sirkuit ini disebut modulator/encoder.

Melalui proses pengaturan ulang ini dari penerima ke pemancar, banyak keuntungan lain dicapai yang dijelaskan lebih rinci dalam teks. Sebagai hasil dari keunggulan ini, modulator/konverter telah menjadi semacam ADC standar untuk konversi A/D berkualitas tinggi (audio, teknologi pengukuran).

Diagram rangkaian skema dari -encoder dan -decoder dengan dua integrator dapat disederhanakan. Hampir tidak ada yang berubah dalam sinyal output di penerima jika integrator mengubah posisinya dari ujung saluran transmisi ke input. Proses linier dapat diubah secara berurutan, seperti yang dijelaskan dalam Bab 7.

Mengapa ini harus dilakukan? Dengan cara ini dua integrator dalam -encoder dapat digantikan oleh integrator tunggal langsung di depan 1 bit ADC (lihat Latihan 10 pada Bab 7). Kami sekarang memiliki apa yang disebut modulator/encoder sigma-delta dengan demodulator/decoder seperti yang ditunjukkan pada Gambar 230. Di sana integrator ditampilkan sebagai penambah umpan balik. Sigma kapital (Σ) adalah simbol untuk "jumlah total" dalam bidang teknis dan ilmiah. Oleh karena itu, varian rangkaian dikenal sebagai modulator/encoder.

Demodulator hanya terdiri dari filter LP analog. Ini memulihkan sinyal input analog dari sinyal termodulasi digital. Ini berfungsi seperti rata-rata mengambang.

Filter Pembentukan Dan Penipisan Kebisingan

Semakin tinggi oversampling semakin kecil kesalahan kuantisasi. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 227 dan Gambar 231. Dengan oversampling n -lipatan, noise kuantisasi mendistribusikan dirinya sendiri pada rentang frekuensi n -kali lipat yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan oleh batang horizontal pada Gambar 231.

Pengurangan lebih lanjut dalam tingkat interferensi ini dimungkinkan dengan menggunakan modulator. Efek pembentukan ini dikenal sebagai "pembentukan derau" muncul sebagai akibat dari pengelompokan ulang integrator pada awal konverter A/D 1 bit. Ini memberikan preferensi pada perubahan sinyal yang lambat karena integrator adalah sejenis rata-rata.

Kesalahan kuantisasi meningkat secara linier dengan frekuensi dan karena itu memiliki karakteristik highpass. Dengan ini berarti hanya tingkat interferensi yang ada setelah pengambilan sinyal di demodulator yang sesuai dengan area segitiga (merah muda).

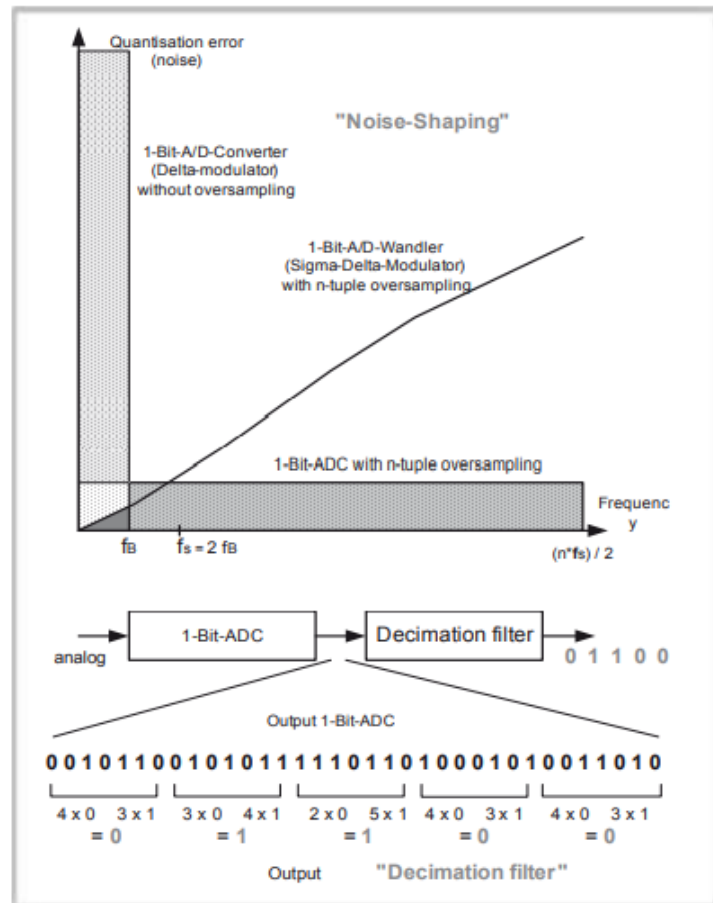
Frekuensi pengambilan sampel f_s dari sinyal audio harus dipilih setinggi mungkin dalam proses ini, tetapi laju transmisi biasanya tetap dan mungkin jauh lebih rendah daripada laju pengambilan sampel. "Penyesuaian" ini disebabkan oleh apa yang disebut

"filter penipisan" (lihat Gambar 231). Mereka membagi urutan bit dari konverter A/D 1 bit menjadi blok-blok dengan nomor bit ganjil (misalnya 7). Mereka kemudian memeriksa apakah lebih banyak simbol "0" atau "1" muncul di dalam blok. Simbol yang lebih sering muncul kemudian ditunjukkan pada keluaran filter penipisan. Tentu saja, ini juga semacam rata-rata dengan karakteristik lowpass.

Memanfaatkan Efek Psiko-Akustik (MPEG)

Domain frekuensi sejauh ini tampaknya tidak berperan dalam pengkodean atau kompresi sinyal audio. Namun, pendengaran sepenuhnya berada dalam domain frekuensi, yaitu kita hanya mendengar sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda. Metode kompresi yang benar-benar cerdas harus menyertakan domain frekuensi.

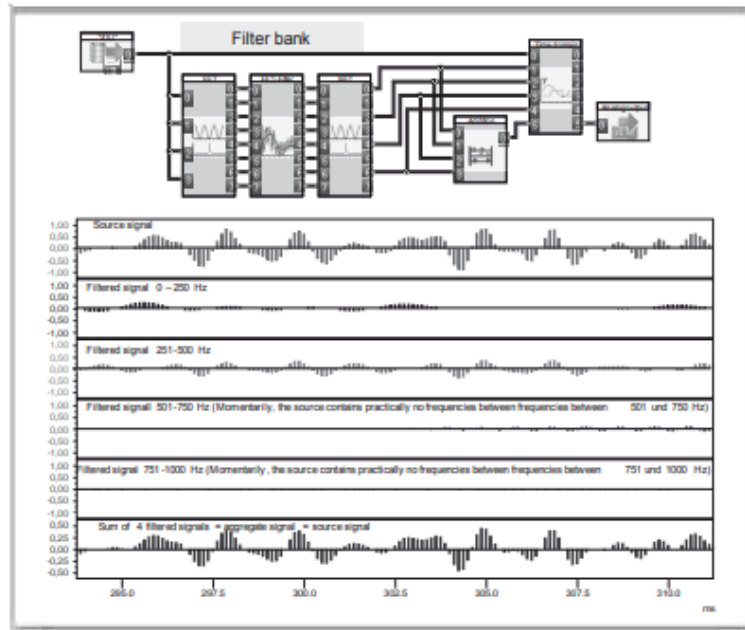
Sinyal audio seperti bahasa dan musik tidak mengandung fitur yang berlebihan, tidak seperti teks di mana huruf "e" muncul lebih bebas daripada "y". Akibatnya sulit untuk mengalokasikan kode yang lebih pendek ke suara atau nada.



Gambar 231: Filter Pembentukan Kebisingan Dan Penipisan

Setengah bagian atas Gambar menunjukkan distribusi derau kuantisasi dalam kasus yang berbeda di atas domain frekuensi. Frekuensi f_B menunjukkan bandwidth dari sinyal asli dan yang dipulihkan, f_S frekuensi sampling minimum dari sinyal sumber. Dalam kasus modulasi hanya derau kuantisasi yang ditunjuk oleh segitiga yang efektif.

Filter penipisan "menghancurkan" jumlah bit/s pada keluaran konverter D/A dengan faktor bilangan ganjil. Dalam satu blok hanya diperiksa mana dari dua simbol 0 atau 1 yang paling sering muncul. Ini kemudian muncul di output. Jika ada lebih dari 1, sinyal naik di dalam blok secara instan "rata-rata". Jika ada lebih 0s itu jatuh.



Gambar 232: Bukti Prinsip "Subband"

Eksperimen fisik ini membuktikan bahwa jumlah sinyal keluaran n -filter identik dengan sinyal aslinya. Filter subband yang digunakan dalam percobaan ini harus, bagaimanapun, memenuhi kriteria tertentu yang termasuk dalam istilah "filter cermin segi empat".

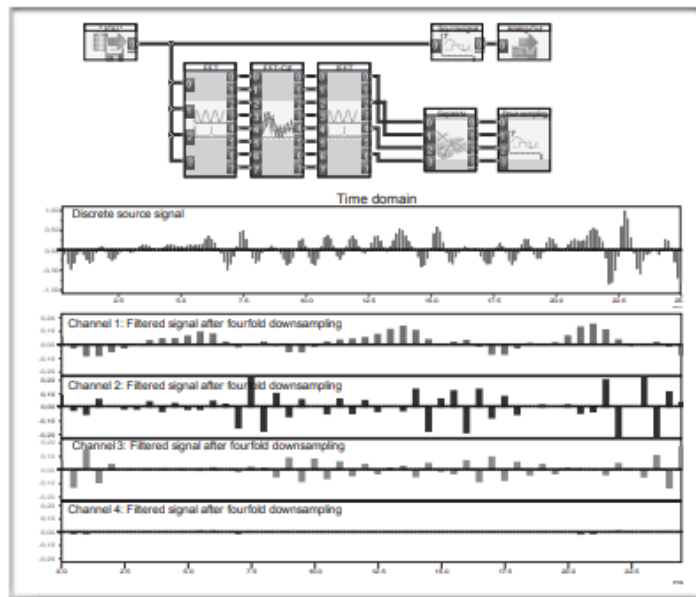
Apa ide di balik ini? Sinyal nyata (fisik) biasanya memiliki sifat "pembobotan frekuensi", yang berarti bahwa energi sinyal untuk periode waktu tertentu sebagian besar terkonsentrasi pada satu atau beberapa rentang frekuensi. Ini menjadi jelas ketika kita melihat domain waktu dari sinyal audio-lingual seperti pada Gambar 67 dan Gambar 71: frekuensi vokal memiliki karakteristik yang berbeda dari konsonan. Selain itu, durasi proporsi frekuensi rendah dari sinyal tersebut seringkali lebih besar daripada frekuensi tinggi (misalnya dalam pulsa burst).

Dengan demikian dapat diasumsikan bahwa kadang-kadang nilai-nilai diskrit dari sinyal sumber dalam subband sama dengan nol. Akan lebih mungkin untuk mengompresi urutan nol ini dengan sangat efektif menggunakan, misalnya, pengkodean RLE.

Tetapi pertama-tama, masalah berikut terbukti: Jika pita frekuensi dari sinyal sumber yang disampel oleh f_A , misalnya, dibagi menjadi n pita frekuensi yang sama besar, masing-masing sinyal keluaran yang difilter n ini awalnya akan berisi jumlah nilai diskrit yang sama. (untuk setiap

unit waktu) sebagai sinyal sumber asli. Masing-masing sinyal n ini pada keluaran filter n ini akan memiliki nilai n kali lipat dari nilai sampel dari sinyal sumber.

Domain Waktu



Gambar 233: Pemfilteran Subband Empat Kali Lipat Dan Downsampling Dalam

Gambar dan eksperimen dengan jelas menunjukkan bahwa laju pengambilan sampel saluran subband adalah seperempat dari laju pengambilan sampel f_A dari sinyal keluaran diskrit. Filter yang digunakan harus memenuhi kriteria yang ketat (lihat filter cermin kuadratur). Awalnya, filter FFT digunakan yang hanya menyaring blok demi blok.

Bentuk umum dari prinsip sampling SP sekarang digunakan. Sejauh ini, telah didefinisikan untuk sinyal lowpass-filtered dengan pita frekuensi B dari 0 ke f_{max} .

Yang penting adalah bandwidth absolut B dari sinyal sumber karena ini adalah satu-satunya bandwidth yang merupakan bingkai untuk kapasitas informasi saluran (kapasitas saluran, lihat hal. 400, 401). Oleh karena itu, bentuk umum dari prinsip sampling SP adalah:

Laju pengambilan sampel f_A dari sinyal sumber dengan bandwidth B dari f_1 ke f_2 harus setidaknya $B=2(f_2 - f_1)$

Sekilas ini mungkin tampak aneh karena sinyal frekuensi tinggi dengan bandwidth B antara f_1 dan f_2 berubah begitu cepat sehingga tidak dapat ditampilkan pada laju sampling f_A . Bagaimana kontradiksi yang tampak ini dapat dijelaskan?

Informasi sebenarnya dari sinyal tidak dalam "frekuensi pembawa" sesaat antara f_1 dan f_2 tetapi dalam perubahan mis. amplitudo, fase atau frekuensi. Selain itu, pita frekuensi tinggi ini dapat diremodulasi dalam kisaran antara 0 dan $(f_2 - f_1)$ tanpa kehilangan informasi, seperti yang ditunjukkan sehubungan dengan demodulasi amplitudo pada Gambar 162 dan Gambar 163. Dalam hal ini, prinsip sampling SP dalam bentuk aslinya tetap bagus.

Mari kita asumsikan bahwa bandwidth dari n saluran adalah B/n . Berdasarkan prinsip pengambilan sampel umum SP bahwa untuk setiap n saluran, laju pengambilan sampel $f^*A = f_A/n$ harus cukup. Oleh karena itu, dalam pengkodean subband, masing-masing dari n sinyal pita "parsial" yang difilter adalah:

Tunduk pada prosedur yang disebut downsampling: Hanya setiap nilai sampling ke- n yang disimpan, pembacaan lainnya diabaikan.

Laju pengambilan sampel keseluruhan dari semua n saluran setelah penyaringan dan downsampling adalah $f_A = f \cdot A \cdot n = (fA/n) \cdot n$, asalkan semua saluran memiliki bandwidth yang sama (lihat Gambar 231).

Semakin banyak subband, semakin efisien biasanya pengkodean berikutnya karena jelas meningkatkan kemungkinan menemukan nilai yang identik pada saat tertentu dalam satu saluran. Ini dapat dikodekan dengan sangat efisien.

Filter Cermin Kuadrat (QMF)

Istilah ini adalah singkatan dari jenis filter tertentu yang sangat penting untuk pengkodean subband.

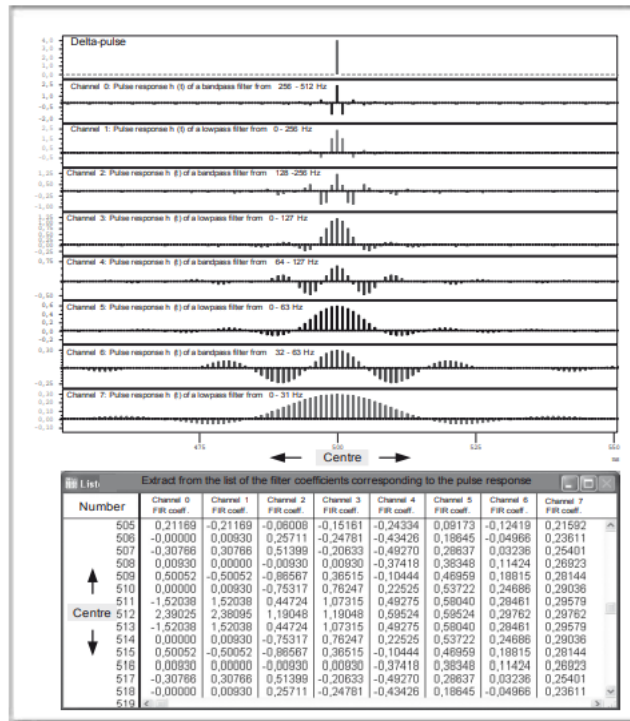
Jumlah sinyal yang difilter pasti akan menyimpang dari sinyal sumber diskrit jika

- jenis filter dengan kualitas berbeda digunakan
- tumpang tindih spektrum subband tidak memiliki nilai perkiraan dan fase spektrum sinyal sumber asli
- prinsip sampling SP diabaikan yang menyebabkan efek antialiasing

Filter berkualitas tinggi ini hanya dapat dirancang sebagai filter digital. Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 10 secara rinci filter digital beroperasi dalam domain waktu.

Penyaringan dalam domain frekuensi (!) berarti mengalikan fungsi transfer $H(f)$ dengan spektrum sinyal. Berdasarkan Prinsip Simetri (lihat Gambar 212) ini identik dengan konvolusi sinyal dalam domain waktu dengan respons pulsa $h(t)$ dari filter.

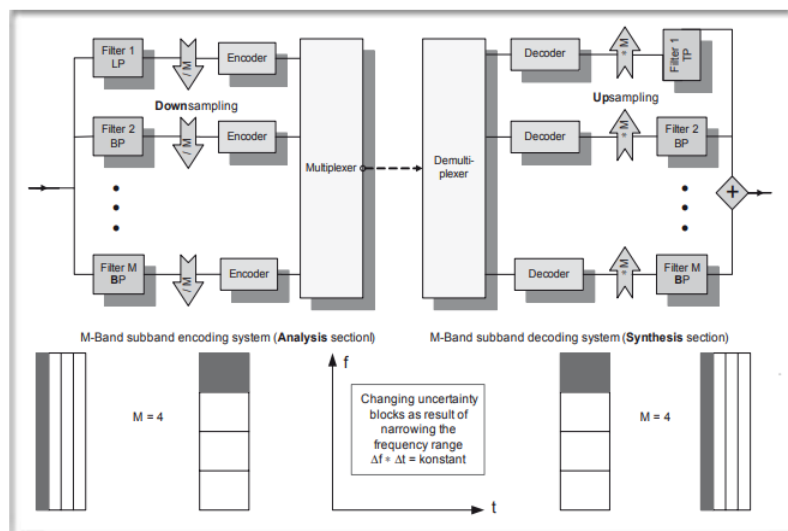
Untuk alasan ini masuk akal untuk mencoba dan menemukan semacam pola dasar dari respon pulsa $h(t)$ dari semua filter yang digunakan. Seperti yang telah ditunjukkan di Bab 10, fungsi Si (berjendela) jelas merupakan pilihan pertama.



Gambar 234: Struktur Internal Respons Pulsa Filter Subband Digital

Gambar menunjukkan 8 respons pulsa dari 8 filter digital yang bandwidth-nya berada dalam hubungan tertentu satu sama lain. Respons pulsa dari tiga filter lowpass di bagian atas tabel – dan dengan demikian koefisien filter dari filter digital ini – dihasilkan dari filter lowpass yang lebih rendah dengan menghilangkan (dari bawah ke atas) setiap nilai lainnya (downsampling!) Jadi durasi pulsa resonansi dibelah dua. Menurut Prinsip Ketidakpastian UP ini berarti menggandakan bandwidth filter. Hal yang sama berlaku untuk respons pulsa dari empat filter bandpass.

Bahkan filter highpass dan lowpass yang berdekatan – mis. saluran 0 dan saluran 1 – yang keduanya mencakup rentang frekuensi tertentu menunjukkan dengan cukup jelas bahwa struktur internal mereka serupa (lih. pembacaan tabel). Dan sekarang untuk pertanyaan pengujian: Apa hubungan antara frekuensi tengah filter bandpass dan bandwidth filter lowpass yang relevan?



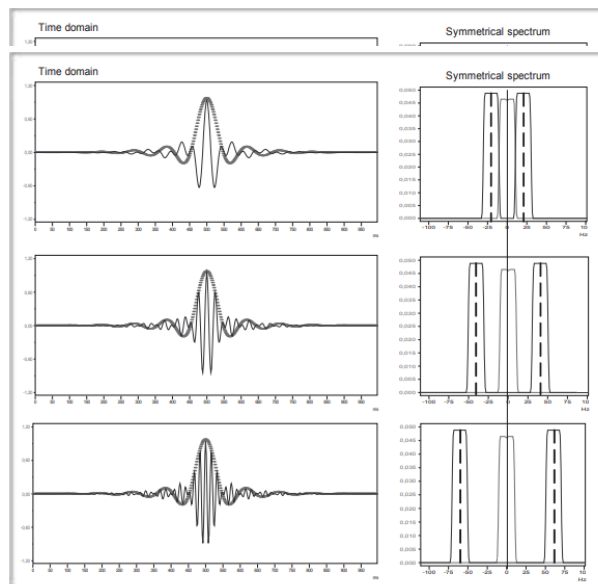
Gambar 235: Diagram Blok Dari Sistem Pengkodean Subband

Sisi kiri menunjukkan bagian pengkodean subband yang terkait dengan pemancar, sisi kanan yang terkait dengan penerima. Seperti yang dijelaskan di bagian utama, tidak ada kompresi data sebagai hasil dari penyaringan dan downsampling saja. Data hanya dapat dikompresi dalam encoder. Sinyal M subband encoder digabungkan dalam satu saluran oleh multiplexer (transduksi serial paralel) dan dipecah menjadi saluran M oleh demultiplexer di penerima (transduksi paralel serial).

Sangat penting untuk memahami Prinsip Ketidakpastian UP untuk memahami proses yang disebutkan di atas. Bagian bawah tabel menggambarkan proses ini. Perilaku sinyal sangat ditentukan oleh "blok ketidakpastian" yang berubah. Karena bandwidth sinyal, yang dalam Gambar ini telah dikurangi menjadi seperempat, ketidakpastian dalam domain waktu meningkat empat kali lipat, yang pada gilirannya mempengaruhi durasi respons pulsa $h(t)$. Lihat juga representasi rinci dalam Gambar 233.

Istilah "filter cermin quadrature" (QMF) adalah referensi ke sifat simetris filter. Fungsi transmisi filter bandpass terhubung yang berdekatan adalah hasil dari pencerminan fungsi transmisi lowpass dari "fungsi induk" ke "frekuensi pembawa" yang didefinisikan dengan jelas (lihat Gambar 236). Sepintas, ini menyerupai Gambar 200, bawah, yang menggambarkan kasus pembatas dari prinsip pengambilan sampel. Dalam proses subband, area konduksi dari filter yang berdekatan secara ideal dipisahkan dengan jelas (lihat Gambar 236). Karena tidak ada filter persegi panjang yang ideal, hasilnya hanya perkiraan. Pilihan terbaik untuk proses ini adalah filter FIR fase linier.

Respons pulsa $h(t)$ – yaitu koefisien filter FIR – dalam Gambar 234 menunjukkan afinitas internal dari filter QM tersebut. Downsampling respons pulsa $h(t)$ (bawah) filter lowpass dari 0 hingga 31 Hz atau -31 hingga +31 Hz menghasilkan koefisien filter untuk lowpass dari -63 hingga +63 Hz, -127 hingga +127 Hz, atau -255 hingga +255 Hz. Respons pulsa bandpass yang secara mulus menghubungkan setiap lowpass dengan bandwidth yang sama adalah hasil dari mengalikan fungsi S_i (lowpass) dengan frekuensi tengah dari bandpass yang relevan.



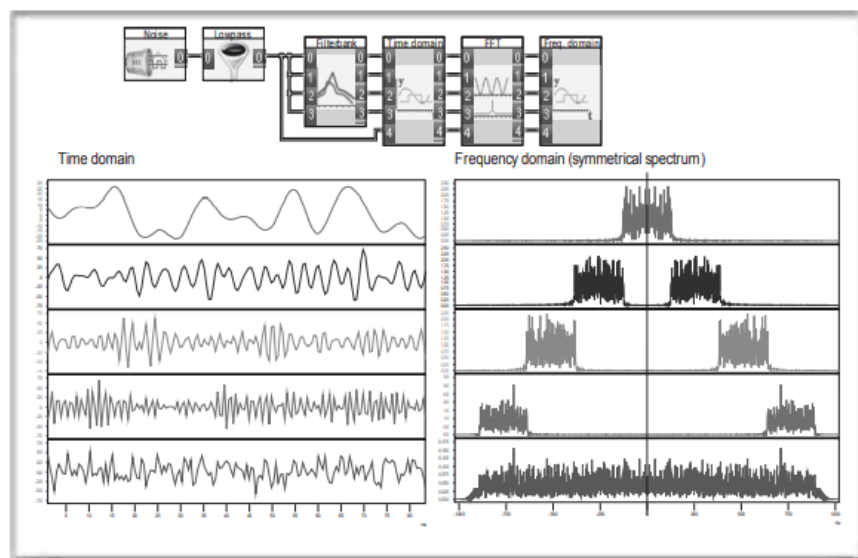
Gambar 236: Pengkodean Subband Dari Perspektif Filter, Respons Pulsa, Dan wafelet

Filter cermin kuadratur QMF digunakan untuk mencegah distorsi atau aliasing dengan tumpang tindih pita frekuensi yang berdekatan. Pada pandangan pertama ini tampaknya (!) paling baik dicapai dengan menggunakan filter berkualitas tinggi dengan fungsi transmisi seperti persegi panjang $H(f)$. Ini akan menghasilkan bentuk dasar dari semua respons pulsa. Seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 233, fungsi si menjadi fungsi induk, juga disebut sebagai fungsi penskalaan. Semua respons pulsa lainnya adalah hasil dari mengalikan fungsi si puncak dengan frekuensi tengah filter bandpass. Oleh karena itu, bagian tengah Gambar menunjukkan fungsi si sebagai amplop. Fungsi si dibatasi secara lokal dengan jendela Blackman dan dikurangi menjadi nol di sisi kiri dan kanan.

Respons pulsa dalam Gambar ini muncul sebagai representasi analog untuk menggambarkan hubungan fisik dengan lebih baik. Apa yang mungkin menjadi hubungan antara Gambar ini dan transformasi wavelet?

Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 236. Fungsi induk atau fungsi penskalaan adalah fungsi Si di atas. Respons pulsa $h(t)_{BP}$ dari empat filter bandpass adalah hasil dari mengalikan fungsi si teratas dengan frekuensi tengah 20, 40, 60 dan 80Hz. Oleh karena itu, fungsi Si selalu menjadi amplop dari respons pulsa ini.

Yang menarik adalah dua respons pulsa teratas $h(t)_{TP}(0-255 \text{ Hz})$ dan $h(t)_{BP}(256-512 \text{ Hz})$ dalam Gambar 234. Perkalian dengan frekuensi tengah yang dijelaskan di sini identik dengan tanda inversi dari setiap nilai lainnya (lihat juga daftar 0 dan 1 pada Gambar 234, bawah).



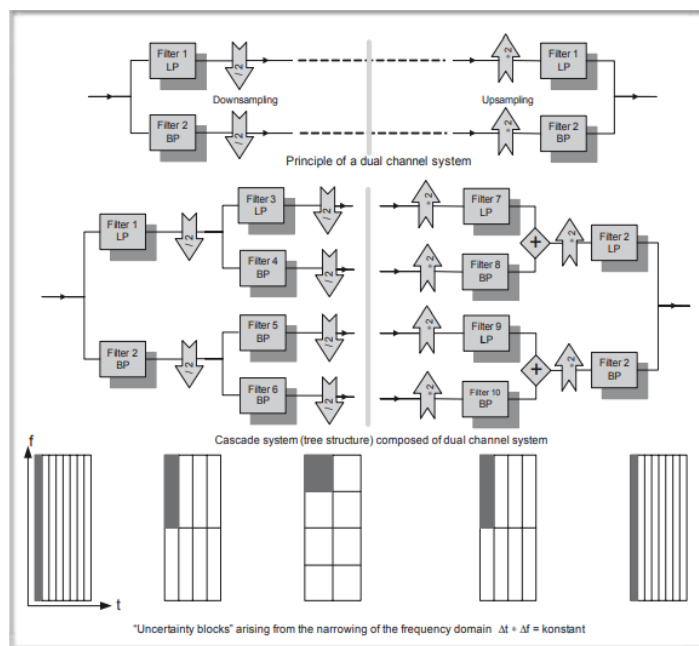
Gambar 237: Simulasi sistem subband dalam domain waktu dan frekuensi

Urutan di bagian bawah menunjukkan sinyal sumber. Dari atas ke bawah, sinyal sumber telah dibagi menjadi empat rentang frekuensi dengan ukuran yang sama. Berkat penggunaan filter FIR berkualitas tinggi (dengan koefisien hingga 512), tidak ada tumpang tindih pita frekuensi yang signifikan. Sinyal bandpass dalam domain waktu menunjukkan frekuensi tengah filter ini.

Berkenaan dengan pengenalan pola, Gambar 236 dan Gambar 237 menunjukkan hal berikut: Sinyal sumber diperiksa kesamaannya dengan empat atau lima respons pulsa ini menggunakan konvolusi. Setiap sinyal yang difilter tidak dapat berubah lebih cepat dari respons pulsa yang relevan $h(t)$. Dalam Gambar, respons pulsa dipilih sebagai pola referensi dengan S_i sebagai fungsi induknya. Ini adalah satu-satunya cara di mana pemisahan frekuensi yang jelas dapat dicapai. Ini memungkinkan kita – seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 232 untuk merekonstruksi sinyal sumber sepenuhnya setelah downsampling, encoding, multiplexing dan transmisi atau penyimpanan, dari sinyal terkompresi setelah demultiplexing, decoding, upsampling dan penyaringan.

Gambar 238 menunjukkan sistem kaskade dengan struktur pohon yang terdiri dari beberapa sistem saluran ganda. Sepintas, jenis pengaturan ini tampaknya bermasalah sejauh menyangkut pemfilteran. Saat menggunakan filter paralel, seperti pada Gambar 235, distorsi (linier) dari filter sebenarnya dapat diabaikan. Dalam hal ini, bagaimanapun, distorsi tumpang tindih atau ditambahkan bersama-sama ketika beberapa filter dihubungkan secara serial. Untuk alasan ini kita perlu menggunakan filter cermin quadrature lagi yang secara individual disetel satu sama lain.

Penyetelan ini selanjutnya digambarkan dalam Gambar 239, atas, yang menunjukkan respons pulsa $h(t)$ dan koefisien filter dari filter lowpass (fungsi-si berjendela). Bagian tengah dari Gambar 239 menunjukkan bahwa setiap detik pembacaan $h(t)$ ditekan dengan cara down-sampling. Akibatnya, durasi t dari $h(t)$ menjadi setengahnya, yang menurut Prinsip Ketidakpastian UP, berarti bandwidth menjadi dua kali lipat. Rangkaian di bawah menunjukkan pengulangan down sampling yang menghasilkan peningkatan bandwidth empat kali lipat.



Gambar 238: Sistem Subband Dengan Struktur Kaskade Atau Pohon

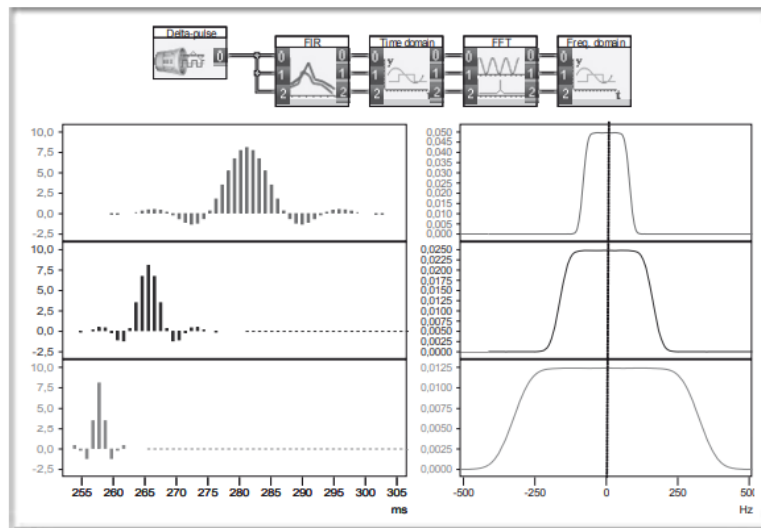
Sistem saluran ganda yang ditunjukkan di atas adalah dasar dari sistem kaskade subband. Kerugian dari filter yang dihubungkan secara seri diimbangi oleh struktur filter yang Sistem Pemrosesan Sinyal (Dr. Agus Wibowo)

sederhana. Meskipun sejauh ini kita membutuhkan beberapa filter paralel yang berbeda untuk pengkodean subband, hanya dua filter dasar yang diperlukan di sini untuk seluruh rentang frekuensi dan untuk dekomposisi atau penskalaan frekuensi. Ini berlaku untuk proses analisis di sisi kiri dan untuk sintesis di sisi kanan, terlepas dari jumlah langkah. Pada setiap langkah, dari kiri ke kanan, pita frekuensi yang masuk dibagi menjadi dua pita frekuensi dengan ukuran yang sama, satu HP dan satu bagian LP. Hal ini dimungkinkan dengan downsampling berulang. Untuk detailnya lihat teks utama dan Gambar 240 dan Gambar 241.

Penskalaan respons pulsa menentukan ketidakpastian dan resolusi frekuensi.

Kembali ke Gambar 238: Alih-alih mengurangi durasi respons pulsa dengan downsampling, ini terjadi di sini dengan setiap sinyal yang difilter. Jika setelah downsampling filter LP dan HP yang sama digunakan seperti sebelumnya, respon pulsa kedua filter muncul dua kali lebih lama dibandingkan dengan durasi sinyal yang telah dibelah dua. Ini (secara otomatis) menghasilkan separuh rentang frekuensi filter.

Downsampling berulang mengubah resolusi dan penskalaan frekuensi dari langkah ke langkah. Jadi kami memiliki skala resolusi (bertahap), yang telah dibahas sehubungan dengan transformasi wavelet berkelanjutan CWT pada akhir Bab 3.



Gambar 239: Mengubah Properti Filter Dengan Mensubsampling Respons Pulsa

Downsampling dengan faktor 2 menghasilkan pengurangan durasi sinyal atau respons pulsa. Sebagai hasil dari Uncertainty Principle UP, bandwidth filter FIR baru menjadi dua kali lipat. Jika downsampling digunakan pada filter FIR baru, filter FIR lain dengan bandwidth empat kali lipat dibuat).

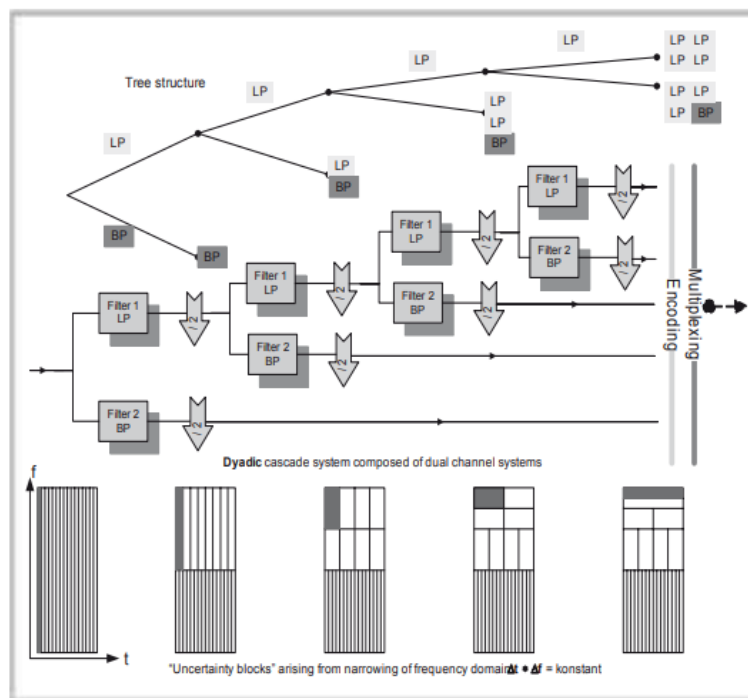
Singkatnya: set filter HP-LP yang sama yang digunakan pada awalnya dapat digunakan di setiap langkah sistem kaskade. Downsampling di setiap langkah ini memiliki efek kaca pembesar (tambahan). Langkah pertama membagi bandwidth sinyal sumber menjadi rentang HP dan LP dengan ukuran yang sama, langkah kedua, pada gilirannya, membagi masing-masing dari dua pita ini menjadi rentang HP dan LP dan seterusnya.

Untuk menggunakan metafora: Sementara gambar asli menunjukkan hutan yang padat, penskalaan langkah demi langkah secara bertahap memperlihatkan pohon, cabang, dan akhirnya daun.

Transformasi Wavelet Diskrit dan Analisis Multi-Skala MSA

Transformasi wavelet berikut (berjendela) FFT jangka pendek (Transformasi GABOR) telah dibahas pada akhir Bab 3 yang menunjukkan bahwa transformasi wavelet memungkinkan kita untuk memperluas fenomena ketidakpastian dari masalah frekuensi waktu ke pola lain yang terkandung dalam gelombang induk, seperti langkah dan diskontinuitas. Transformasi wavelet dikhususkan untuk menganalisis, menyaring, dan menyimpan hampir semua bentuk perubahan secara efisien.

Gambar 65 menyajikan hasil ini. Dalam transformasi wavelet kontinu CWT yang digunakan di sini, wavelet terus dikompresi, yaitu skalanya terus berubah. Saat ini, CWT sesaat diwakili untuk beberapa penskalaan. Semua CWT ini digabungkan dalam gambar keseluruhan di bagian bawah Gambar. Gambar ini mereproduksi struktur sinyal uji dengan lebih detail daripada transformasi FOURIER.

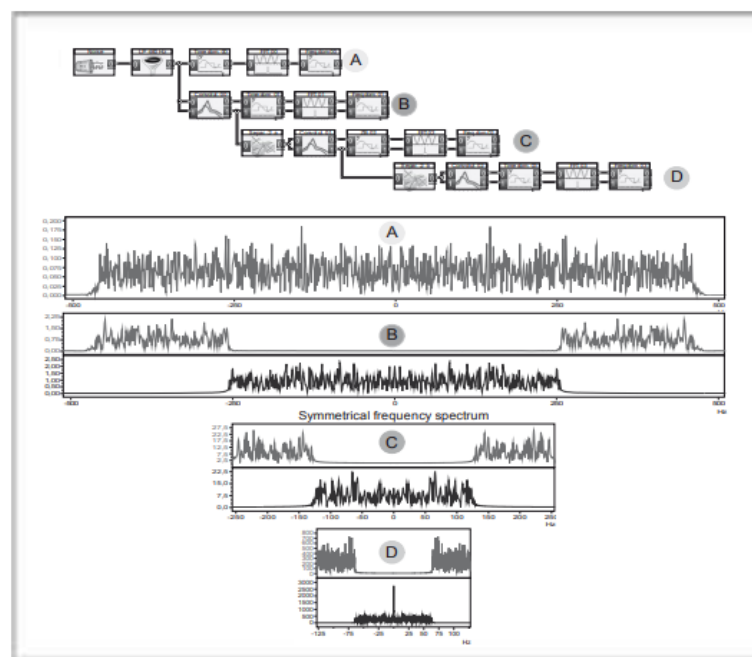


Gambar 240: Transformasi Wavelet Diskrit Dengan Sistem Subband Kaskade Diadik

Rangkaian ini umumnya digunakan untuk DWT. Transformasi wavelet diskrit adalah hasil dari konvolusi respons pulsa BP atau wavelet dengan sinyal input yang relevan. Hanya sinyal yang difilter LP yang dipecah lagi dan dibawa ke langkah yang berbeda. Kumpulan data dikurangi setengahnya dengan downsampling dengan faktor 2 ("diadik"). Secara teori, proses ini dapat dilanjutkan sampai hanya satu bacaan yang tersisa. Dalam praktiknya, bagian terakhir yang difilter LP tidak diubah setelah resolusi cukup tinggi.

Namun keseluruhan gambar di bagian bawah Gambar 65 sangat berlebihan. Semuanya ditangani belasan kali lipat. Hal ini menghasilkan masalah dalam menemukan jumlah minimal penskalaan wavelet yang CWT-nya berisi semua informasi transformasi wavelet tanpa redundansi.

Masalah bentuk diskrit transformasi wavelet DWT untungnya telah dipecahkan. Seperti yang sering terjadi dalam penelitian ilmiah, metode yang sudah dicoba dan diuji dalam pemrosesan sinyal dan gambar ternyata merupakan bentuk khusus DWT. Ini termasuk sistem subband cascade diadik yang ditunjukkan pada Gambar 240. Respons pulsa dari filter bandpass adalah wavelet diskrit yang masing-masing berbelit-belit dengan sinyal yang relevan.



Gambar 241: Transformasi Wavelet Tiga Langkah

Gambar ini menunjukkan DWT dalam percobaan. Gambar menunjukkan bahwa jumlah dari bentuk sinyal yang difilter BP (B), (C) dan (D) bersama dengan sinyal yang difilter LP dari (D) mencakup seluruh spektrum sinyal sumber (A). Hanya sinyal yang difilter LP yang dibawa ke langkah berikutnya.

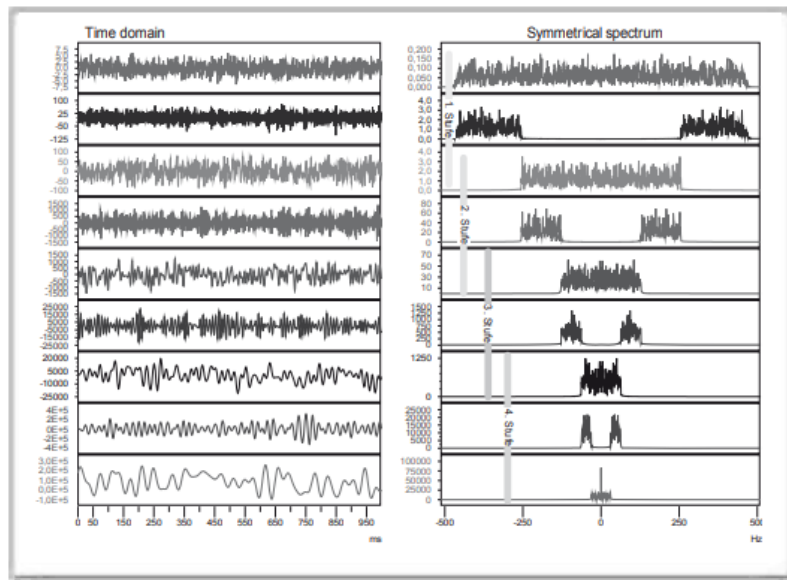
Efek downsampling jelas dikenali. Dengan setiap langkah, durasi sinyal berkurang setengahnya, yang berarti bandwidth juga berkurang setengahnya.

Karena, secara teori, jumlah tak terbatas dari wavelet “pola dasar” yang berbeda dapat digunakan sehubungan dengan transformasi wavelet, ini mungkin merupakan metode pengenalan pola yang paling universal.

Wavelet harus, bagaimanapun, memenuhi kriteria matematika tertentu yang didefinisikan dengan jelas. Ini juga berlaku untuk paket gelombang waktu singkat. Salah satu kriterianya adalah durasi rata-ratanya harus nol. Semua kriteria matematis ini juga dipenuhi oleh respons pulsa dari filter bandpass, yang pada dasarnya sama dengan paket gelombang pendek. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 236. Pola dasar yang dikandungnya

dalam hal ini adalah fungsi Si berjendela yang dalam bentuk murninya adalah respons pulsa dari filter lowpass. Ini adalah fungsi penskalaan yang sebenarnya. Akan tetapi, penskalaan tidak dilakukan dengan kompresi fungsi Si, tetapi secara tidak langsung dengan subsampling sinyal yang difilter dengan faktor 2 (sistem diadik).

Gambar 242: Simulasi Sistem DWT Empat Langkah Dalam Domain Waktu Dan Frekuensi

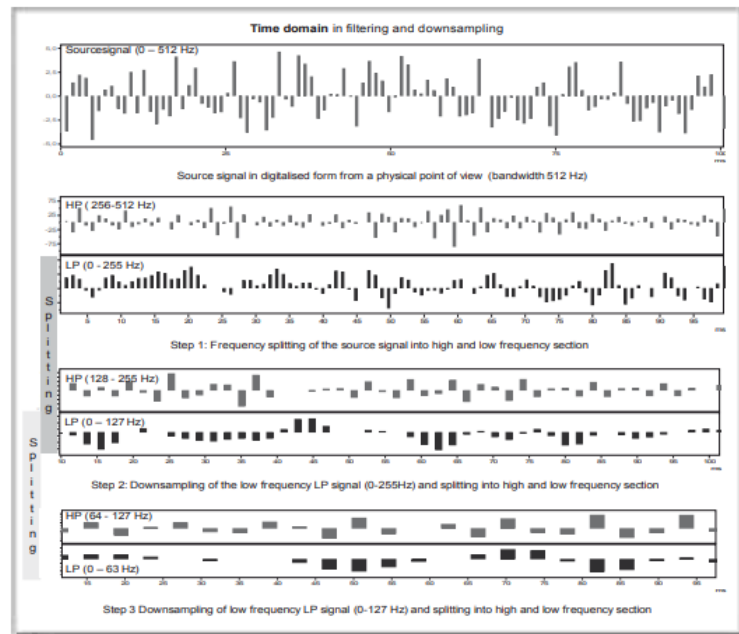


Simulasi dengan DASYLab ini dilakukan secara langsung dengan menggunakan filter khusus, dan tidak menggunakan sistem DWT yang konkrit, sehingga semua sinyal dalam domain waktu dan frekuensi dapat direpresentasikan dalam satu Gambar. Tiga sinyal LP, yang masing-masing dibagi menjadi sinyal LP (setengah panjangnya) dan sinyal BP, juga digambarkan. Domain waktu mengungkapkan apakah itu sinyal LP atau BP.

Oleh karena itu, sistem subband kaskade dalam Gambar 238 dan Gambar 240 masing-masing mewakili keseluruhan sistem DWT. Akibatnya mencakup seluruh informasi yang terkandung dalam sinyal sumber karena rentang frekuensi lengkap terdaftar. Selain itu, secara tidak langsung juga merupakan hal yang membatasi prinsip sampling.

Agar dapat menampilkan informasi sinyal sebebaskan dan sekompak mungkin menggunakan DWT, fungsi penskalaan dan wavelet yang relevan memerlukan adaptasi yang optimal sejak awal. Ini terdengar seolah-olah Anda membutuhkan template yang, sampai tingkat tertentu, merupakan representasi optimal dari aslinya. Dalam praktiknya, perlu untuk mengembangkan - terlepas dari pengetahuan teoritis DWT - rasa fisik bentuk dan durasi isi sinyal yang menentukan informasinya. Ini adalah seni rupa CWT dan DWT.

Seperti apa solusi optimalnya? Ada jawaban sederhana: Koefisien sinyal yang diubah DW – yaitu sinyal BP yang difilter dan urutan digit – harus memiliki area sesedikit mungkin di mana pembacaan menyimpang secara signifikan dari nol. Dari sudut pandang fisika, ini berarti bahwa energi terkonsentrasi hanya pada beberapa koefisien ini. Ini adalah kasus ketika pemilihan "pola dasar" optimal. Dalam hal ini umumnya mudah untuk mengompresi sinyal dengan kuat atau menghilangkan noise sinyal secara besar-besaran.



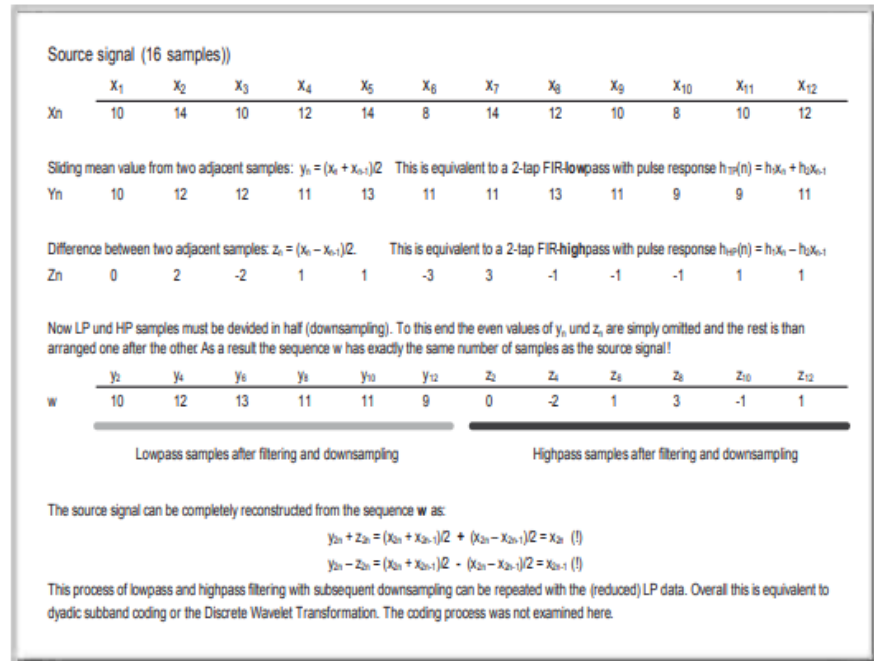
Gambar 243: Sinyal Dalam Domain Waktu Dengan Transformasi Wavelet Diskrit Tiga Langkah

Berikut adalah koefisien diskrit DWT dalam domain waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 240. Nilai LP dihasilkan oleh konvolusi dengan fungsi penskalaan dan nilai BP dihasilkan oleh konvolusi dengan wavelet. Bahkan tanpa pelabelan, dimungkinkan untuk mengenali mana yang merupakan LP dan mana yang merupakan koefisien BP.

Namun demikian, teori menentukan kondisi kerangka yang diperlukan untuk hasil yang optimal. Mereka berlaku terutama untuk kemungkinan merekonstruksi sinyal asli dari sejumlah kecil (sekecil mungkin) koefisien transformasi wavelet.

Jadi hanya wavelet ortogonal yang memungkinkan untuk mencapai secara tidak langsung kasus pembatas dari teorema pengambilan sampel di mana jumlah langkah penskalaan terkecil harus dipilih. Di satu sisi, ini memungkinkan rekonstruksi yang setia dari aslinya dan di sisi lain menghindari redundansi.

Konsep ortogonalitas fungsi dijelaskan dalam Gambar 271. Ini adalah fungsi yang – ditafsirkan secara geometris – berdiri secara vertikal berpasangan di atas satu sama lain. Jadi setiap titik dalam ruang dapat dijelaskan dalam bentuk 3 vektor basis ortogonal; misalnya: "pergi 3 langkah ke arah x, 4 langkah ke arah y, 2,5 langkah ke arah z". Vektor dasar dari x, y dan z harus berdiri di sini secara vertikal berpasangan satu sama lain. Instruksi seperti "Lakukan 3 langkah ke arah x, 5 langkah ke arah y, 2 langkah ke arah z dan 5 langkah ke arah u akan berlebihan karena harus mungkin dalam ruang tiga dimensi untuk menyatakan arah u dalam bentuk dari x, y dan/atau z.



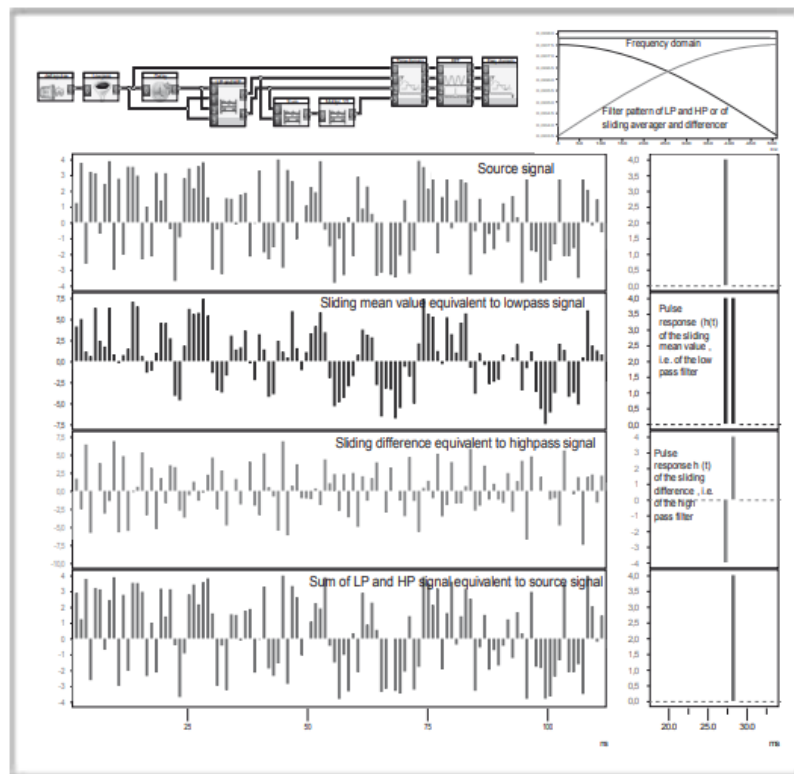
Gambar 244: Rekonstruksi Sinyal Lengkap Dengan Filter FIR 2 Ketuk

Sinyal di sini diwakili oleh 12 sampel atau angka konkret x_n . Low pass paling sederhana yang bisa dibayangkan dipilih: rata-rata geser yang selalu membentuk nilai rata-rata dari dua nilai yang berdekatan: $y_n = (x_n + x_{n-1})/2$. Perhatikan bahwa lowpass ini benar-benar "inert" karena pembacaan y_n berubah kurang tiba-tiba dibandingkan dengan x_n ! Dari sudut pandang sinyal, respons pulsa dari fungsi lowpass atau penskalaan ini adalah $h(t) = 0,5x_n + 0,5x_{n-1}$.

Sekarang bandpass bersamaan yang mewakili perubahan cepat masih hilang. Ini dibentuk oleh perbedaan z_n antara dua nilai x_n yang berdekatan, maka $z_n = (x_n - x_{n-1})/2$. Dengan downsampling, dua set data y_n dan z_n dibelah dua dan diatur ulang untuk membentuk satu set data baru yang juga berisi 12 sampel. Sinyal asli dapat sepenuhnya direkonstruksi dari 12 sampel ini di w !

Fakta bahwa dalam 10 tahun terakhir ribuan artikel ilmiah telah ditulis tentang masalah fungsi penskalaan yang optimal dan wavelet menunjukkan betapa sulitnya menemukan "pola dasar" yang optimal – misalnya dalam kedokteran untuk mengenali defek katup koroner tertentu dengan sarana pola sinyal EKG.

Contoh yang sangat sederhana: rumah biasanya berbentuk persegi panjang. Oleh karena itu, orang dapat menganggap batu bata persegi panjang sebagai pola dasar yang mungkin. Hampir setiap rumah dapat dibangun dari ini. Apakah ini analogi yang terlalu sederhana untuk pemrosesan sinyal? Salah! Wavelet pertama – disebut fungsi HAAR setelah penemunya – memiliki pola dasar persegi panjang dengan tepat. Dalam hubungan ini, periksa contoh pada Gambar 244. Di sini filter FIR 2 ketukan digunakan, filter respons pulsa $h(t)$ atau $h(n)$ yang hanya terdiri dari dua nilai. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 245 dalam eksperimen konkret. Fungsi penskalaan $h(n)tp$ adalah "persegi panjang", waveletnya adalah $h(n)BP$.



Gambar 245: Pemisahan Sinyal LP Dan BP Dengan Filter FIR 2 Ketukan Dalam Domain Waktu

Sejauh ini sebagian besar respons pulsa atau wavelet dan fungsi penskalaan dengan "taps" antara 256 dan 1024 nilai dukungan diskrit dipilih. Untuk alasan ini, tidak ada hal baik yang diharapkan dari filter FIR 2 ketukan. Hasilnya di sini mengejutkan: meskipun domain frekuensi LP dan BP sangat tumpang tindih (kanan atas), sinyal sumber dapat kembali sepenuhnya direkonstruksi dari sinyal yang difilter! Jika kita telah memilih sistem dengan beberapa langkah hasilnya akan sama seperti hal yang sama terjadi pada setiap tingkat berikutnya seperti pada yang pertama. Ini dibuktikan di sini tidak hanya sebagai rumus (Gambar 243) tetapi juga secara eksperimental (lihat urutan bawah).

Sejauh ini pilihan fungsi Si berjendela sebagai fungsi penskalaan mencegah domain frekuensi dari filter yang berdekatan dari tumpang tindih. Ini menghindari distorsi dengan aliasing dan pada saat yang sama mengambil di seluruh domain frekuensi yang menjamin

kebebasan dari kesalahan dan pada saat yang sama penyertaan lengkap dari semua informasi yang ada.

Dalam Gambar 245 pita frekuensi tumpang tindih dengan sangat kuat sebagai akibat dari filter 2 ketukan (kanan atas). Namun demikian, rekonstruksi lengkap sinyal sumber dari sinyal LP dan BP yang disaring dimungkinkan dan ini terlepas dari jumlah langkah DWT.

Ini menunjuk ke struktur ortogonal dari apa yang disebut wavelet HAAR. Fungsi HAAR tampaknya hanya untuk kepentingan akademis karena kesederhanaannya.

Tidak ada pola persegi panjang pada kenyataannya, bukan? Salah! Wavelet apa yang akan Anda gunakan untuk merekonstruksi gambar dinding bata sebuah rumah yang pucat, tergores dan kabur?

Kami dapat meringkas sebagai berikut:

Transformasi wavelet muncul sebagai proses paling universal untuk memfilter pola dari berbagai jenis dari latar belakang data.

Transformasi Wavelet Kontinu CWT memberikan gambaran yang sangat rinci dan informatif tetapi mengandung tingkat redundansi yang tinggi. Ada banyak aplikasi di mana ini mungkin diinginkan dan dapat ditoleransi.

Transformasi Wavelet Diskrit DWT adalah proses yang memungkinkan untuk menghindari redundansi ini dan ini tanpa kehilangan informasi.

Kedua proses berusaha untuk menemukan kesamaan antara pola dan sinyal atau satu set data pada skala yang berbeda melalui korelasi silang - korelasi antara dua sinyal yang berbeda.

Hanya melalui pola dasar yang sesuai, sinyal atau kumpulan data dapat diubah secara efisien. Ini berarti menemukan sesedikit mungkin nilai yang diucapkan divergen dari nol dalam transformasi wavelet. Ini adalah prasyarat untuk kompresi yang efisien atau penghapusan noise dari sinyal sumber.

Kompresi wavelet yang disebut terdiri dari DWT dan kompresi selanjutnya melalui proses pengkodean yang sesuai seperti yang telah dijelaskan sebagian dalam bab ini. Oleh karena itu DWT tidak memampatkan tetapi dengan transformasi menciptakan dasar yang menguntungkan untuk kompresi.

Memanfaatkan Efek Psiko-Akustik (MPEG)

Domain frekuensi sejauh ini tampaknya tidak berperan dalam pengkodean atau kompresi sinyal audio. Namun, pendengaran sepenuhnya berada dalam domain frekuensi, yaitu kita hanya mendengar sinyal sinusoidal dari frekuensi yang berbeda. Metode kompresi yang benar-benar cerdas harus menyertakan domain frekuensi.

Sinyal audio seperti bahasa dan musik tidak mengandung fitur yang berlebihan, tidak seperti teks di mana huruf "e" muncul lebih bebas daripada "y". Akibatnya sulit untuk mengalokasikan kode yang lebih pendek ke suara atau nada.

Namun, fenomena akustik-fisik yang ada hubungannya dengan "ketidakakuratan" organ pendengaran dan otak kita dapat dimanfaatkan:

Dalam hal sinyal audio setidaknya bagian dari sinyal tersebut dapat dihilangkan dalam encoder yang tidak terlihat oleh telinga manusia sebagai akibat dari kapasitas resolusi yang terbatas dalam interaksi domain waktu dan frekuensi dan amplitudo. Ini disebut sebagai pengurangan sinyal atau data yang tidak relevan, yaitu informasi yang berlebihan dapat dihilangkan tanpa kehilangan kualitas.

Sebuah proses kompresi yang mencapai hal ini harus memperhitungkan sifat psiko-akustik organ pendengaran kita dalam persepsi sinyal audio. Sejauh pengakuan informasi yang tidak relevan yang bersangkutan ini termasuk:

- Respon frekuensi dan apa yang disebut ambang batas area pendengaran dan sensasi pendengaran (lihat Gambar 246) dan
- Efek masking yang menggambarkan ketidakakuratan organ pendengaran kita (lihat Gambar 247).

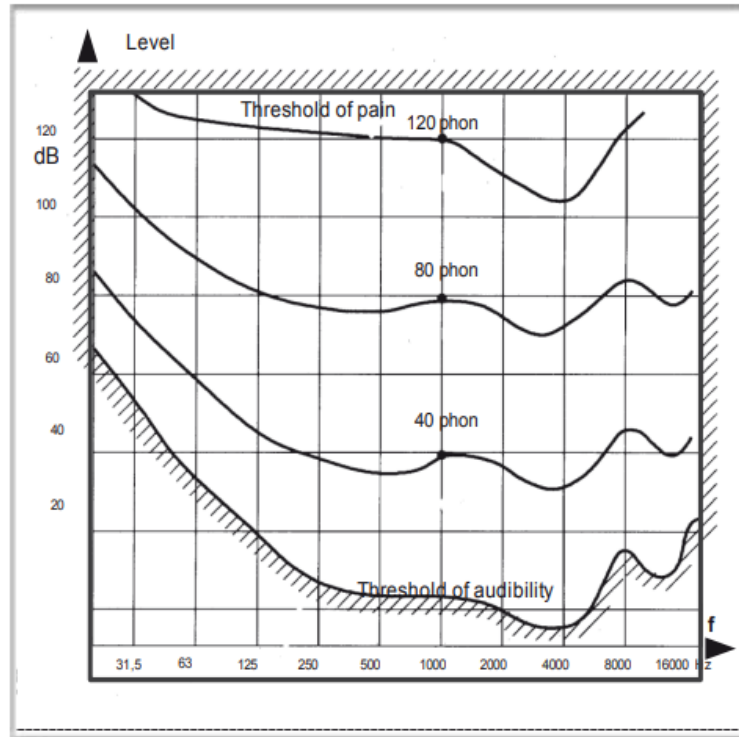
Area sensasi pendengaran pada Gambar 246 menunjukkan persepsi amplitudo yang bergantung pada frekuensi. Ini juga berlaku untuk apa yang disebut ambang pendengaran. Menurut ini pendengaran kita paling sensitif sekitar 4 kHz. Ini ditentukan dengan mengukur titik dari amplitudo apa yang tampaknya terdengar oleh frekuensi untuk sejumlah besar frekuensi yang berbeda.

Catatan: volume L adalah pengukuran logaritmik yang dinyatakan dalam desibel (db). Jika amplitudo berkurang 20 desibel, amplitudo meningkat dengan faktor 10 dibandingkan dengan kuantitas referensi, pada 40 desibel dengan faktor 100, dst.

Biasanya skala frekuensi dipilih secara logaritmik dalam akustik. Perhitungan logaritma adalah perhitungan eksponensial. Akibatnya interval pada sumbu frekuensi antara $0,1 = 10^{-1}$ dan $1 = 10^0$, $10 = 10^1$, $100 = 10^2$, $1000 = 10^3$ dll adalah sama.

Gambar 247 menjelaskan apa yang disebut efek penyembunyian. Bayangkan Anda berada di sebuah klub. Musik keras menggelegar dari speaker besar. Ini adalah kerja keras untuk indera pendengaran karena tercapai tingkat suara 110 desibel dan lebih. Karena kenyaringan musik yang ekstrem, hampir tidak mungkin untuk berbicara kecuali Anda berteriak. Dalam akustik ini disebut sebagai masking. Untuk menghilangkan efek ini, tingkat suara ucapan harus dinaikkan sedemikian rupa sehingga tidak lagi ditutupi oleh sinyal interferensi (dalam hal ini musik).

Pada prinsipnya hal ini menggambarkan sifat telinga yang tidak dapat mendengar nada lemah dalam konteks frekuensi nada kuat. Masking ini memiliki bandwidth yang lebih besar, semakin keras nada yang dimaksud.



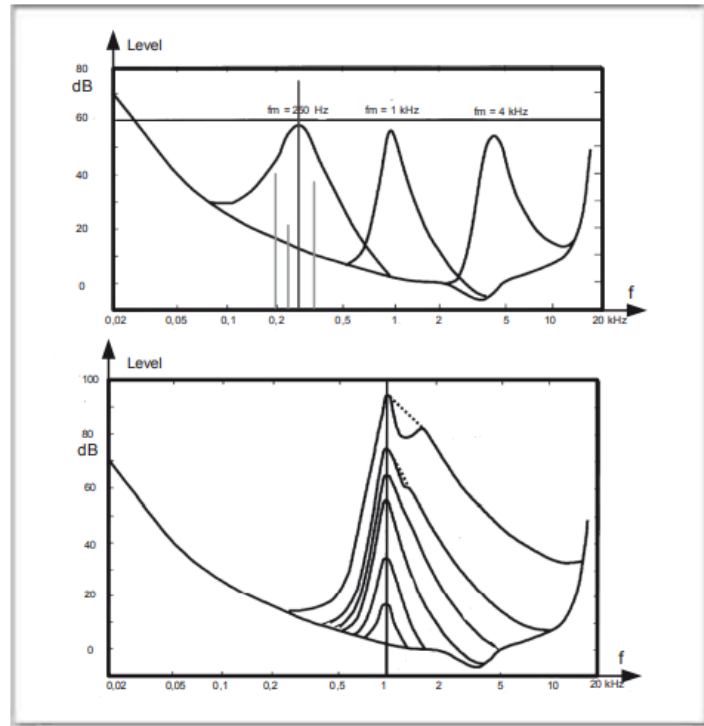
Gambar 246: Area Sensasi Pendengaran Dengan Ambang Pendengaran

Yang disebut area sensasi pendengaran ditunjukkan dengan penetasan. Perhatikan penskalaan logaritmik pada kedua sumbu. Peningkatan 20 desibel menyiratkan peningkatan sepuluh kali lipat pada level sinyal. Dalam akustik berguna dan tepat untuk menggunakan ukuran logaritmik untuk sumbu frekuensi: di sini frekuensi berlipat ganda dari penandaan ke penandaan.

Yang penting dalam kaitannya dengan encoding/kompresi adalah ketergantungan frekuensi sensitivitas organ pendengaran kita. Ini terbesar sekitar 4 kHz.

Kesimpulan: nada lemah di sekitar nada keras tidak perlu ditransmisikan karena tetap tidak dapat didengar.

Gambar 248 melihat penyembunyian dari sudut yang berbeda. Semakin akurat kuantisasi dalam konversi A/D, semakin tidak menyenangkan derau kuantisasinya. Di sekitar nada keras kuantisasi "kasar" - yaitu dengan bit lebih sedikit - dimungkinkan daripada di luar area penyamaran. Dengan demikian, kebisingan kuantisasi jauh lebih bisa terjadi di dalam area masking daripada di luar.

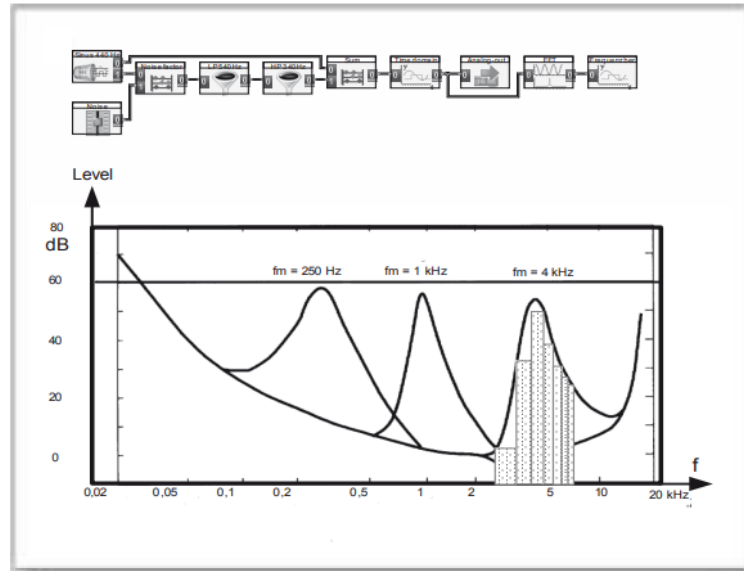


Gambar 247: Masking Dan Ambang Batas Kemampuan Mendengar

Diagram atas: Nada 250 Hz yang keras menyebabkan area masking atau menutupi area sehingga nada yang lebih tenang di sekitarnya tidak dapat didengar.

Diagram bawah: tinggi dan lebar area masking meningkat pesat dengan kenyaringan; pada batas toleransi 100 desibel berkisar antara 200 hingga 20.000 Hz.

Dalam kasus pengkodean audio MPEG yang canggih (MPEG = kelompok ahli gambar bergerak; bertanggung jawab untuk proses kompresi untuk audio dan video digital; standarnya diakui di seluruh dunia) karena dua alasan yang diberikan pita frekuensi audio-sinyal dibagi menjadi 32 pita frekuensi dengan ukuran yang sama. Masing-masing pita frekuensi ini berisi bagian yang disaring pita sempit dari sinyal audio asli. Untuk masing-masing band ini, properti masking dieksploitasi. Nada lemah (frekuensi) dihilangkan jika ada nada keras, dan pada saat yang sama kekasaran kuantisasi disesuaikan dengan penyembunyian.



Gambar 248: Ambang Masking Dan Noise Kuantisasi

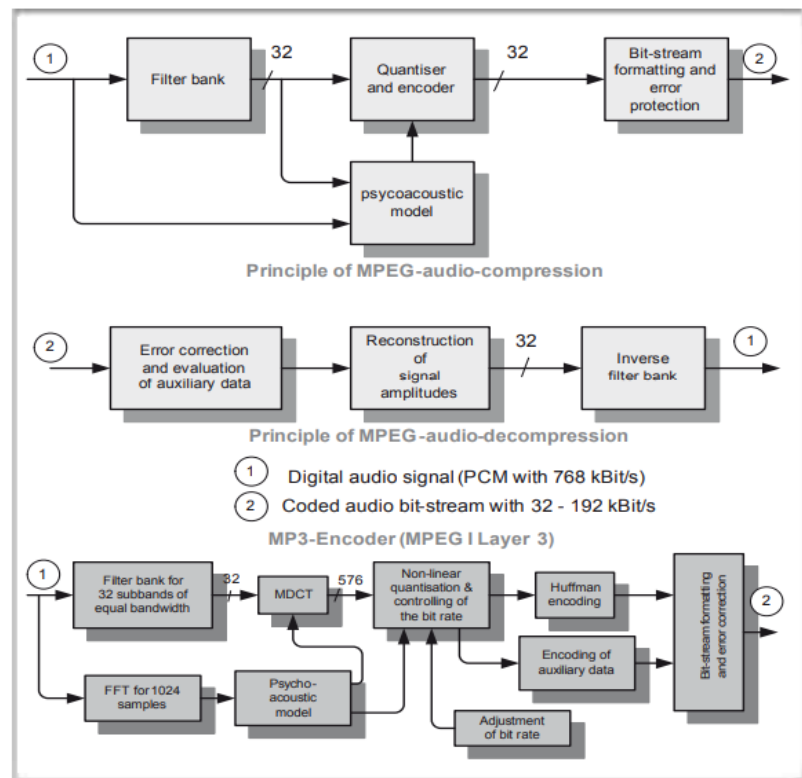
Area masking bergantung pada frekuensi dan amplitudo. Dalam kasus frekuensi tinggi, area masking jauh lebih luas daripada dalam kasus yang rendah. Ini disembunyikan di sini oleh skala frekuensi logaritmik.

Di area penyembunyian nada 4 kHz yang keras, 7 dari 32 pita frekuensi yang sama lebarnya dimasukkan. Sekarang dapat dilihat seberapa kuat kebisingan kuantisasi di area ini tanpa dirasakan secara akustik.

Di bagian bawah sirkuit eksperimental langsung ditampilkan. Sinyal noise narrowband – setara dengan noise kuantisasi dalam area masking – ditambahkan ke nada 440Hz yang keras melalui regulator manual. Hanya dari tingkat tertentu sinyal noise pita sempit dapat terdengar di samping nada sinusoidal. Namun, itu terlihat jelas di layar dalam domain waktu dan frekuensi sebelum ini.

Seperti yang ditunjukkan Gambar 249, encoder MPEG bekerja pada model psiko-akustik yang diperhitungkan dalam Gambar 246 – Gambar 248 Agar dapat mengkode/kompres secara optimal, model psiko-akustik yang optimal pada saat tertentu harus digunakan. Ini tergantung pada sinyal audio. Sinyal keluaran dan sinyal dari 32 saluran dievaluasi untuk tujuan ini. Akibatnya model ini memberikan kuantisasi maksimum yang dapat diterima untuk setiap sub-band, dengan mempertimbangkan efek masking.

Melalui format aliran bit berikutnya, pola bit dari nilai sampling terkuantisasi dari semua 32 saluran dan data tambahan (untuk rekonstruksi sinyal audio dalam dekoder) diformat untuk membentuk aliran bit dan dibuat kebal terhadap interferensi oleh berarti kode perlindungan kesalahan (opsional).



Gambar 249: Reduksi Data Menurut MPEG

Setengah bagian atas menunjukkan diagram blok skema dari encoder dan decoder MPEG. Sinyal audio PCM dibagi menjadi 32 subband dengan lebar yang sama oleh bank filter. Kuantisasi dan pengkodean dikendalikan oleh "model psiko-akustik"; ini memperhitungkan karakteristik sinyal audio yang diberikan dan menghasilkan penyembunyian dalam 32 subband. Kuantisasi sesuai kasar atau halus. Setelah itu, 32 saluran diformat untuk membentuk aliran bit tunggal dan dilengkapi dengan perlindungan kesalahan (lihat bagian berikut "Pengkodean perlindungan kesalahan").

Di bagian bawah rincian kompresi audio paling efektif saat ini menurut MP3 ditampilkan. FFT pada input menunjukkan model psiko-akustik di mana pita frekuensi karakteristik penyembunyian yang kuat atau lemah terjadi. Untuk lebih ekstrem, 32 pita frekuensi dibagi lagi menjadi total 576 (!) subband melalui MDCT (transformasi kosinus diskrit yang dimodifikasi, FFT yang disederhanakan). Pita-pita ini sangat sempit sehingga ada masalah dengan Prinsip Ketidakpastian: waktu build-up dan waktu habis dan respons pulsa menjadi besar sebagai hasilnya dan pada saat yang sama resolusi encoder dalam domain waktu menjadi terlalu kecil. Oleh karena itu, tergantung pada sinyal, dimungkinkan untuk beralih dari waktu ke resolusi domain frekuensi.

Semua upaya ini bertujuan untuk membuat kecepatan data sinyal MP3 serendah mungkin. Ini mendekati batas fisika dan sejumlah besar perhitungan untuk encoder diterima. Proses decoding membutuhkan perhitungan yang jauh lebih sedikit. Secara keseluruhan, contoh ini menunjukkan bahwa kapasitas kalkulasi prosesor PC multimedia tidak cukup besar.

Tingkat kompresi ditentukan terutama oleh pengaturan ambang kuantisasi di setiap pita parsial. Ini ditentukan oleh karakteristik penyembunyian seketika dari 32 saluran, yang menentukan nada (frekuensi) mana yang harus ditransmisikan. Sinyal audio PCM digital dengan kualitas CD dan untuk mono membutuhkan 768 kbit/s. Melalui pengkodean audio MPEG, sinyal dapat dikompresi hingga di bawah 100 kbit/s.

Proses MP3 (atau lebih tepatnya: MPEG 1 Layer 3) sangat populer untuk kompresi audio. Melalui berbagai penyempurnaan teknis – lihat Gambar 249 – tingkat kompresi dapat ditingkatkan hingga kurang dari 10% dari sinyal audio PCM. Oleh karena itu, setidaknya 10 CD audio normal masuk ke satu CD MP3.

Encoding Dan Fisika

Pengkodean dijelaskan di sini sebagai salah satu kemungkinan terpenting dari teknologi komunikasi modern. Sangat mengejutkan bahwa dengan pengecualian kompresi data audio – fenomena fisik mendasar dari bab pertama – Prinsip EMPAT, Ketidakpastian dan Simetri – tampaknya tidak ada hubungannya dengan ini. Mereka jarang digunakan dalam bab ini.

Hal ini berkaitan dengan sejarah perkembangan teori komunikasi. Semua teori informasi berbasis fisik yang terkait dengan nama-nama seperti HARTLEY, GABOR, CLAVIER, dan KÜPFMÜLLER dibayangi oleh kesuksesan besar teori informasi Claude SHANNON (1948) yang murni didasarkan pada matematika (statistik dan kalkulus). dari kemungkinan). Teori ini memungkinkan aplikasi pemrosesan sinyal modern seperti satelit dan telepon seluler.

Masih sulit untuk mendapatkan pegangan yang jelas tentang konsep informasi dari sudut pandang fisik. Masih ada celah yang menganga antara teori dan fisika SHANNON, yang menjadi subjek semua teknologi. Teori SHANNON akan dibahas secara lebih rinci di akhir bab berikutnya.

Latihan pada Bab 11

Latihan 1

Jelaskan dengan menggunakan contoh-contoh konkret keinginan besar aplikasi multimedia untuk kapasitas transmisi. Apa pentingnya ADSL sebagai solusi jangka menengah.

Latihan 2

Istilah "encoding" tidak ada dalam teknologi analog. Berikan definisi yang bermakna dari istilah ini.

Latihan 3

Pengkodean ASCII adalah standar yang sudah lama ada. Ringkaslah mengapa hal itu dianggap usang dan kualitas apa yang harus dimiliki standar baru.

Latihan 4

Sinyal audio dan video dikompresi secara lossily, tetapi file program dan teks tidak. Coba tunjukkan batas antara dua jenis kompresi. Mengapa kompresi tidak selalu bebas kerugian?

Latihan 5

Periksa menggunakan contoh Gambar 224 apakah kode HUFFMAN ini merupakan kode "optimal", dengan menghasilkan pohon HUFFMAN yang berbeda (misalnya ambil "0" sebagai ganti "00" untuk A)

Latihan 6

Lakukan pengkodean LZW untuk "hujan di Spanyol terutama turun di dataran".

Latihan 7

Jelaskan manfaat pengkodean delta dan sigma-delta. Dalam kondisi apa pengkodean ini masuk akal dengan sinyal audio dibandingkan dengan proses PCM tradisional? Mengapa konverter 1 bit mendapatkan lebih banyak dan lebih banyak tanah?

Latihan 8

Jelaskan struktur dan tujuan dari "filter penipisan" pada output dari encoder delta sigma.

Latihan 9

Jelaskan efek psiko-akustik yang dieksploitasi dalam pengkodean MPEG sinyal audio (reduksi tidak relevan).

Latihan 10

Dalam kompresi audio MPEG, sinyal input didistribusikan melalui 32 pita frekuensi yang sama. Apa yang ingin dicapai ini?

Latihan 11

Efek masking dari frekuensi tetangga dan domain frekuensi telah dijelaskan. Menurut Prinsip Simetri seharusnya ada efek penyembunyian dalam domain waktu (yang sebenarnya adalah kasusnya. Seperti apa mereka?).

Latihan 12

Encoding dan decoding MPEG audio dan video di PC dapat dilakukan oleh perangkat lunak atau perangkat keras. Persyaratan apa yang dibuat dari komputer dalam seti

BAB 12

TEKNOLOGI TRANSMISI DIGITAL II: PENYANDIAN SALURAN

Jika perangkat mentransmisikan aliran pola bit yang terus menerus, perangkat itu harus tiba tanpa distorsi pada penerima. Hal ini juga berlaku untuk pengambilan data dari media penyimpanan. Tolok ukur par excellence untuk kualitas transmisi atau penyimpanan adalah apa yang disebut probabilitas kesalahan bit.

Pengkodean Perlindungan Kesalahan Untuk Pengurangan Probabilitas Kesalahan Bit

Dengan cara apa sinyal dapat ditransmisikan seaman mungkin melalui saluran yang bising atau terdistorsi? Teori pengkodean koreksi kesalahan mencoba memberikan jawaban atas pertanyaan ini. Penelitian masalah ini memiliki banyak efek langsung pada Komunikasi dan teknologi komputer.

Meskipun hal ini jelas sejauh menyangkut teknologi komunikasi, mungkin tidak begitu jelas untuk teknologi komputer seperti itu. Tapi, pikirkan misalnya penyimpanan dan kompresi data. Penyimpanan dapat dipahami sebagai semacam transmisi data sementara. Transmisi data setara dengan menulis dalam media penyimpanan dan menerima data setara dengan membaca. Di antara waktu yang berlalu di mana media penyimpanan dapat tergores atau diubah dengan cara lain. Pengkodean perlindungan kesalahan juga dapat bermanfaat dalam penyimpanan data.

Dalam retrospeksi selalu ada kesalahan transmisi di masa lalu yang hampir tidak dapat dihindari dengan sarana yang tersedia. Dalam kasus panggilan telepon melalui saluran yang bising dan berderak, Anda biasanya masih dapat memahami inti dari apa yang dikatakan orang yang Anda ajak bicara meskipun Anda hanya dapat mendengar setengahnya. Dan jika Anda tidak dapat memahaminya, Anda dapat memintanya untuk mengulangi. Jelas, bahasa sangat berlebihan dan ini tampaknya menjadi sumber koreksi kesalahan yang sebenarnya.

Untuk menyimpan file teks langsung yang lebih panjang, hampir tidak perlu mengambil tindakan pencegahan. Jika beberapa byte salah, mereka hanya membuat diri mereka terasa sebagai semacam kesalahan pengetikan. Biasanya dimungkinkan untuk memperbaiki kesalahan dari konteks sebagai akibat dari redundansi.

Situasinya sangat berbeda dengan file zip yang dikemas. Kompresi dicapai dengan menghilangkan data yang berlebihan dan satu tanda yang salah dapat membuat seluruh file tidak dapat digunakan. Pikirkan misalnya file .exe yang dikemas dari suatu program.

Sebagaimana telah disebutkan strategi teknologi transmisi modern adalah sebagai berikut (lihat Gambar 221):

- Dalam data pengkodean sumber dikompresi melalui penghapusan redundansi.
- Dalam entropi encoding, upaya dibuat independen dari jenis sinyal sumber untuk mengoptimalkan kode source encoder sehubungan dengan kekompakan.

- Dalam pengkodean saluran, redundansi berupa bit tambahan (pengecekan data) ditambahkan secara sistematis menurut rencana tertentu untuk mengenali dan menghilangkan kesalahan secara lebih efektif.

Catatan:

pengembangan media penyimpanan profesional merupakan masalah khusus karena akurasi kesalahan harus ditingkatkan setidaknya seribu kali lipat dibandingkan dengan CD audio (kode perlindungan kesalahan). Pada pemutar CD-audio, sebuah sektor membuat data tersedia selama 1/75 detik dari sebuah musik. Jika salah satu sektor atau blok ini rusak, sektor sebelumnya dapat dengan mudah diambil kembali tanpa sepengetahuan pendengar.

Data dari media penyimpanan profesional harus dipasok secara praktis tanpa kesalahan ke komputer. Dalam praktiknya, tingkat kesalahan satu byte kesalahan per 1012 (!) byte data diterima untuk jenis media penyimpanan ini. Untuk 2000 CD-Rom hanya diharapkan 1 kesalahan! Ini hanya mungkin dengan materi dan proses yang diberikan dengan proses yang jauh lebih efektif untuk pengkodean perlindungan kesalahan daripada dengan audio.

Sekarang mari kita ambil kembali gagasan untuk mengulang sinyal agar benar-benar yakin tentang transmisi. Alih-alih "1" lebih baik mengirimkan "11" dan bukannya "0" , "00". Dalam kasus kebisingan tingkat tinggi, satu atau dua kesalahan dapat terjadi, misalnya, "01" diterima. Jadi sinyal pasti diterima dengan kesalahan (error recognition) Tapi apa yang ditransmisikan: "00" atau "11"? Apakah simbol pertama atau kedua terdistorsi?

Untuk meningkatkan keandalan transmisi, lebih banyak redundansi dipilih: "000" dan "111". Kemudian jika "101" diterima, nilai asli "111" akankah semua hal menjadi sama lebih mungkin daripada "000". Dengan semacam "sistem pemungutan suara mayoritas" rangkaian tanda yang diterima ("vektor") dapat didekodekan dan "1" yang benar dapat dipulihkan. Oleh karena itu kode ini tidak hanya mengenali kesalahan tetapi juga menghilangkannya (koreksi kesalahan).

Jarak

Penghapusan kesalahan dimungkinkan dalam kasus "101" karena urutan ini lebih dekat ke "111" daripada "000". Konsep jarak adalah kunci untuk pengenalan dan koreksi kesalahan.

Membuat kode yang mengenali dan mengoreksi kesalahan berarti menambahkan secara tepat jumlah redundansi sehingga kata-kata kode yang merupakan bagian dari stok simbol "berbaring sejauh mungkin" tanpa membuat rangkaian tanda menjadi terlalu panjang.

Pada titik ini definisi formal dari sebuah kode berguna:

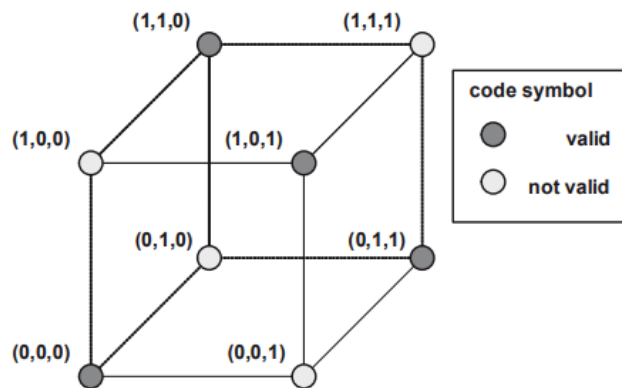
Kode dengan panjang n (misalnya $n=5$) adalah subset dari semua kemungkinan string tanda atau "vektor" yang dapat dibentuk dari simbol (misalnya huruf alfabet). Setiap dua kata kode dari subset ini berbeda dalam setidaknya satu dari n posisi string tanda. Dalam pemrosesan sinyal digital $d = 2$, yaitu kita selalu menggunakan kode biner yang terdiri dari string tanda yang terdiri dari "0" dan "1".

Sebuah sumber dengan empat simbol yang berbeda diberikan (misalnya kontrol forklift "ke kanan", "ke kiri", "bawah" dan "atas"). Mereka dikodekan dalam bentuk biner:

00 for "right"
01 for "down"
10 for "left"
11 for "up"

Sekarang bit paritas ditambahkan untuk pengenalan kesalahan: Jika jumlah "1" genap, 0 ditambahkan, jika tidak 1:

000 for "right"
011 for "down"
101 for "left"
110 for "up"



Generalisasi:

Kata kode biner dengan panjang n dapat direpresentasikan sebagai sudut dadu di "ruang n -dimensi". Kemudian 2^n sudut yang berbeda dari hasil die.

Untuk $n = 3$ kita memiliki $2^3 = 8$ sudut pada gambar. Jarak antara simbol kode valid yang bertetangga lebih besar daripada antara valid dan tidak valid.

Gambar 250: Kode biner dari sudut pandang geometris

Sebuah kata kode biner dengan panjang n dapat dilihat dari sudut pandang matematis sebagai titik sudut kubus n -dimensi bahkan jika ini tidak dapat dipahami dalam arti spasial untuk $n > 3$. Cara memandang sesuatu ini membuat konsep seperti jarak HAMMING atau pentingnya jarak HAMMING minimal dari suatu kode, bola HAMMING (mewakili lingkungan di sekitar titik kata kode tertentu) dan batas HAMMING (ini menunjukkan berapa banyak bit cek yang diperlukan untuk dapat mengoreksi suatu sejumlah kesalahan andal) lebih mudah dibayangkan, setidaknya di bidang tiga dimensi.

R.W. HAMMING menemukan proses pengkodean ini pada tahun 1950. Di samping Claude SHANNON, pendiri sejati teori informasi, dia adalah salah satu tokoh terkemuka dari disiplin ini.

Semakin besar jumlah (minimum) tempat di mana kata-kata kode berbeda, kesalahan yang lebih andal dapat dikenali dan diperbaiki. Angka ini menunjukkan jarak minimal.

Kode HAMMING dan jarak HAMMING

Dalam contoh kami, kode dengan panjang 3 dengan dua bit data dan satu bit cek dipilih. Dengan satu bit cek, hanya mungkin untuk membedakan $2^1 = 2$ status. Jika lebih banyak dipilih, katakanlah k bit cek, 2^k status dapat direpresentasikan. Jika ada kata kode biner dengan panjang n , itu

harus dimungkinkan dalam koreksi kesalahan untuk mengetahui di mana dari n tempat kesalahan terjadi atau apakah tidak ada kesalahan sama sekali. Status yang berbeda $n + 1$ dipertimbangkan.

k bit pemeriksaan harus setidaknya dapat mewakili n tempat yang berbeda di mana kesalahan terjadi atau menunjukkan bahwa tidak ada kesalahan yang terjadi. Dengan demikian kondisi yang berguna untuk koreksi kesalahan berupa hasil pertidaksamaan:

$$2^k \geq n + 1$$

Untuk $k = 3$ dan $n = 7$ pertidaksamaan ini menjadi persamaan; dengan demikian kondisi untuk nilai-nilai ini optimal. Gambar 251 menunjukkan hubungan ini dengan jelas.

k check bit membentuk bilangan biner. Selain itu, dalam pengkodean jenis ini yang disebut setelah R.W.HAMMING, tempat terjadinya kesalahan harus ditunjukkan dengan bilangan biner ini. Jika tidak ada kesalahan yang terjadi, semua bit pemeriksaan harus memiliki nilai 0.

Untuk alasan kecepatan, seseorang ingin memiliki kode pendek, yaitu n harus sekecil mungkin. Jumlah M dari kata sandi harus sebesar mungkin untuk alasan efisiensi. Hal ini juga berlaku untuk jarak minimum D . Tentu saja, tujuan ini bertentangan. Teori pengkodean mencoba menemukan kompromi optimal antara n , M dan D . Kode (n, M, D) sudah menunjukkan dalam nilai-nilai ini seberapa bagusnya.

Jika kata kode terdistorsi pada jalur transmisi maka jumlah kesalahan persis jarak HAMMING antara yang diterima dan kata kode asli. Jika kesalahan harus dikenali, kata kode (salah) yang diterima tidak boleh dialokasikan ke kata kode yang berbeda. Inilah sebabnya mengapa jarak minimal D yang sebesar mungkin sangat penting:

Jika kesalahan kurang dari D terjadi setidaknya kesalahan dapat dideteksi.

Jika kesalahan kurang dari $D/2$ terjadi, kata kode yang diterima lebih dekat dengan kata kode asli daripada semua yang lain.

Setelah sebuah kode digunakan untuk mengirimkan pesan, kata kode harus didekodekan di penerima. Intuisi kita menyarankan bahwa kita harus mencari kata kode yang paling dekat dengan "vektor" yang diterima. Selama jalur transmisi memberikan keandalan 50% untuk setiap bit yang ditransmisikan, taruhan terbaik adalah kata kode yang paling sedikit berbeda dari vektor yang diterima, yaitu kata kode dengan jarak HAMMING terkecil. Strategi ini disebut metode kemungkinan maksimum.

Kode Hamming adalah kode tambalan kesalahan biner yang mampu menambal kesalahan 1-bit dalam satu kata data 4-bit. Kode ini membutuhkan tiga bit kontrol kesalahan yang harus dihitung sebelum disimpan. Bit data adalah a_1 , a_2 , a_3 dan a_4 , bit kontrol kesalahan c_1 , c_2 dan c_3 . Oleh karena itu hasil kode 7-bit:

Contoh:

a1	a2	a3	a4	c1	c2	c3
1	0	0	1	?	?	?

Bit kontrol kesalahan dalam pemancar harus dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} c1 &= a1 + a2 + a3 \\ c2 &= a2 + a3 + a4 \\ c3 &= a1 + a2 + a4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c1 &= 1 + 0 + 0 \\ c2 &= 0 + 0 + 1 \\ c3 &= 1 + 0 + 1 \end{aligned}$$

Sekarang kita menerapkan "modulo 2-sum":

Ini sesuai persis dengan eksklusif-atau-fungsi (EXOR).

$0 + 0 = 1$
$0 + 1 = 1$
$1 + 1 = 0$

Hal ini mengakibatkan

$$1 \oplus 1, \quad c2 = 1 \quad \text{und} \quad c3 = 0$$

a1	a2	a3	a4	c1	c2	c3
1	0	0	1	1	1	0

$$\begin{aligned} 1 &= 1 + 0 + 0 \\ 1 &= 0 + 0 + 1 \\ 0 &= 1 + 0 + 1 \end{aligned}$$

Sekarang kesalahan data pada saluran transmisi

a1	a2	a3	a4	c1	c2	c3
1	0	0	0	1	1	0

$$\begin{aligned} 1 &= 1 + 0 + 0 \\ 1 &= 0 + 0 + 0 \\ 0 &= 1 + 0 + 0 \end{aligned}$$

Di penerima tes paritas sekarang dilakukan sebagai berikut::

$$\begin{aligned} e1 &= (a1 + a2 + a3) + c1 \\ e2 &= (a2 + a3 + a4) + c2 \\ e3 &= (a1 + a2 + a4) + c3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e1 &= (1 + 0 + 0) + 1 = 0 \\ e2 &= (0 + 0 + 0) + 0 = 1 \\ e3 &= (1 + 0 + 0) + 0 = 1 \end{aligned}$$

e1, e2 dan e3 adalah bit cek baru yang harus selalu 0 jika transfer sempurna

Persamaan ke-2 dan ke-3 salah. Kedua persamaan mengandung 2 dan a4. Namun, karena a2 juga akan membuat persamaan pertama salah, a4 pasti salah!

Bit kontrol kesalahan dipalsukan pada saluran transmisi

a1	a2	a3	a4	c1	c2	c3
1	0	0	1	1	0	0

$$\begin{aligned} 1 &= 1 + 0 + 0 \\ 0 &= 0 + 0 + 1 \\ 0 &= 1 + 0 + 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e1 &= (1 + 0 + 0) + 1 = 0 \\ e2 &= (0 + 0 + 1) + 0 = 1 \\ e3 &= (1 + 0 + 1) + 0 = 0 \end{aligned}$$

Hanya persamaan ke-2 yang salah. Karena c_2 hanya terjadi pada persamaan ini dan tidak ada persamaan lainnya, c_2 pasti salah!

Gambar 251: Kode Yang Menemukan Kesalahan Dan Kode Yang Memperbaikinya

Kesalahan bit individu dapat ditemukan dan diperbaiki oleh kode HAMMING dengan kepastian 100%. Jika beberapa bit ditransmisikan atau dibaca dengan cacat, kode ini tidak ada gunanya. Namun ada kode yang mengoreksi kesalahan dan memungkinkan untuk mengoreksi lebih dari satu bit, tentu saja, berdasarkan bit cek tambahan atau redundansi. Praktis semua kode ini yang memperbaiki kesalahan pada dasarnya mengikuti contoh yang dijelaskan: informasi "hulu" dihitung menurut pola yang telah ditetapkan dan data disimpan. Informasi ini digunakan untuk menghitung ulang bit setelah dibaca. Pola bit cek memungkinkan untuk menemukan lokasi kesalahan dan mengenali nilai asli yang benar.

Dengan mengacu pada kasus yang dijelaskan di atas dengan koreksi kesalahan kesalahan $D/2$ sekarang dapat ditentukan dengan tepat:

Kode dengan jarak minimal dari D dapat mengoreksi kesalahan hingga $(D-1)/2$ dengan andal.

Membandingkan vektor yang diterima dengan setiap kata kode yang mungkin untuk menemukan kata kode "paling dekat" secara teoritis adalah metode yang paling menjanjikan tetapi dalam kasus kode yang panjang memerlukan terlalu banyak perhitungan. Untuk alasan ini sebagian besar teori pengkodean berkaitan untuk menemukan kode yang dapat didekodekan secara efisien dan oleh karena itu dengan cepat.

Semua ini mungkin tampak agak teoretis dan tidak terlalu praktis. Sebaliknya adalah benar. Teks berikut diambil dari penghormatan kepada R.W. HAMMING yang menggarisbawahi pentingnya pekerjaan hidupnya:

"Dalam kehidupan sehari-hari kita mengukur jarak dengan menghitung meter yang diperlukan untuk pergi dari satu tempat ke tempat lain.

Di dunia digital sebagai urutan nol dan satu, yaitu "bit", jarak Hamming adalah jumlah bit yang harus diubah untuk mendapatkan dari satu urutan bit ke bit lainnya. Jarak ini diperkenalkan oleh R.W. Hamming pada awal tahun 50-an dan sejak itu telah digunakan secara luas oleh teknologi informasi dan informatika. Dengan demikian dimungkinkan dalam tugas khas "kecerdasan buatan" mengenali wajah untuk mengukur kesamaan dua wajah melalui jarak Hamming mereka.

Aplikasi pertama yang Hamming memperkenalkan pengukuran jarak ini terhubung dengan perlindungan terhadap kesalahan dalam transmisi, penyimpanan atau pemrosesan urutan bit. Semakin besar jumlah kesalahan transmisi, semakin besar pula jarak Hamming yang ditransmisikan dan urutan bit yang diterima secara cacat. Oleh karena itu Hamming hanya digunakan urutan bit untuk transmisi yang antara satu sama lain memiliki jarak Hamming lebih dari dua kali lebih besar daripada yang dapat timbul melalui kesalahan transmisi. Dengan demikian kesalahan dapat dikenali dan bahkan diperbaiki. Beberapa urutan bit dengan jarak Hamming yang besar membentuk "kode Hamming".

Pekerjaan yang dilakukan pada saat yang sama dengan teori informasi SHANNON ini membentuk dasar dari teori umum sistem dan kode koreksi kesalahan. Kepentingannya terletak di atas segalanya pada kenyataan bahwa sistem dengan kompleksitas apa pun

dengan tingkat keandalan yang dapat ditentukan dapat dibangun dari subsistem yang kurang dapat diandalkan. Upaya yang diperlukan dapat dihitung dengan tepat.

Teori matematis yang sangat canggih dari pengkodean koreksi kesalahan memiliki aplikasi yang sangat diperlukan di setiap pemutar CD dan ponsel dan di setiap komputer skala besar dan jaringan informasi di seluruh dunia. Hanya melalui kode-kode seperti itulah kesalahan yang tak terhindarkan dalam pengiriman, penyimpanan, dan pemrosesan informasi dapat diperbaiki”.

Pengkodean Konvolusi

Dalam pengkodean perlindungan kesalahan, dua jenis pengkodean dibedakan: pengkodean blok dan pengkodean konvolusi. Sejauh ini hanya kode dengan panjang blok tetap yang telah ditangani. Di sini informasi ditransmisikan secara blokwise.

Dalam pengkodean konvolusi, di sisi lain, data input - seperti filter digital - "disebarkan" ke beberapa data output dalam proses seperti konvolusi. Gambar 212 menunjukkan struktur encoder konvolusi langsung. Sinyal input mis. sinyal audio digital yang tahan lama – dalam bentuk pola bit diumpangkan sedikit demi sedikit ke dalam register geser dua langkah. Pada saat yang sama sinyal input dihubungkan melalui "penambahan" (EXOR) ke bit register geser pada output. Register geser dapat mengambil 4 status berbeda (00, 01, 10, dan 11). Agar status ini (bit berikutnya muncul di sini sebagai bit kanan dalam register geser) harus sesuai secara gambar dengan status dalam register geser, input dari encoder konvolusi terdaftar di sebelah kanan dan output di sebelah kiri.

Kedua output menerima frekuensi pulsa clock yang sama dengan sinyal input, oleh karena itu redundansi total sinyal output 50% lebih besar daripada sinyal input, prasyarat untuk pengkodean proteksi kesalahan.

Kita sekarang harus waspada terhadap kemungkinan memvisualisasikan aliran sinyal pada output dalam ketergantungannya pada sinyal input dan status register geser. Dua metode telah membuktikan nilainya:

- Diagram keadaan:

Diagram keadaan yang ditunjukkan pada Gambar 253 menjelaskan secara lengkap "sistem aturan" dari encoder konvolusi yang diwakili di sana. Empat keadaan berbeda dari register geser (lingkaran keadaan) berada di empat lingkaran. Sebuah "0" atau "1" mungkin terletak pada input dari encoder konvolusi itulah sebabnya dua panah menunjuk jauh dari setiap lingkaran negara.

Mari kita asumsikan keadaan awal "00". Jika 1” terhubung dengan input, "11" muncul di output (semua operasi register geser menghasilkan $1 + 0 = 1$). Status selanjutnya adalah "01". 1/11 dimasukkan pada panah, tangan kiri 1 adalah sinyal input dan tangan kanan 11 adalah sinyal output.

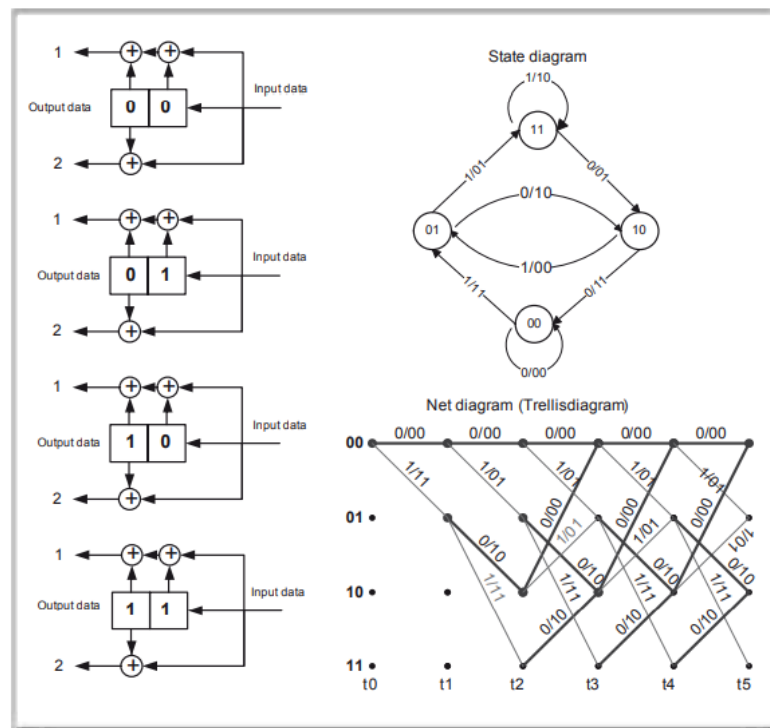
Jika "0" terhubung ke input, status selanjutnya adalah "00". Inilah sebabnya mengapa 0/00 dimasukkan di panah.

- Diagram jaringan:

Biasanya disebut diagram teralis dalam literatur. Urutan waktu sekarang menjadi faktor tambahan. Empat kemungkinan keadaan register geser disusun secara vertikal. Setiap bit tambahan pada input menyiratkan langkah lebih jauh ke kanan.

Mari kita mulai dari kiri atas dengan status "00". Garis tebal berarti "0" pada input dan garis tipis berarti "1". Dari setiap titik teralis mencapai garis tebal dan tipis sesuai dengan "0" dan "1" – pergi ke keadaan yang berbeda. Sinyal input dan output didaftarkan oleh garis tipis dan tebal.

Sementara diagram keadaan membentuk "set aturan" untuk encoder konvolusi, pengkodean pola bit sinyal input tertentu dapat diikuti dengan cermat melalui diagram teralis.



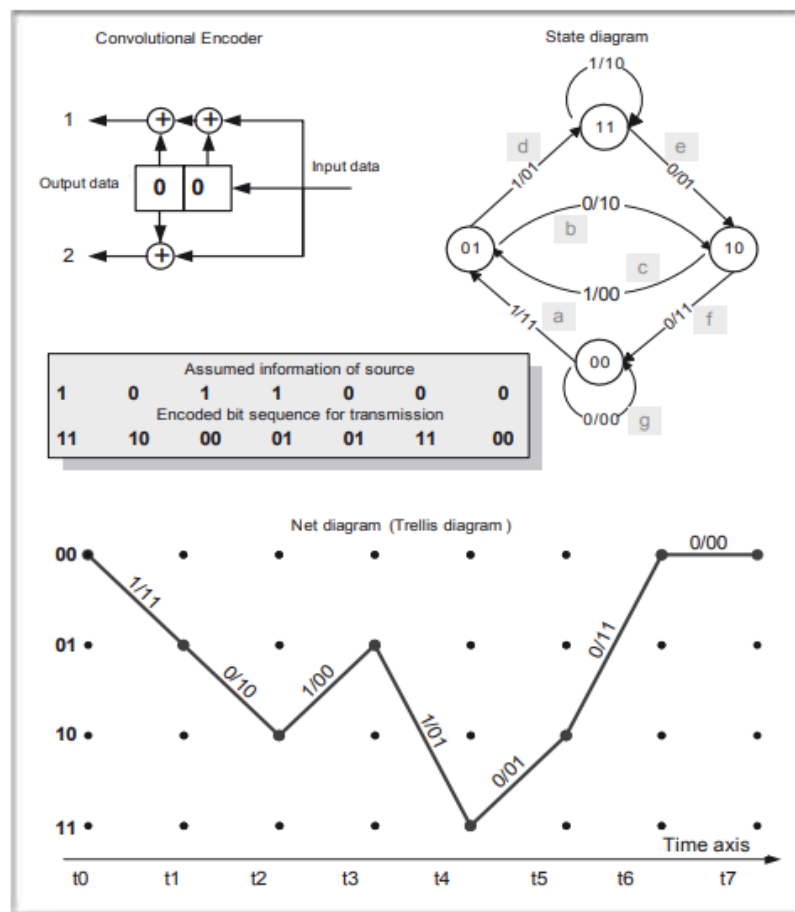
Gambar 252: Contoh Encoder Konvolusi, Diagram Keadaan, Dan Diagram Teralis

Di sebelah kiri ada encoder konvolusi yang sama dengan total 4 status "dalam" register geser). Tautan "+" menjalankan "modula-2" atau operasi-EXOR (lihat Gambar 251).

Diagram keadaan mewakili "set aturan" dari encoder konvolusi dengan cara yang sangat mudah. Di empat lingkaran ada keadaan berbeda dari register geser (lingkaran keadaan). Sebuah "0" atau "1" mungkin terletak pada input dari encoder konvolusi; untuk alasan ini dua anak panah mengarah menjauh dari setiap lingkaran. Dua panah "mendarat" sesuai dengan masing-masing negara bagian. Dimungkinkan untuk panah untuk memulai dan mengakhiri pada keadaan yang sama. Berpindah dari satu keadaan ke keadaan lain hanya mungkin dengan cara yang cukup spesifik; misalnya, perubahan dari "11" ke status "01" tidak mungkin dilakukan dalam satu langkah.

Diagram teralis menunjukkan kemungkinan perubahan dari keadaan ke keadaan dalam urutan waktu, dimulai di sini dari keadaan "00". Status register geser diatur secara vertikal. Mulai dari status "00" hanya dua status lain ("00" dan "01") yang mungkin, tergantung pada apakah ada "1" pada input (garis merah tipis) atau "0" (garis biru tebal). Dari setiap titik di teralis yang dicapai pada prinsipnya dua jalur dimungkinkan, jalur "0" dan jalur "1".

Sinyal input ada di setiap jalur dan setelah garis diagonal ada sinyal output (misalnya 0/10). Di antara kemungkinan jalur yang tercantum di sini ada jalur untuk pola bit tertentu (lihat Gambar 251) dan juga jalur yang paling mungkin untuk penguraian kode VITERBI dari sinyal atau urutan bit yang telah diubah pada jalur transmisi atau dalam media penyimpanan. (lihat Gambar 254).



Gambar 253: Diagram Teralis Untuk Urutan Bit Input Tertentu

Diagram keadaan berlaku untuk semua jenis urutan pola bit input dan tidak hanya untuk yang spesifik. Di sisi lain diagram teralis dapat menggambarkan jalannya urutan keadaan dan sinyal output untuk urutan bit input tertentu.

Contoh di atas mengarah ke urutan bit kode tertentu pada output. Diagram teralis menunjukkan jalur untuk sinyal ini. Agar Anda dapat mengikuti kursus, perubahan keadaan dan sinyal keluaran jalur pada diagram keadaan ditandai dengan huruf a,b,c....

Dalam decoding, masalah berikut menanti kita: bagaimana jalur ini dapat direkonstruksi jika urutan bit dari sinyal keluaran terdistorsi pada satu atau beberapa titik pada jalur transmisi atau oleh media penyimpanan? Decoding VITERBI memberikan jawabannya (lihat Gambar 254)

Contoh: pola bit pada input terdiri dari urutan:

1 0 1 1 0 0 0

Urutan bit berkode yang dapat diperiksa melalui diagram keadaan menghasilkan output:

11 10 00 01 01 11 00

Gambar 253 menunjukkan diagram teralis yang relevan.

Penguraian Kode VITERBI

Apa yang terjadi dalam decoding jika urutan bit kode di atas terdistorsi pada jalur transmisi dan diterjemahkan di penerima. Bagaimana kesalahan dikenali dan diperbaiki?

Gambar 254 menunjukkan ini untuk urutan yang diterima:

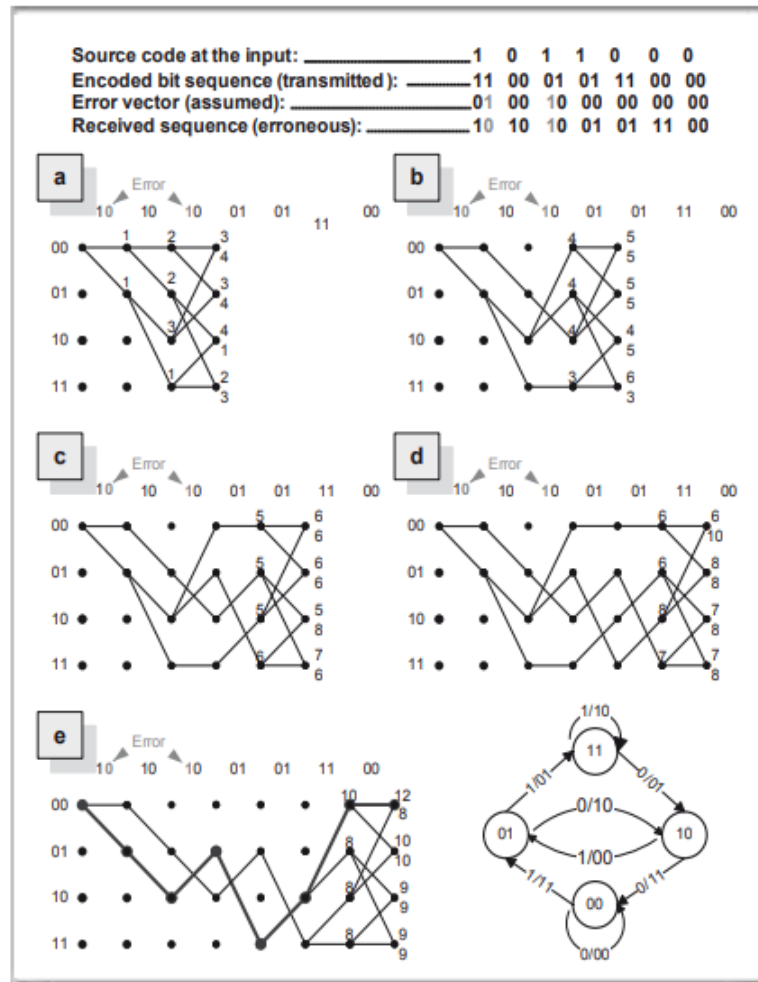
10 10 10 01 01 11 00

Nilai yang digarisbawahi mewakili kesalahan pada jalur transmisi atau media penyimpanan. Sekarang diagram teralis dikembangkan langkah demi langkah dalam dekoder melalui diagram keadaan yang berisi seluruh rangkaian aturan untuk enkoder konvolusi.

Proses decoding yang disebut VITERBI-decoding setelah penemunya mencoba beberapa jalur dan mencoba menemukan jalur yang paling mungkin atau urutan bit berkode yang paling mungkin (metode kemungkinan maksimum).

Sekarang untuk decoding:

- Biarkan decoder berada pada state "00" dan menerima bit sequence "10". Sekilas diagram keadaan menunjukkan: encoder tidak dapat menghasilkan urutan bit ini karena mulai dari keadaan "00" hanya ada dua alternatif:
 - Mengirim "00" dan mempertahankan status "00". Namun, decoder sudah "tahu" bahwa dalam hal ini hanya 1 bit yang ditransmisikan dengan benar. Sebagai "jumlah bit yang benar", "1" terdaftar di titik teralis (atas).
 - Mengirim "11" dan transisi ke status "01" (dalam diagram teralis garis diagonal dari kiri atas). Di sini juga hanya satu bit yang benar yang diterima, yaitu "1" pada titik teralis.
- Dekoder kembali menerima urutan bit "10"
 - Mulai dari state "00" prosedur yang sama diulangi sekali lagi. Jika "00" telah ditransmisikan, status "00" dan "01" akan dimungkinkan; dalam kedua kasus hanya 1 bit yang ditransmisikan dengan benar. Jumlah bit yang benar telah meningkat menjadi "2" (dari semuanya 4 bit) dan ini telah didaftarkan pada titik teralis.



Gambar 254: Penguraian Kode VITERBI

Penguraian kode VITERBI dilakukan untuk memastikan penerimaan urutan pola bit yang bebas kesalahan. Diagram keadaan menunjukkan bahwa pola bit dalam urutan ini tidak dapat dihasilkan oleh encoder konvolusi, yaitu ia segera mengenali bahwa bit pasti salah dalam kasus ini. Namun, karena tidak jelas mana dari dua bit yang harus salah, kedua kemungkinan diselidiki. Jalannya berbeda. "Jumlah bit yang benar" terdaftar di titik teralis.

Dua jalur yang berbeda dapat berpotongan pada titik teralis. Jalur dengan "jumlah bit yang benar" yang lebih kecil akan dihapus. Jadi secara bertahap jalan dengan kemungkinan terbesar muncul. Ini sebenarnya identik dengan jalur untuk urutan bit yang benar dalam Gambar 253. Detailnya dijelaskan lebih dekat dalam teks.

- Mulai dari status "01" penerimaan "01" mengarah ke status "11". Tapi kemudian kedua bit akan salah dibandingkan dengan "10" dan jumlah bit yang benar tetap "1". Penerimaan alternatif dari "10" dengan transisi ke status "10" memberikan dua bit yang benar, yaitu di jalur ini sejauh ini 3 bit yang benar. Setelah dua langkah jalan ini adalah yang paling mungkin..

- Urutan bit ketiga "10" sekarang dievaluasi dengan menggunakan diagram status dan jumlah bit yang benar terdaftar. Dua transisi berakhir di setiap titik keadaan. Dalam keadaan "00" misalnya, kita menemukan dua transisi dengan jumlah bit yang benar yang berbeda (3

dan 4). Penguraian kode VITERBI didasarkan pada penghapusan transisi dengan jumlah bit benar yang lebih sedikit karena ini adalah jalur yang lebih kecil kemungkinannya melalui diagram teralis. Jika jumlah bit pada titik keadaan sama dalam jumlah, tidak ada jalur yang dihapus dan kedua alternatif akan dilanjutkan lebih lanjut.

- Dengan mengevaluasi urutan bit lain yang diterima "01", "01", dan "11" dan penghapusan konstan dari transisi yang paling kecil kemungkinannya, jalur "paling mungkin" dalam diagram teralis terbentuk.
- Urutan bit terakhir yang diterima "00" mengarah pada keputusan. Jalur diagram teralis yang paling mungkin untuk dekoder VITERBI identik dengan jalur dekoder yang benar dalam diagram teralis pada Gambar 253.

Kesalahan dalam urutan yang diterima telah diperbaiki. Dengan membandingkan jumlah bit yang benar yang terdaftar di sebelah kanan, jumlah kesalahan yang terjadi dapat diperkirakan ($14 - 12 = 2$).

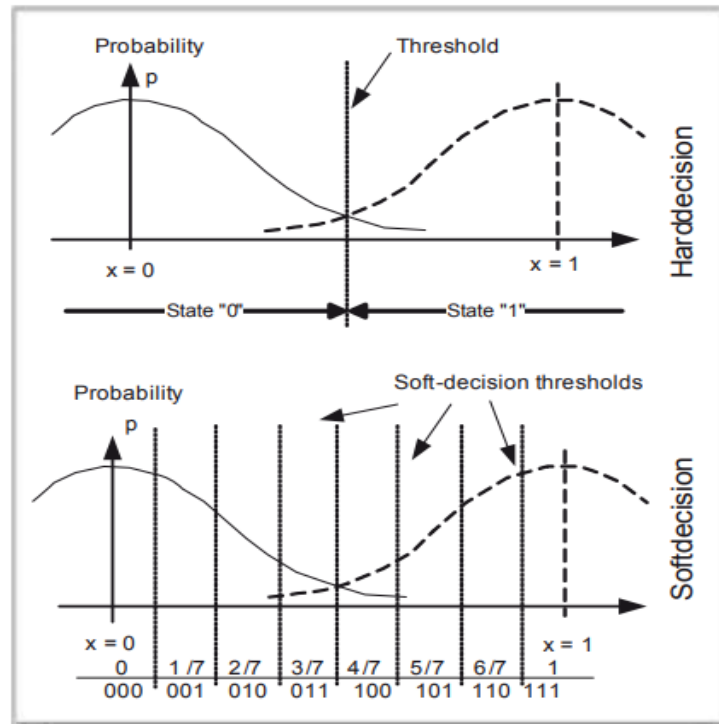
Keputusan Keras Dan Lunak

Setelah mengkodekan sinyal di area pemancar, modulasi mengikuti untuk memungkinkan transmisi. Sinyal didemodulasi di penerima. Sebagai akibat dari berbagai macam interferensi selama transmisi, status "0" dan "1" tidak dapat dibedakan dengan jelas seperti pada pemancar.

Selain interferensi oleh noise atau sinyal lain, sifat media transmisi mempengaruhi bentuk sinyal. Dalam hal transmisi nirkabel, ini misalnya, pantulan ganda dari sinyal yang ditransmisikan oleh berbagai rintangan yang dapat menghasilkan efek gema atau memadamkan sinyal.

Karakteristik dispersi kabel (lihat Gambar 116) juga terlihat jelas. Kecepatan transmisi dalam kabel selalu bergantung pada frekuensi. Akibatnya osilasi sinusoidal dari frekuensi yang berbeda merambat pada kecepatan yang berbeda yang menyiratkan perubahan dalam spektrum fase. Ini melibatkan perubahan bentuk sinyal.

Sinyal atau urutan bit yang diterima terdistorsi dan berisik. Jika keputusan sulit digunakan, kemungkinan dekoder untuk menemukan jalur yang paling mungkin dalam diagram teralis sangat berkurang jika tidak sepenuhnya dihilangkan. Kemungkinan yang lebih halus untuk membuat keputusan harus ditawarkan (keputusan lunak).

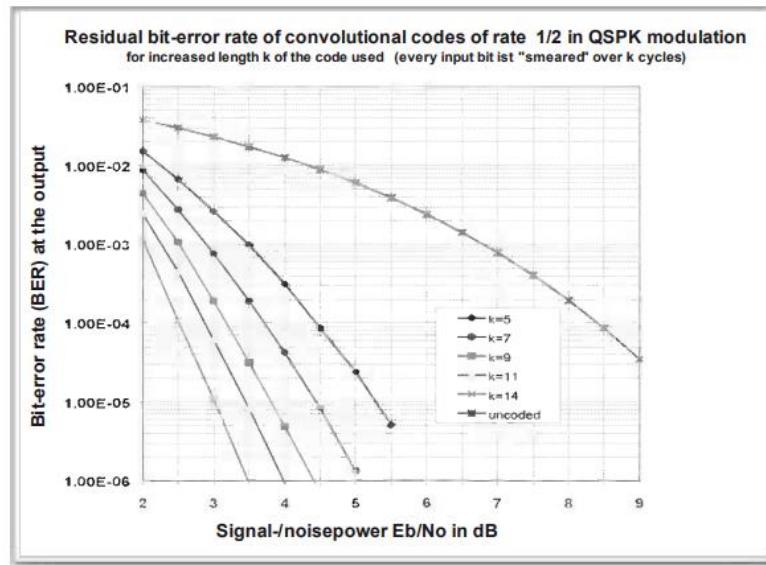


Gambar 255: Keputusan Keras Dan Lunak

Kurva yang diwakili di sini dapat diartikan sebagai berikut: sinyal untuk keadaan "1" (atau "0") biasanya tiba dalam kondisi baik tetapi tingkat penyimpangan kadang-kadang begitu besar sehingga kadang-kadang disalahartikan sebagai keadaan yang berbeda dan ditafsirkan secara salah (daerah penyimpangan tumpang tindih di tengah). Namun, karena beberapa pola bit bertentangan dengan "set aturan" dari encoder konvolusi, keputusan tentang "0" atau "1" harus diambil bersama dengan dekoder VITERBI.

Adalah tugas demodulator (lihat Gambar 221) untuk memberikan dukungan kepada dekoder. Demodulator meneruskan nilai 3 bit ke dekoder yang berkisar dari "000" (kemungkinan besar untuk penerimaan "0") hingga "111" (kemungkinan besar penerimaan 1); itu memilih nilai tergantung pada kelas yang dialokasikan untuk sinyal. Alokasi langkah yang paling sederhana ditunjukkan pada diagram (bawah). Ini telah membuktikan nilainya dalam banyak kasus.

Dalam kasus keputusan lunak tidak hanya nilai integer yang mungkin untuk "jumlah bit yang benar". Ini mengarah pada penilaian yang jauh lebih tepat tentang kemungkinan jalur tertentu melalui diagram teralis. Penguatan pengkodean tipikal terletak di wilayah 2dB.



Gambar 256: Efisiensi Kode Konvolusi

Efisiensi koreksi kesalahan meningkat seperti yang diharapkan dengan lamanya pengaruh encoder yang digunakan. Hal ini ditentukan oleh langkah-langkah penyimpanan register geser. Semakin besar ini, semakin lama bit input mempengaruhi pendahulu dan penerusnya. Informasi input "disebarkan" lebih luas dan karena itu dilindungi lebih efektif terhadap kesalahan bit individu.

$K = 5$ sudah menyiratkan perlindungan kesalahan yang cukup besar dan tingkat kesalahan bit (BER) yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan sinyal non-kode. Namun, jumlah perhitungan meningkat tajam untuk dekoder VITERBI dengan meningkatnya panjang pengaruh.

Untuk strategi keputusan yang optimal, probabilitas menerima sinyal yang terdistorsi harus diketahui (lihat Gambar 255). Dalam prakteknya pilihan 8 tingkat keputusan telah terbukti tepat.

Kapasitas Saluran

Teori informasi memiliki tanggal lahir yang pasti yang ditandai dengan "teorema pengkodean" Claude SHANNON yang terkenal dari tahun 1948. Sebelum ada orang yang bisa meramalkan perkembangan pemrosesan sinyal digital saat ini, dia mengenali masalah mendasar dan memberikan solusi definitif yang brilian. pada waktu bersamaan. Butuh waktu puluhan tahun agar karyanya dapat dipahami dengan baik dan digunakan secara praktis. Kontribusinya adalah salah satu wawasan ilmiah terpenting abad terakhir, sebuah fakta yang, bagaimanapun, diakui oleh sangat sedikit orang. Dari sudut pandang sosiologis, teknologi, dan ilmiah, karyanya menaungi segalanya. Baca tesis di akhir Bab 1 lagi jika Anda tidak percaya ini. Untuk alasan ini adalah tepat untuk melihat ide-ide fundamentalnya dengan mengacu pada saluran informasi.

Pemilihan simbol yang dipilih oleh sumber informasi dalam pembangkitan informasi merupakan sumber ketidakpastian bagi penerima dalam arti ketidakpastian. Ini hanya dihapus ketika penerima mengenali pesan.

Dengan demikian tujuan dan hasil dari proses komunikasi adalah penyelesaian ketidakpastian.

Untuk mengukur jumlah informasi diperlukan tolok ukur yang meningkat dengan tingkat kebebasan pengambilan keputusan sumber. Pada saat yang sama ketidakpastian penerima meningkat mengenai pesan apa yang akan dihasilkan dan dikirimkan oleh sumber. Tolok ukur untuk kuantitas informasi ini disebut entropi H . Ini diukur dalam bit. Arus informasi R adalah jumlah bit/s.

Bagaimana kapasitas transmisi saluran yang terdistorsi atau tidak sempurna dapat dijelaskan? Sumber informasi harus dipilih sedemikian rupa sehingga aliran informasi dari saluran yang diberikan sebesar mungkin. SHANNON menyebut arus informasi maksimum ini sebagai "kapasitas saluran" C . Tesis utama SHANNON tentang saluran transmisi yang terdistorsi adalah:

Saluran (diskrit) memiliki kapasitas saluran C dan sumber (diskrit) dengan entropi H terhubung dengannya. Jika H lebih kecil dari C ada sistem pengkodean yang dengannya informasi dari sumber dapat ditransmisikan melalui saluran dengan frekuensi kesalahan minimal (kemungkinan kesalahan bit).

Hasil ini dicatat oleh ilmuwan dan insinyur lain dengan takjub. Informasi dapat ditransmisikan melalui saluran yang terdistorsi dengan tingkat keandalan yang diinginkan!?

Jika probabilitas kesalahan transmisi meningkat, yaitu kesalahan terjadi lebih sering, kapasitas saluran C seperti yang didefinisikan oleh SHANNON menjadi lebih kecil. Ini berkurang semakin sering terjadi kesalahan. Dengan demikian arus informasi harus dikurangi sedemikian rupa sehingga lebih kecil atau paling banyak sama dengan kapasitas saluran C .

Bagaimana ini bisa dicapai? SHANNON "hanya" membuktikan keberadaan nilai potong ini dia tidak mengatakan bagaimana mencapai ini. Proses pengkodean modern semakin mendekati ideal ini. Hal ini terlihat pada perkembangan teknologi modem hingga saat ini. Jika 20 tahun yang lalu kecepatan data yang dapat dicapai melalui saluran telepon 3 kHz adalah 2,4 kbit/s hari ini lebih dari 56 kbit/s!

Sekarang tampak jelas mengapa penyandian sumber (termasuk penyandian entropi) sebagai metode kompresi harus ditangani secara terpisah dari penyandian saluran (perlindungan kesalahan). Dalam penyandian sumber, redundansi sebanyak mungkin harus dihilangkan dari sinyal untuk mendapatkan sedekat mungkin dengan kapasitas saluran C dari sinyal yang tidak terganggu. Jika saluran dipengaruhi oleh interferensi, jumlah redundansi dapat ditambahkan untuk sedekat mungkin dengan kapasitas saluran (lebih kecil) dari saluran yang terganggu.

Latihan pada Bab 12**Latihan 1**

Buat daftar jenis file yang sangat penting untuk dilindungi dari transmisi yang rusak. Dalam konteks apa konsep redundansi terjadi?

Latihan 2

Definisikan konsep jarak (HAMMING) dari suatu kode dan jelaskan pentingnya untuk pengenalan dan koreksi kesalahan. Apa arti dari pertidaksamaan $2k = n + 1$ (k cek bit; n adalah panjang kata kode).

Latihan 3

Jelaskan metode kemungkinan maksimum untuk pengenalan dan koreksi kesalahan transmisi.

Latihan 4

Buat contoh (seperti pada Gambar 251) dan tentukan koreksi dan periksa bit melalui "penambahan modula 2".

Latihan 5

Jelaskan prinsip pengkodean convolutional dibandingkan dengan pengkodean blok.

Latihan 6

Jelaskan sehubungan dengan pengkodean convolutional representasi aliran sinyal sebagai diagram keadaan atau diagram teralis.

Latihan 7

Jelaskan strategi decoding VITERBI dari urutan penerimaan pola bit yang rusak dalam diagram teralis melalui diagram keadaan

Latihan 8

Keputusan lunak biasanya lebih menguntungkan dibandingkan dengan keputusan keras. Menjelaskan.

Latihan 9

Merumuskan dan menafsirkan tesis utama HANNON dalam teori pengkodean.

BAB 13

TEKNIK TRANSMISI DIGITAL III: MODULASI

Sinyal digital pada keluaran sebuah encoder adalah urutan angka dalam bentuk aliran bit. Agar dapat mentransmisikan pola bit seperti itu melalui media fisik (kabel atau ruang), pola tersebut harus diubah menjadi sinyal waktu kontinu yang termodulasi, yang pada analisis akhir, analog.

Pola bit sebagai jenis sinyal tertentu tampaknya terdiri dari urutan acak impuls persegi panjang. Ini berisi langkah-langkah berturut-turut cepat dan karena itu bandwidth mereka sangat besar. Inilah sebabnya mengapa sebelum transmisi bandwidth perlu dibatasi melalui filter. Menurut Prinsip Ketidakpastian ini mengarah, bagaimanapun, ke perpanjangan waktu setiap bit-pulsa dimana bit tetangga mungkin tumpang tindih (ISI Intersymbol Interference).

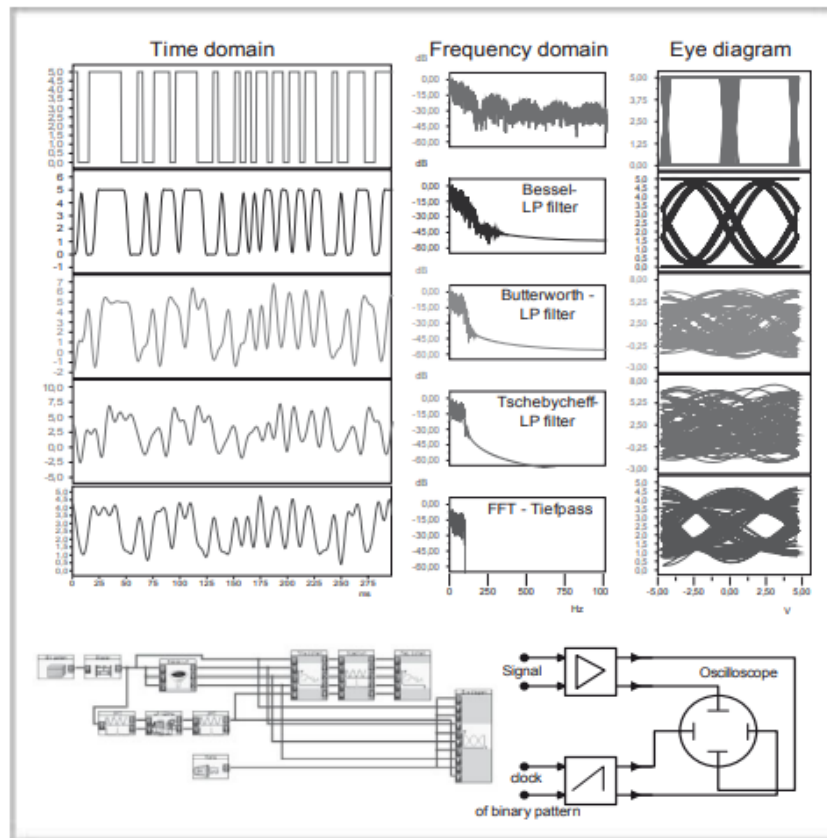
Pulsa persegi panjang selalu memiliki spektrum seperti Si. Hal ini juga ditunjukkan pada Gambar 257. Sebuah "kotak hitam" memberikan urutan pulsa biner yang berubah-ubah. Spektrum memiliki kurva berbentuk Si. Tugasnya adalah, melalui filter, mencoba dan membatasi bandwidth secara optimal sehingga penerima masih dapat merekonstruksi pola bit.

Catatan: diagram mata

Diagram mata pada Gambar 257 memberikan informasi tentang kualitas sinyal digital. Untuk tujuan ini, defleksi horizontal layar disinkronkan dengan jam dari pola bit (acak). Analisis komparatif yang lebih rinci dari diagram mengarah pada hasil berikut:

- Lengkungan "mata" adalah hasil dari kurva transisi pulsa.
- Garis horizontal yang melalui bagian atas dan bawah merupakan ukuran keberadaan pulsa persegi panjang.
- Jika bukaan diagram mata menghilang, distorsi pola bit membuat hampir tidak mungkin untuk merekonstruksi sinyal transmisi asli di penerima.
- Diagram mata memungkinkan untuk memperkirakan kualitas ISI dan apa yang disebut fase jitter (fluktuasi fase tidak teratur yang disebabkan oleh osilator tidak stabil) dan kebisingan yang dilapis.

ISI sangat bergantung pada jenis filter yang digunakan dan terutama pada kecuraman tepinya. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 257 untuk empat jenis filter yang berbeda di mana frekuensi cutoff filter identik dengan apa yang disebut frekuensi NYQUIST (frekuensi minimum yang digunakan untuk pengambilan sampel sinyal terbatas pita menurut prinsip penginderaan: $f_N = 2 \cdot f_{max}$ (lihat Gambar 200). Gambar 257 menunjukkan dua jenis filter di mana diagram mata ditutup di sisi kanan. Filter BUTTERWORTH dan CHEBYCHEFF memiliki kecuraman tepi yang lebih besar daripada filter BESSEL (dengan frekuensi cutoff yang sama dan "kualitas"), tetapi mereka memiliki kurva fase non-linier yang jelas. Ini berarti bahwa osilasi sinusoidal pada output filter berada dalam posisi fase yang berbeda satu sama lain daripada pada input filter. Itulah sebabnya bentuk pulsa menjadi kabur dan bit-bit tetangga saling tumpang tindih, hampir tidak mungkin untuk merekonstruksi pola bit asli pada penerima dalam dua kasus ini.



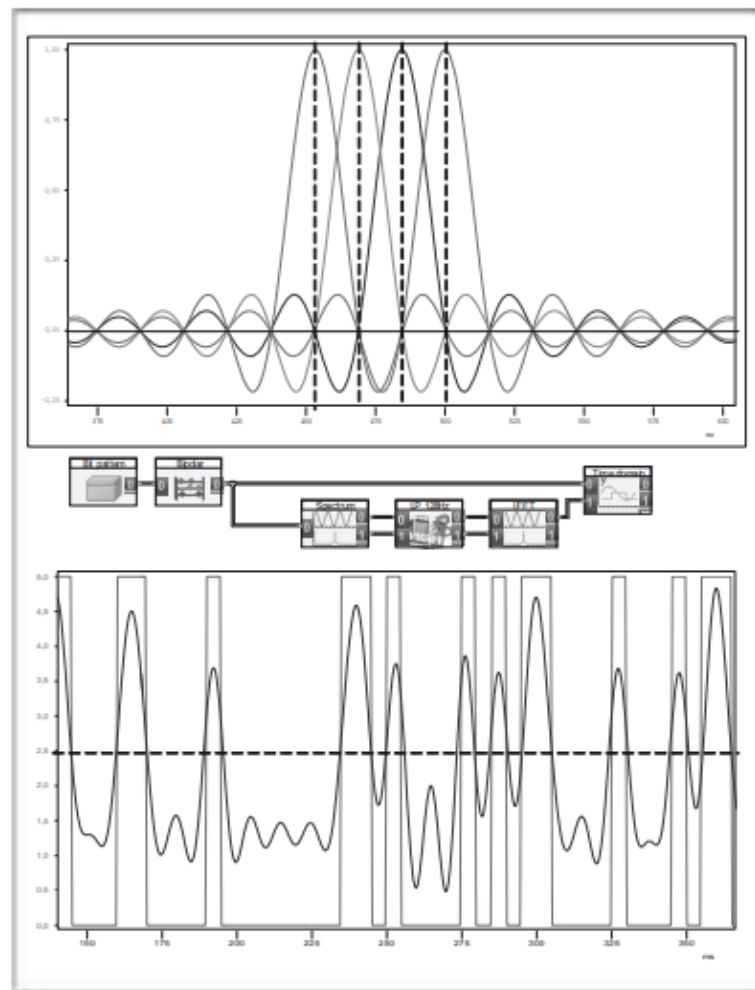
Gambar 257: Penyaringan Aliran Rendah Aliran Bit Untuk Membatasi Bandwidth Transmisi

Di kiri atas Anda dapat melihat pola bit yang dihasilkan oleh encoder, di tengah spektrum berbentuk Si yang relevan. Frekuensi denyut nadi dasar dalam hal ini 200 Hz. Karena bandwidth yang besar sinyal tidak dapat dimodulasi. Penting untuk menemukan filter optimal yang memungkinkan pola bit asli direkonstruksi di penerima dan yang pada saat yang sama mengurangi bandwidth ke kisaran minimum. Frekuensi pengambilan sampel 200 Hz berarti bahwa sinyal 100 Hz terbaik dapat disaring. Ini dicoba menggunakan empat jenis

filter yang berbeda (dengan frekuensi cutoff yang sama 100 Hz dan dengan urutan ke-10 yang sama).

Di bagian atas Anda dapat melihat eksperimen menggunakan filter BESSEL, di bawahnya dengan filter BUTTERWORTH, diikuti eksperimen dengan filter lowpass CHEBYCHEFF (lihat Gambar 141) dan terakhir, di bagian bawah, menggunakan filter FFT (lihat Gambar 206 dst). Filter BESSEL memiliki keunggulan yang sangat menonjol, tetapi respons fase yang hampir linier. Filter BUTTERWORTH dan CHEBYCHEFF keduanya memiliki tepi yang relatif curam, tetapi respons fase non-linear. Filter FFT "ideal", sebaliknya, memiliki tepi yang sangat negatif dan linearitas fase lengkap.

Diagram mata adalah metode standar dalam teknologi pengukuran untuk mengetahui apakah pola bit dapat direkonstruksi. Semakin besar area bebas mata, semakin baik. Menurut metode ini, baik filter BESSEL maupun FFT memenuhi persyaratan ini. Non-linearitas dari respon fase jelas menyebabkan distorsi ekstrim bentuk pulsa dari dua filter lainnya. Hal ini juga dapat dilihat pada domain waktu.



Gambar 258: Pemfilteran Dan Kasus Pembatas Yang Ideal

Dalam Gambar 257, bawah, kasus pembatas (bandwidth minimal dan rekonstruksi lengkap) tercapai. Pada frekuensi cutoff 100 Hz dan batasan bandwidth yang ideal - yaitu persegi panjang - respons pulsa berbentuk Si. Dalam kasus khusus ini, bagaimanapun, fungsi Si tumpang tindih seperti yang ditunjukkan pada Gambar, atas. Sinyal agregat dari masing-masing Sistem Pemrosesan Sinyal (Dr. Agus Wibowo)

masing respons pulsa bebas dari interferensi pada saat pengambilan sampel karena fungsi-Si dari semua pulsa tetangga memiliki persimpangan nol pada saat itu. Gambar di bagian bawah menunjukkan bahwa dalam hal ini nilai "0" dan "1" dari pola bit pasti dapat direkonstruksi pada ambang batas diskriminasi 50%.

Kasus yang paling menarik adalah filter FFT. Anda akan benar-benar mengharapkan diagram mata terburuk karena penyaringan "ideal" dengan tepi yang hampir persegi panjang. Respons pulsa dan transien filter ini, menurut Prinsip Ketidakpastian, membutuhkan waktu yang sangat lama dan menyerupai fungsi Si. Oleh karena itu, semua fungsi Si ini saling tumpang tindih. Jadi, mengapa diagram mata relatif terbuka?

Penjelasannya diberikan dalam Gambar 258. Dengan frekuensi NYQUIST, sinyal agregat dari masing-masing respons pulsa bebas dari interferensi pada saat pengambilan sampel karena fungsi Si dari semua pulsa tetangga memiliki persilangan nol pada saat itu. Gambar di bagian bawah menunjukkan seberapa baik pola bit asli dapat direkonstruksi. Namun, tidak ada filter FFT analog dengan karakteristik ini.

Penguncian Status Diskrit

Prosedur modulasi klasik hanya memiliki rentang frekuensi terbatas dan hal yang sama berlaku untuk metode modulasi digital. Ini juga menggunakan, secara langsung dan tidak langsung, osilasi sinusoidal sebagai pembawa. Perbedaan mendasar antara metode modulasi analog dan digital terletak pada penguncian status diskrit.

Osilasi sinusoidal dapat dimodulasi dengan memperhatikan amplitudo, fase dan frekuensi. Dengan kata lain, prosedur modulasi digital mengubah amplitudo atau fase (atau kombinasi keduanya) secara bertahap atau diskrit dalam satu atau beberapa (berdekatan) osilasi sinusoidal.

Penguncian Pergeseran Amplitudo (2-Ask)

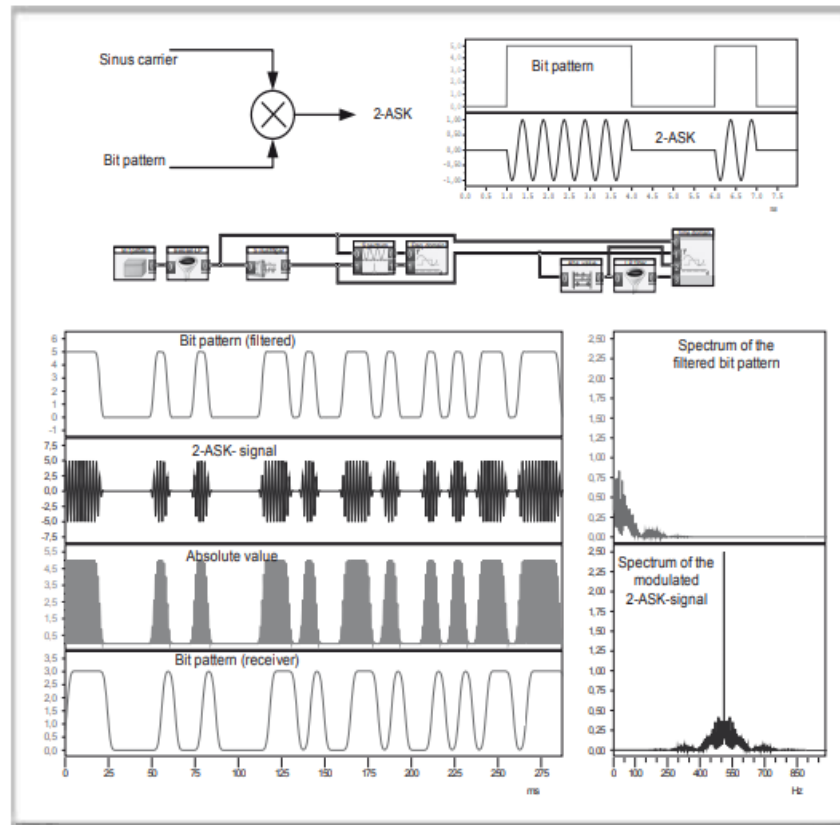
Gambar 259 menunjukkan penguncian osilasi pembawa sinusoidal melalui pola bit unipolar. Kuncinya dalam hal ini adalah perkalian dari dua sinyal dan informasinya – seperti halnya AM – di dalam amplop. Sinyal termodulasi mengambil dua status (ASK: Amplitude Shift Keying).

ASK dalam bentuk ini hampir tidak pernah digunakan saat ini. Jika frekuensi pulsa clock dan frekuensi pembawa tidak memiliki hubungan integer ada langkah-langkah sporadis yang memperlebar bandwidth. Mematikan pemancar akan memberi kesan kepada penerima tentang transmisi permanen keadaan nol. Selain itu, sinkronisasi antara pemancar dan penerima tampaknya tidak sepenuhnya tanpa masalah.

Penguncian Pergeseran Fase (2-Psk)

Untuk alasan di atas tampaknya lebih masuk akal untuk menggunakan pola bit bipolar untuk modulasi yang simetris ke nol (NRZ-Signal: No return to zero). Dalam prosedur ini pembawa sinusoidal dikalikan secara bergantian dengan nilai positif dan negatif, mis. +1 dan -1.

Ini, bagaimanapun, berarti bahwa amplitudo tidak berubah, tetapi prosedurnya adalah penguncian fase pergeseran antara 0 dan rad (PSK: Phase Shift Keying). Phase shift keying juga dapat diartikan sebagai amplitudo shift keying dimana amplitudo tidak dinyalakan atau dimatikan tetapi dibalik.



Gambar 259: Amplitudo Shift Keying 2-ASK

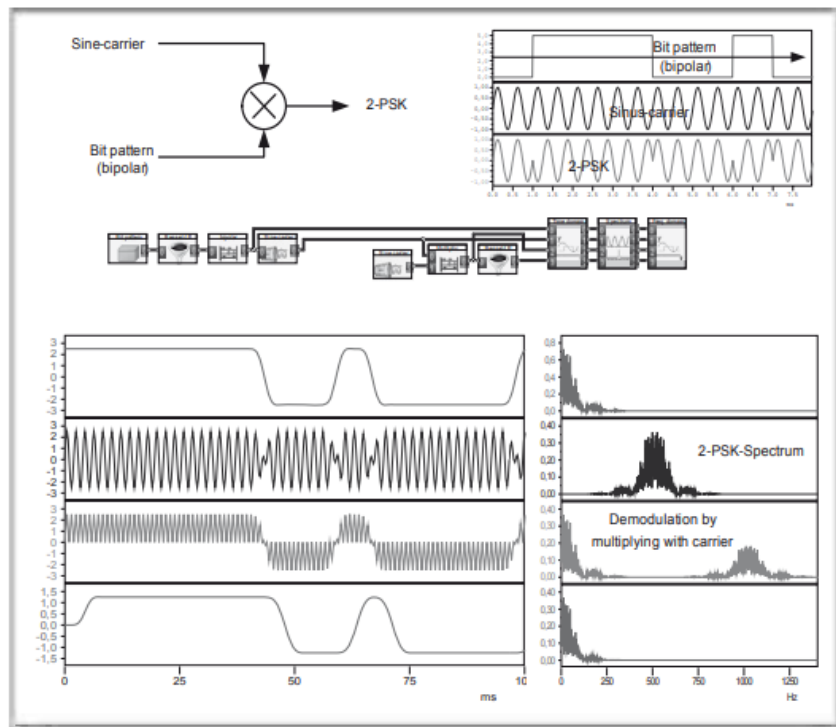
Gambar atas: Pada prinsipnya, 2-ASK tidak berbeda dari modulasi amplitudo klasik AM dalam hal sirkuit. Alih-alih sinyal kontinu, pola bit diskrit dimodulasi yang hanya memilih antara dua keadaan.

Gambar bawah: contoh ini jauh lebih realistis. Pada awalnya pola bit dibatasi pita menggunakan filter (BESSEL) yang sesuai. Sinyal tidak memiliki langkah apa pun dan tidak dapat berubah lebih cepat dari frekuensi tertinggi yang dikandungnya. Sinyal termodulasi atau "dikunci" memiliki kurva kontinu. 2-ASK adalah AM double-side-band dengan carrier (lihat kanan bawah).

Di sini demodulasi dilakukan dengan cara konvensional menggunakan rektifikasi (atau pembentukan nilai absolut) sebelum penyaringan lowpass BESSEL. Berkat linearitas fase filter, bentuk pulsa – pola bit – hampir tidak terdistorsi. Pola bit asli dapat dengan mudah direkonstruksi. Untuk tujuan ini, denyut nadi dasar dari pola biner perlu diekstraksi dari sinyal yang diterima. Komponen yang dibutuhkan adalah PLL (Phase Locked Loop, lihat Gambar 181), komparator (dengan potensi diskriminator) dan rangkaian Sample & Hold.

Sejumlah besar energi transmisi digunakan oleh pembawa yang tidak mengandung informasi apapun. Ini berarti bahwa kewajiban distorsi informasi yang dikirimkan relatif tinggi. Gambar berikut menunjukkan bahwa penguncian fase pergeseran 2-PSK adalah

metode yang lebih disukai. Namun, ini hampir tidak digunakan lagi karena penguncian pergesean fase kuadratur adalah metode yang jauh lebih efisien yang menjamin tingkat transmisi yang jauh lebih tinggi.



Gambar 260: Phase Shift Keying 2-PSK

Phase shift keying adalah hasil perkalian dari sinyal bi-polar dengan pembawa sinus. Ini secara otomatis mengarah – seperti yang dapat dilihat dengan jelas di atas – ke penguncian pergesean fase. Gambar di tengah menunjukkan rangkaian modulasi dan demodulasi untuk penguncian pergesean fasa dengan DASyLab. Urutan pola bit yang sewenang-wenang dibatasi pita oleh lowpass, diubah menjadi sinyal bipolar dan dikalikan dengan pembawa. Sinyal pra-filter dengan jelas menunjukkan langkah-langkah fase. Berbeda dengan 2-ASK, tidak ada pembawa yang dikenali dalam spektrum, energi transmisi total digunakan oleh bagian sinyal yang membawa informasi.

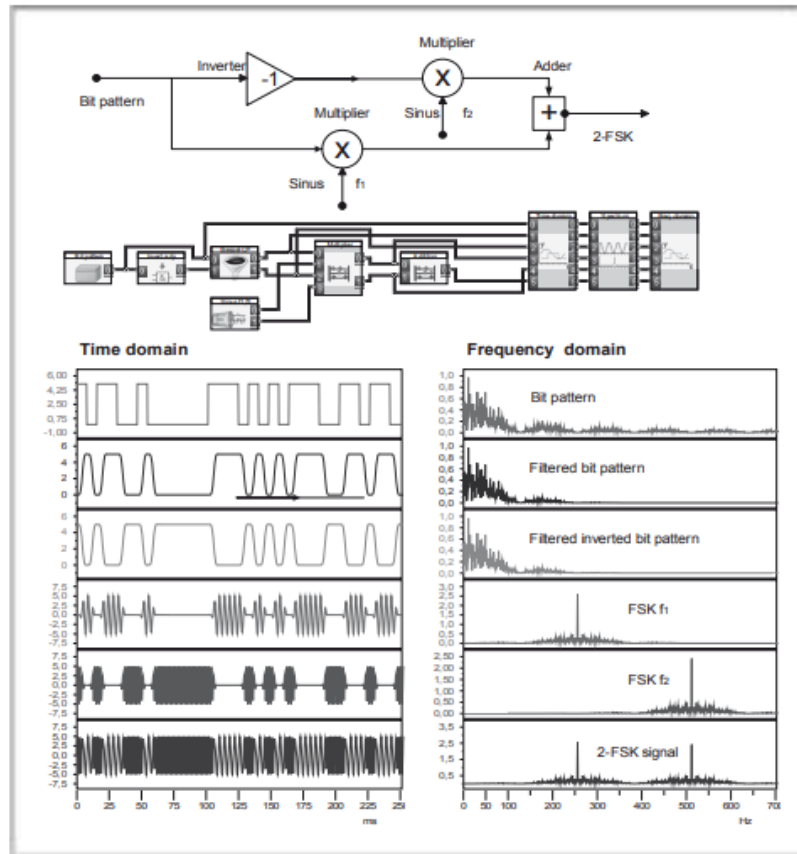
Demodulasi dilakukan dengan mengalikan sinyal yang masuk dengan pembawa sinusoidal yang dapat direkonstruksi menggunakan PLL atau loop Costa. Sinyal agregat dan diferensial – seperti halnya AM – ditunjukkan dalam spektrum. Sinyal sumber direkonstruksi dengan penyaringan lowpass.

Kunci Pergesean Frekuensi 2-FSK

2-FSK mengalokasikan dua frekuensi yang berbeda ke dua keadaan pola bit. Gambar 210 menunjukkan sinyal, diagram blok dan sistem DASyLab (2-FSK dengan dua status berbeda).

Selain itu, pola bit input dibalik. Percabangan ini berarti bahwa hanya satu sinyal pada suatu waktu yang "tinggi", sedangkan yang lainnya selalu "rendah" pada saat itu. Kedua pola bit tersebut kemudian disaring dan akhirnya dikalikan dengan frekuensi f_1 dan f_2 . Jadi

hanya satu frekuensi pada satu waktu yang – sejalan dengan pola bit – diaktifkan. Jumlahnya adalah sinyal 2-FSK.



Gambar 261: Pergeseran Frekuensi Keying (2-FSK)

Sirkuit DASyLab juga membalikkan pola bit yang masuk. Kedua sinyal – pola bit terbalik dan asli – kemudian difilter lowpass. Hanya satu dari dua sinyal yang berbeda dari nol. Perkalian setiap sinyal dengan frekuensi f_1 atau f_2 menghasilkan dua sinyal ASK dari frekuensi yang berbeda, hanya satu yang hadir pada waktu tertentu. Jumlah dari kedua sinyal adalah sinyal 2-FSK.

Domain frekuensi (bawah) menunjukkan bahwa kedua frekuensi perlu terpisah satu sama lain secara relatif lebar sehingga kedua sinyal tidak tumpang tindih. Oleh karena itu, metode ini tidak diterapkan di mana transmisi yang sangat efisien pada saluran terbatas pita ditujukan.

Ruang Sinyal

Status diskrit osilasi sinusoidal dialokasikan ke status diskrit pola bit sehubungan dengan amplitudo, fase, dan frekuensi. Kita akan melihat bahwa kombinasi dari ketiga kemungkinan umumnya digunakan dengan metode modulasi digital yang sangat efisien. Ini menghasilkan semacam APFSK (amplitude-phase-frequency-shift keying).

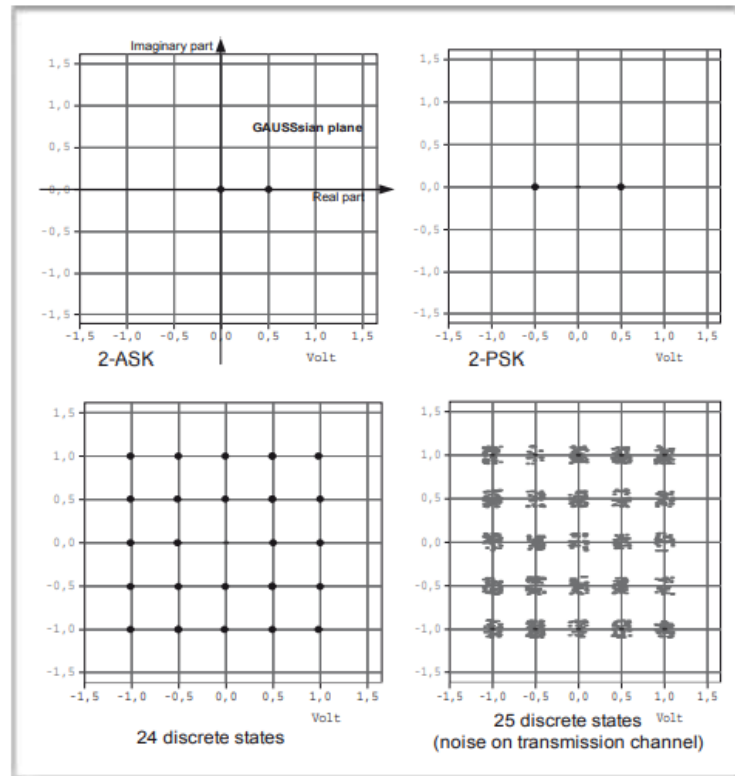
Bidang numerik GAUSS yang diperkenalkan pada Bab 5 (lihat Gambar 97 dst.) memberikan presentasi yang jelas tentang kemungkinan keadaan sinyal termodulasi digital

ini. Berbeda dengan simetri frekuensi yang disajikan dalam bab itu (setiap osilasi sinusoidal terdiri dari dua frekuensi $+f$ dan f), dalam hal ini cukup menggunakan satu vektor $+f$ saja.

Dalam ruang sinyal berbagai keadaan diskrit yang berbeda dari osilasi pembawa direpresentasikan sebagai vektor sehubungan dengan amplitudo dan fase. Namun, praktik umum untuk hanya mewakili sudut-sudut vektor. Selain itu, osilasi pembawa berbentuk cosinus biasanya dipilih sebagai pembawa atau pembawa referensi dengan modulasi 2-ASK dan 2-PSK sehingga ujung-ujungnya berada pada sumbu horizontal pada bidang numerik GAUSSian.

Pada Gambar 262 ujung 2-ASK dan 2-PSK berada pada satu garis, yaitu dari sudut pandang matematis dalam ruang satu dimensi. Jadi mengapa representasi pada bidang GAUSSI (dua dimensi) begitu penting sehubungan dengan ruang sinyal? Pertimbangkan aspek-aspek berikut:

- Tepatnya satu area dapat ditentukan di mana status (diskrit) ditempatkan di saluran terganggu agar dapat diidentifikasi dengan jelas di penerima.
- Hal ini menunjukkan keunggulan 2-PSK dimana ujung-ujungnya memiliki jarak dua kali lipat dibandingkan dengan 2-ASK (asalkan amplitudo frekuensi pembawa identik).
- Dalam saluran terganggu, ujung-ujungnya tidak akan selalu berada pada posisi yang sama seperti dalam keadaan ideal yang tidak terganggu. Jika, misalnya, salurannya berisik, ujungnya didistribusikan secara acak dalam kisaran tertentu dengan setiap prosedur (lihat Gambar 262).
- Ruang satu dimensi dapat dengan mudah diperbesar menjadi ruang dua dimensi, jika tidak hanya sudut fase 0 dan 180 derajat, tetapi sudut fase dan amplitudo lainnya juga diizinkan.
- Semakin banyak keadaan (diskrit) yang berbeda dari osilasi pembawa (frekuensi konstan) yang diizinkan, semakin baik pemanfaatan bandwidth dari transmisi yang seharusnya.
- Di sisi lain: semakin pendek jarak antara ujung yang berbeda dari ruang sinyal, semakin besar kecenderungan interferensi sinyal. Ini mungkin dapat dihindari dengan menghubungkan pengkodean saluran dan modulasi saluran.
- Pertanyaan yang paling penting sekarang adalah sejauh mana bandwidth sinyal berubah ketika jumlah keadaan diskrit (amplitudo dan fase) dari osilasi pembawa meningkat.



Gambar 262: Status Sinyal Diskrit Dan Ruang Sinyal

Bidang numerik GAUSS direpresentasikan sebagai ruang sinyal dua dimensi untuk osilasi pembawa di mana amplitudo dan fase berada dalam keadaan diskrit. 2-ASK dan 2-PSK diposisikan pada sumbu horizontal. Jelas bahwa jumlah kemungkinan keadaan sinyal diskrit harus ditingkatkan untuk membentuk ruang sinyal dua dimensi.

Hal ini dimungkinkan – seperti yang ditunjukkan pada Gambar 98 dst – dengan membagi osilasi sinusoidal yang bergeser fase menjadi bagian sinus dan kosinus. Pergeseran fase kuadratur (QPSK) adalah contoh paling sederhana – dijelaskan dalam Gambar 263 dan teks berikut.

- Hal lain yang perlu diperjelas adalah penggunaan beberapa frekuensi pembawa yang berdekatan (multiplex frekuensi) yang masing-masing memiliki sejumlah keadaan diskrit. Frekuensi yang berbeda secara teoritis membutuhkan bidang GAUSSian yang berbeda. Jika Anda mengikuti alur pemikiran ini, ruang sinyal sebenarnya adalah tiga dimensi dengan frekuensi sebagai dimensi ketiga.
- Apakah lebih baik bekerja hanya dengan satu frekuensi pembawa dan banyak status diskrit yang berbeda, atau dengan banyak frekuensi pembawa berbeda dan hanya beberapa status diskrit?
- Tetapi ada lebih banyak situasi yang bisa dibayangkan. Misalnya jaringan telepon seluler di mana semua peserta menggunakan rentang frekuensi yang sama pada waktu yang sama dengan saluran yang dipisahkan melalui pengkodean khusus. Dalam kasus seperti itu, semua saluran lain akan merasa sebagai gangguan tambahan dari saluran yang digunakan.

- Ini adalah hubungan timbal balik dari keadaan diskrit yang sama sekali berbeda (amplitudo, fase, frekuensi) dari sinyal sehubungan dengan pemanfaatan optimal bandwidth terbatas dari media transmisi. Pengkodean ditambahkan sebagai "dimensi" keempat. Ini berarti bahwa teori informasi Claude SHANNON perlu diperhitungkan sehubungan dengan masalah ini dan hanya ada dua cara untuk mendapatkan wawasan yang lebih dalam:
- Eksperimen yang bertujuan baik dengan DASYLab, selalu ingat bahwa dalam fisika sinyal serta di bidang sains lainnya, motto nya selalu adalah: hasil eksperimen yang terbukti yang dapat dijelaskan oleh fisika adalah kebenaran ilmiah. Dalam teknologi tidak ada yang mungkin bertentangan dengan hukum alam.
- Interpretasi pernyataan fundamental dari teori informasi SHANNON. Manakah dari hasil teori ini yang relevan dengan pertanyaan kita? Sejauh mana mereka berkontribusi untuk memecahkan masalah kita?

Penguncian Pergeseran Fase Kuadrat – QPSK

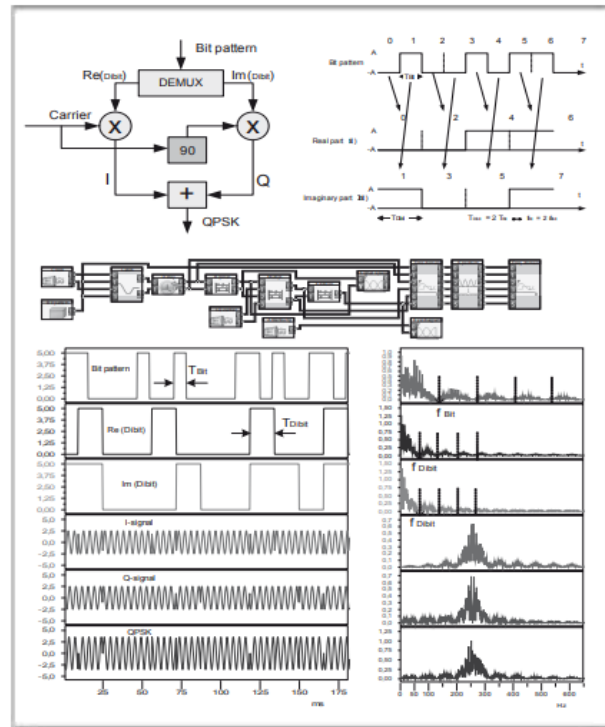
QPSK adalah langkah pertama menuju ruang sinyal dua dimensi. Tujuannya adalah menggunakan trik untuk mentransmisikan dua kali jumlah data (per unit waktu) menggunakan bandwidth yang sama.

Untuk tujuan ini urutan bit input diubah menjadi dua urutan bit dari setengah frekuensi pulsa (lihat Gambar 263, kanan atas). Dua bit serial berturut-turut dari frekuensi f_{Bit} diubah menjadi "dibit paralel" dengan frekuensi f_{Dibit} . Dalam hal ini f_{Dibit} hanya setengah dari f_{Bit} .

Tugas ini dilakukan oleh apa yang disebut demultiplexer (multiplexer menggabungkan beberapa saluran untuk membentuk satu saluran, demultiplexer membalikkan proses ini, yaitu mereka membagi satu saluran penerima menjadi beberapa saluran keluaran).

Salah satu komponen dibit ini adalah untuk menunjukkan horizontal, yang lain bagian vertikal dalam keadaan ruang sinyal. Ini berarti bahwa $2^2 = 4$ keadaan yang berbeda dimungkinkan.

Untuk hasil yang sukses (lihat Gambar 97 dst) diperlukan bagian nyata – yang terkait dengan osilasi berbentuk kosinus – dan bagian imajiner yang terkait dengan osilasi sinusoidal. Kedua bagian mengalami pergeseran fasa hanya 90 derajat.

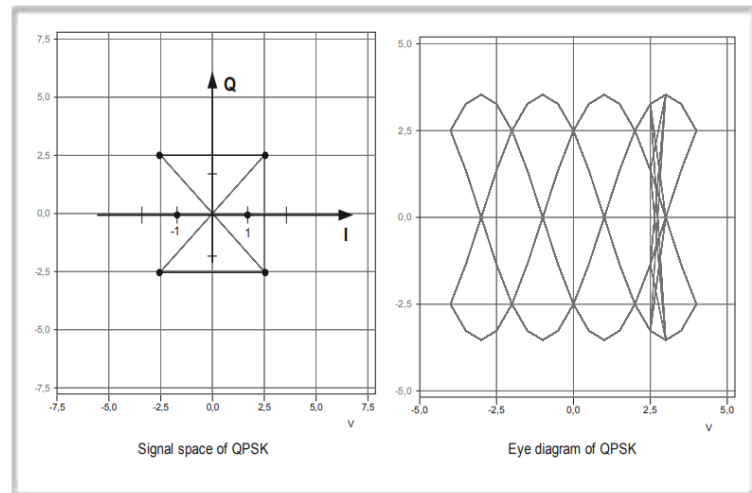


Gambar 263: Kunci Pergeseran Fase Kuadrat (QPSK)

Teks ini memberikan penjelasan rinci tentang bagaimana fungsi sirkuit QPSK. Agar dapat menampilkan semua sinyal dengan cara yang realistis, sirkuit DASYLab yang rumit harus dirancang terlebih dahulu. Sirkuit penundaan memiliki fungsi untuk mencapai sinkronisasi yang tepat dari dua saluran dibit. Urutan bit tidak disaring sehingga representasi lebih jelas.

Domain frekuensi membuktikan bahwa dua kali jumlah data per unit waktu yang ditransmisikan oleh sinyal QPSK dibandingkan dengan pola bit asli dan dibandingkan dengan 2-ASK dan 2-PSK. Gambar dengan jelas menunjukkan bahwa jarak posisi nol dari spektrum berbentuk Si dengan sinyal QPSK hanya setengah dari pola bit input di atas.

Ini menunjukkan bagaimana meningkatkan lebih lanjut jumlah data yang ditransmisikan per unit waktu: alih-alih empat status diskrit mungkin 16 (4×4), 64 (8×8) atau bahkan 256 (16×16).



Gambar 264: Ruang Sinyal Dan Diagram Mata Untuk QPSK

Di ruang sinyal di sisi kiri Anda dapat melihat empat status diskrit yang direpresentasikan sebagai titik. Garis penghubung di antara mereka menunjukkan kemungkinan transisi dari satu keadaan ke keadaan lain.

Dalam diagram mata khusus ini, pergeseran fase 90 derajat antara empat osilasi sinusoidal yang berbeda – yang sesuai dengan empat titik ruang sinyal – dapat dilihat dengan jelas.

Ini menjelaskan struktur sirkuit QPSK. Bagian nyata dan imajiner sekarang perlu ditambahkan. Harap diingat bahwa jumlah kosinus murni dan osilasi sinusoidal murni selalu menghasilkan osilasi sinusoidal yang digeser oleh sudut fase tertentu.

Dengan menambahkan dua osilasi sinusoidal yang fase – bergeser 90 derajat satu sama lain (sinus dan kosinus), osilasi sinusoidal dari setiap pergeseran fase dapat dihasilkan asalkan hubungan amplitudo terhadap satu sama lain dapat dipilih secara sewenang-wenang.

Ini berarti bahwa setiap titik pada bidang numerik GAUSSI dapat dicapai jika dua amplitudo yang relevan dipilih.

Karena saluran dibit hanya memiliki dua keadaan, A dan $-A$ (bipolar), ada empat sudut fase yang berbeda. Gambar 264 menunjukkan empat keadaan dan kemungkinan transisi dari satu keadaan ke keadaan berikutnya sebagai garis penghubung antara titik-titik.

Diagram mata tidak hanya menunjukkan empat osilasi sinusoidal yang bergeser 90 derajat terhadap satu sama lain (sesuai dengan empat titik dalam ruang sinyal), tetapi juga sudut diagonal 45 derajat.

Modulasi Amplitudo Quadrature Digital (QAM)

Pemanfaatan bandwidth telah digandakan berkat QPSK dan ini menunjukkan kemungkinan peningkatan drastis lebih lanjut dalam pemanfaatan: alih-alih empat status diskrit mungkin 16, yaitu $4 \cdot 4$ status diatur dalam kotak, $64 (= 8 \cdot 8)$ atau genap $256 (= 16 \cdot 16)$.

Bagaimana kisi-kisi seperti itu dapat dihasilkan dalam bidang numerik GAUSSI? Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 265. Diagram rangkaian skematik menunjukkan sebuah mapper yang menghasilkan dua sinyal dengan empat tingkat amplitudo yang berbeda masing-masing dari aliran bit serial yang masuk. Kotak hitam sirkuit DASYLab mengungkapkan bahwa mapper ini memiliki struktur yang agak rumit. Pertama, transduser paralel serial atau demultiplexer menghasilkan urutan pola bit 4 saluran dari aliran bit serial. Frekuensi pulsanya lebih rendah daripada aliran bit serial dengan faktor 4.

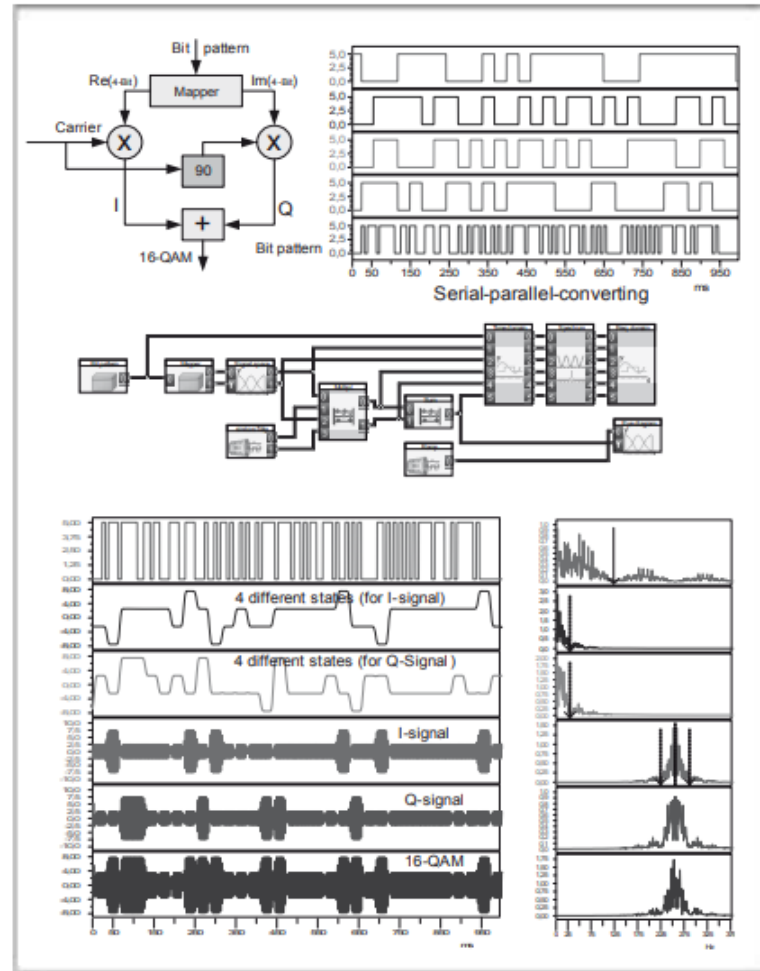
Dengan demikian, "sinyal 4-bit" ini dapat mengambil $2^4 = 16$ status berbeda secara instan. Jadi ruang sinyal yang relevan perlu terdiri dari 16 status diskrit yang berbeda. Pemeta sekarang mengalokasikan sinyal 4 langkah ke masing-masing pola 4 bit pada dua output, satu untuk sinyal I, yang lain untuk sinyal Q. Sinyal 16-QAM dengan total $4 \cdot 4 = 16$ status sinyal yang disusun dalam kisi dibuat dengan menambahkan komponen I- dan Q-.

Dari sudut pandang matematis dapat dikatakan bahwa mapper menggambarkan pola 4-bit pada 16 titik di ruang sinyal.

Hasil yang paling penting adalah dalam domain frekuensi. Bandwidth berkurang dengan faktor 4 seperti yang ditunjukkan dengan membandingkan jarak nol dari spektrum berbentuk Si dengan aliran bit serial dan sinyal 16-QAM.

Gambar 266 menunjukkan ruang sinyal, diagram mata, dan detail sinyal untuk dapat memeriksa keteraturan:

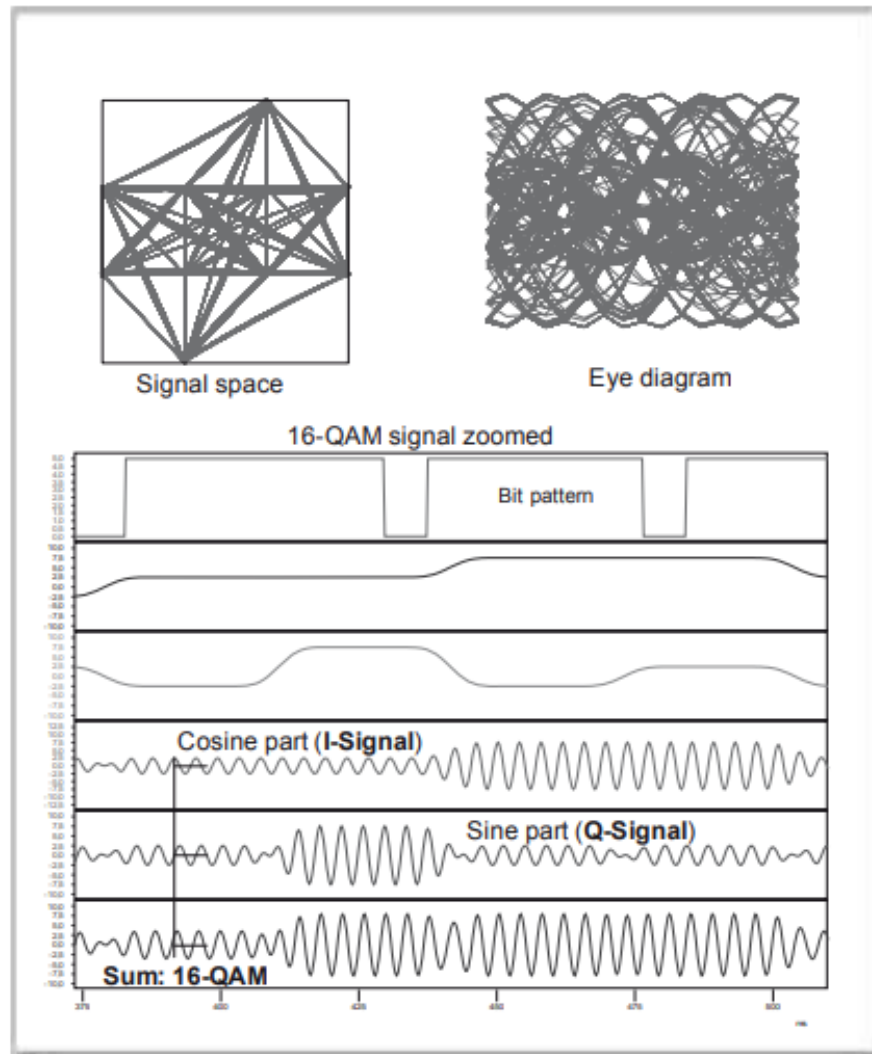
- Ruang sinyal menunjukkan 16 (total ada 16) status sinyal berbeda yang diambil dalam waktu singkat. Selain itu, ini menunjukkan transisi ke negara lain mana yang terjadi.
- Diagram mata sangat kompleks karena banyaknya kemungkinan status sinyal. Diagram yang ditampilkan di sini berbeda dari diagram mata konvensional dalam teknologi pensinyalan di mana osilasi segitiga berkala dengan tanjakan naik dan turun digunakan sebagai pengganti gigi gergaji periodik dengan tanjakan naik. Berbeda dengan osiloskop, backshift dari gigi gergaji tidak dapat ditekan. Inilah sebabnya mengapa simetri diagram mata sedikit berbeda.
- Detail sinyal memungkinkan pemeriksaan yang lebih baik dari hubungan antara sinyal I, sinyal Q dan sinyal 16-QAM. Garis vertikal menunjukkan dengan sangat jelas bahwa penjumlahan sinus dan cosinus dapat menghasilkan sinyal sinusoidal dengan posisi fasa dan amplitudo yang berbeda.



Gambar 265: 16-QAM: Konversi Paralel Serial, Mapper, Pembentukan Sinyal

Blok diagram kiri atas menunjukkan set up dasar yang telah dimodelkan serealistis mungkin menggunakan DASYLab. Yang disebut mapper, yang menggambarkan aliran bit yang masuk pada 16 titik grid di ruang sinyal, telah direpresentasikan sebagai kotak hitam agar representasi tidak terlalu membingungkan. Kotak hitam ini berisi demultiplexer dengan 4 saluran keluaran. Sinyal dengan lebar 4 bit dihasilkan dari aliran bit serial melalui konversi paralel serial.

Seketika, sinyal dengan lebar 4 bit memiliki $2^4 = 16$ kemungkinan status sinyal yang dapat ditemukan di ruang sinyal. Pemeta menggunakan aturan matematika ("Gambar") untuk menghasilkan 2 sinyal 4 langkah bipolar untuk defleksi X dan Y dalam ruang sinyal dari sinyal ini dengan lebar 4 bit.

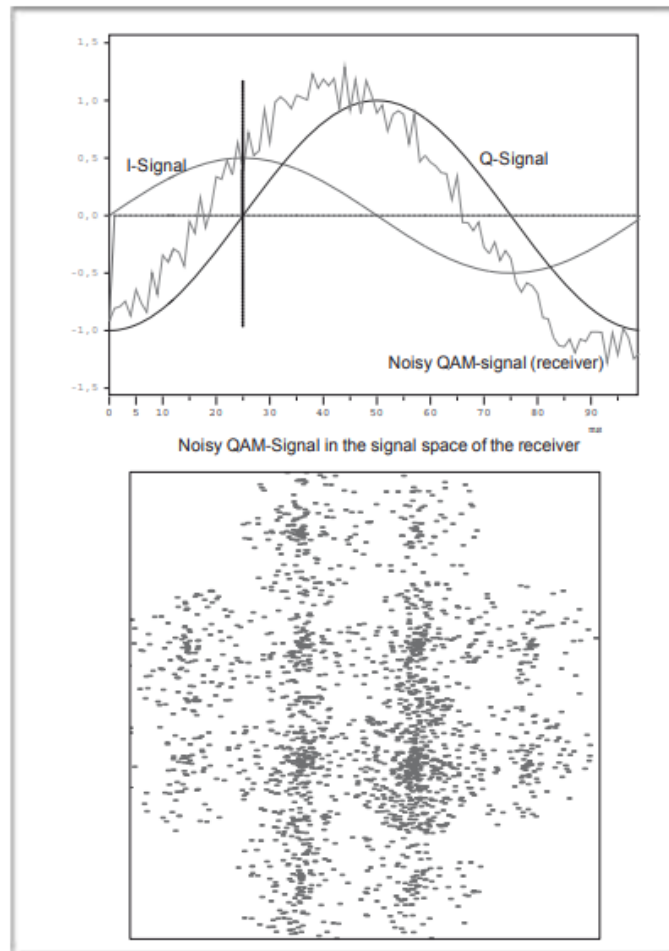


Gambar 266: 16-QAM: Ruang Sinyal, Diagram Mata, Dan Detail Sinyal

Ruang sinyal menunjukkan 10 (ada total 16) status sinyal yang diambil dalam waktu singkat. Selain itu, ini menunjukkan transisi ke status sinyal lain yang terjadi.

Diagram mata sangat kompleks karena banyaknya status sinyal. Penafsiran hanya dimungkinkan dalam konteks Gambar lainnya.

Detail sinyal memungkinkan pemeriksaan yang lebih baik dari hubungan antara sinyal I, sinyal Q dan sinyal 16-QAM. Garis vertikal menunjukkan dengan sangat jelas bahwa jumlah sinus dan cosinus menghasilkan sinyal sinusoidal dengan posisi fasa dan amplitudo yang berbeda.



Gambar 267: Keandalan Penerimaan Sinyal QAM

Simulasi menunjukkan detail dari sinyal yang diterima 25-QAM yang bising. Ruang sinyal menunjukkan koridor bebas antara 25 rentang. Ini berarti bahwa sinyal dapat sepenuhnya direkonstruksi.

Akses Ganda

Anda telah terbiasa dengan pelajaran pertama teori informasi SHANON sehubungan dengan pernyataan tentang pengkodean sumber dan pengkodean saluran. Mereka dapat diringkas sebagai berikut:

Pelajaran 1:

Jangan pernah memotong informasi sinyal dengan tergesa-gesa sebelum semua keputusan mengenai pemrosesan sinyal lebih lanjut telah diambil.

Pelajaran 2:

Pengkodean sumber (yang memampatkan sinyal dengan menghilangkan redundansi) harus benar-benar dipisahkan dari pengkodean saluran (yang membuat transmisi melalui saluran bising lebih dapat diandalkan dengan penambahan redundansi yang ditargetkan).

Para ilmuwan masih berurusan dengan Pelajaran 2. Masih ada penelitian yang kompleks di bidang ini dengan tujuan mencapai batas laju transmisi – kapasitas saluran C – yang didefinisikan oleh teori SHANNON.

Tapi ada pelajaran ketiga yang semakin penting dan belum sepenuhnya dipahami dan konsekuensinya masih harus dinilai sepenuhnya. Dan meskipun teori itu diterbitkan lebih dari 50 tahun yang lalu, para ahli masih berselisih. Pelajaran ini memiliki implikasi ekonomi yang sangat besar dan investasi sebesar ratusan miliar dolar bergantung padanya. Secara abstrak teori ini dapat dikemukakan sebagai berikut:

Pelajaran 3:

Jika saluran terganggu oleh gangguan, tindakan perlindungan dapat dioptimalkan bahkan jika gangguan datang dalam bentuk terburuknya, yaitu sebagai derau "GAUSSian" putih (pita lebar)!

Sebelum saya mulai menjelaskan teknik modulasi terbaru, saya ingin menjelaskan apa yang tersirat dari pelajaran ini sehubungan dengan penggunaan praktis dan konkret.

Bisnis yang paling menguntungkan dengan masa depan yang sangat menjanjikan adalah menyediakan teknologi untuk komunikasi di seluruh dunia yang sesempurna, seefisien dan seekonomis mungkin. Setiap keputusan untuk atau menentang teknologi transmisi tertentu dapat berarti kemenangan atau kekalahan. Saya berbicara tentang Akses Ganda ke media transmisi.

Sekilas, teknologi tradisional multipleks pembagian frekuensi dan multipleks pembagian waktu tampak relatif tidak bermasalah. Multipleks pembagian frekuensi telah disajikan secara mendalam di Bab 8 dan disajikan dalam beberapa Gambar (misalnya Gambar 165). Teknologi ini masih digunakan dalam kabel berpelindung dan dalam relai radio, penyiaran dan televisi.

Multipleks pembagian frekuensi berarti bahwa semua saluran ditransmisikan dengan frekuensi terhuyung-huyung dan secara bersamaan.

Anda semua tahu kekurangan dari metode ini. Selama media transmisi adalah kabel (terlindung), pandu gelombang optik atau tautan relai radio, masalahnya kurang lebih terkendali. Penerimaan FM di dalam mobil, bagaimanapun, menunjukkan bahwa karena beberapa pantulan sinyal transmisi pada rintangan seperti lampu lalu lintas, interferensi dapat muncul yang dapat memadamkan keseluruhan sinyal secara lokal. Ketika pengemudi bergerak beberapa meter, sinyal sering muncul kembali. Sinyal transmisi menyebabkan gangguan pada dirinya sendiri ketika di tempat penerimaan pergeseran fasa antara pembawa sinyal transmisi langsung dan sinyal transmisi yang dipantulkan adalah 180 derajat atau rad.

Untuk alasan simetri – frekuensi dan waktu dapat dipertukarkan – metode multipleks pembagian waktu juga harus dimungkinkan:

Multipleks pembagian waktu berarti bahwa semua saluran ditransmisikan secara terhuyung-huyung dalam waktu dan dalam rentang frekuensi yang sama.

Time-division multiple access (TDMA) adalah teknologi transmisi digital penuh pertama. Rencananya ditunjukkan pada Gambar 268 Metode ini juga sangat rawan interferensi (misalnya disebabkan oleh beberapa pantulan di telepon seluler) kecuali jika tindakan perlindungan khusus diambil.

Masalah interferensi ini tentu saja terbesar dengan komunikasi seluler, nirkabel, seluler (telepon seluler). Dalam kasus terburuk, beberapa efek berikut dapat terjadi:

- Beberapa gangguan ketika banyak pengguna mengakses sistem secara bersamaan.
- Interferensi ganda yang disebabkan oleh penerimaan multipath ketika rintangan menyebabkan beberapa pantulan.
- Interferensi ganda yang disebabkan oleh beberapa sel yang berdekatan yang mengirim dan menerima dalam pita frekuensi yang sama (jaringan telepon seluler).

Saluran transmisi sejauh ini dianggap sebagai "satu dimensi", tetapi di sini pengaruh ruang dan pengaruh pergerakan antara penerima dan pemancar dipertimbangkan.

Mari kita kembali ke Pelajaran ke-3 HANNON. Dikatakan bahwa segala jenis gangguan – mis. yang disebabkan oleh beberapa akses – dapat dikontrol jika berperilaku seperti derau putih (GAUSSian). Strategi kontrol yang mungkin sebagian dapat disimpulkan dari hukum SHANON tentang kapasitas saluran C:

$$C = W \log_2 (1 + S/N)$$

Huruf-huruf itu melambangkan:

C := kapasitas saluran dalam bit/s

W := bandwidth sinyal

S := tingkat sinyal

N := tingkat kebisingan

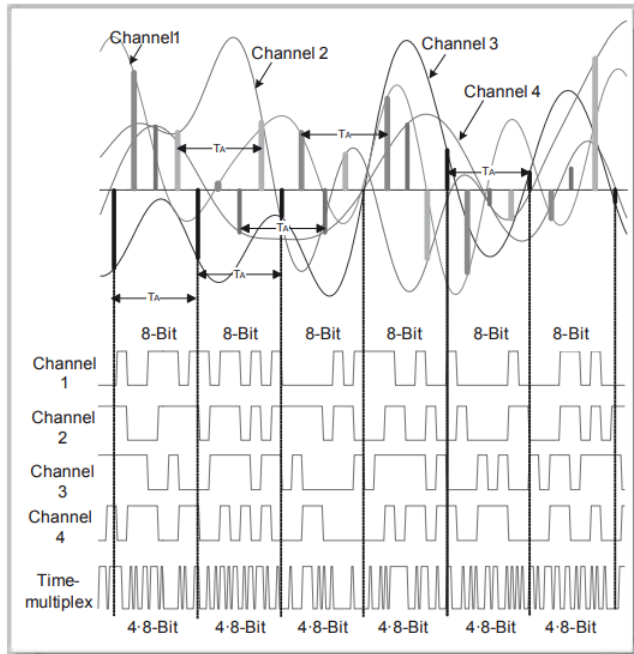
Bagi yang menganggap logaritma terlalu rumit, ada cara lain untuk menyajikan hukum di atas (fungsi logaritma adalah fungsi eksponensial):

$$1 + S/N = 2^{C/W} \quad \text{or} \quad S/N = 2^{C/W} - 1$$

Contoh:

mari kita asumsikan bahwa tingkat kebisingan N sama dengan tingkat sinyal S, yaitu sinyal hampir menghilang dalam kebisingan.

Dalam hal ini yang berikut ini benar: $S/N = 1$ atau $1 = 2^{C/W} - 1$ atau $2 = 2^{C/W}$ dan oleh karena itu $C = W$.



Gambar 268: Proses Multipleks Pembagian Waktu

Dalam hal ini digitalisasi sinyal analog terdiri dari empat fase yang diwakili oleh empat sinyal analog: pemindaian, kuantisasi, pengkodean, dan multiplexing pembagian waktu.

Keempat saluran (paralel) semuanya dipindai pada kecepatan pemindaian yang sama (misalnya, $f_A = 8 \text{ kHz}$ atau $T_A = 125 \text{ s}$). Namun, ini dilakukan dengan pergeseran fase masing-masing 90 derajat atau pergeseran waktu oleh $T_A/4$. Ini menghasilkan kecepatan pemindaian total $4 \cdot 8 \text{ kHz} = 32 \text{ kHz}$ untuk empat saluran.

Kuantisasi dan pengkodean dilakukan dalam satu tahap. Hasilnya tersedia dalam bentuk empat sinyal digital – yaitu waktu dan nilai diskrit – yang dalam hal ini memiliki lebar 8 bit. Tingkat pulsa dasar setiap sinyal digital individu adalah 32 kHz.

Multiplexing pembagian waktu adalah konversi serial-paralel di mana laju transmisi 32 kbit/s menjadi empat kali lipat dan meningkat menjadi 128 kbit/s.

Penerima melakukan prosedur ini dalam urutan terbalik: pertama, demultiplexing, yaitu konversi serial-paralel dan kemudian konversi D/A.

Dalam telekomunikasi setidaknya 30 saluran yang berbeda digabungkan menggunakan multiplexing pembagian waktu (PCM 30). Mirip dengan pembagian frekuensi multiplexing, beberapa kelompok kecil dapat digabungkan untuk membentuk unit yang lebih besar (misalnya PCM 120 dll).

Hasil: batas teoritis untuk laju transmisi C sama dengan bandwidth yang disediakan sinyal dan tingkat kebisingan yang identik; misalnya pada $W = 1 \text{ MHz}$ hasilnya adalah $C = 1 \text{ Mbit/s}$.

Ini menghasilkan kemungkinan berikut:

- Pada prinsipnya, dimungkinkan untuk menghilangkan sinyal sepenuhnya dalam noise. Ini sudah menarik perhatian angkatan bersenjata. Sinyal yang hilang dalam kebisingan hampir tidak dapat disadap atau ditemukan. Prasyaratnya, bagaimanapun, adalah "pengkodean acak semu" yang berarti bahwa sinyal tidak hanya harus broadband tetapi juga harus muncul secara acak.
- Jika semua sinyal adalah pita lebar dan acak semu sehubungan dengan akses ganda, semua pengguna dapat mengakses rentang frekuensi yang sama pada waktu yang sama – asalkan prosedur yang benar digunakan.

Di sinilah, di samping domain waktu dan frekuensi, pengkodean masuk. Hampir tidak ada yang tahu bahwa itu adalah kriptografi, yaitu kode yang tidak dapat didekodekan oleh orang yang tidak berwenang, yang membawa Claude SHANNON ke wawasannya. Kode yang tidak dapat diuraikan atau sinyal yang dikodekan tidak menunjukkan keteraturan atau "kecenderungan ke arah pelestarian" yang dapat digunakan. Dari sudut pandang fisik, itu hanyalah semacam kebisingan.

Pelajaran ke-3 SHANNON menunjukkan cara mengatasi masalah akses ganda dan interferensi timbal balik dengan kombinasi bandwidth sinyal, durasi waktu dan pengkodean.

Gambar 269 menunjukkan dimensi baru pengkodean (multipleks kode atau CDMA akses ganda pembagian kode) dibandingkan dengan TDMA akses ganda pembagian waktu dan FDMA akses ganda pembagian frekuensi dalam cara yang sangat grafis.

CDMA saat ini dianggap sebagai solusi paling cerdas, efisien dan komprehensif untuk sebagian besar akses bebas gangguan dalam semua variasinya.

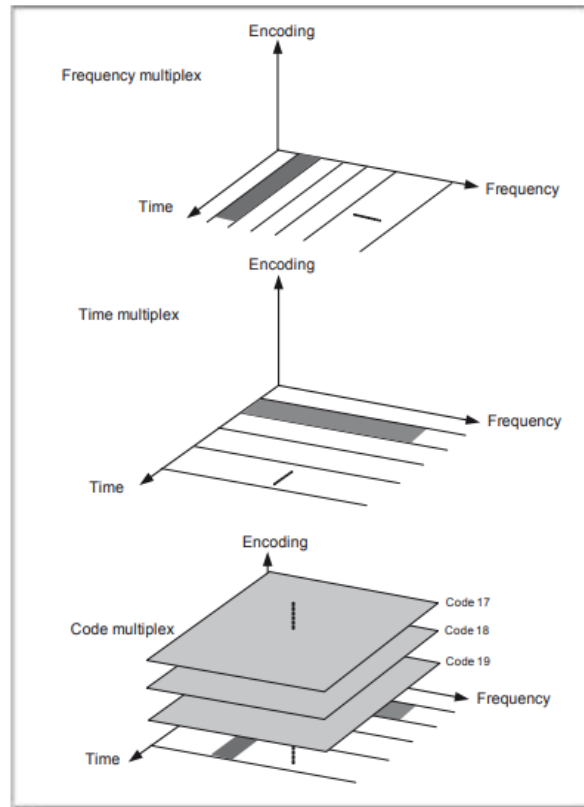
CDMA memfasilitasi beberapa akses simultan dalam rentang frekuensi yang sama. Koneksi individu ditandai dengan cara pengkodean.

Sistem transmisi digital modern, dan mungkin semua sistem masa depan, akan menggunakan ketiga "dimensi" menggunakan CDMA. Saya ingin menambahkan bahwa tidak hanya ada satu prosedur CDMA yang mungkin, seperti halnya tidak ada yang namanya hanya satu urutan acak.

CDMA dapat menggabungkan FDMA dan TDMA secara bersamaan. Beberapa kombinasi berbeda bisa dibayangkan. Pengkodean saluran juga dapat digabungkan dengan cara yang optimal (modulasi berkode).

Multitone Diskrit

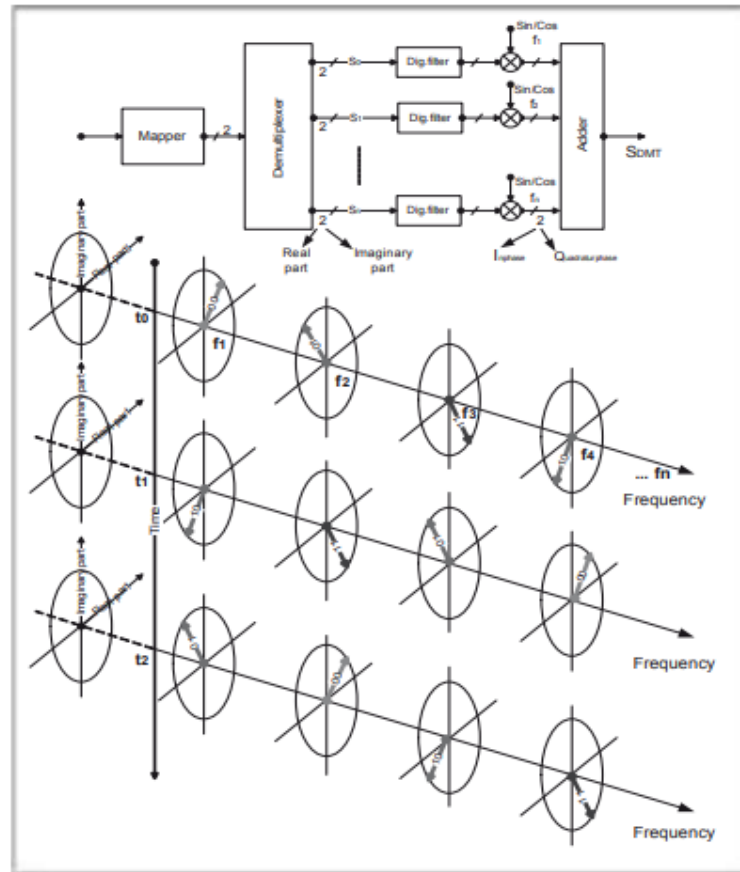
Discrete Multitone (DMT) memfasilitasi transmisi sejumlah besar data dalam media transmisi kritis. Pita frekuensi dibagi menjadi banyak sub-pita yang berjarak sama dalam bentuk sisir. Setiap sub-band memiliki pembawa yang dapat dimodulasi secara individual menggunakan QPSK atau QAM bertingkat.



Gambar 269: Akses Ganda Frekuensi, Waktu, dan Divisi Kode (FDMA, TDMA, dan CDMA)

Time-Division Multiple Access: semua saluran berdasarkan waktu dan ditransmisikan dalam pita frekuensi yang sama. Frekuensi-Divisi Multiple Access: semua saluran frekuensi dinilai dan ditransmisikan secara bersamaan.

Code-Division Multiple Access: CDMA memfasilitasi beberapa akses secara bersamaan dan dalam pita frekuensi yang sama. Penspasian saluran dilakukan dengan menggunakan kode.



Gambar 270: 4-PSK-DMT Sebagai Contoh Sistem Pembawa Ganda Diskrit

Diagram blok di atas menunjukkan mapper (yang dalam hal ini sangat mudah) yang "memparalelkan" dua bit berturut-turut dari aliran bit yang masuk (bagian nyata dan imajiner). Ini menghubungkan dua bit dengan dua kali panjang simbolis dengan dua sirkuit (bagian nyata dan imajiner). Demultiplexer kemudian mendistribusikan bit-bit ini ke, misalnya, 1000 saluran dengan masing-masing dua sirkuit, yang menambah panjang simbolik dengan faktor 1000. Bit-bit ini perlu disangga oleh demultiplexer dan dikeluarkan secara sinkron sehingga mereka sinkron waktu. Kemudian bagian real dikalikan dengan cosinus dan bagian imajiner dengan osilasi sinusoidal dengan frekuensi f_k ($0 < k < 1000$) per kanal. Semua sinyal ditambahkan di penambah; sDMT terdiri dari 1000 frekuensi dengan amplitudo yang sama yang dapat mengambil hanya empat posisi fase: 45, 135, 225 dan 315 derajat (4-PSK).

Bagian bawah Gambar menunjukkan posisi fase sesaat dari empat dari 1000 frekuensi pembawa ini pada tiga titik waktu yang berurutan. Sumbu vertikal adalah sumbu waktu, sumbu horizontal adalah sumbu frekuensi.

Catatan:

Media transmisi kritis adalah saluran yang mendistorsi linier, yaitu media menyebabkan perubahan dalam spektrum amplitudo dan fase sinyal. Alasan fisik adalah penyerapan yang bergantung pada frekuensi, dispersi (osilasi sinusoidal dari frekuensi yang berbeda merambat pada kecepatan yang berbeda), dan propagasi multipath yang

disebabkan oleh refleksi pada rintangan. Yang terakhir secara tidak langsung memiliki efek yang sama.

Prosedur DMT digunakan dalam:

- Teknologi modem pita suara (300 – 3400 Hz)
- Transmisi digital cepat melalui pasangan kawat logam. Contohnya adalah HDSL (High Speed Digital Subscriber Line) dan ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line).
- Transmisi radio melalui saluran dengan propagasi multipath (komunikasi seluler atau telepon seluler) termasuk DAB (Siaran Audio Digital).

DMT mentransmisikan PSK dan QAM bertingkat menggunakan banyak frekuensi pembawa yang berjarak sama. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 270. Ini menyajikan sistem DMT untuk kasus yang sangat mudah (4-PSK). Pemeta yang sangat sederhana mendistribusikan aliran bit pada dua saluran (konversi paralel serial). Satu saluran mewakili bagian nyata, yang lain bagian imajiner. Efeknya adalah panjang simbolik (durasi bit) berlipat ganda.

Pada prinsipnya, inilah yang dilakukan oleh demultiplexer. Ini melakukan konversi paralel serial dengan membagi dua saluran input menjadi, misalnya, 1000 saluran paralel. Jadi durasi simbolis juga ditambah dengan faktor 1000. Prasyaratnya adalah bahwa sinyal keluaran 2 kali 1000 adalah sinkron. Oleh karena itu demultiplexer perlu menyangga 2 kali 1000 saluran dan mengeluarkannya secara bersamaan. Selain itu, sinyal keluaran harus bipolar.

Setelah pra-penyaringan untuk mengurangi bandwidth dari urutan persegi panjang setiap pola bit real-part dikalikan dengan pembawa berbentuk cosinus, dan pola bit imajiner dengan pembawa sinusoidal dari frekuensi tertentu f_k ($0 < k < 1001$). Situasinya cukup sederhana karena dengan PSK amplitudo semua osilasi pembawa selalu sama.

Kosinus dan bagian sinus dari satu osilasi pembawa ditambahkan – tergantung pada pola 2-bit

– untuk membentuk osilasi pembawa dengan pergeseran fasa 45, 135, 225 dan 315 derajat. Sinyal keluaran sDMT dari penambah berisi total 1000 frekuensi pembawa yang fasenya berubah sejalan dengan laju durasi simbolis antara keempat nilai ini. Ini ditunjukkan pada Gambar 270, bawah.

Proses ini perlu dibalik di penerima dengan "memproyeksikan" sinyal yang diterima ke dalam ruang sinyal (tiga dimensi). Gambar 267 menunjukkan bahwa rentang tertentu yang mengelilingi titik sinyal dari sinyal yang tidak terdistorsi tidak boleh dilampaui. Tetapi kesalahan masih dapat diidentifikasi melalui pengkodean saluran yang efektif asalkan tidak terlalu sering terjadi.

Kompleksitas sistem DMT tampaknya sulit dibayangkan. 1000 frekuensi pembawa dan lebih banyak lagi, pengganda, pra-filter, demultiplexer yang sangat kompleks, dll. Namun, kita cenderung berpikir dalam kerangka sistem analog. Jika sistem analog seperti itu dibangun di masa pra-digital, itu akan memenuhi beberapa ruangan. Kata ajaibnya, bagaimanapun, adalah DSP (Digital Signal Processing) yang memungkinkan sistem yang begitu kompleks. Prasyarat untuk sistem seperti itu di atas semua daya komputasi karena sistem DMT sebagian besar merupakan program, yaitu virtual. Pemrosesan real-time dari

sejumlah besar sinyal dalam sistem DMT membuat tuntutan yang sangat tinggi pada prosesor. Baru-baru ini chip telah diproduksi yang mengambil aliran bit pada input dan mengeluarkan sinyal pita dasar DMT langsung pada output. Ini berarti bahwa mereka berisi semua proses yang telah dijelaskan di atas, termasuk pengkodean saluran.

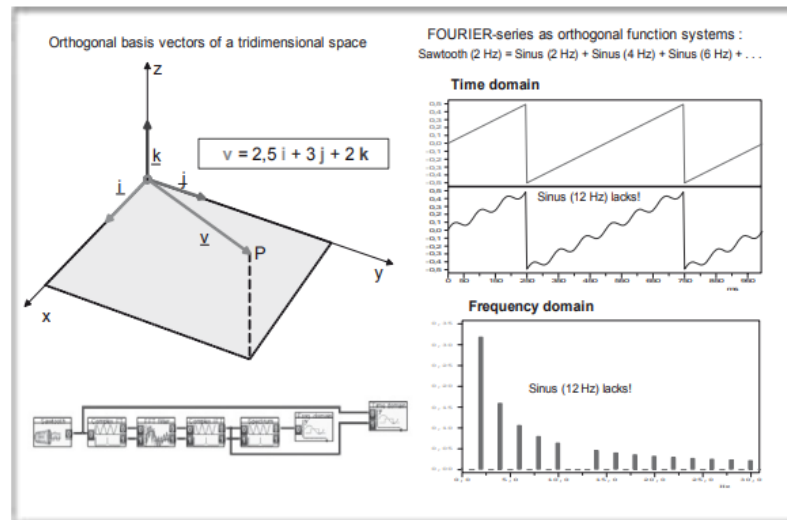
Pita dasar dapat digeser ke dalam rentang frekuensi apa pun melalui satu pembawa frekuensi tunggal. Ini dilakukan dengan menggunakan teknologi analog.

Alternatif mana untuk sistem DMT broadband yang ada di sepanjang Pelajaran 3 SHANNON? Bukankah lebih mudah jika misalnya aliran bit input langsung dimodulasi oleh satu pembawa tunggal melalui QAM?

Para ahli telah lama berselisih, tetapi sekarang mereka tampaknya telah mencapai kesepakatan. Modulasi CAP (Carrierless Amplitude/Phase) adalah bentuk multi-level khusus dari QAM di mana banyak keadaan berbeda dari ruang sinyal dialokasikan ke satu osilasi pembawa tunggal melalui amplitudo diskrit dan pergeseran fasa. 16-QAM pada Gambar 265 juga menunjukkan prinsip di balik CAP.

Perbedaan antara DMT dan CAP menunjukkan perbedaan halus sehubungan dengan Pelajaran ke-3 SHANNON:

- DMT lebih banyak beroperasi di domain frekuensi, CAP lebih banyak di domain waktu. Teknologi QAM/CAP beroperasi dengan simbol rate yang relatif tinggi. Setiap simbol memiliki durasi yang singkat dan oleh karena itu memiliki pita frekuensi yang lebih lebar. DMT memiliki durasi simbol yang jauh lebih lama dan sejumlah besar pita frekuensi yang lebih sempit.
- Oleh karena itu, DMT jauh lebih rentan terhadap penerimaan multipath sehubungan dengan telepon seluler atau DAB penyiaran digital. Selama banyak pantulan yang disebabkan oleh rintangan tiba selama durasi simbol, sinyal transmisi dapat direkonstruksi.
- DMT dapat disesuaikan jauh lebih fleksibel dengan sifat fisik saluran (misalnya kabel). Dalam rentang frekuensi dengan redaman dan/atau interferensi tinggi, frekuensi pembawa dalam rentang ini dapat dimodulasi PSK pada level rendah. Akibatnya jarak antara titik-titik dalam ruang sinyal menjadi lebih besar yang berarti kekebalan kebisingan meningkat dan kemungkinan kesalahan bit berkurang. Dengan demikian DMT dapat jauh lebih baik disesuaikan dengan kapasitas saluran yang bergantung pada interferensi.
- Sampai saat ini konsep QAM/CAP memiliki keunggulan sebagai prinsip yang lebih lurus dan dengan demikian dapat direalisasikan dengan lebih mudah dari sudut pandang teknis. Hal ini tidak lagi terjadi. Sebaliknya: DMT telah menjadi standar yang diterima dan chip oleh banyak produsen sekarang tersedia. CAP, sebaliknya, tidak terstandarisasi dan tidak ada chip yang tersedia karena DMT telah mempelajari Pelajaran ke-3 SHANNON dengan cara yang lebih cerdas.



Gambar 271: Ortogonalitas

Bagaimana titik P di ruang angkasa dapat dicapai? Cukup mudah dengan mengikuti petunjuk berikut: lakukan 2,5 langkah standar (panjang 1) dalam arah x ($2.5i$) ditambah 3 langkah standar dalam arah y ($3j$) ditambah 2 langkah standar dalam arah z ($2k$). Jadi vektor yang menuju ke P dapat didefinisikan sebagai $v = 2.5i + 3j + 2k$. Vektor digarisbawahi dan dicetak tebal. Mereka mewakili nilai numerik yang menunjukkan arah.

i , j , dan k bebas linier karena berada dalam posisi vertikal, yaitu ortogonal satu sama lain. Ini berarti: Titik P tidak akan pernah tercapai tanpa salah satu dari tiga vektor standar i , j dan k . Persamaan $v = 2.5i + 3j + 2(i + j)$ akan salah. i , j dan k sangat diperlukan jika Anda ingin mengatur ruang tiga dimensi, yaitu jika Anda ingin dapat mencapai titik mana pun di ruang ini.

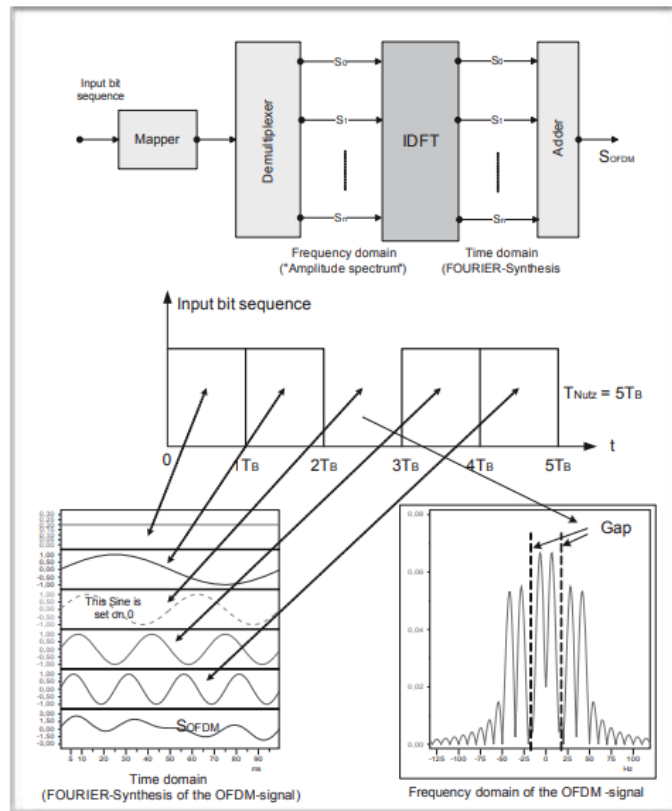
Sistem fungsi ortogonal: gigi gergaji periodik 2 Hz berisi, seperti yang kita ketahui, semua kelipatan bilangan bulat dari frekuensi 2Hz, yaitu osilasi sinusoidal dari 2,4,6, ... Hz hingga frekuensi "tinggi tak terhingga".

Jumlah frekuensi diskrit yang tak terbatas ini membentuk - dalam pengertian yang disebutkan di atas - sebuah "ruang vektor dengan jumlah dimensi yang tak terbatas". Alasannya adalah: jika hanya salah satu dari frekuensi ini yang hilang – pada Gambar di atas adalah osilasi sinusoidal 12 Hz – osilasi gigi gergaji tidak dapat direkonstruksi sebagai osilasi sinusoidal. Dalam pengertian itu masing-masing osilasi yang tak terhitung banyaknya ini sangat diperlukan dan totalnya merupakan jumlah osilasi minimum yang diperlukan untuk membentuk gigi gergaji. Dalam istilah matematika ini berarti: semua osilasi sinusoidal ini memiliki hubungan "ortogonal" satu sama lain.

Orthogonal Frequency division Multiplex (OFDM)

DAB standar penyiaran digital Eropa yang baru beroperasi menggunakan prosedur DMT khusus: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). "Ortogonal" berarti "berada dalam posisi vertikal ke..." dan merupakan istilah dasar dalam matematika, khususnya matematika ruang vektor. Gambar 271 menunjukkan hubungan antara ortogonalitas dan teknologi modulasi.

Frekuensi pembawa yang digunakan dalam OFDM selalu merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar.

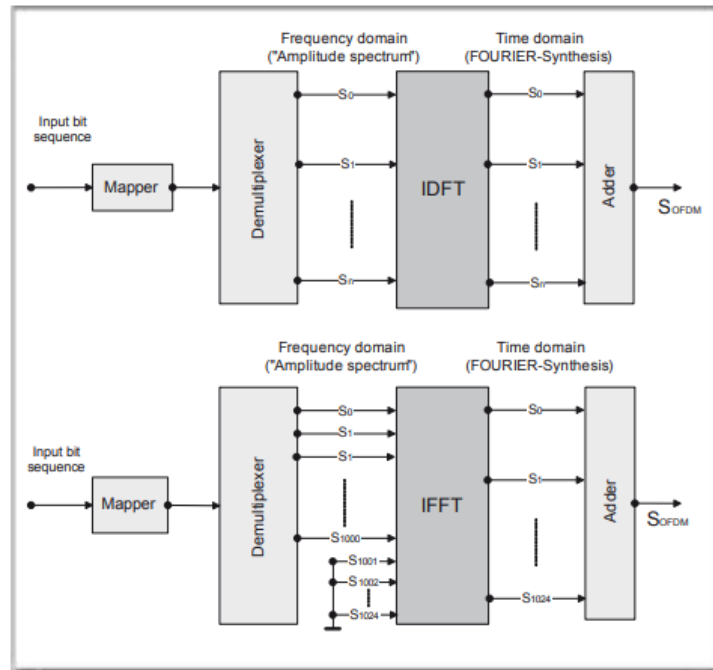


Gambar 272: Diagram Blok Dan Representasi OFDM Yang Disederhanakan

Pada Gambar 270 terdapat sejumlah osilasi sinusoidal pada masukan penambah. Jika mereka adalah kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar, jumlah mereka dapat didefinisikan sebagai sintesis FOURIER. Sintesis FOURIER adalah, bagaimanapun, hasil dari transformasi FOURIER Terbalik IFT (lihat Gambar 95) atau dalam kasus ini dari IDFT (Transformasi FOURIER Diskrit Terbalik). Akibatnya, pola bit pada output demultiplexer dapat didefinisikan sebagai spektrum diskrit (bagian nyata dan imajiner) yang ditransformasikan melalui IDFT oleh sintesis FOURIER menjadi sinyal DMT dalam domain waktu.

Alih-alih banyak pengganda dan osilator dalam Gambar 270, blok IDFT digunakan dalam sistem OFDM. Setiap bit pada banyak input dari blok IDFT memiliki frekuensi diskrit dengan amplitudo diskrit dan posisi fasa pada output.

Tepatnya, setiap input/output terdiri dari 2 baris (bagian nyata dan imajiner).



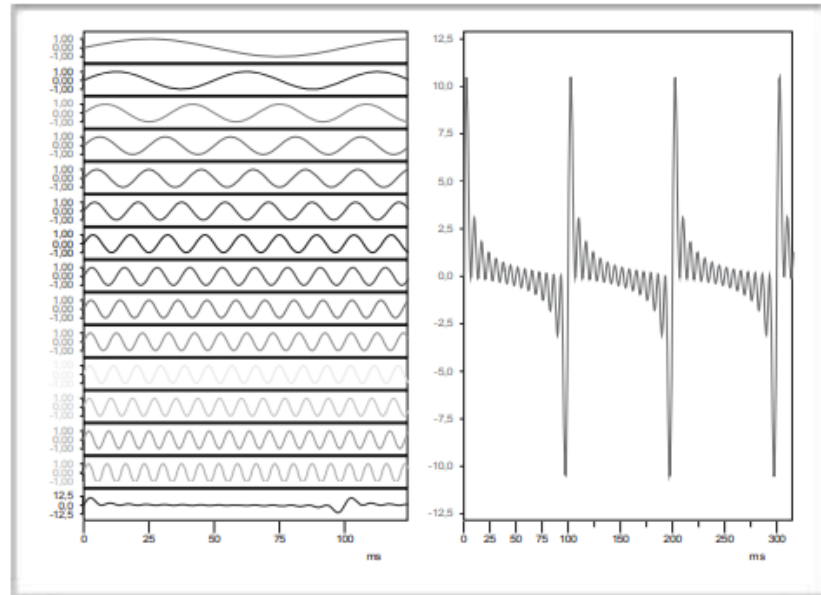
Gambar 273: IDFT dan IFFT

Transformasi FOURIER Diskrit DFT dan IDFT transformasi FOURIER Diskrit Terbalik memfasilitasi panjang blok variabel, yaitu mereka dapat disesuaikan dengan jumlah output dari demultiplexer. Kedua algoritma, bagaimanapun, sangat terikat pada komputasi ketika jumlah output tinggi.

FFT, seperti halnya IFFT, adalah DFT yang telah dioptimalkan dalam hal kecepatan. Mereka memanfaatkan prinsip simetri dalam algoritma. FFT dan IFFT selalu membutuhkan panjang blok yang merupakan kekuatan 2, mis. $2^{10} = 1024$.

Dalam hal ini 1024-IFFT membutuhkan waktu lebih lama dari 1000-IDFT. Oleh karena itu dimungkinkan untuk mengasumsikan bahwa 24 nilai input yang hilang sama dengan nol. Informasi tentang semua pola bit input dipertahankan.

Ini memiliki konsekuensi yang mengejutkan dan keuntungan yang tidak terduga. Harap perhatikan lagi Gambar 270, atas. Pada keluaran demultiplexer terdapat kode bit lebar seketika. Setiap bit yang terkandung dalam kode itu kemudian dikalikan dengan pembawa berbentuk sinusoidal atau kosinus dan oleh karena itu ada mis. 1000 (equidistant) osilasi sinusoidal dengan posisi fase variabel pada input penambah, yang totalnya adalah sinyal DMT dalam domain waktu pada output penambah. Ini mungkin ada hubungannya dengan sintesis FOURIER, yaitu dengan pembentukan sinyal dalam domain waktu dengan menambahkan osilasi sinusoidal yang relevan.



Gambar 274: Sinyal OFDM Dengan Fase Nol (ASK-OFDM)

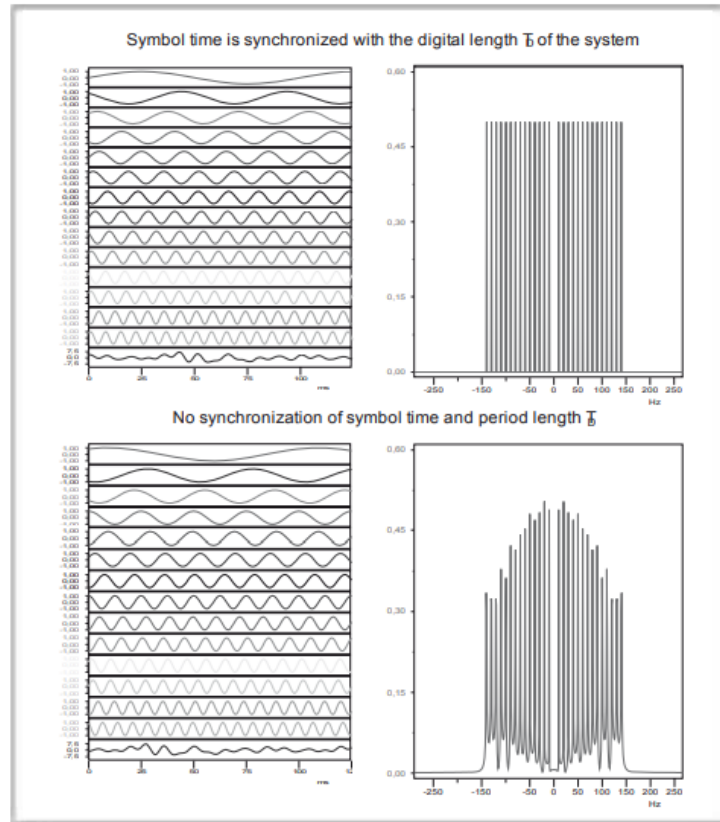
Gambar menunjukkan mengapa tidak boleh ada ASK-OFDM murni karena itu berarti bahwa semua osilasi pembawa akan memiliki fase yang sama. Ini akan memiliki konsekuensi serius pada output penambah. Jumlah dari semua osilasi pembawa mungkin memiliki puncak lokal yang tinggi ("pulsa jarum"). Ini pada gilirannya akan berarti bahwa peralatan transmisi – misalnya amplifier – tidak akan mampu mengatasinya.

Jika seluruh sinyal AFDM menyerupai white noise dalam domain frekuensi, pergeseran kunci fase pseudo-acak (sebagai gambar dari pola bit yang relevan) dari osilasi pembawa dengan amplitudo yang sama adalah pilihan yang sesuai.

Tapi osilasi sinusoidal mana yang cocok? Seperti yang kita ketahui, hanya osilasi sinusoidal yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar yang dapat dianggap sehubungan dengan sinyal (periodik) sebagai sinyal digital dengan panjang blok tertentu yang didefinisikan sebagai periodik (lihat Bab 9 "Digitalisasi"). Namun, sintesis FOURIER diperoleh dengan berpindah dari frekuensi ke domain waktu, yaitu melalui IFT Transformasi FOURIER Terbalik, atau dalam hal ini melalui IDFT (Transformasi FOURIER Diskrit Terbalik).

Dengan demikian kode bit pada keluaran demultiplexer dapat diinterpretasikan sebagai spektrum frekuensi dan sejumlah besar pengali dan osilator dapat digantikan oleh blok IDFT. Berkat ortogonalitas frekuensi pembawa, prosedur menggunakan IDFT disederhanakan.

Gambar 272 menunjukkan dengan cara yang disederhanakan bahwa durasi simbol dengan OFDM sama dengan panjang periode osilasi dasar. Ini berarti bahwa kelipatan bilangan bulat dari panjang periode semua osilasi pembawa cocok dengan setiap simbol OFDM.



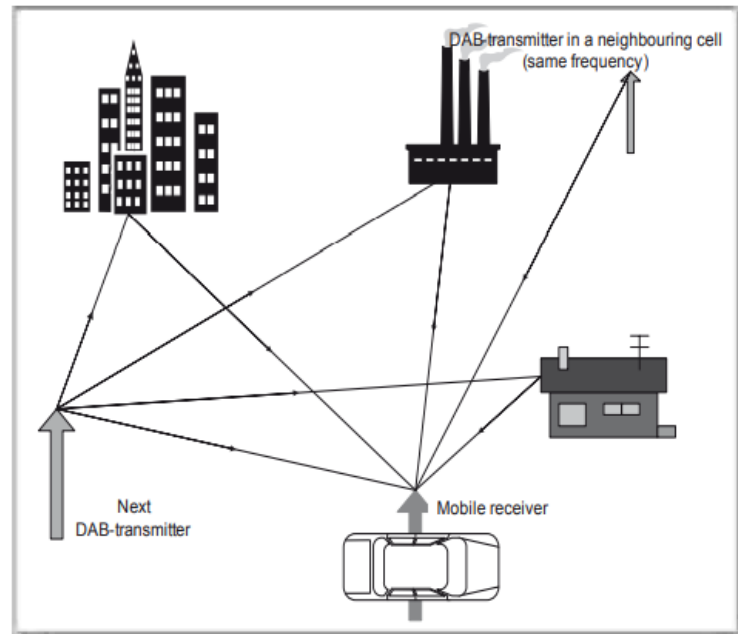
Gambar 275: OFDM Dan Panjang Periode Digital TD

Panjang simbol dianggap sebagai referensi waktu sehubungan dengan OFDM. Selain itu, sinkronismenya dengan TD panjang periode digital dari keseluruhan sistem pemrosesan sinyal sangat penting. Hanya dengan demikian spektrum jumlah dari semua osilasi pembawa direpresentasikan atau direkonstruksi dengan benar. Gambar ini menunjukkan pilihan acak dari empat fase yang mungkin dari masing-masing pembawa.

Setengah bagian bawah dari Gambar menunjukkan konsekuensi dari ketidaksinkronan panjang simbol dan panjang periode digital TD dari keseluruhan sistem seperti yang disimulasikan oleh DASYLab. Inilah sebabnya mengapa panjang blok (dalam hal ini 2048) tidak cukup sesuai dengan kecepatan pemindaian (dalam hal ini 2040).

Panjang simbol dan panjang periode digital TD dari sistem keseluruhan sehingga perlu memiliki hubungan bilangan bulat satu sama lain.

Oleh karena itu, masalah khusus dengan sistem OFDM adalah sinkronisasi waktu yang tepat dari semua pemancar sehubungan dengan interferensi dan penerimaan yang disinkronkan dari pemancar yang berdekatan.



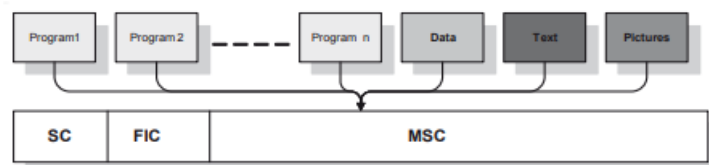
Gambar 276: Penerimaan Multipath Dan Penerimaan Yang Disinkronkan Dengan DAB

Kode OFDM (COFDM) dan Digital Audio Broadcasting (DAB)

Digital Audio Broadcasting DAB merupakan pengembangan bersama dari beberapa negara Eropa. Karakteristik DAB adalah mode transmisi yang berbeda memfasilitasi adaptasi audio, teks, gambar dan mobile TV sesuai permintaan. Oleh karena itu, DAB tidak hanya merupakan peningkatan dari pendahulunya, penyiaran FM, tetapi juga merupakan bagian dari sistem transmisi data digital yang sepenuhnya baru – dengan penekanan kuat pada radio dan TV.

1536 pembawa sinusoidal ditransmisikan pada jarak 1 kHz (mode I). Untuk durasi setiap panjang simbol TS 1,246 ms setiap pembawa dapat mengambil empat keadaan fase diskrit yang berbeda (4-DPSK). Ini setara dengan 2 bit ($2^2 = 4$). Dalam kerangka waktu DAB dari 76 simbol (94,7 ms) $76 \times 1536 = 233.472$ bit dapat ditransmisikan. Hasilnya adalah 2,4 Mbit, yaitu kecepatan transmisi dengan DAB adalah 2,4 Mbit/s.

Gambar 276 menunjukkan penerimaan multipath dan digital dalam telepon seluler. Masalah yang dihasilkan seperti gangguan (fading) dll tidak dapat diselesaikan dengan metode analog. DAB sebagian besar telah mampu memecahkan masalah ini dengan menggunakan kombinasi tindakan perlindungan yang unik. Oleh karena itu DAB disebut sebagai COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex).

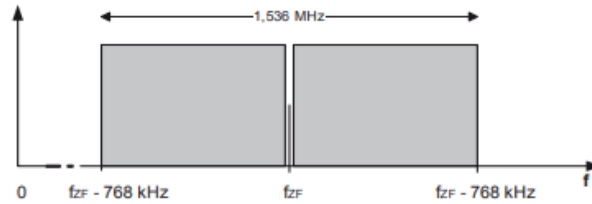


SC: Saluran Sinkronisasi, Sinkronisasi

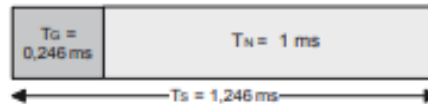
FIC: Saluran Informasi Cepat, Mengontrol

MSC: Saluran Layanan Utama, Data

6 Saluran audio stereo biasanya ditransmisikan secara bersamaan dalam bingkai DAB.



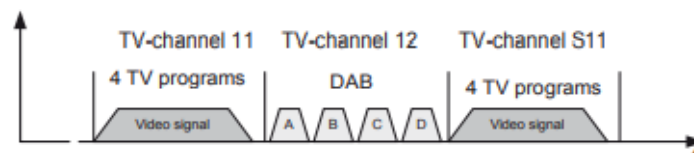
Dalam bandwidth DAB 1,536 MHz 2,4 MBit/s ditransmisikan . Dalam mode I 1536 frekuensi pembawa pada interval 1 kHz digunakan, yang dimodulasi 4-DPSK dalam setiap kasus.



Superposisi dari semua 1536 operator sinus dalam T_s

Rentang Pengguna Dan Perlindungan Dari Simbol DAB .

Interval waktu simbol DAB membutuhkan total 1.246 ms. Ini terdiri dari interval perlindungan dan interval pengguna. Jadwal DAB berisi 76 simbol seperti $T_s = 1.246$ ms. Per simbol 4 negara (4-DPSK) - dan karena itu 2 bit - dapat direpresentasikan per frekuensi pembawa. Per jadwal (94,7 ms) ini berada pada 1536 frekuensi pembawa $1536 * 76 * 2 = 233,472$ bit, per detik 2,4 MBit atau tingkat transmisi hasil 2,4MBit/s.



Empat sinyal DAB dapat ditransmisikan dalam saluran televisi dengan bandwidth 7 MHz. Ini sesuai dengan 24 program Stereo dalam kualitas CD atau 80 program mono. Misalnya saluran 12 dalam rentang VHF digunakan untuk proyek percontohan. Setiap satu dari empat sinyal DAB dapat diganti dengan 1 program TV.

Gambar 277: Rangka DAB, struktur frekuensi dan waktu

Komponen sinkronisasi SC berisi simbol nol yang memungkinkan penerima untuk melakukan sinkronisasi kasar dari bingkai dan struktur simbol. Simbol referensi fasa yang juga terdapat pada bagian sinkronisasi berfungsi untuk melakukan sinkronisasi yang tepat. Komponen kontrol FIC mentransmisikan data untuk mengontrol dan mendekode sinyal multipleks DAB. Karena data ini memerlukan transmisi bebas kesalahan, mereka telah dikodekan secara khusus untuk menghindari kesalahan.

Sinyal yang diterima hanya dievaluasi selama interval T_N yang digunakan. Interval pelindung dengan panjang T_G mengurangi distorsi (linier) yang disebabkan oleh penerimaan multipath dan sinkronisasi. Komponen data MSC berisi data pengguna.

Sinyal audio dikodekan sebagai tindakan perlindungan terhadap kesalahan (pengkodean konvolusi dan decode VITERBI). Tindakan perlindungan efektif lainnya adalah interleaving. Interleaving waktu memfasilitasi restrukturisasi bit program yang awalnya saling menggantikan menggunakan pola tetap untuk menyisipkannya sedemikian rupa sehingga terpisah lebar dalam waktu. Interleaving frekuensi berarti bahwa data dari program

yang berbeda juga direstrukturisasi dan dialokasikan ke 1536 frekuensi pembawa sedemikian rupa sehingga data dari suatu program terpisah jauh dalam spektrum.

Sinyal audio dari sinyal DAB secara harfiah "terkoyak" dalam domain waktu dan frekuensi. Oleh karena itu, sinyal DAB dan tetangganya tampak hampir seperti white noise pita lebar.

Jika pita frekuensi yang sempit terganggu oleh fading, hanya sebagian kecil dari sinyal yang umumnya rusak dan dapat dikenali dan dikoreksi dalam proses decoding.

Sistem Global untuk Komunikasi Seluler (GSM)

GSM juga merupakan pengembangan bersama Eropa, dalam hal ini untuk telepon seluler. Pada jaringan D GSM menggunakan rentang frekuensi 890-915 MHz untuk uplink dan rentang frekuensi 925-960 MHz untuk downlink. Pada E-network uplink berada pada range 1760,2-1775 MHz dan downlink pada range 1855,2-1870 MHz. Masing-masing band ini dibagi menjadi saluran dengan lebar 200 kHz. Karena uplink dan downlink dua frekuensi atau saluran selalu sesuai satu sama lain (dupleks). Ini berarti GSM juga menggunakan FDMA (lihat Gambar 278).

Tujuan GSM adalah perlindungan terhadap penyalahgunaan dan penyadapan (kriptologi), kapasitas pengguna yang tinggi, pemanfaatan bandwidth yang tinggi, transisi ke telepon fixed-line, optimalisasi layanan telepon, kualitas data yang tinggi dan probabilitas kesalahan bit yang rendah, dan layanan data dan tambahan yang terintegrasi. .

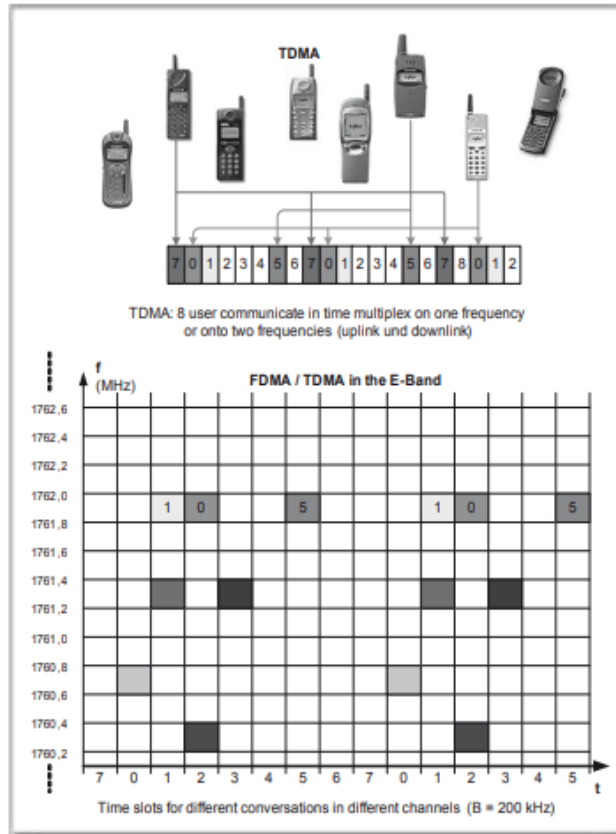
GSM menggunakan TDMA untuk memisahkan pengguna sel (lokal). 8 pengguna stasiun pangkalan berbagi satu frekuensi pembawa.

Kombinasi TDMA dan FDMA menghasilkan 400 jalur transmisi di jaringan D dengan 50 saluran dupleks masing-masing 200 kHz dan 8 pengguna per saluran. Kecepatan bit saluran adalah 271 kBit/s pada bandwidth 200 kHz. Sekali lagi, proses 4-DPSK digunakan untuk modulasi. Kecepatan bit per panggilan adalah 13 kBit/s. Kapasitas transmisi yang tersisa digunakan untuk perlindungan data. Pengkodean konvolusi dan interleaving digunakan untuk tujuan ini.

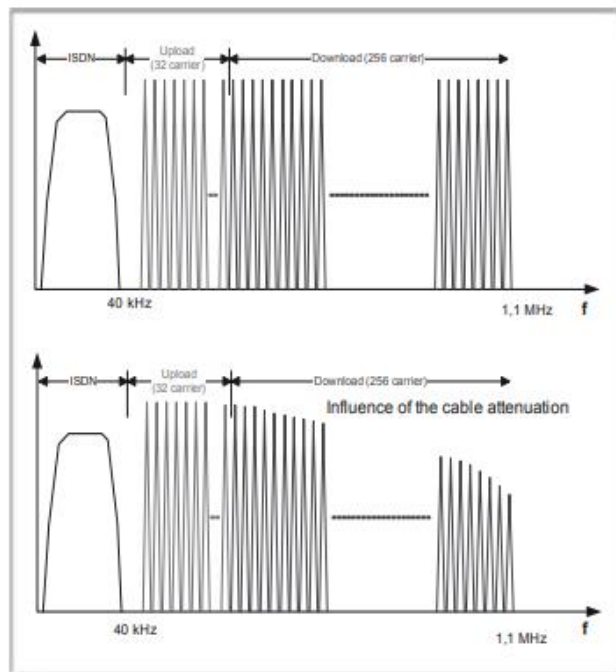
Saluran Pelanggan Digital Asimetris (ADSL)

Prosedur ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) telah dijelaskan di awal Bab 11. Ini adalah variasi khusus dari DMT untuk bagian kabel. Dengan mengoptimalkan semua prosedur pengkodean dan modulasi yang dijelaskan sejauh ini, dimungkinkan untuk mentransmisikan, bersama ISDN, hingga 8 Mbit/dtk tambahan melalui kabel Cu biasa 0,6 mm untuk telepon.

Sistem ADSL modern beroperasi di atas pita frekuensi ISDN dan memanfaatkan rentang frekuensi kira-kira hingga 1,1 MHz. Sebanyak 256 frekuensi pembawa dengan jarak 4 kHz (untuk hilir) digunakan. Setiap operator biasanya dapat mengambil hingga 32 status di ruang sinyal.



Gambar 278: Multiplexing frekuensi dan waktu dalam prosedur GSM



Gambar 279: ADSL sebagai prosedur khusus – asimetris – DMT

Sistem ini, bagaimanapun, disesuaikan dengan sifat-sifat jalur transmisi dengan mengukur jarak sinyal-noise secara otomatis. Dengan transmisi kabel Cu biasa, kehilangan transmisi sekitar 1 MHz meningkat secara drastis. Oleh karena itu, kemungkinan status Sistem Pemrosesan Sinyal (Dr. Agus Wibowo)

pembawa dalam rentang itu dikurangi sehingga hanya 4-QAM alih-alih mis. 32-QAM dimanfaatkan. Jika ada gangguan pita sempit yang kuat dalam rentang tersebut – mis. disebabkan oleh penyiaran – operator “dimatikan”.

Kehilangan transmisi meningkat secara proporsional dengan panjang kabel. Oleh karena itu tingkat transmisi di ADSL sebanding dengan panjang saluran. Informasi pabrikan tentang ADSL biasanya mengacu pada panjang 2 hingga 3 km.

Karena ADSL dirancang untuk komunikasi internet yang lebih cepat, downstream hingga 8 Mbit/s jauh lebih besar daripada upstream (hingga 768 kBit/s). Secara umum, jumlah data yang ditransmisikan dari internet ke pengguna jauh lebih besar daripada sebaliknya.

Modulasi dan demodulasi dilakukan sebagai OFDM. yaitu IDFT atau IFFT digunakan dalam pemancar untuk mengubah tingkat amplitudo diskrit pada output demultiplexer ke dalam domain waktu. (lihat Gambar 265 dan Gambar 272). Prosedur ini dibalik di receiver dengan FFT. 256 (= 28) pembawa untuk hilir dan 32 (= 25) untuk hulu adalah tanda yang jelas bahwa IFFT dan FFT digunakan. IFFT 512 titik perlu digunakan karena sinyal kompleks di pemancar terdiri dari 256 bagian nyata dan 256 bagian imajiner masing-masing.

Telekom, penyedia telepon Jerman, saat ini menawarkan T-DSL, variasi dengan tarif yang jauh lebih rendah. Untuk alasan ini, setiap stasiun switching digital yang terlibat tidak perlu memasang koneksi internet dengan kecepatan transmisi yang sangat tinggi.

Prosedur HDSL simetris hingga 50 Mbit/dtk ditawarkan untuk koneksi pendek.

Menyebarkan Spektrum

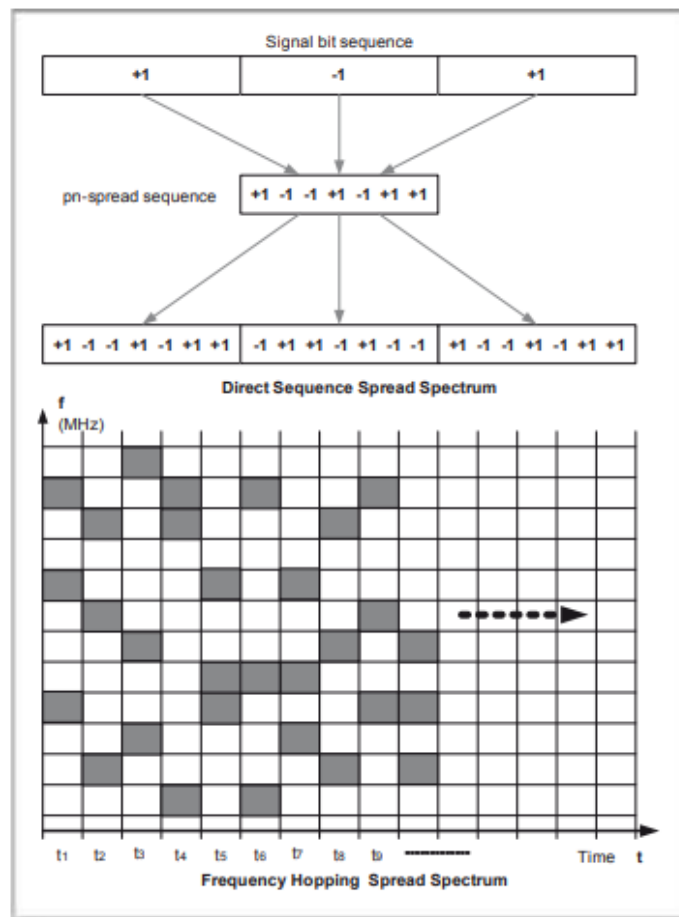
CDMA (Coded Division Multiple Access) sering diidentikkan dengan prosedur spread spectrum. Dengan mempertimbangkan Pelajaran HANNON, ini mungkin metode transmisi yang paling menarik. Pita frekuensi "alami" dari suatu sinyal sengaja disebarkan agar pita yang ditransmisikan jauh lebih lebar. Apa tujuan dari prosedur seperti itu?

Mari saya jelaskan terlebih dahulu bagaimana mengubah sinyal narrowband menjadi sinyal broadband. Metode paling sederhana adalah dengan menggunakan pulsa yang lebih pendek karena dalam kasus yang terbatas pulsa jarum menghasilkan spektrum yang sangat luas. Prosedur seperti itu akan sebanding dengan multiplexing waktu (misalnya di GSM, lihat Gambar 268) di mana 8 pengguna berbagi satu sinyal yang mengarah pada peningkatan kecepatan data dengan faktor 8. Masing-masing pengguna hanya akan memiliki seperdelapan dari waktu di pembuangan mereka. Di sisi lain, penggunaan pulsa pendek menyebabkan masalah teknis dalam banyak kasus karena pemancar perlu mengubah daya transmisi dengan cepat.

Menyebarkan urutan narrowband melalui urutan pulsa yang berperilaku seperti white noise (pseudo noise (pn)-urutan) tampaknya menjadi pilihan yang lebih layak. Urutan ini, bagaimanapun, perlu berperilaku sedemikian rupa sehingga mereka dapat diidentifikasi sebagai kebisingan karena semuanya perlu dibalik di penerima. Kebisingan semu ini dihasilkan melalui register geser umpan balik dan diulang setelah periode waktu tertentu. Berbeda dengan white noise, pseudo noise memiliki denyut nadi yang tetap.

Setiap pengkodean proteksi kesalahan menghasilkan penyebaran pita frekuensi karena kode yang lebih panjang digunakan. Oleh karena itu tampaknya masuk akal bahwa penyebaran harus dilakukan dalam bentuk pengkodean yang membuat sinyal jauh lebih rentan terhadap kesalahan.

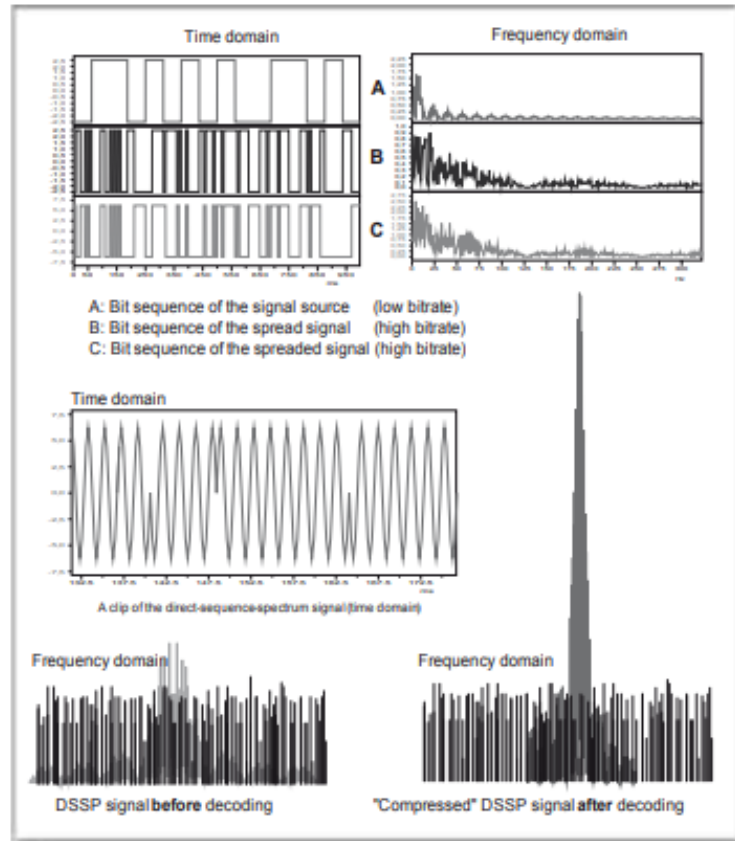
Prinsip spektrum sebaran urutan langsung cukup mudah. Pada prinsipnya adalah perkalian dari urutan bit bipolar tingkat rendah dengan urutan bit pn bipolar tingkat tinggi (lihat Gambar 281), sebaliknya seperti AM.



Gambar 280: Spektrum Penyebaran Urutan Langsung dan Frekuensi Hopping

Prinsip prosedur Urutan Langsung tampaknya menawarkan metode termudah. Sinyal spread dapat dibangkitkan dengan operasi logika sederhana.

Mungkin tidak mudah untuk menghasilkan satu set synthesizer frekuensi untuk "frequency hopping" yang dapat disetel dengan sangat cepat. "Time hopping" sebagai metode ketiga seharusnya lebih mudah.



Gambar 281: Spektrum Penyebaran Urutan Langsung DSSS

Atas: urutan spread jelas memperluas spektrum. Bandwidth identik dengan urutan spread. Secara teoritis harus berulang secara berkala dengan pulsa dari urutan bit tingkat rendah. Ini, bagaimanapun, tidak ada konsekuensi untuk bandwidth spektral.

Pusat: Pembawa digunakan untuk memodulasi urutan bit spread untuk transmisi. Gambar menunjukkan detail kecil dalam domain waktu dari sinyal spektrum-spread termodulasi. Dalam hal ini jelas merupakan sinyal termodulasi PSK.

Bawah: Jika penerima mengetahui kode, sinyal yang diterima dapat direkonstruksi dalam bentuk terkompresi. Sinyal terkompresi ini menonjol di atas sinyal dan berisi informasi tentang urutan bit tingkat rendah asli (lihat atas).

Dalam kasus sinyal spread-spectrum, bandwidth – tidak seperti semua proses transmisi digital yang dijelaskan sejauh ini – jauh lebih besar daripada kecepatan informasi.

Pelebaran spektrum meningkatkan ketahanan interferensi (juga) terhadap sumber interferensi pita sempit. Ini bisa menguntungkan jika seseorang mencoba dengan sengaja mengganggu sinyal.

Kemungkinan lain adalah Frequency Hopping Spread Spectrum. Lompatan frekuensi dikendalikan oleh urutan pn. Sistem ini terutama terdiri dari generator kode dan synthesizer frekuensi yang dapat dikontrol dengan cepat yang dikendalikan oleh generator kode. Berbeda dengan FSK (lihat Gambar 261) jumlah frekuensi yang mungkin tidak hanya dua; mungkin sangat besar.

Untuk alasan simetri time hopping, frekuensi spread juga harus ada. Di sini pulsa melompat secara acak ke belakang dan ke depan di antara kemungkinan waktu transmisi seolah-olah ada sistem multipleks waktu hanya untuk satu sinyal.

Jika sinyal tersebar berdasarkan frekuensi di pemancar, sinyal tersebut dikompresi secara bersamaan di penerima. Karena energi sinyal tidak berubah, kurva amplitudo harus ditingkatkan dengan faktor penyebaran. Sinyal menonjol dari kebisingan. Hal ini ditunjukkan dengan jelas dalam Gambar 281.

Sinyal hanya dapat dikompresi berdasarkan frekuensi di penerima jika kodenya diketahui. Karena kode berbeda untuk setiap sinyal, banyak sinyal dapat menggunakan rentang frekuensi yang sama sehingga kerugian dari penyebaran pita frekuensi sedikit banyak dapat dikompensasikan. Sinyal diambil melalui korelasi (lihat Gambar 84 dan Gambar 85). Dengan ini berarti kesamaan atau kecenderungan pelestarian dari sinyal asli "disaring".

Spread spectrum dapat digunakan terutama di mana sinyal yang sangat lemah yang telah menghilang menjadi noise harus dipulihkan. Prosedur ini digunakan di GPS (sistem penentuan posisi global), misalnya, atau di mikrofon nirkabel. Spread spectrum mungkin menjadi solusi untuk broadband, jaringan komunikasi nirkabel dalam rentang frekuensi maksimum.

Latihan Bab 13

Latihan 1

- a. Jelaskan kemungkinan membatasi sinyal digital – yaitu pola bit – dalam frekuensi sebelum modulasi dan transmisi.
- b. Bagaimana tumpang tindih dengan pulsa yang berdekatan (interferensi) dapat dibatasi?
- c. Bagaimana mungkin untuk menentukan secara kualitatif menggunakan teknik pengukuran apakah informasi dari sinyal yang diterima dapat direkonstruksi?
- d. Mengapa banyak jenis filter tidak cocok untuk memfilter urutan bit "persegi panjang"?

Latihan 2

Meringkas perbedaan umum antara proses modulasi klasik dan digital.

Latihan 3

Bandingkan pergeseran kunci amplitudo, fase dan frekuensi.

- (a) Apa keuntungan dan kerugian yang Anda lihat?
- (b) Apa cara termudah untuk mengubah ASK menjadi PSK?

Latihan 4

Jelaskan ide di balik ruang sinyal (dua dimensi) pada bidang GAUSSI.

Latihan 5

Jelaskan dengan menggunakan QPSK pemindah empat fase kunci bagaimana secara praktis setiap titik dalam ruang sinyal dapat dicapai.

Latihan 6

Dalam modulasi amplitudo kuadratur digital QAM sejumlah titik yang diatur dalam bentuk grid dapat dicapai dalam ruang sinyal menggunakan mapper.

- a. Jelaskan struktur dasarnya
- b. Berapa banyak status sinyal (titik dalam ruang sinyal) yang diperlukan untuk sinyal 4 bit pada input?
- c. Bagaimana hal ini dapat diwujudkan dalam hal sirkuit di mapper?
- d. Berapa banyak tingkat amplitudo diskrit yang diperlukan oleh bagian nyata dan imajiner dari suatu sinyal?

Latihan 7

Dari representasi sinyal penerimaan QAM dapat ditentukan dengan tepat apakah sinyal sumber dapat direkonstruksi.

- (a) Bagaimana ini bisa dilihat?
- (b) Pada prinsip apa penerima QAM bekerja?

Latihan 8

Ringkaslah tiga "pelajaran" dari teori informasi SHANNON.

Latihan 9

Sistem PCM 30 menggunakan proses time multiplex TDMA. 30 pelanggan dapat menggunakan saluran transmisi yang sama. Berapa besar laju bit sistem PCM 30 dengan lebar pita NF 4 kHz dan menggunakan konverter A/D 8 bit?

Latihan 10

- (a) Proses DMT saat ini berada di garis depan teknologi transmisi digital modern.
- (b) Keuntungan apa yang diharapkan dari DMT terlepas dari strukturnya yang kompleks?
- (c) Media transmisi apa yang cocok untuk proses DMT? Berikan alasan.
- (d) Apa fitur khusus OFDM
- (e) Melalui proses sinyal digital apa upaya dapat dikurangi secara signifikan?
- (f) Sejauh mana sistem DMT virtual, yaitu program?
- (g) Apa "chip standar" yang diperlukan terutama untuk pemrosesan sinyal digital DSP?
- (h) Aplikasi apa yang bekerja berdasarkan DMT?

Latihan 11

Jelaskan struktur pemancar dan penerima OFDM

Latihan 12

Apa yang ada di balik penyebaran pita frekuensi dan CDMA?

BAB 14

JARINGAN SARAF

Semua prosedur dan sistem untuk pemrosesan sinyal yang telah kita tangani sejauh ini memiliki kesamaan: mereka tidak dapat menyesuaikan perilakunya dan terikat oleh aturan dan model matematika. Sifat mereka statis dan non-adaptif.

Dalam hal ini mereka pada dasarnya berbeda dari "sistem pemrosesan sinyal" di alam. Di sini, kemampuan untuk beradaptasi dan belajar merupakan instrumen penting dalam mengalahkan saingan dan mengatasi ancaman terhadap kelangsungan hidup.

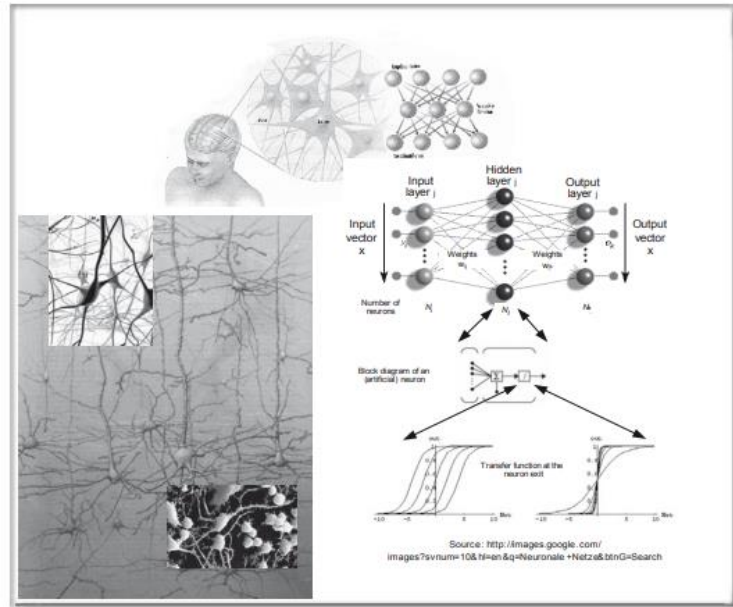
Analisis struktur dan pemrosesan sinyal sistem biologis alami adalah objek neurofisiologi. Otak manusia terdiri dari sejumlah besar (sekitar 100 miliar) "modul standar" yang sebagian besar mirip - neuron - yang saling terkait dengan cara yang sangat kompleks (jumlah koneksi antara neuron bahkan lebih besar beberapa kali lipat). Gambar 281 memberikan sketsa dan informasi tentang topik ini. Setiap sinyal yang diterima dan setiap proses pembelajaran mengubah otak. Jadi semua aktivitas mental, kontak sosial dan gerakan fisik memunculkan neuron baru dan hubungan di antara mereka.

Alam selalu menjadi guru besar ilmu pengetahuan dan teknologi. Neuroinformatics bertujuan untuk mentransfer formula sukses alam ke bidang mikro-elektronik. Dalam konteks ini ada dua istilah yang bersaing: kecerdasan buatan dan jaringan saraf. Tampaknya mustahil untuk menarik garis pemisah yang jelas di antara mereka.

Setelah bertahun-tahun melakukan penelitian terpadu, upaya untuk menerapkan kecerdasan buatan (AI) dalam mikroelektronika tampaknya masih jauh dari prospek. Salah satu alasannya adalah bahwa kecerdasan adalah istilah yang terlalu kompleks untuk diproyeksikan ke mikroelektronika pada saat ini. Saat ini, ilmuwan AI dikritik karena memprogram komputer untuk bertindak seperti manusia bahkan sebelum mereka mendefinisikan kecerdasan manusia, bagaimana asal mulanya, atau bahkan apa arti dari "memahami". Sebaliknya, jaringan saraf tiruan telah pindah dari bidang penelitian fundamental, memungkinkan realisasi konkret dari aplikasi inovatif.

Jaringan saraf tiruan bekerja dengan model jaringan saraf alami yang sangat disederhanakan. Dilihat secara geometris, mereka biasanya terdiri dari beberapa lapisan neuron, sementara dalam kasus yang paling sederhana lapisan yang berdekatan berkomunikasi searah dari lapisan input ke lapisan output (lihat juga Gambar 281).

Ada banyak literatur tentang hal ini. Di sini, kami hanya akan menunjukkan dasar-dasar dalam teks dan Gambar. Selain itu, tampaknya jauh lebih menarik untuk memberikan ruang lingkup pembelajaran dengan penelitian independen, yaitu menggunakan eksperimen praktis untuk menyampaikan perasaan untuk pengembangan aplikasi yang menarik.

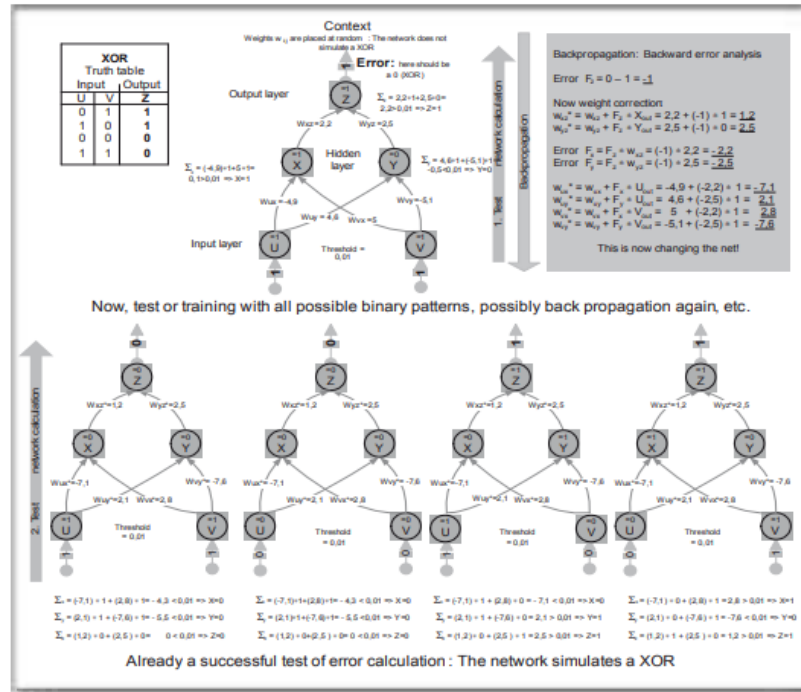


Gambar 282: Visualisasi Jaringan Saraf "Biologis" Dan Buatan Alami

Di bagian kiri gambar ada upaya untuk memvisualisasikan bagian kecil dari jaringan saraf biologis dalam kompleksitas spasialnya. Sebaliknya, seperti yang terlihat di bagian kanan gambar, jaringan saraf tiruan memiliki struktur dua dimensi yang agak sederhana yang terdiri dari lapisan input, satu atau lebih lapisan "tersembunyi" dan lapisan keluaran. Biasanya, hanya lapisan yang berdekatan yang berkomunikasi hanya dalam satu arah. Sesuai dengan antetipe biologis, setiap neuron di sini mewakili "modul" yang cukup sederhana dalam hal teknologi sinyal: sinyal masuk berbobot ditambahkan dan dibatasi ukurannya oleh fungsi transfer non-linier.

Batas ini "menstabilkan" jaringan saraf dengan mengurangi pengaruh jumlah dominan. Akibatnya, lebih banyak unit pelatihan diperlukan sampai jaringan saraf akhirnya dioptimalkan. Dengan bantuan pemrosesan sinyal "paralel besar-besaran", sekali lagi seperti antetipe biologis, dimungkinkan untuk melakukan pengenalan pola yang sangat cepat bahkan dalam kasus proses individu yang lambat. Berbeda dengan komputer, seluruh jaringan saraf selalu terlibat dalam pengenalan pola. Tidak ada pembagian antara perangkat keras dan perangkat lunak dalam jaringan saraf. Jaringan saraf adalah kedua hal pada saat yang sama. Kemampuan untuk mengenali pola tersembunyi dalam bobot koneksi yang berbeda dan dalam struktur jaringan dari jaringan saraf yang terlatih!!

NB: bab ini tidak dapat ditulis sebelum modul DASYLab- telah diperluas oleh kelompok pemodelan proses lain untuk menghasilkan jaringan saraf. Ini adalah pencapaian para ilmuwan dan insinyur di Institut Fraunhofer für Produktionstechnik und Automation (IPA) di Stuttgart. Saat itu, mereka mencari pendekatan baru untuk menghindari barang cacat dengan pemantauan dan optimalisasi proses produksi ("zero error production"!).



Gambar 283: Bagaimana Jaringan Saraf Belajar

... mungkin dapat dijelaskan dengan cara yang paling sederhana oleh jaringan saraf "minimal" dengan karakteristik modul neuron yang paling sederhana. Disini terdapat input layer dengan dua neuron, hidden layer dengan dua neuron dan output layer dengan hanya satu neuron.

Jaringan saraf ini belajar untuk bertindak seperti modul XOR- logis. Kesamaan semua neuron adalah menghasilkan 1 pada output jika ambang 0,01 terlampaui, jika tidak 0. Pada awalnya, bobot dipilih secara acak (lihat di atas). Pada kedua input 1 digunakan.

Perhitungannya, bagaimanapun, menghasilkan 1 bukannya 0 (XOR): error! Koreksi pembobotan sekarang dilakukan dengan perhitungan error yang diarahkan ke belakang (back propagation). Dengan bobot baru (setengah bawah gambar) semua 4 kemungkinan biner diuji. Hasil: Jaringan saraf ini bekerja seperti modul XOR-! Contoh ini menunjukkan di atas segalanya bahwa adalah mungkin untuk mewujudkan bahkan sistem berbasis aturan (logis) menggunakan jaringan saraf "belajar"!

Modul IPA ini disediakan oleh sistem pembelajaran ini dan bahkan diperluas dan berganti-ganti.

Kabar baiknya adalah: untuk menggunakan jaringan saraf, Anda tidak perlu tahu cara kerjanya! Ini adalah perbedaan lain dari sistem pemrosesan sinyal biasa yang dibahas dalam bab-bab sebelumnya: tanpa pengetahuan rinci tentang setiap komponen atau modul, sistem keseluruhan "berbasis aturan" tidak dapat dihasilkan. Tidak ada yang bisa "dibiarkan secara kebetulan".

Sebaliknya, berikut ini berlaku untuk jaringan saraf:

Jaringan saraf dioptimalkan untuk pengenalan pola tertentu dengan dilatih dengan data yang sesuai. Hal ini dilakukan sampai input data pelatihan menghasilkan output yang diinginkan. Dalam arti tertentu jaringan saraf belajar dengan pelatihan!

Kemampuan ini dihasilkan dari struktur neuron dan jaringan yang diambil dari jaringan syaraf alami. Kemungkinan yang dihasilkan dari ini jelas merupakan perubahan paradigma dalam pemrosesan sinyal.

Dalam literatur pengantar sering dinyatakan bahwa “jaringan saraf tidak memerlukan penggunaan aturan matematika. Mereka hanya membutuhkan contoh dari mana mereka dapat belajar”. Ini, bagaimanapun, dalam banyak kasus hanya benar pada prinsipnya atau hanya setengah kebenaran:

Secara umum, sinyal pra-pemrosesan masuk akal, memilih informasi penting dari data pelatihan dan mengarah ke solusi yang lebih sederhana, kuat dan sukses untuk jaringan saraf.

Pra-pemrosesan sinyal yang optimal di bidang teknologi dan ilmu alam sebagian besar membutuhkan analisis konteks fisik yang tepat dan akhirnya mengarah pada sejumlah parameter yang mengacu pada proses temporal, karakteristik frekuensi atau, misalnya, juga frekuensi kemunculan. Informasi yang dipilih oleh parameter yang sesuai biasanya dimasukkan ke dalam jaringan saraf.

Contoh: Sebuah jaringan saraf (sederhana) adalah untuk mengenali, apakah sinyal (misalnya segitiga-, gigi gergaji-, persegi panjang- atau sinyal sinus) hadir pada input dan melaporkan hasilnya.

Bahkan ketika menggunakan jaringan saraf, setidaknya di bidang teknologi dan ilmu alam, pemrosesan sinyal konvensional dengan mempertimbangkan rentang waktu dan frekuensi serta statistik sangat diperlukan. Contoh “sederhana” di atas menunjukkan hal ini: apakah strategi solusi dalam rentang waktu dan frekuensi lebih disukai? Seperti apa solusi optimal jika frekuensi dan amplitudo sinyal yang disebutkan bervariasi dalam batas-batas tertentu dan/atau sinyal input berisik?

Berikut istilah jaringan saraf selalu mengacu pada jaringan saraf tiruan kecuali istilah jaringan saraf biologis digunakan.

Apa Saja Aplikasi Jaringan Saraf?

Jaringan saraf adalah instrumen baru yang kuat untuk memecahkan masalah di bidang apa pun dengan cara apa pun yang mungkin terkait dengan pengenalan pola.

Seperti halnya antetipe biologis, berbagai bidang penerapan jaringan saraf baik yang ada sekarang atau yang akan ada di masa depan sangat luas..

Untuk menciptakan pemahaman yang lebih mendalam tentang keserbagunaan ini, tampaknya ide yang baik untuk memulai dengan membuat daftar contoh aplikasi yang lebih sederhana dan lebih kompleks untuk jaringan saraf dari berbagai bidang daripada kategori yang lebih abstrak.

Jaringan saraf sudah dapat melakukan hal berikut:

- nilai real estat
- mengenali dan mengklasifikasikan sel kanker
- mengidentifikasi penyebab kemacetan lalu lintas
- mengklasifikasikan sinyal sonar mis. dari kapal selam dan bahkan membedakan antara kapal dari kelas yang sama
- prakiraan letusan matahari
- memantau pemberian pinjaman
- memberikan saran untuk produksi bir yang lebih enak rasanya
- memprediksi kemungkinan SIDS (sindrom kematian bayi mendadak)
- memprediksi harga saham pada penutupan pasar
- menghilangkan kesalahan dalam proses produksi
- mengoptimalkan fungsi lengan robot
- mengenali pesawat musuh
- mengajari komputer untuk membaca teks yang tidak dikenal dengan keras atau mentransfer kata yang diucapkan ke pengolah kata
- mengenali orang dan objek di sekitar atau menyaring dan mengidentifikasi mereka dll. dll.

Mungkin daftar ini sudah membangkitkan rasa penasaran Anda. Kata kerja saja memberikan indikasi umum pertama dari kemampuan jaringan saraf:

Jaringan saraf dapat mengenali, mengidentifikasi, mengevaluasi, meramalkan, memantau, mengoptimalkan, menghilangkan, mengklasifikasikan, dan menyaring pola dari jenis yang paling berbeda.

Aplikasi jaringan saraf tidak terbatas pada bidang teknologi dan ilmiah (meskipun ini akan mendominasi bab ini). Sekarang dan terlebih lagi di masa depan mereka akan berdiri untuk pengenalan pola di (hampir) semua bidang yang dimodelkan pada antetipe biologis mereka.

Seperti yang ditunjukkan oleh contoh di atas dan definisi/generalisasi yang lebih dekat dari kemampuan jaringan saraf, istilah pengenalan pola cukup abstrak dan dapat menggambarkan berbagai macam fenomena. Bagaimanapun, itu adalah istilah kunci untuk segala bentuk komunikasi!!

Untuk dapat menilai realisasi atau aplikasi praktis dari jaringan saraf, berikut ini adalah upaya untuk mendefinisikan subdivisi yang lebih abstrak dari istilah ini:

Generalisasi

Generalisasi harus dipahami sebagai kemampuan untuk menalar ketika dihadapkan pada hal-hal yang tidak diketahui. Ini dengan syarat bahwa informasi yang tidak diketahui mungkin berbeda tetapi setidaknya mirip dengan informasi yang diketahui. Ini terdengar rumit tetapi akan menjadi jelas dengan contoh:

- pengenalan suara
- penilaian real estat (lokasi, jaringan transportasi, isolasi, dll.)

Prakiraan tren

Karena sumbu waktu di dalam materi data, kinerja masa depan dapat diinterpolasi. Contoh:

- penggantian suku cadang yang aus tepat waktu
- prakiraan bencana alam

Evaluasi

Ada perilaku yang diharapkan. Evaluasi dapat dihitung dengan perbedaan antara data aktual dan data yang ditargetkan. Contoh:

- perbedaan kualitas dalam produksi
- persetujuan/penolakan pinjaman

Toleransi

Hampir selalu ada toleransi dalam kasus data nyata yang dapat dibandingkan. Di sini, istilah toleransi mengacu pada data yang tidak bersih, tidak benar, dan tidak lengkap. Contoh:

- melengkapi atau mengganti simbol, teks, atau fragmen gambar yang hilang
- keputusan untuk mengintervensi sistem atau menghentikan proses produksi
- Penyaringan
- Pilih informasi yang relevan (untuk menghindari redundansi) untuk meminimalkan upaya pengenalan pola. Contoh:
- sinyal bersih atau data "noise" dalam arti luas
- segmentasi konten gambar penting dalam proses pencitraan modern (misalnya ultra sound dan tomografi NMR)

Optimasi

Bertujuan untuk mendapatkan hasil yang optimal dengan sedikit usaha (misalnya juga saat membuat jaringan saraf). Contoh:

- optimalisasi fungsi lengan robot
- pembuatan rencana penerbangan
- sistem pakar medis

Ekstrapolasi

Analisis data untuk tujuan klasifikasi

- diagnosis kesalahan produksi
- klasifikasi pola kompleks seperti sidik jari untuk menemukan pola data serupa dengan cepat

Isi kategori ini tumpang tindih seperti yang ditunjukkan pada contoh berikut:

Pengenalan ucapan: ini membuat perkiraan, mengevaluasi dan menunjukkan toleransi tertentu (misalnya spektrum kata yang sama diucapkan beberapa kali selalu berbeda ke tingkat yang lebih besar atau lebih kecil, misalnya, jika pembicara memiliki pilek). Pengenalan suara bekerja dengan menyaring parameter tertentu, sebagian besar spektral (pita frekuensi). Optimalisasi dicoba dengan melatih jaringan saraf, dan dengan banyaknya

pilihan sampel suara, ekstrapolasi membantu klasifikasi untuk merencanakan cara untuk menemukan kata yang paling mirip.

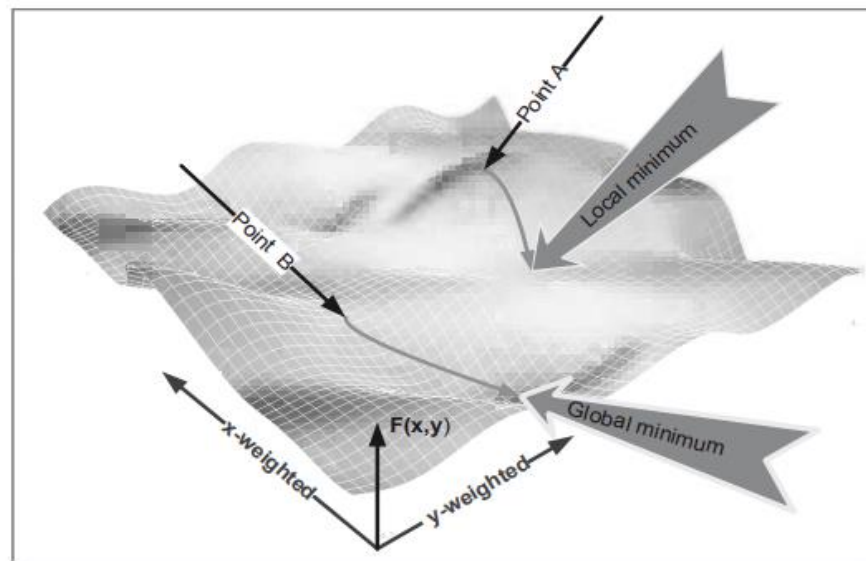
Penjelasan di atas dengan jelas menggambarkan sulitnya membuat dan mewujudkan jaringan saraf:

Kualitas data yang digunakan untuk melatih jaringan saraf sangat penting.

Semakin baik pengguna menangkap atau memahami materi data, semakin baik dia akan mengatur untuk menyortir gandum informasi dari sekam dan meminimalkan jumlah parameter. Ini juga mengoptimalkan atau "menyusut" struktur jaringan. Jaringan saraf tidak membengkak oleh pemberat yang tidak perlu.

Backpropagation Sebagai Minimisasi Kesalahan: Pencarian Lembah Terdalam

Gambar 270 menunjukkan vektor tertentu dari ruang tiga dimensi, yang diwakili oleh $v = (x; y; z) = (2,5; 3; 2)$



Gambar 284: Backpropagation Sebagai Jalur Gradien Terbesar: Pegunungan Potensial Dari Fungsi Kesalahan

Titik keluaran memutuskan apakah minimum lokal atau bahkan minimum global, yaitu minimum terendah dari keseluruhan "lanskap", dicapai dengan propagasi balik. Gambar menunjukkan prosedur untuk kasus batas hanya dua pembobotan variabel.

$$u = (7; -5; 2,2; 0,5; 27)$$

Ini sesuai dengan instruksi "pindahkan 2,5 satuan langkah ke arah x, lalu 3 langkah ke arah y dan akhirnya 2 langkah ke arah z untuk mencapai titik akhir P dari vektor v". Dalam matematika, masalah vektor selalu diperluas untuk mencakup dimensi apa pun. Misalnya vektor terletak pada ruang vektor lima dimensi yang dapat dibayangkan secara struktural daripada spasial. Jadi, dalam Gambar yang sama, frekuensi gigi gergaji periodik membentuk ruang vektor berdimensi tak hingga (ortogonal) – sesuai dengan struktur matematika yang disebut deret FOURIER yang menggambarkan jumlah semua gelombang sinusoidal dari sinyal periodik.

Ide vektor ini sekarang juga diterapkan pada jaringan saraf. Jika misalnya 6 neuron membentuk lapisan input, keenam sinyal input secara keseluruhan membentuk ruang vektor

Sistem Pemrosesan Sinyal (Dr. Agus Wibowo)

enam dimensi. Juga, jumlah n neuron keluaran atau sinyal yang keluar dari sana memiliki n -dimensi. Jika enam parameter dipilih sedemikian rupa sehingga informasinya tidak terkandung dalam 5 parameter lainnya, mereka masing-masing (dalam arti linier) independen satu sama lain atau, sebagai tambahan, bahkan ortogonal, yaitu berdiri secara vertikal satu di atas yang lain. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 270 dalam bab 13.

Propagasi balik sebagai metode koreksi kesalahan, di mana pembobotan dimodifikasi, dapat diinterpretasikan secara geometris sebagai perhitungan dalam ruang multidimensi. Dalam kasus dua dimensi dengan bobot yang berbeda (!), sering terjadi bidang multi-kubah dengan beberapa gunung dan lembah (lihat Gambar 283).

Pada pemeriksaan lebih dekat, propagasi balik adalah apa yang disebut metode penurunan gradien yang diatur dalam lanskap, yang titik tinggi dan rendahnya dibentuk oleh satu atau lebih kesalahan.

Perambatan balik kemudian menggunakan cara paling curam ke lembah yang berdekatan (gradien persis mendefinisikan jalur air atau bola bergulir akan menuju ke lembah).

Dengan setiap menjalankan backpropagation, lanskap berubah dengan perubahan bobot dan kesalahan. Titik rendah datang lebih dekat, atau lebih tepatnya sekitar langsung ditampilkan diperbesar. Kondisi stabil, yaitu kondisi potensi terendah, tercapai di dasar lembah.

Membuat Jaringan Saraf Dengan DASYLab

DASYLab adalah program untuk akuisisi data. DASYLab diumpangkan dengan data atau sinyal melalui antarmuka atau file yang diproses, dianalisis, dievaluasi, divisualisasikan, dipancarkan, dll. oleh sistem virtual yang diwakili oleh DASYLab.

Dalam kebanyakan kasus, ini adalah data/sinyal yang bergantung pada waktu, yang dalam rentang yang ditentukan menunjukkan bentuk kurva yang pasti. Bentuk kurva bergantung waktu ini berisi informasi, properti, atau pola yang sesuai dengan nilai target pada keluaran jaringan saraf.

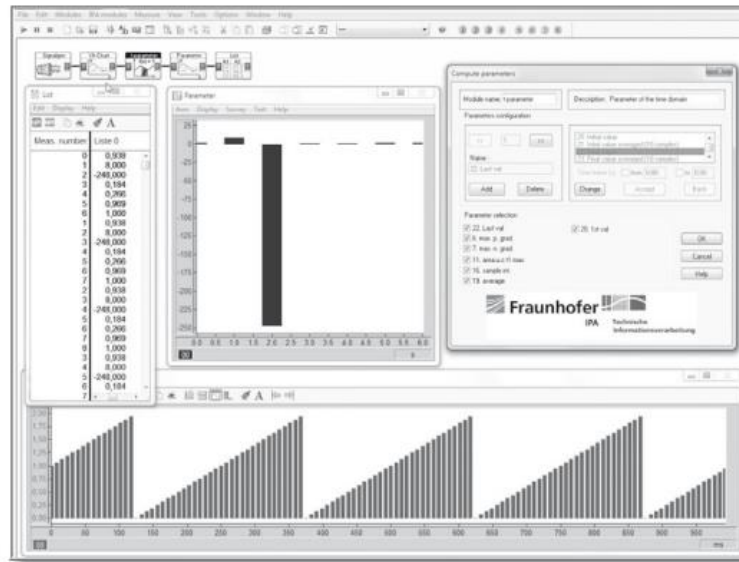
Parameter yang diekstraksi dari sinyal-sinyal ini dapat dialokasikan ke rentang waktu dan juga rentang frekuensi. Oleh karena itu, dua modul parameter disediakan untuk prapemrosesan sinyal. Satu modul mengevaluasi perjalanan waktu, yang lain mengevaluasi karakteristik spektral.

NB: Jaringan saraf juga digunakan di luar bidang teknologi dan ilmiah (lihat contoh). Materi data tidak harus memiliki sumbu waktu dan oleh karena itu tidak ada karakteristik spektral dalam arti fisik!

Modul "Menghitung Parameter"

Tujuan dari pra-pemrosesan sinyal adalah reduksi data. Tujuannya adalah untuk mengekstrak parameter signifikan dari data atau sinyal yang khas dari karakteristik pembeda dari berbagai nilai target jaringan saraf. Modul parameter menyediakan serangkaian fungsi matematika untuk tujuan ini.

Gambar 284 menjelaskan proses pemilihan parameter. Generator di sini menyediakan gigi gergaji (berkala) yang terdiri dari 256 nilai diskrit. Di menu, berbagai parameter dipilih, dalam hal ini 7 semuanya. Pada output modul parameter, parameter diskrit muncul dalam urutan yang ditentukan oleh pilihan (lihat jendela parameter). Reduksi data dengan faktor 36 (256/7) dapat dilihat dengan jelas ketika sinyal parameter dibandingkan dengan sinyal gigi gergaji.



Gambar 285: Modul Parameter Untuk Rentang Waktu

Fungsi modul parameter dapat diuji menggunakan sistem pengujian yang ditunjukkan di bagian kiri atas Gambar. Diagram di bagian bawah menunjukkan sinyal input, gigi gergaji. Fungsi matematika tercantum dalam menu modul ini yang tersedia sebagai parameter dan dapat dipilih satu demi satu. Fungsi-fungsi ini terdaftar dan dijelaskan di menu bantuan..

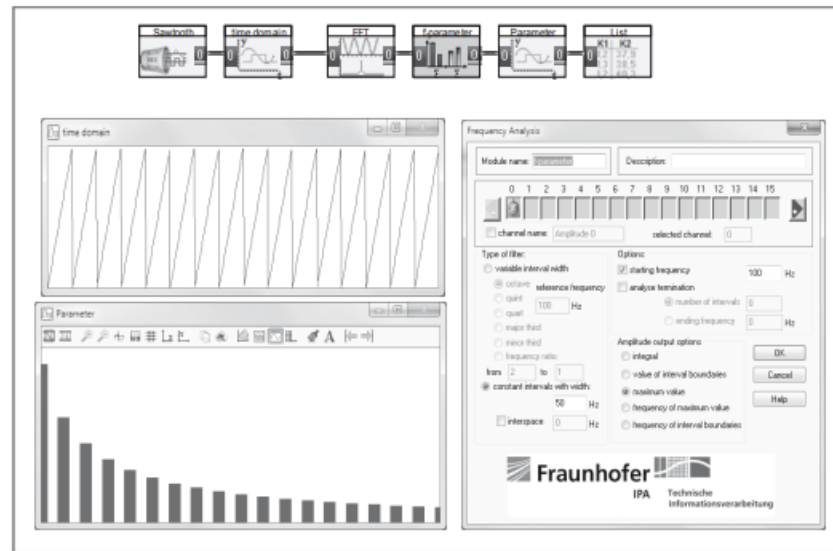
Dalam kalimat pemilihan, nilai yang dihitung muncul di pintu keluar modul (cari parameter sinyal yang ditampilkan sebagai kolom). Proses sinyal ini semata-mata tergantung pada kalimat parameter yang dipilih, tidak signifikan secara fisik. Karena "fungsi lumpatan" gigi gergaji, nilai dominan -248 hasil.

Reduksi data adalah tujuan dari pra-pemrosesan sinyal. Semakin rendah jumlah nilai target pada output jaringan saraf, semakin rendah jumlah parameter yang dipilih.

Parameter yang dipilih harus membuat semua nilai target dapat dibedakan. Setidaknya ada dua cara yang menjanjikan untuk mencapai hal ini:

Mempertimbangkan dan mengevaluasi koneksi matematis dan fisik yang berbeda dari nilai target.

Verifikasi grafis dari pembedaan grafis dari nilai target dengan "presentasi air terjun" seperti pada Gambar 291.



Gambar 286: Memilih Dan Mengonfigurasi Parameter Frekuensi

Ini adalah sistem pengujian sederhana untuk mempelajari lebih lanjut tentang modul parameter frekuensi. Pada input, osilasi gigi gergaji periodik 52 Hz digunakan. Rentang frekuensi tertentu sekarang harus dipilih dalam menu.

Mulai dari 50 Hz, interval frekuensi bandwidth konstan (50 Hz) dikonfigurasi tanpa celah, menghasilkan 18 pita frekuensi pada frekuensi batas 1000 Hz. Oleh karena itu, setiap pita frekuensi mengandung bagian tertentu dari sinyal. Dari spektrum amplitudo pita frekuensi ini, opsi keluaran sekarang dipilih, mis. "integral" atau "nilai maksimum".

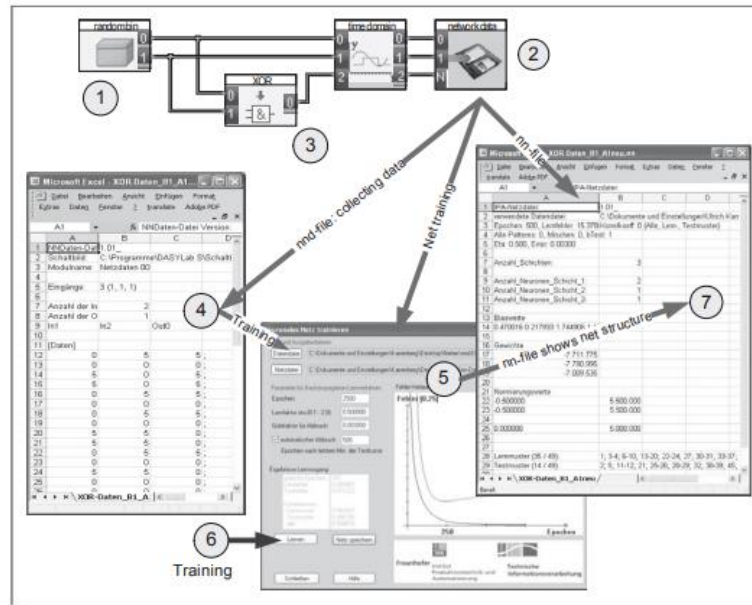
Reduksi data: Dalam kasus di atas, praktis seluruh informasi frekuensi terkandung dalam 18 nilai diskrit, karena dengan lebar interval 50 Hz hanya satu frekuensi yang terletak di setiap interval. Spektrum normal akan memiliki 1024 nilai diskrit. Namun, modul parameter frekuensi atau integral untuk masing-masing dari 18 rentang frekuensi yang ditentukan hanya memberikan 18 nilai diskrit.

Modul Parameter Frekuensi

Untuk menggunakan modul ini, sinyal terlebih dahulu harus diubah menjadi rentang frekuensi oleh FFT. Umumnya, ketika memilih interval frekuensi, ada perbedaan antara lebar interval variabel dan konstan. Dengan lebar interval variabel, interval melebar dari bawah ke frekuensi pembatas, penskalaannya dilakukan dengan "oktaf", "quint", "quart" dll. Modul parameter frekuensi menyediakan satu nilai diskrit untuk setiap interval.

Menjadi sangat diperlukan untuk realisasi jaringan saraf, modul ini dapat digunakan untuk berbagai aplikasi lain yang mencakup pemilihan pita frekuensi tertentu.

Dengan modul "kumpulkan" yang baru, parameter rentang waktu dan rentang frekuensi dapat diringkas dan ditampilkan secara berurutan. Dengan demikian, jaringan saraf dapat secara bersamaan menggunakan parameter waktu dan rentang frekuensi.



Gambar 287: Modul "Kumpulan Data Jaringan"

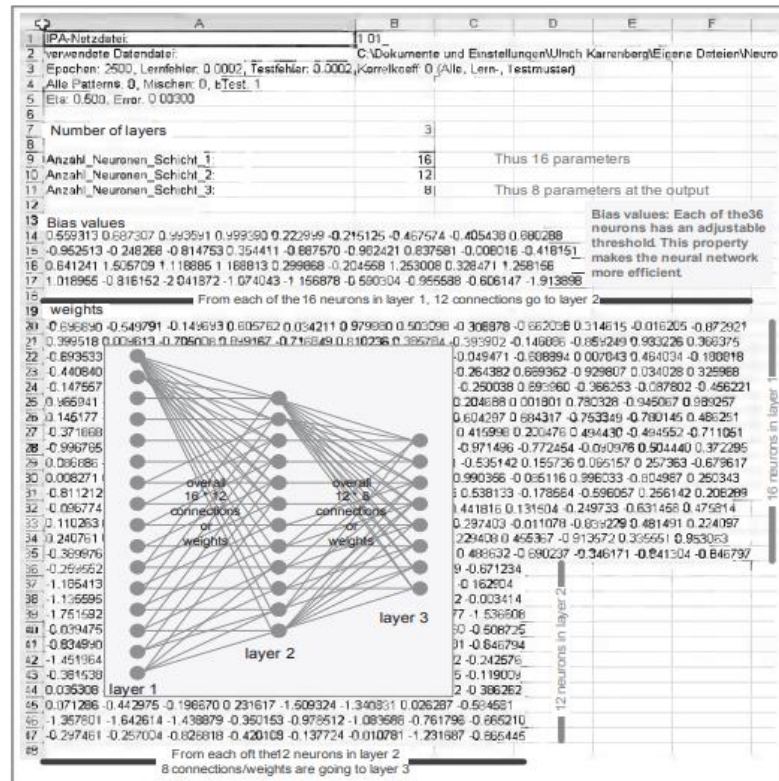
Modul ini menerima data pelatihan, mengevaluasinya dan menggunakannya untuk melatih jaringan saraf. Ini menciptakan modul yang menentukan. Sekali lagi, contoh langsung dari jaringan XOR digunakan untuk membuat data internal modul ini sejelas dan sejelas mungkin.

Seluruh proses dapat digambarkan sebagai berikut: (1) Generator pola biner ("modul kotak hitam") menyediakan sinyal biner stokastik dua saluran dengan nilai 0 dan 5 (tingkat TTL). Pola biner ini mencapai modul "kumpulkan data jaringan" (2) serta gerbang XOR (3). Yang terakhir memberikan sinyal output XOR yang benar. Sinyal ini dikirim ke input N dari modul "kumpulkan data jaringan". Input ini menerima sinyal yang nantinya akan ditampilkan pada output dari jaringan saraf dengan kombinasi input biner sekarang karena, dalam hal ini 0 atau 5.

Data input dan output dari jaringan saraf berikutnya awalnya diarsipkan dalam file nnd, terstruktur dengan jelas (4), di sini digambarkan di sini sebagai file EXCEL. Seluruh struktur jaringan saraf sekarang harus dihitung dari tombol ("belajar" (6) ini). Sebuah subprogram mengubah bobot dan meminimalkan kesalahan menggunakan backpropagation sampai kesalahan ini berada di bawah batas yang telah ditentukan. Hasil perhitungan ini diarsipkan sebagai file jaringan (file nn) (5). File jaringan (7) ini memberikan deskripsi lengkap tentang jaringan saraf berikutnya (lihat juga Gambar 287).

Modul "Kumpulan Data Jaringan"

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 286, modul ini tidak hanya mengumpulkan data tetapi dengan cara tertentu merupakan dasar aktual untuk pembuatan jaringan saraf. Jumlah neuron dari lapisan input dari jaringan saraf berikutnya hanya dihasilkan dari jumlah parameter yang muncul pada output modul parameter atau/dan modul parameter frekuensi.



Gambar 288: Struktur Dan Data Jaringan Dari File nn

Jaringan saraf yang dihasilkan dari file nn ini akan memiliki 16 neuron input di lapisan 1, 8 neuron keluaran di lapisan 3. Karena perhitungan otomatis jaringan, lapisan tersembunyi di sini memiliki 12 neuron. Setiap neuron terhubung ke setiap neuron dari lapisan berikutnya. Hasilnya, ada $16 \cdot 12 = 172$ koneksi dan pembobotan antara lapisan 1 dan lapisan 2, antara lapisan 2 dan 3 $12 \cdot 8 = 96$ sambungan dan pembobotan. Gambar mencakup penjelasan lebih lanjut.

Jumlah neuron keluaran dihasilkan langsung dari jumlah nilai target yang diberikan ke input N dari modul "kumpulkan data jaringan". Oleh karena itu, jaringan XOR selalu memiliki dua neuron input dan satu neuron output.

Sekilas Di Balik Layar Desain Jaringan

Menu modul "kumpulkan data jaringan" mencakup beberapa parameter yang lebih dapat disesuaikan dan Gambar pada proses propagasi balik. Proses yang menentukan adalah transformasi file *.nnd melalui pelatihan menjadi file jaringan *.nn. Berikut adalah informasi lebih lanjut dalam hubungan ini:

- Data yang disertakan dalam file *.nnd dibagi dalam rasio 2 banding 1 menjadi data pelatihan dan data uji. Yang terakhir berfungsi untuk memverifikasi dan menilai kualitas jaringan. Dengan rangkaian pengukuran yang dicatat secara berurutan, sering terjadi akumulasi rangkaian tes dengan nilai pola pembelajaran yang lebih kecil diikuti oleh akumulasi rangkaian tes dengan nilai yang lebih tinggi atau sebaliknya. Untuk menghindari pelatihan dengan data yang berbeda dari yang digunakan dalam tes, data

diacak terlebih dahulu dan dibagi menjadi sekitar 10 hingga 20 kelas. Kelas-kelas ini kemudian dibagi dengan kelas dengan perbandingan 2 banding 1. Jadi, nilai rendah dan tinggi dapat ditemukan dengan kemungkinan besar baik dalam data pelatihan maupun data uji.

- Jumlah epoch menunjukkan seberapa sering proses backpropagation dengan pola pembelajaran dari data latih dioperasikan. Data uji tidak berjalan melalui proses propagasi balik, karena memiliki fungsi kontrol. Untuk membuat kondisi pengujian yang sebenarnya, data yang terlibat dalam konfigurasi jaringan saraf tidak boleh digunakan.
- Kesalahan pembelajaran dan pengujian dihitung setiap lima epoch untuk tampilan kesalahan grafis dari pola pembelajaran dan pengujian dalam menu. Jadi dengan 5000 epoch, misalnya, tidak ada poin lebih dari yang diperlukan yang dihitung untuk visualisasi, mis. untuk resolusi monitor 1024 • XGA
- Faktor pembelajaran adalah faktor pembobotan yang dengannya "kesalahan" sesaat neuron dimasukkan ke dalam modifikasi pembobotan berikutnya. Logikanya, jumlah epoch pembelajaran tergantung langsung pada faktor pembelajaran, faktor pembelajaran lagi secara kompleks juga tergantung pada struktur jaringan dan data pelatihan. Dengan faktor pembelajaran yang lebih kecil, dengan sedikit modifikasi bobot dari epoch ke epoch, waktu sebelum pembuatan akhir jaringan lebih besar karena jumlah run yang lebih tinggi.
- Korelasi menggambarkan kesamaan antar pola. Faktor korelasi disini adalah derajat kesamaan nilai target (nilai nominal) dan nilai prognosis. Dalam menu "train neuronal network", faktor korelasi antara nilai target dan nilai prognosis yang disediakan oleh jaringan dihitung dan ditampilkan masing-masing untuk pola pembelajaran, pola pengujian, dan keseluruhan semua pola. Korelasi ini memungkinkan kesimpulan tentang ukuran kesalahan masing-masing. Bentuk kurva pada menu menunjukkan jumlah epoch dengan ukuran error terkecil.
- Nilai standar: Umumnya, dengan standarisasi (pada kisaran 0...1) dari data masuk dan parameter di pintu keluar, kemungkinan pengaruh yang mendominasi dari nilai input-atau output harus "dilapisi". Dengan demikian, semua nilai masuk memiliki peluang yang kurang lebih sama untuk memengaruhi desain jaringan dalam pelatihan. Ukuran absolut dari data di pintu masuk memang tidak mengatakan apa pun tentang relevansi pengenalan pola di pintu keluar, karena parameter di pintu masuk tidak selalu berhubungan satu sama lain.
- Pada akhirnya, proses pembelajaran harus dibatalkan. Ada dua batasan untuk hal ini: jumlah epoch yang diberikan dalam menu dan undercut dari faktor kualitas. Kesalahan setelah setiap zaman adalah jumlah penyimpangan antara keluar jaringan dan nilai nominal. Jika jumlah ini masing-masing jumlah rata-rata per neuron lebih kecil dari faktor kualitas terikat, pelatihan dibatalkan.

Karena standarisasi dan ketergantungan yang kuat dari data pelatihan, sangat sulit atau hampir tidak mungkin untuk menentukan faktor kualitas yang masuk akal. Sebagai tindakan pencegahan, default selalu mewakili nilai yang sangat kecil (0,003). Selain itu, pembatalan terjadi saat mencapai minimum kesalahan pengujian (lihat di bawah).

Proses Pola Tes Mana Yang Ideal?

Singkatnya: proses pengujian yang ideal tidak ada. Proses pola pembelajaran dan tes harus – mengingat rentang yang lebih besar – terus menurun..

Jika default 2500 epoch tercapai, pelatihan dibatalkan. Jika 10.000 epoch disetujui, sebagai aturan umum bentuk kurva kesalahan pola pembelajaran tidak akan berbeda, kecuali fakta bahwa kesalahan pada setiap pola pembelajaran mungkin menjadi lebih kecil.

Bentuk kurva kesalahan pola uji - karena validasi dengan pola uji - pada awalnya juga menurun secara permanen. Namun, setelah itu, ada minimum, tergantung pada kualitas data pelatihan (lihat Gambar 286), dari mana bentuk kurva meningkat.

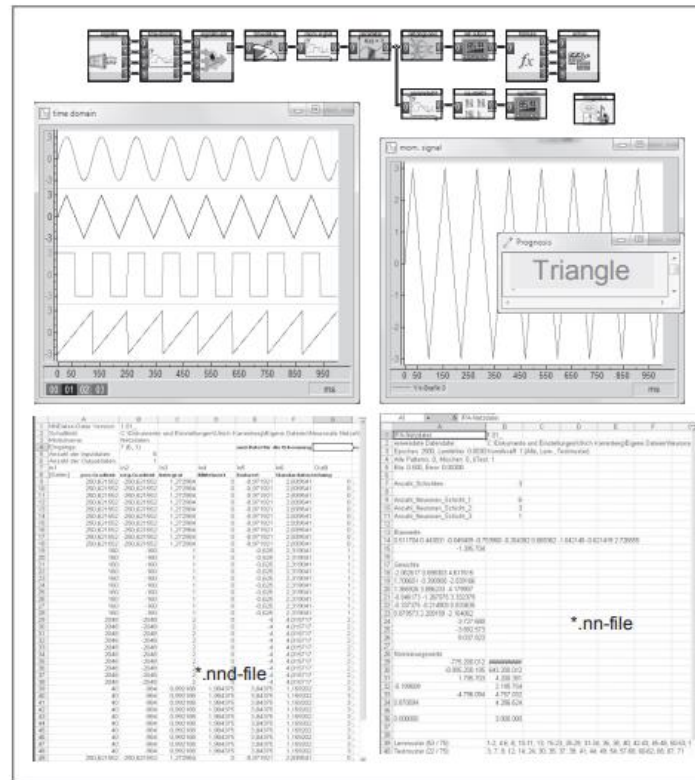
Bentuk kurva dari kesalahan pola pengujian yang meningkat setelah minimum dapat diartikan sebagai penurunan kemampuan jaringan untuk menggeneralisasi.

Konfigurasi jaringan yang relatif terbaik dengan inisialisasi awal saat ini dan data uji yang dipilih secara acak adalah proses minimum dari kesalahan pola pengujian. Agar diakui secara objektif, pelatihan dibatalkan setelah 500 epoch setelah minimum ini, mengingat, tidak ada minimum lain yang muncul. Konfigurasi jaringan yang termasuk dalam minimum ini disimpan.

Proyek: Pengenalan Pola Sinyal Dari Generator Fungsi

Untuk membuat langkah-langkah proyek yang berbeda secara transparan, pengenalan pola yang awalnya tampak agak sederhana dipilih. Empat sinyal periodik – sinus, segitiga, persegi panjang dan gigi gergaji – dengan frekuensi dan amplitudo yang sama harus dibedakan.

Tugas di atas menyediakan data pelatihan yang hampir ideal. Gambar 288 menunjukkan kumpulan mereka serta bagian dari file *.nnd dan *.nn. Pengamatan lebih dekat mengungkapkan karakteristik yang mencolok: sinyal sinus dan sinyal segitiga sangat mirip, baik dalam rentang waktu maupun dalam rentang frekuensi (Gambar 31 dalam bab 2; amplitudo harmonik ganjil yang lebih tinggi dari segitiga berubah dengan $1/n^2$).

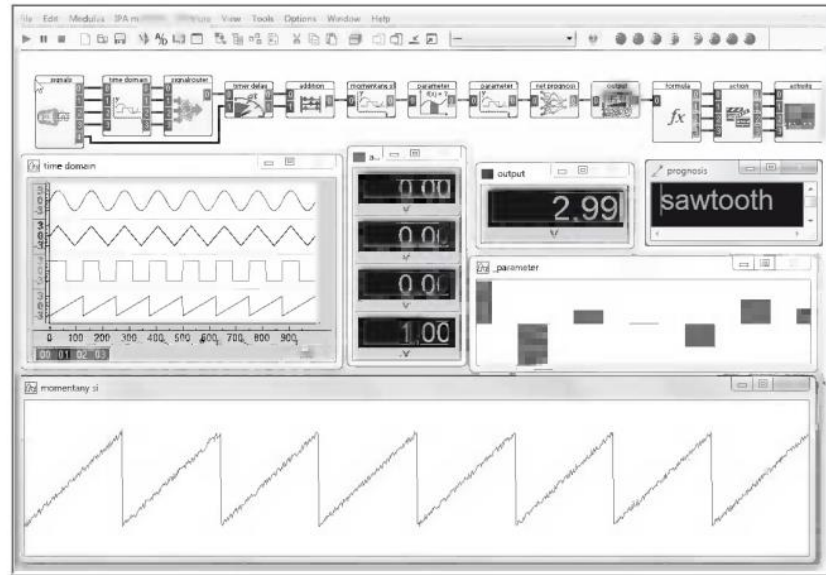


Gambar 289: Jaringan Saraf Untuk Mengenali 4 Sinyal Periodik Yang Berbeda

Gambar menunjukkan proses penting dalam mengumpulkan data pelatihan, mengidentifikasi struktur jaringan dan pelatihan jaringan. Dengan bantuan diagram blok, Anda dapat melihat: pertama, empat sinyal dihasilkan dengan modul generator, kemudian satu demi satu dipilih oleh sakelar, kemudian diumpungkan ke modul parameter. 6 parameter (gradien pos. maks., gradien neg. maks., integral, rata-rata, nilai akhir dan ketidakteraturan standar) diarsipkan dalam file *.nnd. Setiap sinyal menerima "nilai target", mis. segitiga = 1, sinus = 2 dst. Saat ini, sinyal segitiga dengan nilai target 1 (di pintu keluar dari jaringan saraf) diproses.

Melihat file *.nnd di sebelah kiri menunjukkan seberapa masuk akal parameter yang dipilih. Mereka membuat empat sinyal dapat dibedakan dengan sempurna. Masing-masing dari empat sinyal telah dibaca 10 kali. Nilai target masing-masing berdiri di sisi kanan dan mewakili (kode) jenis sinyal.

File *.nn- (jaringan) yang diatur dengan sangat jelas menyediakan data apa pun tentang struktur jaringan dan ukuran jaringan. Contoh ini menunjukkan dengan sangat jelas ketergantungan langsung ukuran jaringan dari jumlah nilai target. Yang belum bisa dikenali adalah kemiripan yang kuat antara sinus dan segitiga. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 289.



Gambar 290: Pengenalan Yang Salah Jika Terjadi Kebisingan Yang Tumpang Tindih

Parameter rentang waktu yang dipilih bereaksi sangat sensitif terhadap gangguan proses sinyal oleh noise. Misalnya, kedua parameter "gradien positif maksimum" dan "gradien negatif maksimum" sangat berfluktuasi. Parameter tidak berubah dibandingkan dengan Gambar 288.

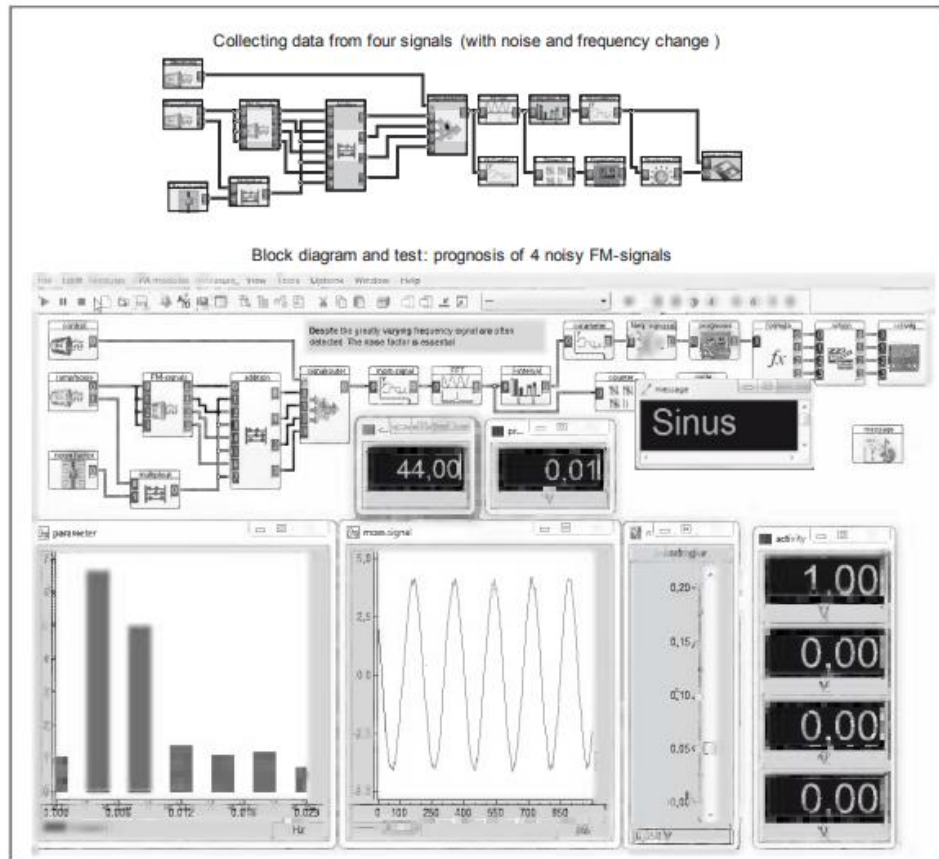
Namun untuk beberapa alasan, pengenalan sinyal yang benar pada Gambar 289 dan 290 tidak sederhana itu sama sekali. Karena keempat sinyal memiliki frekuensi (dasar) yang sama, fitur pembeda yang penting dihilangkan. Dengan keempat sinyal periodik, integral di seluruh proses adalah nol. Juga, nilai awal dan nilai akhir serupa.

Melihat lebih dekat pada data pelatihan (file *.nnd, lihat Gambar 287), data cocok setelah setiap individu berlari sejauh mungkin hingga posisi setelah titik desimal. Ini berarti data pelatihan sama sekali tidak ideal karena sebenarnya data yang digunakan selalu sama.

Kekokohan jaringan saraf juga disediakan oleh fluktuasi tertentu dari data pelatihan.

Hanya dengan ini, "proses belajar" yang sebenarnya tidak akan terjadi sampai saat ini. Fluktuasi di dalam data pelatihan secara langsung diterapkan dalam toleransi jaringan saraf terhadap perubahan kecil.

Ketika tidak ada fluktuasi, bahkan dipertanyakan apakah jaringan saraf adalah solusi yang cocok sama sekali.



Gambar 291: Data Pelatihan Variabel: Sinyal Modulasi Frekuensi Dan Noise

Kedua diagram blok untuk "mengumpulkan data" dan "prognosis" identik hingga modul di sisi kanan. Data latih dan data uji yang lebih rendah ditumpangkan dan frekuensi dimodulasi oleh sinyal noise 0,045V, sehingga frekuensinya bisa lebih dari dua kali lipat. Tercatat adalah parameter rentang frekuensi. Namun demikian, sinyal dikenali lebih andal daripada dalam "kasus umum" dari Gambar 289. Ini secara signifikan mendukung tesis dari sebelumnya.

Pengujian yang dijelaskan dalam Gambar 288 dapat divariasikan sehingga sinyal yang sedikit bising dapat digunakan untuk pengumpulan data masing-masing pelatihan. Selain itu, perubahan permanen frekuensi dasar (dalam rentang tertentu) dari empat sinyal dilakukan. Sebenarnya, empat sinyal dalam Gambar 290 juga dimodulasi frekuensi.

Selanjutnya, parameter rentang frekuensi sekarang digunakan. Dari sudut pandang fisik, berikut adalah keuntungan tertentu yang ada. Pertama, di dalam pita frekuensi yang digunakan, noise kurang terlihat karena didistribusikan ke seluruh pita, yang menyisakan sangat sedikit untuk masing-masing pita. Selain itu, garis spektral dari 4 sinyal kuasi mewakili singularitas, yang mudah dikenali dan dievaluasi. Terlepas dari karakteristik pengenalan yang jauh lebih sulit, jaringan saraf mengenali sinyal lebih baik dari sebelumnya (tegangan noise 0,045V).

Pengenalan Ucapan Sebagai Contoh Pengenalan Pola Nyata Yang Sangat Kompleks

Pengenalan pola dari 4 sinyal periodik adalah "sintetis" dengan cara tertentu: polanya secara formal dapat dideskripsikan (teori!) dan sebagai hasilnya mudah dikenali. Selanjutnya, materi pelatihan tidak mengalami fluktuasi.

Mempertimbangkan hal ini, sinyal suara adalah kebalikannya. Mereka tidak dapat digambarkan secara formal dan selalu mengalami fluktuasi yang besar. Setiap kata yang diulang sangat berbeda dalam aspek waktu dan spektrum dari pendahulunya. Namun, karena kita tetap mengenalinya, harus ada kesamaan!

Memikirkan kemungkinan metode pengenalan suara di tempat pertama perlu memikirkan bagaimana sifat kepala sekolah – menggunakan contoh telinga manusia – memberikan pengenalan pola ini dengan sangat baik.

Komentar:

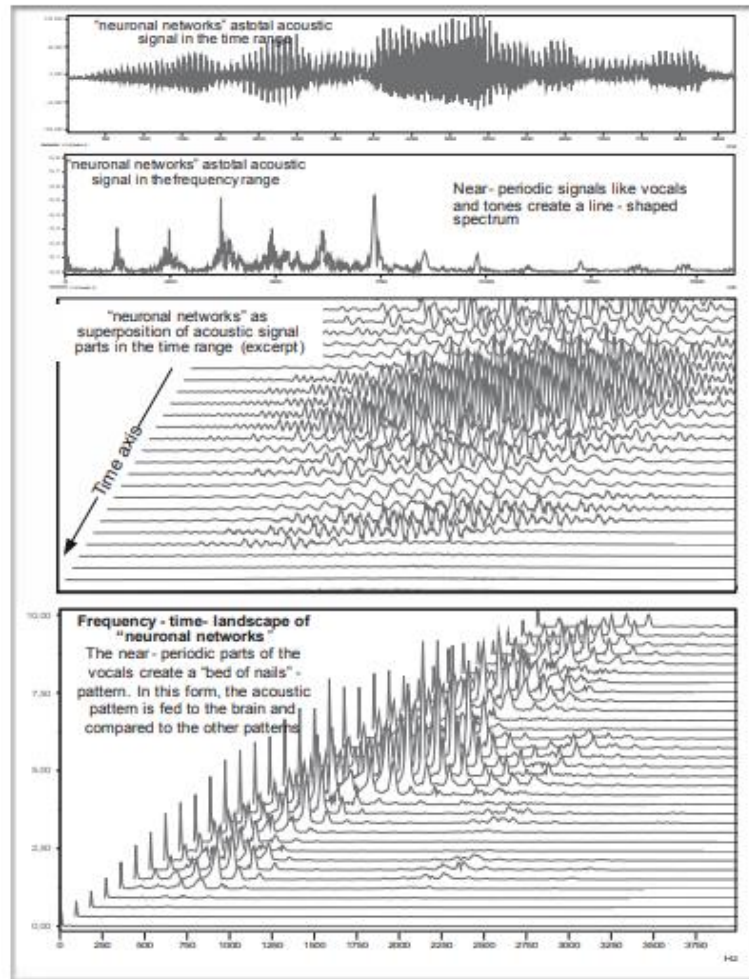
Namun, proses yang tepat dari pengenalan sinyal akustik oleh telinga dan otak belum sepenuhnya diketahui. Diketahui bahwa kita hanya mendengar "frekuensi", sehingga sinyal selalu mengalami semacam transformasi FOURIER di telinga. Dari sudut pandang fisik, tidak ada tanda-tanda proses yang secara umum berbeda. Namun, ini harus diterapkan secara permanen pada sampel suara atau musik pendek, jika tidak, musik tidak akan dapat didengar sampai simfoni berakhir.

Di sisi lain, sinyal akustik seperti itu tidak bisa begitu saja dipotong menjadi potongan-potongan waktu, karena dalam proses ini informasi akan dipotong dan dengan demikian hilang. Untuk menghindari hal ini, bagian informasi harus tumpang tindih. Prinsip ketidakpastian (Bab 3) dengan ini menyerukan tumpang tindih "halus" dengan bantuan fungsi jendela yang sesuai, karena perubahan tiba-tiba dari proses waktu akan menyebabkan frekuensi tambahan yang tidak termasuk dalam sinyal akustik yang sebenarnya.

Setara dengan ini setelah prinsip simetri (Bab 5) adalah diseksi pita frekuensi menjadi bagian-bagian frekuensi. Semakin sempit ini, semakin lama bagian waktu pelengkap harus bertahan (prinsip ketidakpastian), yang akan menyebabkan tumpang tindih dalam rentang waktu.

Melihat fisika koklea, alam tampaknya lebih menyukai proses ini (lihat Gambar 79 dalam bab 4). Proses pengendapan bidang selektif frekuensi ini (filter) akhirnya mengarah pada superposisi dari banyak proses waktu menjadi satu kesatuan.

Sementara dalam rentang waktu superimposisi menghasilkan "kesibukan" yang agak besar, situasi dalam rentang frekuensi sama sekali berbeda. Karena vokal membentuk suara dan nada musik, bagian-bagian yang hampir periodik ini menghasilkan semacam pola dasar, di mana informasi suara yang sebenarnya disimpan di dalamnya.

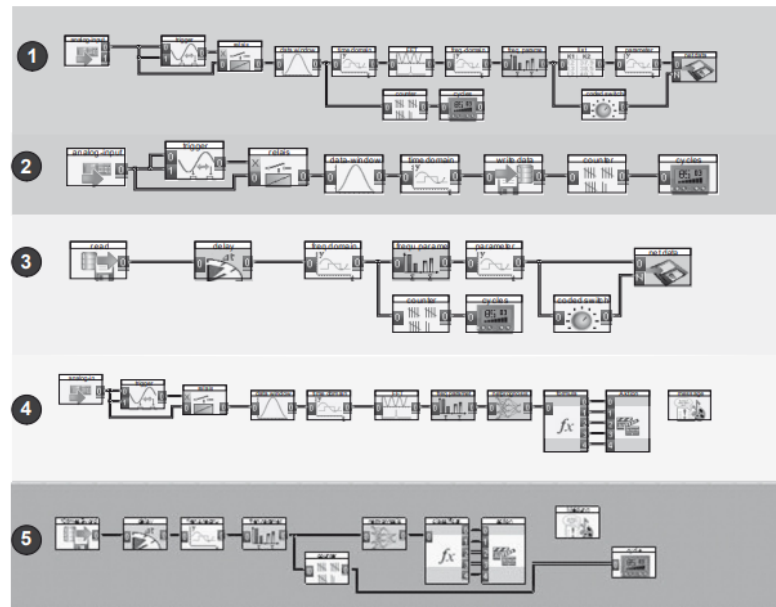


Gambar 292: Tentang Dasar-Dasar Fisik Dan Masalah Pengenalan Suara

Melalui mikrofon, istilah "jaringan saraf" diajukan sebagai sinyal akustik. Di atas, sinyal ini ditampilkan secara keseluruhan dalam rentang waktu dan frekuensi. Karena alasan yang disebutkan, untuk tujuan pengenalan sinyal akustik, sinyal total harus dibedah dalam bagian waktu atau frekuensi (lihat juga bab 4).

1. Karena bagian-bagian yang hampir periodik dalam suara (vokal) atau musik (nada), sebuah pola yang menyerupai "tempat tidur paku" semuanya menghasilkan rentang frekuensi. Identifikasi masing-masing asosiasi sinyal akustik di otak ini kira-kira dapat dijelaskan sebagai pengenalan pola dari "tempat tidur paku" tersebut. Ini terutama berlaku untuk pengenalan suara elektronik melalui komputer.
2. Diagram langsung untuk pembangkitan jaringan. Sinyal direkam melalui mikrofon dan diubah. Kemudian parameter frekuensi terdeteksi dan file *.nnd dibuat. Akhirnya file *.nn dibuat melalui pelatihan jaringan. Kerugian: deteksi parameter optimal yang lama. Penggunaan mikrofon secara konstan.
3. Diagram untuk pembangkitan spektrum multi file. Masing-masing dari 5 kata diucapkan 10 kali. Keseluruhan 50 spektrum diajukan dalam file total atau multi file sebagai bahan dasar untuk semua pengujian lebih lanjut (file referensi). Semua tes lebih lanjut mulai sekarang tanpa mikrofon.

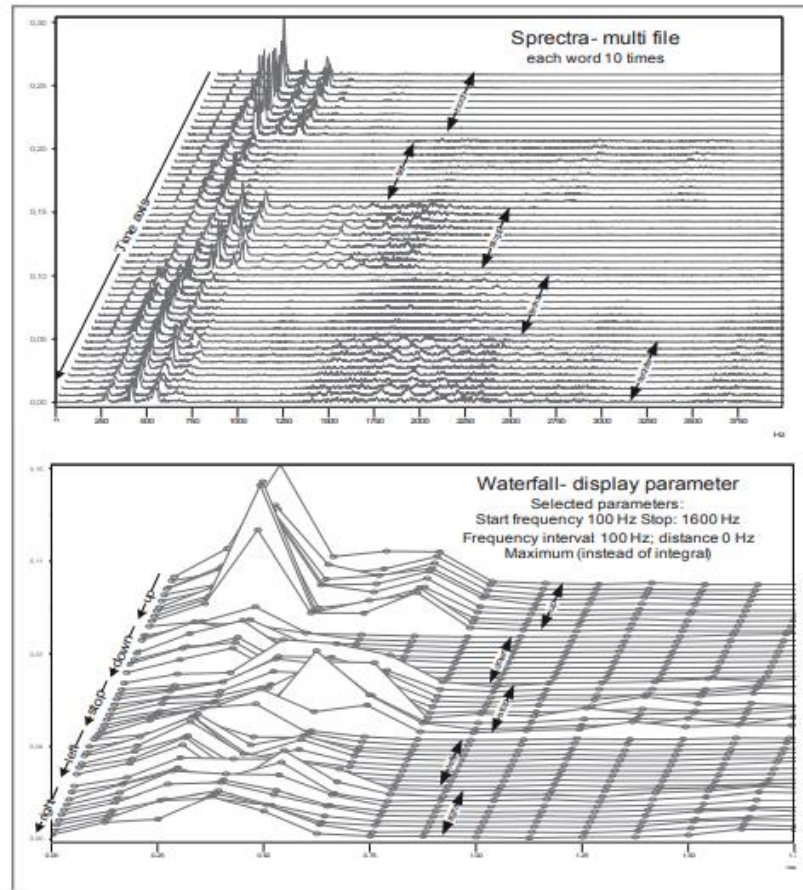
4. Dengan bantuan file referensi, file *.nnd yang optimal dapat dideteksi dalam pengujian dengan pemilihan parameter yang cerdas. Dari sini, file *.nn dapat dibuat.
5. Prognosis switch: melalui mikrofon, toleransi jaringan saraf dapat diuji.
6. Karena proses pengenalan suara yang disederhanakan sangat bergantung pada speaker, rkuualitas jaringan dapat dikontrol paling mudah dengan file referensi speaker.



Gambar 293: Diagram Blok Dari Proyek Pengenalan Suara Yang Digunakan

Dalam dokumen elektronik, 5 sakelar dapat diaktifkan dengan mengklik tombol berwarna..

Sayangnya, tidak (belum) mungkin untuk secara langsung memproses pola “bed-of-Nails” lengkap dalam bentuk array dua dimensi dengan DASYLab. Jadi, kita harus menggunakan "pola akustik" seperti pada bab 4, masing-masing berlangsung tepat 1 detik. Juga dipetik lagi contoh dari bab 4 berupa kemudi akustik forklift dengan bantuan kata “atas”, “bawah”, “berhenti”, “kiri” dan “kanan”.

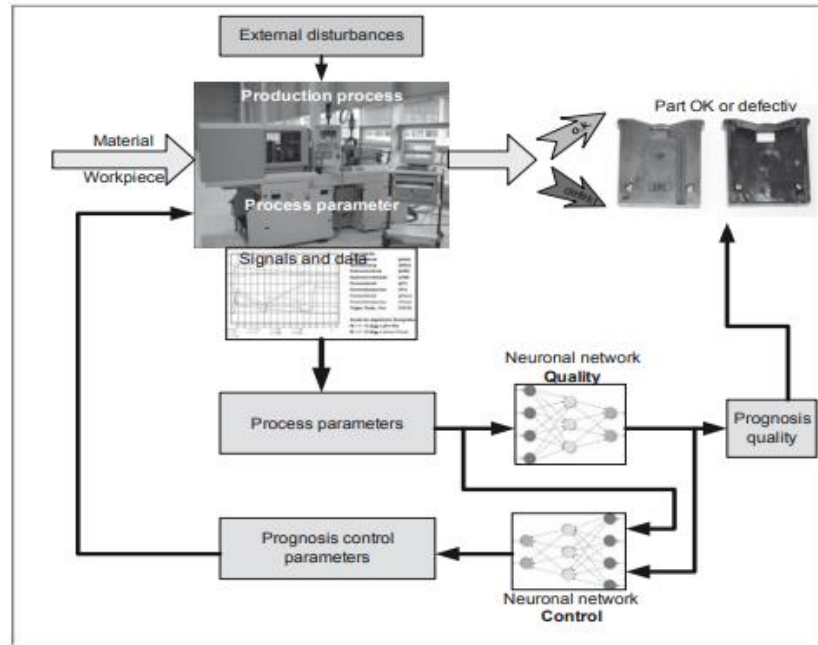


Gambar 294: Visualisasi Fitur Pembeda Dari Nilai Target

Lanskap frekuensi-waktu di bagian atas gambar menunjukkan perbedaan spektral yang jelas antara beberapa kata. Ini sudah merupakan indikasi penting mengingat kualitas bahan referensi. Jaringan saraf tetap diberi makan dengan parameter yang juga dapat digambarkan oleh tampilan air terjun. Di sini juga dapat ditemukan fitur pembeda untuk semua 5 kata.

Materi pelatihan dapat disiapkan dengan mengulang setiap 5 kata misalnya 10 kali dan ini secara keseluruhan 50 spektrum digunakan dalam satu file *.ddf masing-masing *.nnd. Untuk mencapai ini, konstelasi tertentu disesuaikan dalam menu modul parameter frekuensi (misalnya, frekuensi awal 50Hz, rasio frekuensi 12 hingga 9, jumlah interval: 8).

Segara setelah file *.nnd ada, pelatihan jaringan dapat dimulai. Sebagai hasil dari proses pembelajaran, file jaringan *.nn telah tersedia.



Gambar 296: NEPRES Dalam Penggunaan Industri: Gambaran Umum Skema

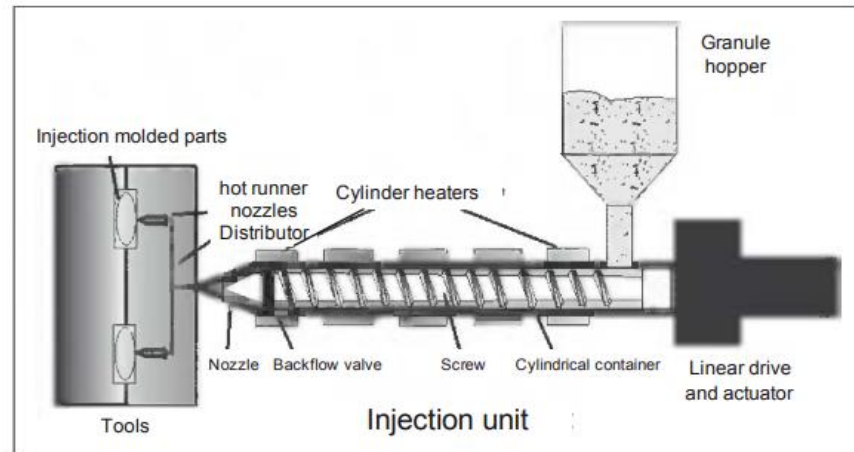
Target di sini adalah mewujudkan produksi dengan tingkat kesalahan serendah mungkin. Ini membutuhkan metode yang memungkinkan pernyataan kualitas yang disinkronkan siklus dengan praktis tanpa penundaan waktu. Karena pemantauan fluktuasi kualitas yang terintegrasi dalam proses dan pengaturan parameter penyesuaian yang dibangun di atasnya, reaksi cepat terhadap variasi kualitas masing-masing proses ini dimungkinkan. Hal ini dicapai dengan model pemantauan data proses masing-masing parameter proses, di mana melalui jaringan saraf variasi kualitas produk dapat dideteksi (sumber: Fraunhofer IPA).

Jika sudah di sini tidak ada visual atau hanya perbedaan yang tidak pasti dapat ditemukan, bahan referensi baru harus diterapkan. Yang lebih efisien adalah tampilan parameter air terjun yang sesuai. Jika perbedaan yang jelas diberikan, jaringan saraf yang dihasilkan akan berhasil bekerja dengan probabilitas yang sangat tinggi (lihat juga Gambar 293).

Jaringan Saraf Dalam Penggunaan Industri

Hubungan antara sebab dan akibat dalam prosedur nyata seperti proses produksi industri seringkali sangat kompleks. Kompleksitas yang tinggi ini juga merupakan hasil dari banyaknya parameter interaktif secara bersamaan. Selain itu, berbagai macam faktor yang mempengaruhi serta gangguan kebetulan yang tak terhindarkan memainkan peran besar. Proses nyata karena itu menghindari deskripsi formal analitik dan tepat dari koneksi ini sejauh mungkin.

Selama ini pemantauan kualitas produk manufaktur kebanyakan dilakukan dengan pemeriksaan lanjutan, dengan sampel atau bahkan dengan pemeriksaan 100%.



Gambar 297: Prinsip Proses Pencetakan Injeksi Plastik

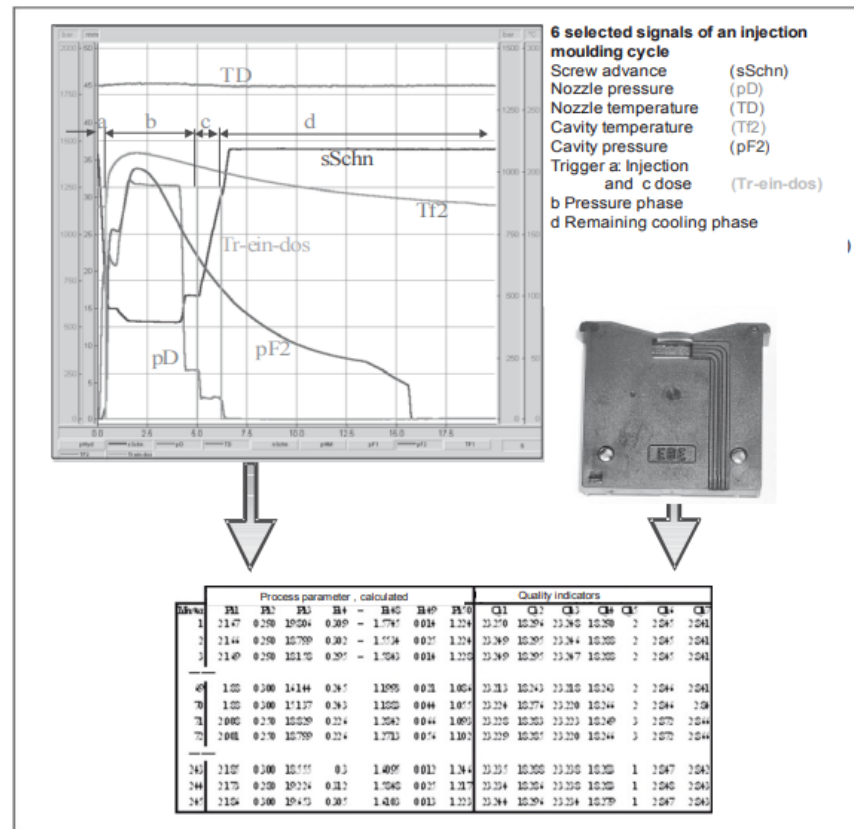
Cetakan injeksi plastik adalah proses pembentukan utama, di mana hampir semua bagian dapat dibentuk dari butiran plastik. Pada awalnya, granul dilelehkan pada ca. 160 - 300 derajat (tergantung material) dan disuntikkan ke dalam cetakan (disebut rongga) alat pada tekanan beberapa ratus bar. Setelah fase pendinginan tertentu, alat dibuka dan bagian-bagiannya dikeluarkan. Sebagian besar informasi tentang prosedur dalam proses dan fluktuasi yang terjadi termasuk dalam sinyal yang diambil langsung dari rongga tempat bagian itu dibuat. Karena itu, sebagian besar sinyal tekanan dan suhu dari alat digunakan untuk pemantauan proses.

Yang terakhir diminta terutama untuk suku cadang yang relevan dengan keselamatan atau untuk produk sederhana (berharga rendah), mis. pin ulir, yang nantinya digunakan dalam rakitan besar dan, jika terjadi kerusakan, akan menyebabkan pengerjaan ulang yang mahal atau menyebabkan kerusakan total pada rakitan. Meskipun semakin banyak inspeksi yang diotomatisasi mis. dengan menggunakan pemrosesan citra industri, banyak prosedur inspeksi dilakukan oleh personel yang terlatih khusus dalam produksi.

Memeriksa suku cadang di akhir produksi selalu sangat mahal. Jika bagian yang rusak terjadi dalam jumlah yang lebih besar pada pemeriksaan, ini sebagian besar mengarah pada penghentian proses produksi dan sebagai akibat dari kehilangan produksi lebih lanjut. "Koreksi" yang diperlukan dari proses produksi sebagian besar memerlukan beberapa tes dan inspeksi yang dapat berlangsung selama berjam-jam. Kesalahan yang tidak terdeteksi dan sebagai hasilnya dapat menyebabkan keluhan pelanggan, dalam kasus terburuk mereka dapat memicu kecelakaan dengan cedera pribadi yang menyebabkan kerusakan atau penarikan produk yang mahal.

Oleh karena itu, tujuan setiap produsen harus menghasilkan kualitas tanpa harus memeriksanya dengan mahal!

Cara terbaik untuk mencapai ini mengarah pada pemantauan langsung proses produksi.



Gambar 298: Sinyal Sensor, Pembuatan Data Pelatihan

Pada dasarnya Anda dapat mengatakan, semakin banyak informasi dari proses yang langsung tersedia (dalam banyak kasus sebagai data terukur dari beberapa sensor), semakin baik suatu proses dapat dipantau, asalkan pemrosesan sinyal (otomatis) yang sesuai dan interpretasi sinyal. Banyak alat dibatasi untuk membatasi pemantauan beberapa parameter sinyal mis. maxima atau integral atau pengamatan pita toleransi sinyal. Sebagai alternatif, Institut Fraunhofer für Produktionstechnik und Automation (IPA) dalam beberapa tahun terakhir telah mengembangkan sistem yang efisien yang memungkinkan prognosis kualitas untuk setiap bagian yang diproduksi berdasarkan jaringan saraf tiruan dan dengan demikian menjamin pemantauan 100% dari proses manufaktur. .

Selain pemantauan, sistem yang disebut NEPRES ini (catatan kaki: NEPRES = sistem regulasi proses saraf) juga memberikan kemungkinan untuk campur tangan dalam proses jika terjadi fluktuasi kualitas dengan melakukan backcoupling melalui jaringan saraf lebih lanjut.

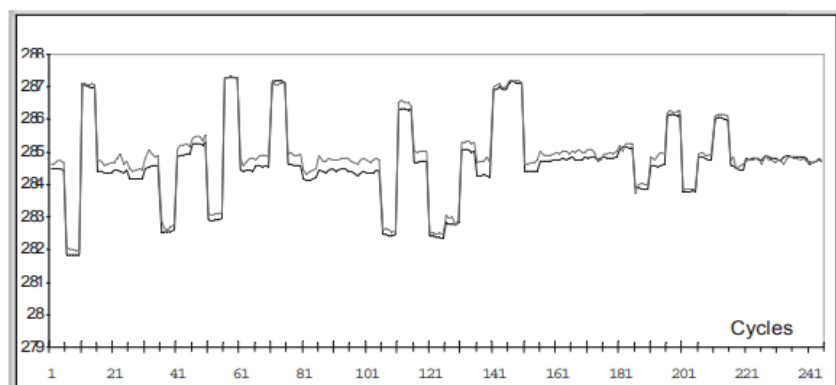


Gambar 299: Produksi Casing Cetakan Injeksi Untuk Jam Digital (Sumber: PKT)

Prinsip sistem ditunjukkan pada Gambar 295. Awalnya, NEPRES dikembangkan untuk memantau proses pencetakan injeksi plastik dan dapat mencapai potensi penuhnya di sana karena pra-pemrosesan yang tersedia dan pengetahuan proses yang dibundel di dalamnya. Karena universalitas pendekatan yang diimplementasikan dan struktur modular – seluruh fungsionalitas termasuk dalam modul yang terintegrasi dalam DASyLab – NEPRES umumnya berlaku untuk berbagai proses.

Sebelum proses pemantauan, sistem harus disesuaikan dengan proses target masing-masing, artinya mis. "pembuatan" data pola dan pelatihan jaringan saraf harus dilakukan. Dalam praktiknya, prosedur sistematis berikut ini ternyata berhasil:

- Langkah pertama untuk setiap proses adalah analisis rinci dari proses target yang direncanakan dengan keterlibatan intens staf sebagai pembawa pengetahuan yang penting. Dengan analisis fitur produk penting yang akan dipantau ditemukan serta parameter proses yang penting untuk mengarahkan proses. Berdasarkan ini, sensor yang diperlukan disimpulkan.
- Setelah proses dilengkapi dengan sensor yang ditentukan sebelumnya, dan setelah kopleng dari seluruh perolehan nilai pengukuran, pengujian dilakukan secara sistematis. Ini diperlukan untuk membuat data pola secara optimal di kemudian hari yang diperlukan untuk pelatihan jaringan saraf.



Gambar 300: Prognosis Dan Data Produk

Berat pelat jam diprediksi dan diukur kembali oleh NEPRES (245 siklus, min. hingga maks. kira-kira 0,05 gram)

- Parameter uji ditentukan oleh rencana uji statistik yang dioptimalkan secara khusus untuk pencetakan injeksi. Dengan ini, informasi maksimum juga tentang efek timbal balik dimungkinkan dengan ruang lingkup pengujian yang relatif kecil. Hal ini diperlukan untuk memungkinkan jaringan saraf untuk secara tepat menampilkan ruang parameter di sekitar titik operasi dan memungkinkan prognosis yang andal yang membentuk dasar penting dari pemantauan sistem.
- Sinyal sensor dari semua siklus produksi bagian uji dicatat dan kemudian digunakan sebagai dasar untuk pembuatan parameter. Setelah pengujian, kualitas bagian yang diproduksi harus ditentukan.
- Parameter yang secara otomatis ditentukan dari sinyal bersama dengan kualitas yang ditentukan masing-masing parameter mesin berfungsi sebagai data pelatihan untuk jaringan regulasi pemantauan masing-masing (Gambar 295).

Setelah pelatihan dan verifikasi wajib, sekarang pernyataan kualitas prognostik untuk setiap bagian yang diproduksi sudah dekat. Proyek aplikasi yang penting dan berhasil diproses adalah pencetakan injeksi pelat jam yang sangat presisi (lihat Gambar 298). Dalam pengujian yang bertahan selama beberapa minggu, sistem NEPRES digunakan untuk memantau dan menyesuaikan kembali proses tersebut.

Dengan demikian dihasilkan ketepatan prognosis yang sangat tinggi (Gambar 299). Fluktuasi dalam operasi 3-shift terus disesuaikan. Sesuai pengguna, dengan sistem NEPRES, produksi tanpa kesalahan berhasil diwujudkan.

Jaringan Saraf: Perspektif Dan Keterbatasan

Jaringan saraf memiliki kemampuan untuk belajar dalam arti tertentu. Fakta ini sendiri merupakan perubahan paradigma dalam pemrosesan sinyal teknis. Hal ini menghasilkan aplikasi baru, bahkan oleh jaringan kerja searah yang relatif kecil dengan propagasi balik menjadi mungkin.

Timbul pertanyaan, apakah jaringan saraf yang jauh lebih besar dari jenis ini pada dasarnya dapat menghasilkan aplikasi baru, membuatnya kira-kira sebanding dengan jaringan saraf biologis. Hal ini sangat mungkin untuk dinegasikan, karena terlalu banyak karakteristik struktural dari jaringan saraf biologis yang hilang, terutama mengenai otak sebagai antetype.

Dalam waktu dekat, akan sangat penting untuk memahami karakteristik struktural yang hilang ini dan menerapkannya sedikit demi sedikit ke dalam jaringan saraf. Dalam hal ini, perspektif yang mulia dapat diramalkan untuk teknologi ini. Itu harus diizinkan untuk merancang kemungkinan arah pembangunan.

Umpan balik bisa dibilang memainkan peran yang menentukan dalam jaringan saraf biologis, terutama di apa yang disebut neokorteks (secara filogenetik bagian termuda, paling berbeda dari korteks serebral manusia, yaitu 90% dari itu), domisili kecerdasan. Di sini, sebagian besar "sirkuit" benar-benar didominasi oleh mekanisme umpan balik. Tidak

diragukan lagi bahwa umpan balik ini adalah resep sukses alam mengenai otak. Namun demikian, tidak ada teori yang disetujui untuk mengapa di luar sana sejauh ini.

Petunjuk:

Harus disebutkan dalam konteks ini, bahwa backpropagation tidak mewakili umpan balik yang nyata. Itu hanya terjadi pada fase belajar, bukan pada fase kerja. Setiap informasi di sini hanya mengalir satu arah dari pintu masuk ke pintu keluar..

Lebih jauh lagi, jaringan saraf kita tidak mengenal waktu. Jaringan saraf biologis memproses aliran informasi yang berubah dengan cepat. Jaringan saraf yang diterapkan di sini sebaliknya memproses pola input statis dan mengubahnya menjadi pola output statis. Kemudian, pola input lain disajikan.

Dalam jaringan saraf yang bekerja searah dengan backpropagation yang digunakan di sini, tidak ada riwayat atau catatan tentang apa yang terjadi beberapa waktu sebelumnya. Tidak mungkin untuk membandingkan pola baru atau pola parsial dengan pola yang telah disimpan sebelumnya, karakteristik mendalam dan sistem yang menentukan dari jaringan saraf biologis. Ini terutama dapat diatur melalui umpan balik.

Mempertimbangkan hal ini, alternatif yang menarik untuk jaringan saraf adalah penyimpanan asosiatif otomatis. Fakta bahwa output neuron diumpangkan kembali ke input adalah perbedaan utama pada jaringan saraf yang diterapkan di sini. Ini mungkin tampak aneh, tetapi loop umpan balik mengarah ke beberapa karakteristik yang menarik. Jika pola aktivitas dikenakan pada neuron ini, mereka menyimpannya melalui umpan balik. Dengan cara tertentu, jaringan asosiasi otomatis berasosiasi dengan dirinya sendiri, oleh karena itu namanya.

Ada dua karakteristik penting yang dihasilkan dari ini:

- Versi pola yang diubah dan tidak sistematis atau sebagian dapat menyebabkan pengambilan pola tersimpan yang benar.
- Jika umpan balik tertunda, rangkaian pola atau pola temporal dapat disimpan.

Begitulah cara manusia mempelajari sesuatu, sebagai rangkaian pola temporal. Umpan balik dan penundaan temporal sangat mungkin merupakan bagian dari "prinsip keberhasilan alam" dan karena itu menjanjikan variasi jaringan saraf pada tingkat teknis. Anehnya, mekanisme umpan balik dalam kombinasi dengan kinerja temporal variabel tampaknya kurang menarik bagi peneliti kognisi, AI, dan jaringan serta ilmuwan saraf. Di mana sampai tingkat tertentu umpan balik diterapkan, seringkali masalah stabilitas seperti osilasi terjadi.

Dengan teknik pencitraan modern dari teknologi medis – terutama pencitraan resonansi magnetik – menjadi mungkin untuk membuktikan dengan pengukuran, area korteks dan bagian otak mana yang aktif pada saat aktivitas motorik tertentu seperti mendengar, melihat, berbicara, dll. . . Dengan kata lain: otak dan terutama korteks dipetakan dengan sempurna dan oleh karena itu sebanding dengan permadani kain perca. Ini menyesatkan asumsi, "pemrosesan sinyal" di korteks akan berbeda dari satu area ke area lainnya. Di sisi lain, analisis anatomi menghasilkan fakta, bahwa seluruh korteks sebagian besar dibangun dengan cara yang sama dan terdiri dari enam lapisan superposisi. Ini berlaku untuk korteks semua mamalia.

Komputer memproses "data" dari semua jenis: teks, gambar, sinyal akustik, dll. . Pemrosesan umumnya selalu sama, tidak tergantung pada bentuk data yang berbeda. Dari sudut pandang fisiologis, ini juga berlaku untuk otak, karena neuron adalah neuron. Tidak mungkin bagi mereka untuk berbeda antara mis. bentuk fisik impuls yang dikondisikan motorik dan semacamnya dari organ indera apa pun. Bahkan, organisasi dalam tampaknya memutuskan area mana yang bertanggung jawab atas sesuatu.

Keenam lapisan menunjuk ke model hierarkis pemrosesan sinyal, setidaknya ini adalah asumsi yang sering diucapkan. Model ini memiliki keunggulan untuk dapat menjelaskan secara masuk akal karakteristik tertentu dari otak. Salah satu karakteristik ini adalah penyimpanan pola dalam bentuk invarian mereka. Dengan cara ini, kita melihat wajah orang yang kita kenal tanpa memandangnya, berdiri di kejauhan, berbaring di lantai atau mengenakan topi. Pola tampaknya disimpan dalam bentuk yang semakin abstrak setelah menjalani langkah pemrosesan yang berbeda – lapisan hierarkis.

Saat ini, ada banyak jenis jaringan saraf yang sebagian memungkinkan struktur umpan balik. Perkembangan jaringan saraf saat ini tampaknya menderita karena kurangnya pertimbangan metode dasar pemrosesan sinyal dalam antetipe besar, otak manusia, temukan.

Tampilan karakteristik neokorteks pada akhir bab ini akan menunjuk lagi pada perspektif besar yang dapat dimiliki jaringan saraf jika asumsi kemampuan dan karakteristik korteks dapat disetujui atau dipahami dengan lebih baik dan diimplementasikan dalam pengembangan jaringan saraf. .

Dalam penilaian perkembangan penelitian serebral di masa depan, terutama tentang kecerdasan buatan, seperti biasa, ada dua kelompok: optimis dan pesimis. Keduanya secara umum memperkenalkan kekhawatiran dan harapan ke dalam diskusi yang dapat dianggap serius.

Kaum pesimis skeptis menunjuk pada otak yang sangat kompleks dengan puluhan miliar neuron dan puluhan miliar sinapsis. Sistem raksasa ini mustahil dapat dipahami sepenuhnya (lihat misalnya Der Spiegel Nr.1, 2001 "alam semesta di kepala", "kerendahan hati sebelum misteri terakhir"). Ini juga tentang klarifikasi mendasar berikut: apakah otak manusia dengan puluhan miliar selnya mampu kesadaran diri?

Kelompok optimis yang lebih kecil menunjuk pada sejarah sains sebagai bukti bahwa alam dapat menghasilkan sistem yang sangat kompleks. Bahkan sistem chaos yang sangat kompleks dapat dihasilkan oleh fungsi sederhana (non-linear). Kesamaan substansial dari sistem semacam itu harus ditemukan dan dimodelkan. Bidang ilmiah raksasa dengan berbagai penerapannya sebagai elektro magnet dan mekanika kuantum akan dapat dijelaskan di intinya dengan beberapa rumus (persamaan Maxwell masing-masing persamaan Schrödinger).

Tampaknya seolah-olah perubahan dari komputer konvensional dengan "bottle neck"-nya ke sistem data sinyal yang didasarkan pada prinsip-prinsip alami dapat kembali menyebabkan reorientasi teknis.

Latihan pada bab 14

Latihan 1

Penggunaan jaringan saraf dalam pemrosesan sinyal digital berbantuan komputer sering digambarkan sebagai “perubahan paradigma”. Alasan apa yang dapat diberikan untuk ini dibandingkan dengan pemrosesan sinyal analog dan digital "konvensional"?

Latihan 2

- a. Mengapa pemrosesan sinyal “konvensional” tampak cocok dengan penggunaan jaringan saraf? Apa yang dicapai dengan itu pada akhirnya?
- b. Pengetahuan apa yang diperlukan, dukungan apa yang masuk akal, untuk melakukan pra-pemrosesan sinyal sebaik mungkin?

Latihan 3

Modul IPA masing-masing menyediakan modul parameter untuk rentang waktu dan rentang frekuensi (analisis frekuensi).

- a. Untuk rentang waktu, modul parameter mencakup banyak fungsi matematika khusus. Di sini, pemahaman matematis pengguna secara khusus diminta dalam hal pemilihan fungsi yang dapat digunakan dalam kasus praktis. Selama masalah praktis mana masing-masing contoh yang akan Anda gunakan mis. fungsi "standar deviasi" atau "median"? Apakah ada yang menentang pemilihan fungsi sebanyak mungkin untuk menjamin informasi pola yang disaring yang mungkin tidak Anda lihat sejak awal ??
- b. Penggunaan modul parameter untuk rentang frekuensi memerlukan pemahaman fisik khusus dalam peranti praktis. Sebutkan beberapa studi kasus dalam konteks ini dan coba temukan pernyataan yang menggeneralisasi penggunaannya.

Latihan 4

Untuk realisasi jaringan saraf, ada dua modul yang tersedia: mengumpulkan data jaringan (masing-masing mengumpulkan data pelatihan) dan prognosis jaringan.

- a. Dengan bantuan modul mengumpulkan data jaringan, pada awalnya file *.nnd dibuat. Dengan ini, pola masuk- (parameter-) dialokasikan ke pola target tertentu. Bagaimana Anda dapat menggabungkan pola masuk ini dengan pola target dalam penggunaan praktis?
- b. Jaringan saraf termasuk dalam file *.nn yang kami dapatkan dari menu *.nnd file ("belajar"). Jelaskan strategi bagaimana struktur jaringan ditemukan melalui data yang masuk.
- c. Menu "pelatihan jaringan" mencakup default tiga lapis untuk jaringan saraf. Kemungkinan apa yang tersisa (misalnya dengan "jaringan XOR") jika ini tidak menyediakan jaringan yang berfungsi?

Latihan 5

Gambar 282 menunjukkan modul XOR- dalam bentuk jaringan saraf. Pertama, pembobotan dipilih secara acak, dalam hal ini $w_{ux} = -3$, $w_{uy} = 3,2$, $w_{vx} = 4$, $w_{vy} = -2$, $w_{xz} = -3,2$ und $w_{yz} = 4$.

Jalankan kalkulasi error mundur dalam bentuk tertulis (backpropagation) sampai gerbang XOR disimulasikan.

Latihan 6

Proyek "Mesin koin akustik". Dalam praktik industri, pengenalan pola akustik sering digunakan, selain pengenalan suara, misalnya, dalam pembuatan kaca, ubin, dan genteng. Barang yang rusak akibat retak atau berlubang ditolak Jadi, gelas yang rusak terdengar berbeda dari gelas yang sempurna..

- Pikirkan secara konstruktif tentang struktur mekanis perangkat semacam itu. Setelah menempuh jarak tertentu (tinggi jatuh, misalnya, 40 - 50 cm) koin jatuh ke atas batu atau marmer. Suara benturan (nada!) harus direkam menggunakan mikrofon. Berdasarkan pola akustik denominasi koin dapat dikenali (2 €, 1 €, 50 c, 20 c, 10 c)!
- Mengapa hanya pengenalan pola yang berhasil dalam rentang frekuensi?
- Catat seri pengujian yang sesuai untuk semua koin. Bandingkan spektrum koin yang berbeda. Mengapa ada begitu banyak nilai frekuensi yang identik dalam spektrum semua koin?
- Sekarang manfaatkan modul parameter dengan tepat untuk menyaring bagian-bagian yang berbeda dari spektrum koin.
- Buat jaringan saraf yang analog dengan "pengenalan ucapan".

Latihan 7

Unduh ca. 20 panggilan burung berbeda dari internet dan buat jaringan saraf yang mengalokasikan suara berbeda ke masing-masing burung.

Alternatifnya: rekam nada konser a dengan beberapa instrumen musik dan buat jaringan saraf untuk pengenalan instrumen.

Latihan 8

Neuron biologis: Cari tahu dengan bantuan literatur khusus – cari di Internet – fakta tentang

- pembentukan sel saraf, khususnya membran sel,
- perambatan sinyal saraf di sepanjang akson,
- transmisi sinyal saraf melintasi sinaps dan
- jumlah dan data fisik dari neuron, sinapsis, dll. dari otak

Latihan 9

Backpropagation: Memahami dan menganalisis menggunakan literatur - seperti Internet - dari

- (a) prinsip metode pembelajaran backpropagation,
- (b) prinsip gradien jaringan saraf,
- (c) turunan dari aturan delta dan
- (d) turunan dari aturan backpropagation.

BAB 15

PEMODELAN MATEMATIS SINYAL – PROSES – SISTEM

Bab ini dimaksudkan untuk bertindak sebagai penghubung antara sistem pembelajaran interaktif dan berbasis multimedia "Sinyal - Proses - Sistem" dan literatur spesialis standar tentang hal ini pada tingkat matematika yang tinggi.

Dalam bab-bab sebelumnya semuanya telah dilakukan untuk secara konsisten menghindari matematika yang sangat abstrak. Ini dicapai dengan menggunakan dasar fisik dari ilmu khusus ini. Rupanya, itu belum cukup sering diulang bahwa setiap disiplin teknis berakar pada fisika daripada matematika dan strukturnya.

Pernyataan Berikut Ini Berlaku:

Matematika (juga) mengizinkan pernyataan, perhitungan, dan model yang sama sekali tidak ada hubungannya dengan alam dan fenomena yang menggambarkannya. Teknologi di sisi lain tidak dapat bertindak melawan salah satu hukum alam. Itu tidak akan berhasil. Akibatnya, akar teknologi tidak terletak pada matematika, meskipun Anda mungkin dengan mudah mendapatkan kesan ini ketika membaca sebagian besar buku-buku spesialis ini (di mana kata "fisika" bahkan sering tidak muncul) tetapi jelas dan pasti dalam fisika. .

Kemungkinan yang disediakan matematika di sisi lain untuk fisika dan teknologi dibahas secara menyeluruh di Bab 1. Ini merupakan prasyarat untuk hampir semua sains dan teknologi. Logika batinnya, presisi, konsistensi dan keterverifikasiannya, kurangnya redundansi dan keterkomunikasian telah membentuk dunia modern lebih signifikan daripada apa pun dan memungkinkan pertukaran ide, analisis, dan prediksi yang tidak mungkin diberikan pada tingkat yang sama oleh bahasa.

Berikut ini terutama akan membahas matematika sinyal kontinu karena dengan cara ini latar belakang fisik akan digambarkan dengan lebih jelas. Pergantian berikutnya ke sinyal diskrit telah terbukti relatif mudah. Sayangnya, urutan mata pelajaran matematika tidak dapat sesuai dengan urutan bab dalam buku ini, karena dasar dan struktur dalam fisika dan matematika sangat berbeda satu sama lain.

Bilangan Kompleks

Bilangan kompleks diperlukan untuk setiap proses yang berubah dari waktu ke waktu, frekuensi atau spasial, terutama sinyal dari jenis yang paling bervariasi. Mereka akan dibahas di awal lampiran matematika ini, karena mereka sangat menyederhanakan akses matematika.

Spektrum sinyal mengalokasikan dua informasi untuk setiap frekuensi: amplitudo dan sudut fasa . Untuk alasan ini spektrum amplitudo dan spektrum fase dibedakan dalam Bab 2 (lihat "Representasi 3D Gambar 28 – Gambar 38).

Dalam Bab 5, dalam kerangka simetri rentang frekuensi, kami memperkenalkan bidang GAUSSian bilangan kompleks (lihat Gambar 97, Gambar 319 - 101). Dua nilai tepat (a , b) dimiliki oleh setiap titik pada bidang ini (dan bidang lainnya). Dengan cara ini sebuah vektor menghasilkan untuk setiap frekuensi, dimana

- panjang vektor sama dengan amplitudo ,
- sudut antara vektor frekuensi dan sumbu horizontal positif sama dengan sudut fasa .

Dengan menggunakan bidang GAUSSI, bilangan kompleks apa pun dari rumus $a + ib$ dapat ditunjukkan sebagai titik pada bidang ini, di mana ada definisi yang awalnya sangat aneh untuk i :

$$i = \sqrt{-1}$$

Eksansi bilangan yang tidak mencolok ini dari bilangan real ke bilangan kompleks mendorong matematika dalam 200 tahun terakhir. Istilah "kompleks" dan "imajiner" juga membingungkan: mereka menyarankan sesuatu yang sulit, misterius dan tidak jelas. Hal ini tidak terjadi. Faktanya, mereka menyederhanakan dan menunjukkan perhitungan yang sangat sulit yang tak terhitung jumlahnya. Istilah efisien atau rentang angka yang diperluas akan lebih baik.

Untuk banyak fenomena fisik elektromagnetisme, bidang osilasi, gelombang, dan fisika kuantum, tidak terpikirkan tanpa perhitungan yang rumit. Hubungan dengan kisaran angka ini sangat ekstrim sehingga perhitungan yang rumit dapat dilihat sebagai bagian penting dari "bahasa alam".

Oleh karena itu, kalkulasi kompleks juga mendominasi teknologi elektro, yang didasarkan pada fenomena fisik, terutama teknologi yang melingkupi "sinyal – proses – sistem".

Bagi mereka yang sejauh ini belum menyadari pentingnya bilangan kompleks, masalah berikut ini mungkin menarik:

Bilangan asli, rasional, irasional atau bilangan real adalah masalah pengetahuan umum. Di sini, bilangan asli (0), 1,2,3,4,... tampaknya merupakan rentang yang "tidak berbahaya", yang hanya sedikit yang bisa dikatakan. Tetapi ada juga bilangan prima - semua bilangan yang hanya dapat dibagi dengan 1 dan dengan sendirinya:

1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, ... ,167, 173, 179, ... ,9967, 9973, ...

Matematikawan telah berurusan dengan angka-angka ini selama berabad-abad, banyak dari mereka menghabiskan seluruh hidup mereka sering mencoba untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- Dapatkah saya memahami distribusinya dalam kumpulan bilangan real?
- Berapa lama saya harus terus menghitung untuk sampai ke bilangan prima berikutnya?
- Mengapa bilangan prima berikutnya muncul seolah-olah secara kebetulan hanya setelah beberapa langkah, beberapa di sisi lain hanya setelah celah besar?
- Apakah mungkin ada pola tersembunyi?

Ahli matematika hebat Bernhard RIEMANN menemukan cara untuk memecahkan masalah di akhir abad ke-19. Dengan bantuan bilangan kompleks, ia berhasil menerjemahkan distribusi bilangan prima dalam lanskap matematika di atas bidang dua dimensi (yang disebut fungsi zeta). Topografi (bentuk, bentuk) lanskap ini mencakup seluruh pengetahuan tentang bilangan prima. Secara khusus, cukup mengetahui titik-titik di permukaan laut (nol) untuk dapat merekonstruksi seluruh lanskap. Jadi nol mencakup semua informasi tentang distribusi bilangan prima.

RIEMANN mengembangkan formula konkret untuk menurunkan distribusi bilangan prima dari nol ini. Yang mengejutkan, setiap nol yang dia hitung ternyata ditempatkan pada garis lurus yang sejajar dengan sumbu y (sumbu imajiner), yang membentang di sisi kanan sumbu y pada jarak (sumbu nyata) sejajar ke sumbu imajiner. Dan dalam beberapa cara, setiap nol mewujudkan sumber gelombang yang meluas seperti suara akustik!

Suara setiap nol ditumpangkan satu sama lain untuk distribusi bilangan prima.

Hanya ada satu masalah: baik RIEMANN maupun orang lain tidak mampu membuktikannya sejauh ini. Oleh karena itu disebut sebagai hipotesis RIEMANN, yang disebut masalah hadiah milenium dalam matematika. Untuk bukti ini, hadiah 1 juta dolar telah ditawarkan oleh sebuah yayasan Amerika.

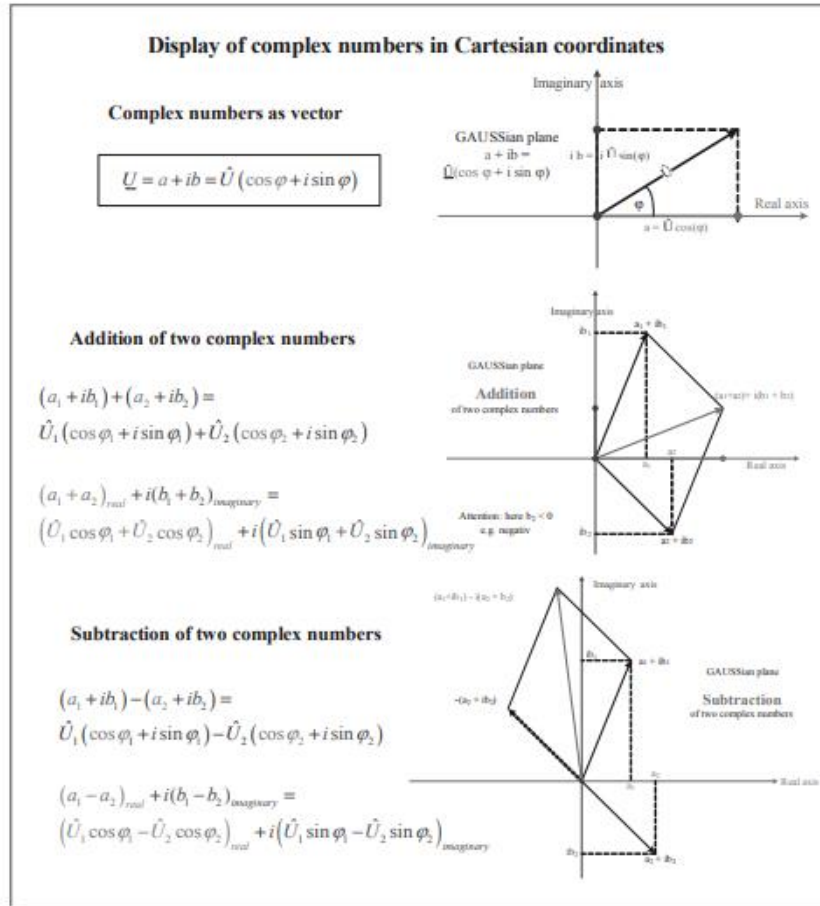
Rupanya, bilangan kompleks menyediakan platform intelektual yang kuat yang memungkinkan untuk memecahkan banyak masalah dengan menggunakan perspektif universal yang sesuai. Banyak masalah mendasar dapat dipertimbangkan secara rinci dan tepat dijelaskan dengan bantuan mereka.

Menariknya, ini terutama berlaku untuk fenomena fisik fisika kuantum, dunia mikrokosmos yang tidak terlihat.

Operasi Sederhana Dengan Bilangan Kompleks

Sejumlah fungsi/proses matematika merupakan inti dari buku ini. Dalam konteks ini terutama yang disebut fungsi/proses linier harus disebutkan:

- Menambah dan mengurangi
- Penundaan sementara
- Perkalian dengan konstanta
- Diferensiasi
- Integrasi



Gambar 301: Tampilan Bilangan Kompleks, Penjumlahan Dan Pengurangan Dalam Koordinat Kartesius

Vektor digambarkan dengan garis penghubung antara titik (0, 0) dan (a, b) dan (0,i0) dan (a, ib). Proyeksi pada sumbu nyata dan imajiner ditentukan oleh fungsi sudut. Jika panjang vektor (seperti yang digunakan dalam teknologi elektro) didefinisikan sebagai , a = sin dan b= sin. Penjumlahan dan pengurangan sangat mudah dan mudah diinterpretasikan secara geometris. Penjumlahan dan pengurangan dapat dilakukan secara grafik cukup dengan menggunakan penggaris, atur persegi dan pensil.

Tidak ada identifikasi standar untuk bilangan kompleks. Dalam elektro-teknologi, biasanya u(t), i(t) dan Z untuk tegangan, arus dan hambatan AC (impedansi) digunakan. Matematika dan fisika sering dilakukan tanpa garis bawah (dalam ck berikut, X(f), Y(f)dan H(f) dll.).

Sejauh ini, bilangan kompleks telah didefinisikan oleh (a, ib), proyeksi vektor pada sumbu nyata dan imajiner. Ini adalah bentuk Cartesian dari bilangan kompleks. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 300 dan Gambar 301, penambahan dan pengurangan serta perkalian dengan konstanta dapat dilakukan dengan sangat mudah dan grafis dengan cara ini.

Complex numbers in Cartesian representation

- Multiplication with a real absolute term k**
 $k\underline{U} = k(a + ib) = k\hat{U}(\cos \varphi + i \sin \varphi)$
 bzw.
 $k[(a_1 + ib_1) \pm (a_2 + ib_2)] = k\left[\left(\hat{U}_1 \cos \varphi_1 \pm \hat{U}_2 \cos \varphi_2\right) + i\left(\hat{U}_1 \sin \varphi_1 \pm \hat{U}_2 \sin \varphi_2\right)\right]$
 Result: the operation equates to a dilation of the vector length bei the factor k
- Multiplication of two complex numbers**
 $(a_1 + ib_1)(a_2 + ib_2) = \hat{U}_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)\hat{U}_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) =$
 $\hat{U}_1\hat{U}_2[(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + i(\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_2 \cos \varphi_1)]$
 Result: products of angle functions yield . Geometrical interpretation is unsure!
- Division of two complex numbers**
 $\frac{a_1 + ib_1}{a_2 + ib_2} = \frac{\hat{U}_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)}{\hat{U}_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)}$
 Tricky expansion by using $(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$

$$\frac{(a_1 + ib_1)(a_2 - ib_2)}{(a_2 + ib_2)(a_2 - ib_2)} = \frac{(a_1 a_2 + b_1 b_2) + i(b_1 a_2 - a_1 b_2)}{a_2^2 + b_2^2} = \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} + i \frac{b_1 a_2 - a_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} =$$

$$\frac{\hat{U}_1(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2)}{\hat{U}_2(\cos^2 \varphi_2 - \sin^2 \varphi_2)} + i \frac{\hat{U}_1(\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)}{\hat{U}_2(\cos^2 \varphi_2 - \sin^2 \varphi_2)}$$

 Result: products of angle functions yield . Calculation is extensive . Geometrical interpretation is unsure !

Solution: multiplication and division of two complex numbers in exponential notation with the help of the EULERian relation .

Gambar 302: Perkalian Dan Pembagian Dua Bilangan Kompleks Dalam Representasi Kartesius

Perkalian dan pembagian bilangan kompleks dalam representasi Cartesian cenderung agak rumit. Solusi dari masalah ini ditunjukkan di bawah ini dan ditentukan dalam Gambar 303.

Perkalian, pembagian, sampling, nilai absolut, windowing dan kuantisasi dijelaskan sebagai proses non-linier. Untuk perhitungan yang rumit, yang terakhir dengan pengecualian perkalian dan pembagian, kurang penting.

Perkalian dan pembagian bilangan kompleks dalam representasi Cartesian terbukti sangat rumit (lihat Gambar 301). Di atas segalanya, interpretasi geometris yang tepat sangat sulit.

The EULERian relation

$$\cos \varphi + i \sin \varphi = e^{i\varphi}$$

As proof, EULER compares the serial expansion of e^x , $\sin(x)$ und $\cos(x)$, for the e-function he used the imaginary quantity (ix) instead of x

$$e^{ix} = 1 + ix + \frac{(ix)^2}{2!} + \frac{(ix)^3}{3!} + \frac{(ix)^4}{4!} + \frac{(ix)^5}{5!} + \frac{(ix)^6}{6!} + \dots =$$

$$\left\{ 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} \pm \dots \right\} + i \left\{ x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \mp \dots \right\} =$$

$$\cos \varphi + i \sin \varphi = e^{i\varphi}$$

With the angle π an interesting special case results :

$\cos \varphi + i \sin \varphi = e^{i\varphi}$

Now choose angle = π

$\cos \pi + i \sin \pi = e^{i\pi}$

$-1 + i0 = e^{i\pi}$

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

The astounding equation connects 3 mathematical "elementary absolute terms" :
 $e = 2,71828\dots$, $\pi = 3,14159\dots$ sowie i ($i^2 = -1$)

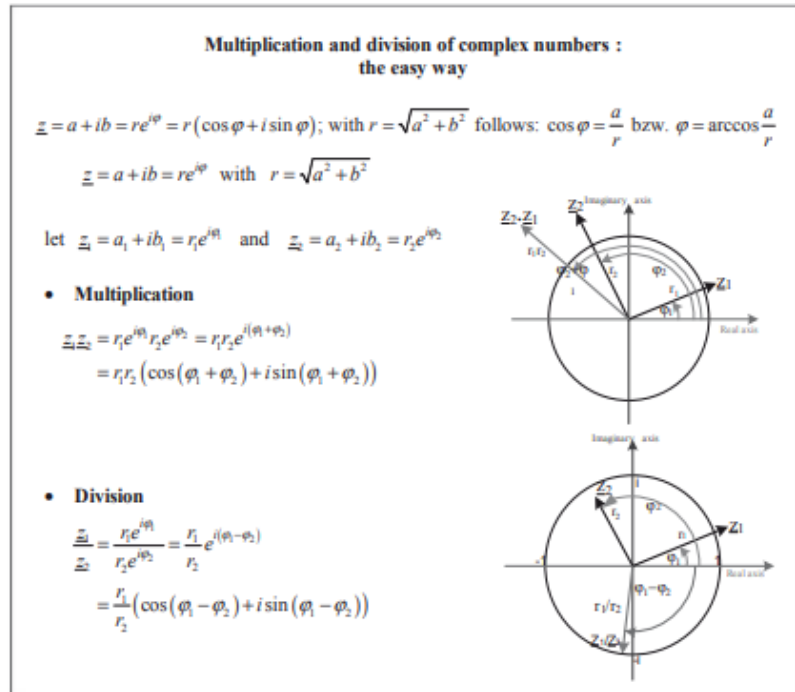
Gambar 303: Bilangan Kompleks Dalam Notasi Eksponensial: Relasi EULERian

Hubungan EULER tidak hanya menyederhanakan semua perhitungan aritmatika lebih lanjut, tetapi juga memungkinkan interpretasi geometris sederhana dari proses ini, dan, terlebih lagi, memberikan pemahaman yang mendalam dan pola penjelasan untuk berbagai masalah matematika dan fenomena fisik. Pengembangan serial yang diperlukan untuk pembuktian tidak dipertimbangkan lebih lanjut di sini karena dapat ditemukan dalam buku teks matematika yang tak terhitung jumlahnya.

Solusi yang diberikan oleh relasi EULER, pemahaman yang sangat penting dari ahli matematika ini tentang notasi eksponensial bilangan kompleks (lihat Gambar 302), sangat berguna di sini.

Kasus khusus sudut yang ditunjukkan pada Gambar 302 juga sama mencengangkannya. Angka biasanya mewakili proses pertumbuhan dan reduksi alami, angka di sisi lain untuk keliling, luas lingkaran, ..., permukaan bola, volume bola, ergo untuk simetri lingkaran.

Dalam hal ini, e-fungsi dengan daya imajiner juga memiliki simetri melingkar ini. Jika sudut diubah, puncak vektor bergerak pada keliling lingkaran satuan bidang kompleks.



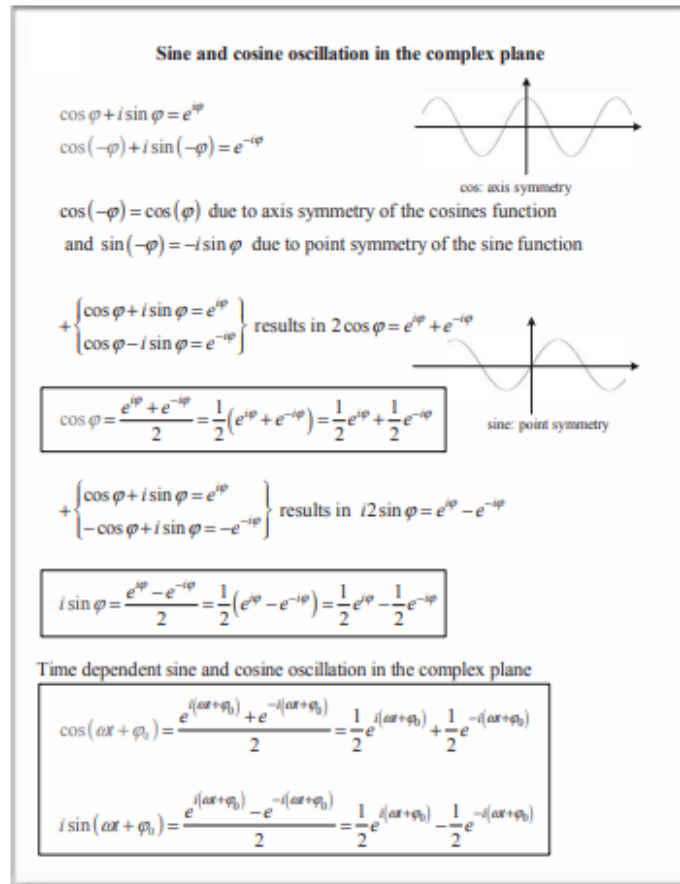
Gambar 304: Perkalian Dan Pembagian Bilangan Kompleks Dalam Notasi Eksponensial

Konversi koordinat Cartesian ke dalam bentuk eksponensial dengan r dan i berlangsung dengan bantuan PYTHAGORAS dan fungsi sudut \sin dan \cos dan fungsi kebalikannya \arcsin dan \arccos . Pada kalkulator saku yang terakhir ditampilkan sebagai \sin^{-1} dan \cos^{-1} . Interpretasi geometrisnya mudah: mereka ditambahkan ketika dikalikan, dikurangi ketika dibagi.

Seperti yang ditunjukkan Gambar 304, perkalian dan pembagian dua bilangan kompleks dalam notasi eksponensial menjadi permainan anak-anak. Selain itu, interpretasi geometrisnya mudah. Kedua operasi aritmatika ini dapat ditangani oleh penggaris dan busur derajat.

Sekarang kita sampai pada diferensiasi dan integrasi. Tidak mungkin untuk memberikan pengenalan matematis yang baik untuk kalkulus diferensial dan integral di sini. Namun, itu tidak perlu untuk tujuan kami, terima kasih dalam analisis akhir untuk hubungan EULER.

Sebagai gantinya, dalam Gambar 306 disediakan bagan turunan dasar dan integral yang cukup untuk tujuan kita. Sejumlah latihan mengikuti. Diferensiasi dan integrasi sangat penting untuk sinyal – proses – sistem yang kompleks, karena perubahan dapat didokumentasikan, yang selalu terjadi pada sinyal.

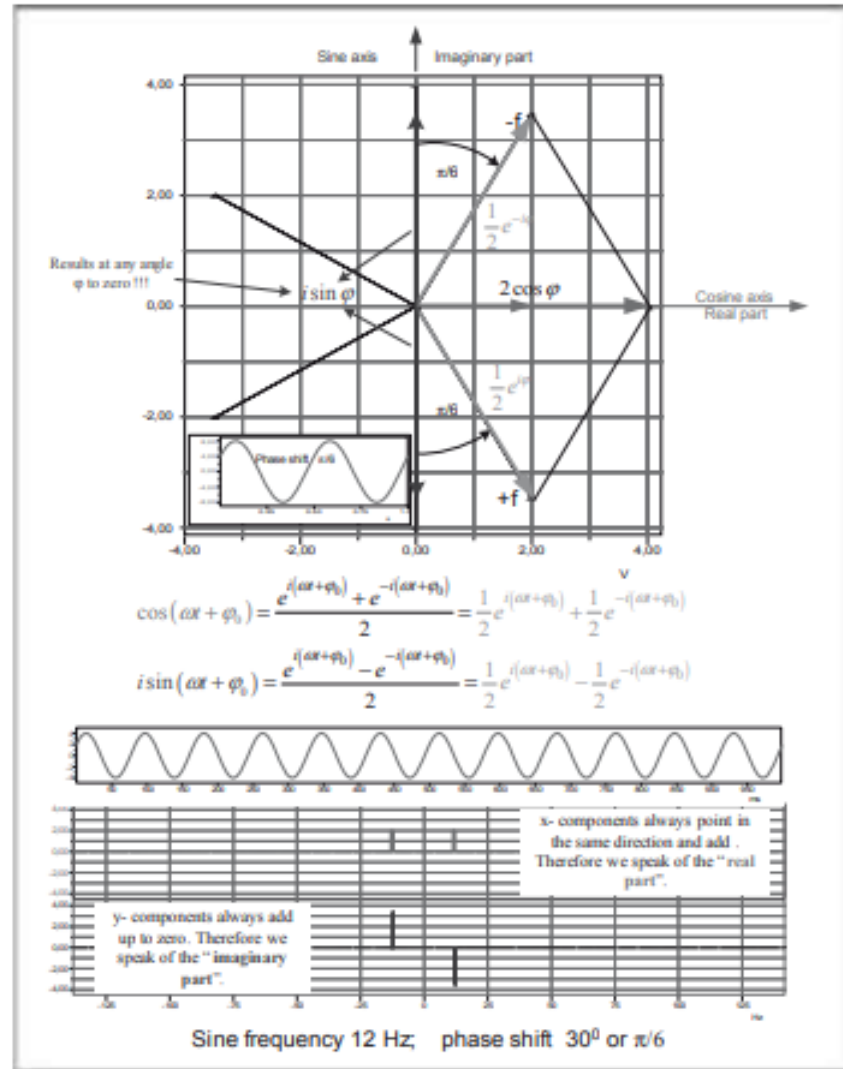


Gambar 305: Sinus Dan Kosinus Sebagai Kombinasi Linier Dari Vektor Kompleks Terkonjugasi $E^{i\varphi}$ Dan $E^{-i\varphi}$

Di sini kita menyimpulkan dari mana vektor kompleks sinus dan kosinus disusun. Pada waktu tertentu ada dua vektor kompleks (di bawah, "vektor frekuensi") yang terikat bersama dalam hubungan yang tidak terpisahkan. Vektor frekuensi satu adalah kompleks terkonjugasi ke yang lain.

Tanda-tanda aljabar yang berbeda berarti bahwa jumlah sudutnya adalah ukuran yang sama pada waktu tertentu, sedangkan dengan perubahan waktu sudut mereka berputar secara diametris.

Komponen imajiner yang dihasilkan dari kedua vektor yang berputar secara diametris adalah nol untuk setiap sudut (lihat Gambar 306 serta Gambar 97 dalam Bab 5). Komponen imajiner tidak muncul secara eksternal baik secara visual atau terukur, tetapi ada dalam arti kausal.



Gambar 306: Vektor Berputar Kompleks Sebagai Penyebab Osilasi Sinus Dan Kosinus

Di sini kita menggunakan materi grafis dari Bab 5 untuk mendemonstrasikan matematika dari vektor frekuensi berputar menggunakan data yang diukur.

Pada frekuensi 12 Hz, vektor frekuensi bergerak 12 kali putaran 2π per detik. Grafik tersebut menggambarkan kondisi sesaat pada pergeseran fasa $\pi/6$ atau 30° .

Dalam pengukuran di bawah osilasi sinus 12Hz dengan amplitudo 4V digunakan. Amplitudo ini tidak termasuk dalam tampilan formula untuk kepentingan kejelasan.

Chart of elementary derivatives $f'(x)$		Chart of elementary integrals
Function $f(x)$	Derivative $f'(x)$	
$c = \text{konstant}$	0	$\int a \cdot f(x) dx = a \int f(x) dx$
x	1	$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}$
x^a	ax^{a-1}	$\int \cos x dx = \sin x$
$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$	$\int \sin x dx = -\cos x$
e^x	e^x	$\int e^x dx = e^x$
e^{ax}	ae^{ax}	$\int \cos ax dx = \frac{\sin ax}{a}$
$\sin x$	$\cos x$	$\int \sin ax dx = -\frac{\cos ax}{a}$
$\cos x$	$-\sin x$	$\int e^{ax} dx = \frac{e^{ax}}{a}$
$\sin ax$	$a \cos ax$	
$\cos ax$	$-a \sin ax$	

The absolute values of integration were left out

The derivative of time is shown as a point, that is $\frac{d^2(t)}{dt^2} = (f(t))'$

2 applications for differentiation

$$\begin{aligned} (\cos(ax))' &= \left(\frac{1}{2}e^{i(ax)} + \frac{1}{2}e^{-i(ax)} \right)' = \\ -a \sin(ax) &= \frac{i a \omega}{2} e^{i(ax)} - \frac{i a \omega}{2} e^{-i(ax)} \left[\left(-\frac{1}{a\omega} \right) \right] \\ \Rightarrow i \sin(ax) &= -\frac{i^2}{2} e^{i(ax)} + \frac{i^2}{2} e^{-i(ax)} \quad [i^2 = -1] \\ \Rightarrow i \sin(ax) &= \frac{1}{2} e^{i(ax)} - \frac{1}{2} e^{-i(ax)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (i \sin(ax))' &= \left(\frac{1}{2}e^{i(ax)} - \frac{1}{2}e^{-i(ax)} \right)' \\ i a \cos(ax) &= \frac{i a \omega}{2} e^{i(ax)} - \frac{-i a \omega}{2} e^{-i(ax)} \quad [i a \omega] \\ \Rightarrow \cos(ax) &= \frac{1}{2} e^{i(ax)} + \frac{1}{2} e^{-i(ax)} \end{aligned}$$

1 application for integration:

$$\begin{aligned} \int \cos(ax) dt &= \int \left(\frac{1}{2}e^{i(ax)} + \frac{1}{2}e^{-i(ax)} \right) dt = \frac{1}{2} \int e^{i(ax)} dt + \frac{1}{2} \int e^{-i(ax)} dt \Rightarrow \\ \frac{\sin(ax)}{a\omega} &= \frac{1}{2a\omega} e^{i(ax)} + \frac{1}{2(-i\omega)} e^{-i(ax)} \quad [i a \omega] \Rightarrow i \sin(ax) = \frac{1}{2} e^{i(ax)} - \frac{1}{2} e^{-i(ax)} \end{aligned}$$

Gambar 307: Diferensiasi Dan Integrasi Nilai Kompleks Bergantung Waktu

Di kedua bagan di atas, aturan "keras dan cepat" untuk diferensiasi dan integrasi tercantum yang berperan dalam buku ini. Integral FOURIER- diperiksa dan dijelaskan secara terpisah.

Aplikasi mengacu pada derivasi dan integrasi bagian nyata $\cos(c t)$ dan bagian imajiner $\sin(c t)$. Anehnya, bagian imajiner dapat diturunkan dari bagian nyata yang terdiferensiasi dan juga dari bagian nyata yang terintegrasi dan sebaliknya.

NB: notasi untuk turunan bergantung waktu.

Pada titik ini osilasi sinus dan kosinus penting dalam pengertian fisik. Mereka secara fisik nyata, tetapi bagaimanapun cara mereka menjadi ada, dari sudut pandang matematika, hanya dapat digambarkan dalam bidang yang kompleks!

Membayangkan Aplikasi

Aplikasi utama kalkulus kompleks dalam bidang teknologi adalah elektro-teknologi dan dalam bidang ilmu alam adalah fisika. Tentu saja, elektro-teknologi didirikan atas dasar fisik elektromagnetisme serta fenomena aliran muatan dalam bahan padat, cair dan gas dan yang disebut plasma (gas sebagian atau seluruhnya terdiri dari pembawa muatan bebas seperti ion atau elektron).

Itulah sebabnya hanya ada tiga komponen dasar dalam teknologi elektro: resistansi OHM R , induktansi kumparan L dan kapasitansi kapasitor C .

Hambatan Ohm di sini berarti efek panas dari arus listrik atau aliran muatan dalam bahan, yaitu transformasi energi elektromagnetik menjadi energi panas "mekanik". Sebenarnya, radiasi panas yang terjadi secara bersamaan juga merupakan energi elektromagnetik, meskipun dalam rentang frekuensi yang sangat tinggi (inframerah).

Arus searah yang mengalir melalui kumparan menciptakan medan magnet. Dalam elektro-teknologi, ini diwakili oleh induktansi L sebagai komponen. Di antara pelat kapasitor yang diberi tegangan arus searah, medan listrik memanifestasikan dirinya; kapasitansi C - komponen yang didedikasikan untuk medan listrik - menggambarkan proporsi jumlah muatan yang disuplai dan level tegangan.

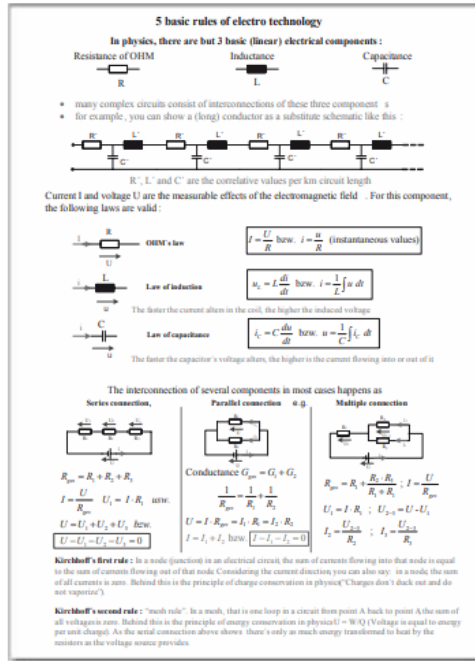
Penjelasan yang disederhanakan ini tidak dimaksudkan untuk menyembunyikan fakta bahwa setiap arus yang dapat diubah secara temporal selalu menciptakan medan elektromagnetik, dan bahwa setiap medan magnet yang dapat diubah secara temporal menciptakan medan listrik yang dapat diubah secara temporal dan sebaliknya.

Efek medan elektromagnetik diukur dengan tegangan dan arus. Ada 5 persamaan dasar yang mengoperasikan interaksi elektromagnetik ini. Gambar 308 menunjukkan hal ini.

Sekarang setelah semua proses matematis (dan pensinyalan) yang relevan telah ditangani dalam kerangka perhitungan yang kompleks, penerapan relevansi praktis dan teoritis yang besar akan dihitung: rangkaian beresilasi. Di sini ini adalah singkatan dari setiap proses dan sistem yang selektif frekuensi atau bergantung pada frekuensi. Dalam Gambar 308 rangkaian resonansi seri, sambungan seri R , L dan C , dipilih.

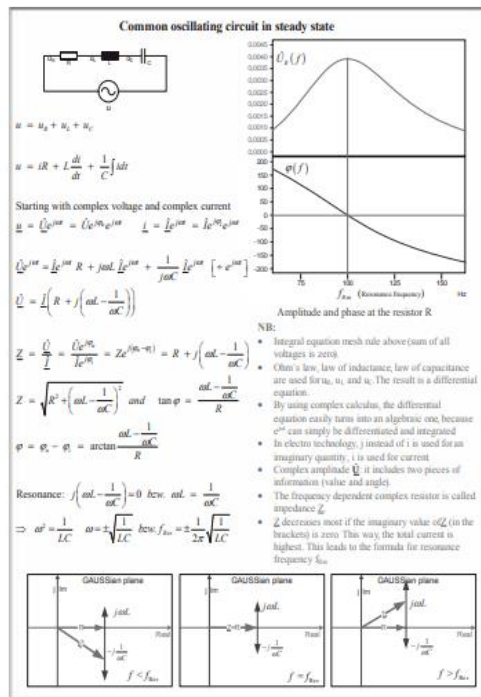
Karena korelasi tegangan dan arus pada kumparan dan kapasitor dijelaskan melalui koefisien diferensial atau kalkulus integral, proses perhitungan praktis rangkaian dan jaringan menghasilkan persamaan diferensial. Di sinilah relasi EULER (Gambar 303) berperan. Fungsi-e sangat mudah untuk dibedakan dan diintegrasikan. Persamaan aljabar yang relatif langsung (Gambar 309) dihasilkan dari persamaan diferensial.

Dalam teknologi elektro, untuk satuan imajiner dipilih huruf j ($j^2 = -1$), karena i telah ditetapkan untuk arus listrik.



Gambar 308: Aturan Untuk Perhitungan Sirkuit Elektro-Teknis Linier

Elektroteknologi pada dasarnya menggambarkan aplikasi praktis dari medan elektromagnetik. Komponen seperti koil/ induktansi L dan konduktor/ kapasitansi C dapat ditetapkan untuk medan elektromagnetik ini. Karena aliran arus dalam zat konduktif, energi elektromagnetik diubah menjadi panas. Perwakilan dari proses ini adalah resistansi komponen OHM R.



Gambar 309: Ketergantungan Frekuensi Dari Rangkaian Osilasi Dengan Osilasi Paksa

Reaksi atau defleksi tertinggi (di sini dalam bentuk brownout pada resistor R) adalah pada frekuensi resonansi. Jika rangkaian beresilasi hanya dimulai sekali, ia beresilasi dalam apa yang disebut frekuensi alami. Ini sedikit lebih rendah dari frekuensi resonansi.

Pada titik ini perlu untuk mengatasi inkonsistensi yang tampak. Dalam Gambar 308, sesuatu yang digunakan sebagai "tegangan generator" dan arus total yang secara fisik atau teknik pengukuran tidak ada sama sekali:

$$\underline{u}(t) = \hat{U}e^{j(\alpha t + \phi_u)} = \hat{U}e^{j\phi_u} e^{j\alpha t} = \underline{\hat{U}}e^{j\alpha t} \quad \text{respectively} \quad \underline{i}(t) = \hat{I}e^{j(\alpha t + \phi_i)} = \hat{I}e^{j\phi_i} e^{j\alpha t} = \underline{\hat{I}}e^{j\alpha t}$$

Di sini, u dan i adalah sudut fase nol", sudut vektor pada momen $t = 0$. Informasi fase ini bersama dengan informasi amplitudo menghasilkan amplitudo kompleks baik untuk tegangan maupun arus.

Benar, bagaimanapun, sinusoidal, nilai terukur harus digunakan sebagai tegangan dan arus. Oleh karena itu perhitungan rangkaian osilasi diperiksa menggunakan nilai-nilai berikut:

$$u(t) = \underline{\hat{U}} \cos(\alpha t) = \frac{1}{2} \underline{\hat{U}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) \quad \text{respectively} \quad i(t) = \frac{1}{2} \underline{\hat{I}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t})$$

Nilai-nilai ini sekarang digunakan dalam persamaan diferensial:

$$\begin{aligned} u &= u_R + u_L + u_C = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \Rightarrow \\ u &= \frac{\underline{\hat{U}}}{2} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) = \frac{R}{2} \underline{\hat{I}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) + L \frac{\hat{I}}{2} (j\omega e^{j\alpha t} - j\omega e^{-j\alpha t}) + \frac{1}{C} \frac{\hat{I}}{2} \left(\frac{1}{j\omega} e^{j\alpha t} - \frac{1}{j\omega} e^{-j\alpha t} \right) \\ \underline{\hat{U}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) &= \underline{\hat{I}} \left[R (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) + j\omega L (e^{j\alpha t} - e^{-j\alpha t}) + \frac{1}{j\omega C} (e^{j\alpha t} - e^{-j\alpha t}) \right] = \\ \underline{\hat{U}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) &= \underline{\hat{I}} \left\{ \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] e^{j\alpha t} + \left[R - j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] e^{-j\alpha t} \right\} \end{aligned}$$

Jadi, ini adalah solusi untuk vektor belok kiri $e^{j\omega t}$ serta vektor belok kanan $e^{-j\omega t}$.

Dalam literatur, impedansi Z untuk rangkaian beresilasi adalah

$$\underline{Z} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

Dengan demikian, impedansi terkonjugasi kompleks adalah

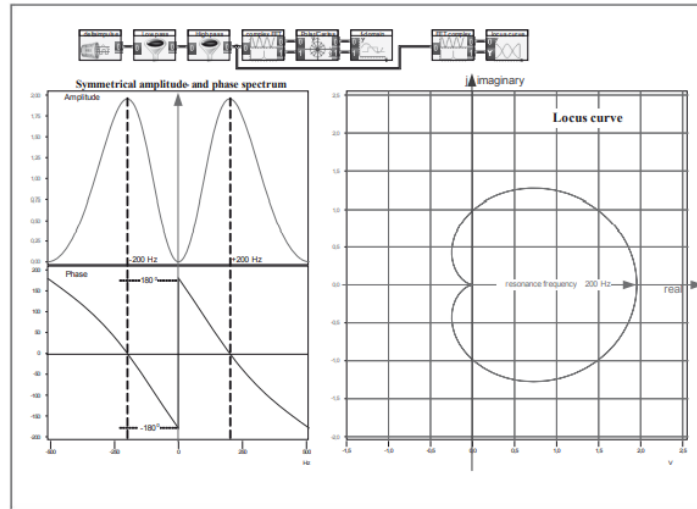
$$\underline{Z}^* = R - j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

Karenanya:

$$\underline{\hat{U}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) = \underline{\hat{I}} \{ \underline{Z} e^{j\alpha t} + \underline{Z}^* e^{-j\alpha t} \} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\underline{\hat{U}}}{\underline{\hat{I}}} (e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) = (\underline{Z} e^{j\alpha t} + \underline{Z}^* e^{-j\alpha t})$$

Ketergantungan frekuensi dari amplitudo dan sudut dari kedua vektor berputar yang berlawanan dapat dilihat dengan jelas. Ini diberikan oleh nilai-nilai imajiner. Di sini nilai-nilai imajiner secara fisik ada dan terukur! Kurva lokus yang sudah dikenal menghasilkan grafik (Gambar 110 hingga Gambar112).

Kurva lokus dari rangkaian osilasi atau bandpass dilintasi (berlawanan) dua kali pada seluruh domain frekuensi positif dan negatif (Gambar 309).



Gambar 310: Kurva Locus/Respons Frekuensi Dari Filter BESSEL Orde Kedua Seperti Rangkaian Berosilasi.

Seperti yang ditunjukkan oleh struktur sirkuit di atas, sistem seperti sirkuit berosilasi dibuat oleh koneksi seri low-pass dan high-pass dengan frekuensi terbatas 200Hz. Kedua filter tersebut merupakan filter BESSEL- orde kedua. Informasi amplitudo dan fase terkandung dalam kurva locus

Jadi sekarang muncul mengapa cukup untuk memasok tegangan dan arus dalam bentuk berikut:

$$\underline{u}(t) = \hat{U}e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \hat{U}e^{j\varphi_u} e^{j\omega t} = \underline{\hat{U}}e^{j\omega t} \quad \text{and} \quad \underline{i}(t) = \hat{I}e^{j(\omega t + \varphi_i)} = \hat{I}e^{j\varphi_i} e^{j\omega t} = \underline{\hat{I}}e^{j\omega t}$$

Kurva locus hanya harus ditulis satu kali, tidak ganda.

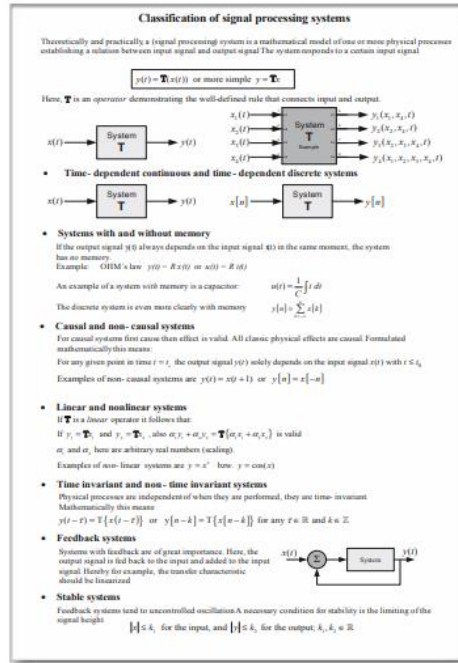
Klasifikasi sistem pemrosesan sinyal

Secara teoritis dan praktis, sistem (pemrosesan sinyal) adalah model matematis dari satu atau lebih proses fisik yang menetapkan hubungan antara sinyal input dan sinyal output. Sistem merespon sinyal input tertentu.

Dalam matematika, kita berbicara tentang transformasi atau peta. Proses ini didefinisikan dengan bantuan operator T, di mana berikut ini berlaku:

$$y = \mathbf{T}(x)$$

Betapapun sederhananya hubungan ini muncul, sistem yang berbeda dapat sangat bervariasi. Gambar 309 menunjukkan klasifikasi awal dari sistem yang berbeda.



Gambar 311: Klasifikasi Awal Sistem Pemrosesan Sinyal

Secara matematis, sinyal adalah fungsi $x(t)$. Notasi $u(t)$ juga digunakan, karena, dalam banyak kasus, sinyal adalah informasi yang membawa tegangan bolak-balik $u(t)$.

FOURIER - Analisis Sinyal Periodik

Sinyal periodik selalu memenuhi formalisme berikut:

$$x(t + T) = x(t) \text{ für alle } t \in \mathbb{R}$$

Durasi siklus sinyal T_0 adalah nilai positif terkecil yang mungkin untuk T . Sinyal periodik yang paling penting dalam konteks ini tanpa diragukan lagi adalah osilasi sinus, yang ditunjukkan di sini sebagai

$$x(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Menurut Bab 2, setiap sinyal periodik dapat dianggap sebagai jumlah osilasi sinus berbobot amplitudo yang frekuensinya merupakan kelipatan integral dari frekuensi dasar f_0 .

$$\begin{aligned} u_{\text{periodisch}}(t) &= u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + \dots \\ &= \hat{U}_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + \hat{U}_2 \sin(2\omega_0 t + \varphi_2) + \hat{U}_3 \sin(3\omega_0 t + \varphi_3) + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{N \rightarrow \infty} \hat{U}_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \end{aligned}$$

Dalam notasi matematika biasanya dirumuskan sebagai berikut:

$$x(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega_0 t - \varphi_k)$$

Representasi ini disebut bentuk harmonik dari deret FOURIER. Dilihat dari perspektif fisika, CO adalah komponen arus searah (offset) dari sinyal seperti, misalnya, ramp periodik atau gelombang gigi gergaji.

Seperi terlihat pada Gambar 98, setiap osilasi sinus yang bergeser fase dapat ditulis sebagai jumlah dari sinus (berbobot) dan osilasi kosinus:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t))$$

Notasi ini disebut bentuk trigonometri deret FOURIER.

NB: Setiap informasi dari sinyal periodik harus berada dalam periode T_0 , karena sinyal tersebut kemudian berulang. Selanjutnya, proses temporal sesaat dari $x(t)$ harus dikaitkan dengan frekuensi yang sesuai $k\omega_0$.

Jadi, tidak mengherankan bahwa kedua koefisien a_k dan b_k dihitung dengan rata-rata aritmatika dari hasil kali $x(t)$ dan osilasi sinus dari frekuensi yang bersesuaian $k\omega_0$:

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad \text{bzw.} \quad b_k = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

Derivasi matematis yang tepat belum dijelaskan berikut ini.

Representasi matematis dan fisik yang sempurna adalah bentuk eksponensial kompleks dari deret FOURIER:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad \text{NB: for } k \quad -\infty \leq k \leq \infty \text{ is valid}$$

dimana untuk amplitudo kompleks atau koefisien FOURIER- berlaku hal berikut:

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Derivasi rumus berikut dari amplitudo kompleks atau koefisien FOURIER- c_k adalah latihan penting dalam kalkulus kompleks dan harus dilakukan secara independen "menggunakan kertas dan pensil".

Gambar 270 telah menunjukkan istilah ortogonalitas. Dengan demikian, deret FOURIER dapat direpresentasikan secara matematis dan secara teknis sinyal dalam ruang vektor berdimensi tak hingga. Frekuensi $k\omega_0$ adalah linier-independen satu sama lain. Dalam ruang vektor ini mereka disusun secara vertikal (ortogonal) satu sama lain.

Jika sinyal kompleks pada suatu interval saling tegak lurus (ortogonal) satu sama lain, mereka memenuhi kendala produk skalar berikut (hasilnya adalah bilangan real):

$$\int_a^b \Psi_k(t) \cdot \Psi_m^*(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{if } m \neq k \\ \alpha & \text{if } m = k \end{cases}$$

$$\text{Let be } \Psi_n(t) = e^{jm\omega t} \Rightarrow \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{jk\omega t} (e^{jm\omega t})^* dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{jk\omega t} \cdot e^{-jm\omega t} dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{j(k-m)\omega t} dt$$

$$\text{Case 1: } m = k \Rightarrow \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{j(k-m)\omega t} dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{j0\omega t} dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^0 dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} 1 dt = T_0 \triangleq \alpha$$

$$\text{Case 2: } m \neq k \text{ or } m - k = n \Rightarrow \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{jm\omega t} dt = \frac{1}{jn\omega_0} e^{jn\omega t} \Big|_{t_0}^{t_0+T_0} = \frac{1}{jn\omega_0} (e^{jn\omega_0(t_0+T_0)} - e^{jn\omega_0 t_0}) =$$

$$\frac{1}{jn\omega_0} e^{jn\omega_0 t_0} (e^{jn\omega_0 T_0} - 1) = \frac{1}{jn\omega_0} e^{jn\omega_0 t_0} (e^{jn2\pi} - 1) = \frac{1}{jn\omega_0} e^{jn\omega_0 t_0} (1 - 1) = 0$$

Dalam kasus $k = +/- 1, +/-2, +/-3, \dots$, dua vektor, dengan amplitudo yang sama, berputar berlawanan arah di sekitar nol bidang GAUS seperti ditunjukkan pada Gambar 305 Penjumlahan vektor kedua vektor menghasilkan bentuk kronologis dari gelombang sinus nyata dengan frekuensi $k\omega_0$. Ini adalah satu-satunya model osilasi sinusoidal (harmonik) yang tidak konsisten secara matematis dan fisik! Bentuk eksponensial kompleks dari deret FOURIER adalah sebagai berikut:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega t} \quad \text{From orthogonality it follows}$$

$$\int_a^b \Psi_k(t) \cdot \Psi_m^*(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} (x(t)) e^{-jm\omega t} dt = \int_{t_0}^{t_0+T_0} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega t} \right) e^{-jm\omega t} dt =$$

$$\int_{t_0}^{t_0+T_0} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j(k-m)\omega t} \right) dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \int_{t_0}^{t_0+T_0} e^{j(k-m)\omega t} dt$$

Menurut kasus 1, dari semua integral ini hanya satu yang tersisa untuk $m = k$. Hasilnya demikian:

$$\int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) e^{-jm\omega t} dt = c_m T_0 \quad \text{bzw. } c_m = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) e^{-jm\omega t} dt$$

Bentuk harmonik dan trigonometri deret FOURIER- dapat diturunkan dengan mudah dari bentuk eksponensial. Di sini ini akan ditunjukkan untuk bentuk trigonometri.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega t} = x(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k e^{jk\omega t} + \sum_{k=1}^{\infty} c_{-k} e^{jk\omega t} = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (c_k e^{jk\omega t} + c_{-k} e^{jk\omega t})$$

Relasi EULER sekarang digunakan:

$$e^{\pm jk\omega t} = \cos k\omega_0 t \pm j \sin k\omega_0 t$$

$$x(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [(c_k + c_{-k}) \cos k\omega_0 t + j(c_k - c_{-k}) \sin k\omega_0 t]$$

$$\text{Now } c_0 = \frac{a}{2} \text{ and } (c_k + c_{-k}) = a_k \quad ; \quad j(c_k - c_{-k}) = b_k$$

Dalam setiap kasus, nilai kompleks dan nilai kompleks terkonjugasi yang sesuai ditambahkan atau dikurangkan. Jadi a_k und b_k selalu nyata. Seperti yang diharapkan, hasilnya adalah

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t))$$

Dari seri FOURIER- ke transformasi FOURIER-

Dalam Gambar 38, transisi dari sinyal periodik dengan spektrum garisnya ke sinyal non-periodik atau unik dijalankan dengan jelas. Caranya adalah dengan memperbesar durasi siklus T_0 secara berurutan sehingga akhirnya cenderung menuju tak terhingga. Karena $f_0 = 1/T_0$, garis spektral bergerak semakin dekat, sampai akhirnya membentuk spektrum kontinu.

Jalur ini sekarang harus dibuat ulang untuk membuat transit dari deret FOURIER (sinyal periodik) ke FT transformasi FOURIER aktual untuk sinyal nonperiodik atau unik. Hal ini juga berlaku untuk invers FOURIER- transformasi IFT.

$$\text{If } T_0 \rightarrow \infty \text{ is possible, still } \lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0} = x(t) \text{ is valid}$$

Pertama-tama kita asumsikan deret FOURIER- masih ada. Baru kemudian kita menguji pengaruh yang tepat dari T_0 menuju tak terhingga.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad \text{with } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_0 \quad \text{and } c_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Indeks T_0 hanya menunjukkan bahwa formalisme berlaku untuk semua durasi siklus, juga untuk T_0

$$T_0 \rightarrow \infty. \text{ Thus } c_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Di sini, respons frekuensi $X(c)$ yang termasuk dalam solusi integral menjadi perhatian khusus. Kami mendefinisikan FT transformasi FOURIER sebagai

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{with } \omega = 2\pi f$$

Amplitudo kompleks atau koefisien FOURIER- kemudian dapat ditulis sebagai

$$c_k = \frac{1}{T_0} X(k\omega_0)$$

Ketika dimasukkan ke dalam seri FOURIER- (lihat di atas) ini menghasilkan:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T_0} X(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t}$$

Karena

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_0 \quad \text{it follows } x_{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \omega_0$$

Dalam hal batas:

$$x(t) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} x_{T_0}(t) = \lim_{\omega_b \rightarrow 0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(k\Delta\omega) e^{jk\Delta\omega t} \Delta\omega$$

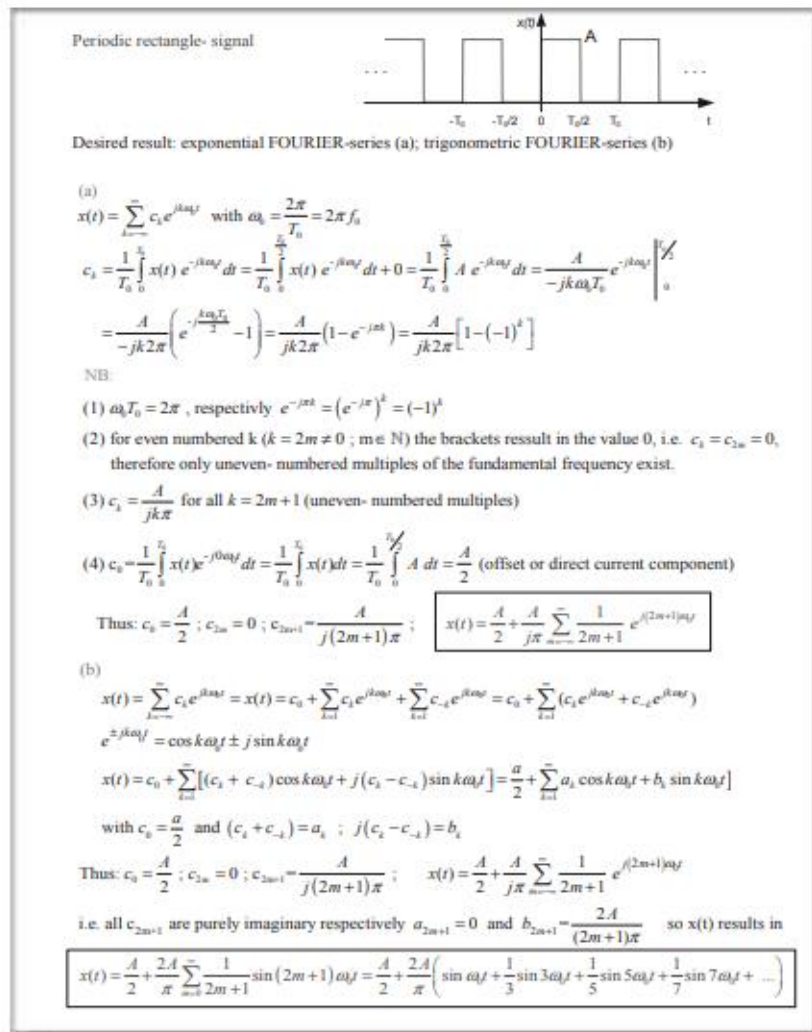
Interpretasi geometris untuk formalisme ini menghasilkan daerah di bawah kurva ejt X sebagai jumlah dari persegi panjang kecil seperti anak tangga.

$$(k\Delta\omega) \cdot (X(k\Delta\omega) e^{jk\Delta\omega t})$$

Pertimbangan nilai batas menghasilkan:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df$$

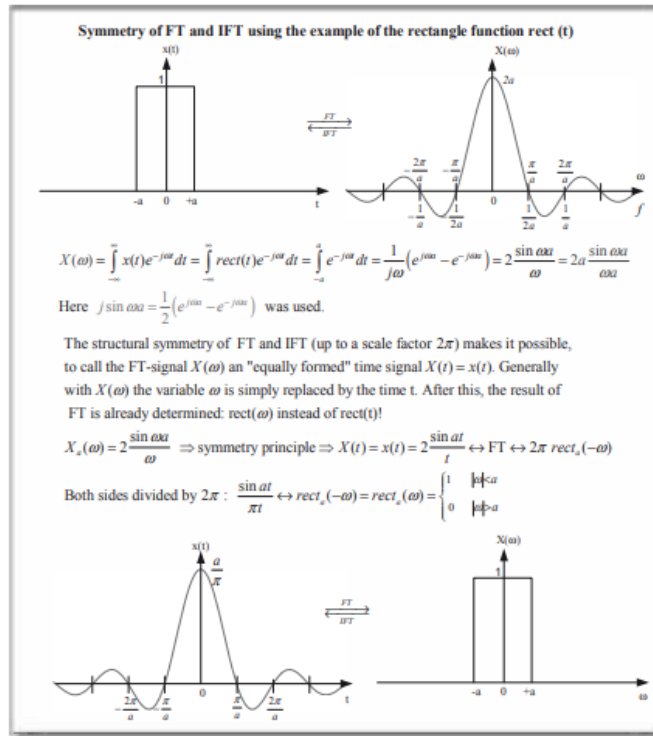
Ini adalah invers FOURIER- transformasi IFT, yang dengannya kurva kronologis dapat dihitung dari informasi area frekuensi. Perbandingan struktural formalisme FT dan IFT menunjukkan simetri sempurna dari kedua transformasi, sampai batas tertentu sumber informasi untuk bab 5.



Gambar 312: Deret FOURIER-: Menghitung Spektrum Dengan Contoh Persegi Panjang Periodik

Dibutuhkan banyak latihan untuk menghitung spektrum eksponensial dan trigonometri. Namun, hasilnya sudah diketahui dari Gambar 34 Integral dapat ditentukan dengan bantuan Gambar 307 dari bab ini.

Berkenaan dengan sumbu referensi $x(t)$ pada titik waktu 0, sinyal persegi panjang di sini tidak simetris cermin, ini adalah titik simetris (jika offset $A/2$ tidak dipertimbangkan), seperti osilasi sinus yang sesuai. Osilasi kosinus sebaliknya adalah simetri cermin. Jika sumbu $x(t)$ - digeser oleh $T_0/4$ ke kanan atau ke kiri, akan dihasilkan deret FOURIER- dengan $\cos^2 \omega t$. Spektrum fase terletak pada nol, yaitu semua sudut fase adalah nol.



Gambar 313: Sinyal Singular: FOURIER- Prinsip Transformasi Dan Simetri

Contoh ini telah dibahas dalam Gambar 91. Di sini, latar belakang matematika ditambahkan. Untuk alasan praktis, frekuensi sudut c diambil sebagai variabel, bukan f . Frekuensi sudut c ($c=2\pi f$) di sini merupakan suku komplementer terhadap waktu t dan sebaliknya. Anda hanya perlu mempertimbangkan faktor skala 2π .

Kebalikan dari istilah-istilah itu langsung mencolok: Segala sesuatu yang besar di satu domain ternyata kecil di domain komplementer dan sebaliknya (lihat Gambar 35). Semakin cepat perubahan dalam satu domain, semakin besar perluasan sinyal yang ditransformasikan di domain lainnya. Segala sesuatu yang bersudut ternyata bulat dalam domain komplementer.

Domain waktu dan domain frekuensi mewakili dua "dunia", di mana "angka" yang sama, diproyeksikan ke dunia yang saling melengkapi, membuat gambar yang sama. Selain itu, sinyal dua dimensi, seperti gambar, dapat mengalami transformasi FOURIER: semua informasi horizontal kemudian terkandung dalam kurva vertikal. Mereka tegak lurus satu sama lain.

Karakteristik Dasar Dari Sinyal Dan Sistem Nyata Dalam Domain Waktu

Pentingnya respons impuls $h(t)$ telah dibahas secara rinci dalam Bab 6. Ini menggambarkan reaksi sistem linier yang secara simultan diberi energi oleh frekuensi apa pun dengan amplitudo yang sama. Selain itu, tidak ada yang tersembunyi di balik koefisien filter filter digital, tetapi respons impuls $h(t)$ (lihat Bab 10). Kami akan menjelaskan lebih banyak secara matematis pada koneksi ini.

Pertama, dalam Gambar 314, fungsi langkah $s(t)$ dan - impuls (t) didefinisikan untuk "sinyal uji" yang telah dibahas secara rinci dalam Bab 6. Fungsi langkah dan impuls sebagai batas memunculkan beberapa masalah matematika karena singularitas, tetapi tidak dari sudut pandang fisik yang nyata (lihat Bab 6).

Pengambilan sampel fungsi kontinu $x(t)$ oleh impuls sangat relevan secara praktis di sini. Jika Anda sekarang mengambil sampel "terus-menerus" selama periode yang sangat lama, setelah Norbert WIENER perspektif baru untuk sintesis sinyal kontinu waktu dihasilkan (lihat Gambar 37):

Semua sinyal kontinu $x(t)$ dapat dipahami sebagai terdiri dari 6- impuls berbobot yang terletak sangat berdekatan (frekuensi sampling f_A cenderung tak terhingga).

Konstruksi ini menyaingi prinsip FOURIER. Sementara dalam sintesis sinyal FOURIER terjadi oleh osilasi sinus yang bertahan "sangat lama", dalam sinyal perspektif baru disintesis oleh peristiwa tunggal yang "sangat pendek" dan padat.

Perbedaan luar biasa ini memungkinkan perspektif statistik baru tentang sinyal kontinu yang menawarkan akses baru ke teori informasi. Ini juga mudah dipahami dari sudut pandang konten (lihat teks di akhir Bab 12):

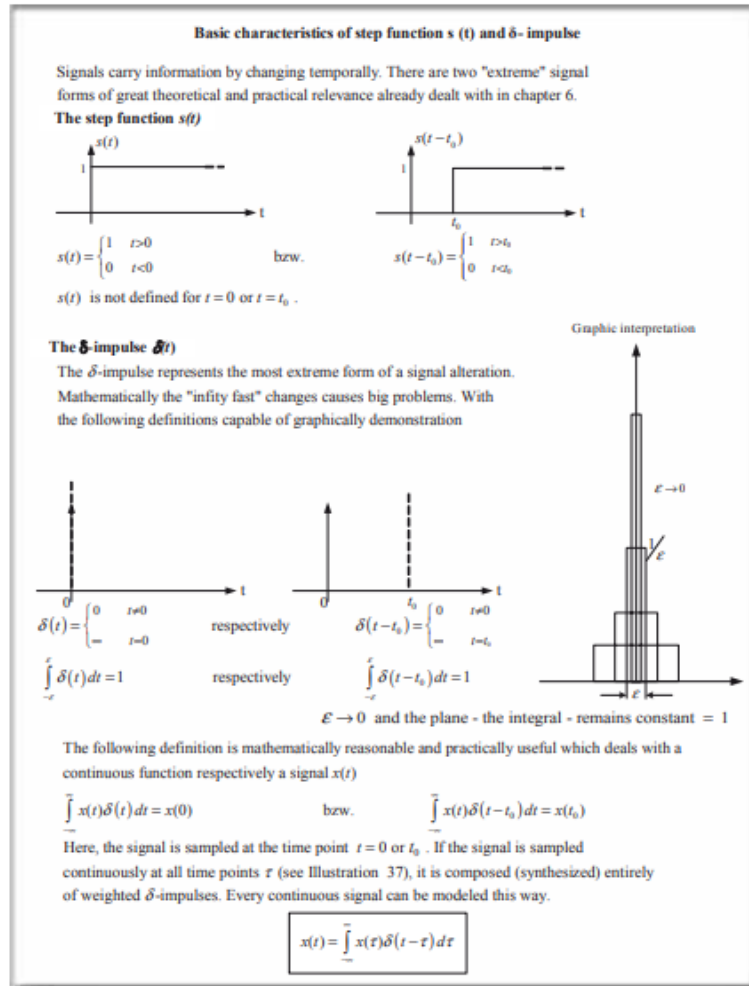
Pada penerima informasi, ada ketidakpastian tentang kondisi sinyal berikutnya sesuai dengan ketidakmungkinan prediksi. Ini mengarah ke metode matematika statistik dan kalkulus probabilitas. Bagaimana ketidakpastian ini ditunjukkan oleh fungsi sinus, yang kurvanya dapat diprediksi hingga tak terbatas?

Sebagai kesimpulan dari demonstrasi WIENER tentang sinyal kontinu

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau$$

(lihat Gambar 315) adalah salah satu proses terpenting dalam domain waktu (juga dalam domain frekuensi).

Respon impuls $h(t)$ mencakup semua informasi sistem dalam domain waktu dan domain frekuensi (fungsi transfer!). Tumpang tindih semua respons impuls dari impuls - berbobot rapat dari $x(t)$ harus menunjukkan respons $y(t)$ sistem terhadap sinyal input $x(t)$.

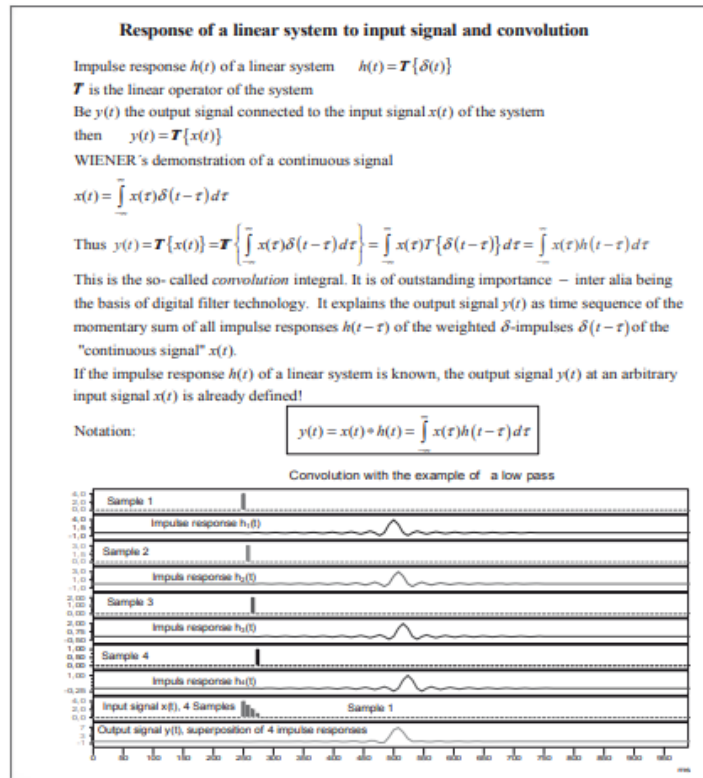


Gambar 314: Fungsi langkah, δ -impuls dan sinyal kontinu sebagai urutan δ -impuls berbobot

Meskipun lokasi langkah ekstrim mereka – singularitas ini cenderung mewakili kesulitan tertentu dalam matematika – $s(t)$ dan $\delta(t)$ memainkan peran penting dalam pemeriksaan sistem linier.

Persamaan terakhir, diperkenalkan oleh Norbert WIENER, menunjukkan demonstrasi yang sampai batas tertentu menyaingi demonstrasi FOURIER dari sintesis sinyal kontinu. Kedua demonstrasi itu sama pentingnya.

Sementara bentuk FOURIER lebih terhubung ke sisi kontinu, bentuk WIENER memberikan akses ke karakteristik statistik dan struktur sinyal. Hanya sudut pandang statistik inilah yang mengarah pada teori informasi dan sibernetika SHANNON saat ini.



Gambar 315: Integral konvolusi dan konvolusi

Konvolusi sebagai suatu proses sama pentingnya dengan transformasi FOURIER. Ini memberikan pola penjelasan konklusif untuk respons sistem linier terhadap sinyal nyata apa pun dalam domain waktu, seperti yang dilakukan transformasi FOURIER untuk domain frekuensi. Lihat juga pengujian pada Gambar 208.

Prinsip simetri juga menghasilkan informasi lebih lanjut, sebanding dengan invers FORIER- transformasi IFT.

Konvolusi Dan Perkalian

Jika pada input sistem sebuah sinus dalam bentuk fungsi eksponensial kompleks ejt diterapkan, hasil sinyal output berikut

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{j\omega(t-\tau)} d\tau = e^{j\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = e^{j\omega t} \cdot H(f)$$

karena FT dari respon impuls $h(t)$ mewakili fungsi transfer $H(f)$.

$$h(t) \xrightarrow{FT} H(f)$$

Untuk alasan simetri (lihat Bab 5, Gambar 91), berikut ini juga harus valid:

$$H(f) \xrightarrow{IFT} h(t)$$

atau keseluruhan

$$\boxed{h(t) \begin{array}{c} \xrightarrow{FT} \\ \xleftarrow{IFT} \end{array} H(f)}$$

Untuk mengamati efek konvolusi dalam domain frekuensi, integral konvolusi mengalami FT

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \right] e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \right] d\tau$$

FT dari sinyal $h(t - \tau)$ dalam tanda kurung siku. FT ini bertepatan dengan FT $h(t)$, tidak termasuk pergeseran fasa. Sudut fase ini sama dengan sudut rotasi e^{-j} . Hal ini mengakibatkan

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)H(f)e^{-j\omega\tau} d\tau = H(f) \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau = H(f) \cdot X(f)$$

Spektrum sinyal output dengan demikian dapat dihitung melalui perkalian fungsi transmisi $H(f)$ dengan spektrum sinyal input $X(f)$.

$$\boxed{Y(f) = H(f) \cdot X(f)}$$

Jika IFT diterapkan pada produk $Y(f)$, hasilnya lagi adalah konvolusi. Konvolusi dalam domain waktu sama dengan perkalian dalam domain frekuensi.

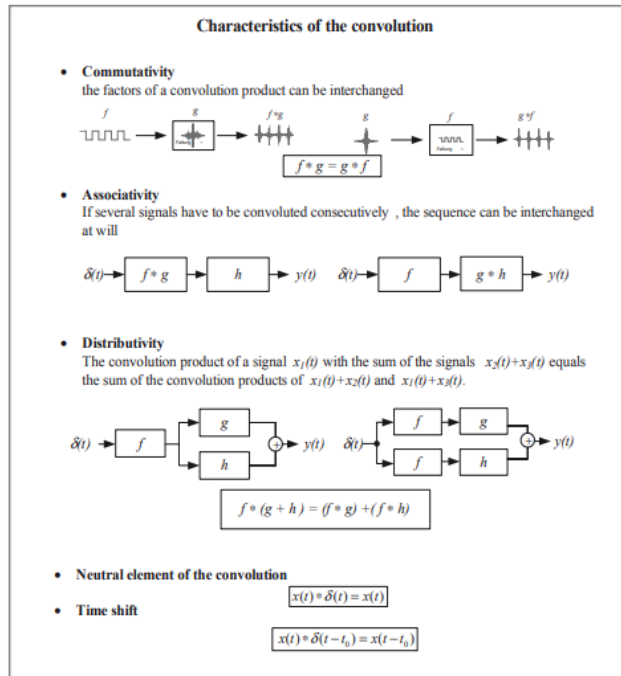
$$\boxed{h(t) * x(t) \xrightarrow{FT} H(f) \cdot X(f)}$$

Untuk alasan simetri, berikut ini juga harus valid:

$$\boxed{h(t) \cdot x(t) \xrightarrow{FT} H(f) * X(f)}$$

Perkalian dalam domain waktu sama dengan konvolusi dalam domain frekuensi yang paling baik diamati dalam modulasi amplitudo AM di Bab 8 (lihat misalnya Gambar 158 et seq.).

Ini adalah dua teorema konvolusi yang penting. Mereka sangat penting dalam penggunaan praktis, karena Anda dapat menghitung konvolusi dengan cepat dan mudah menggunakan transformasi FOURIER- Cepat (FFT) dan FFT Terbalik (IFFT). Metode ini digunakan hampir secara eksklusif di Bab 10 ("filter digital")..



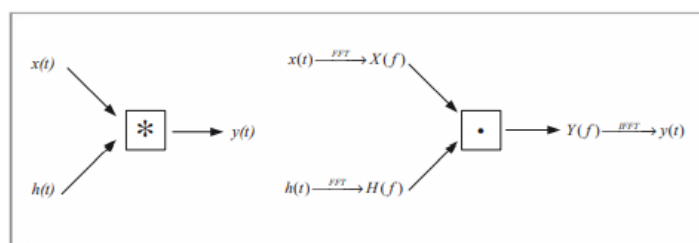
Gambar 316: Demonstrasi Yang Jelas Dari Karakteristik Konvolusi

Korelasi Dan Konvolusi

Salah satu tugas terpenting pemrosesan sinyal – juga dan terutama pemrosesan sinyal biologis organisme hidup – adalah mengukur kesamaan atau korelasi atau analogi pola. Proses ini sudah digunakan untuk proyek Speech Recognition (lihat Gambar 81). Ini sekarang akan dimodelkan secara matematis.

Rata-rata temporal dari hasil kali dua sinyal $x_1(t)$ dan $x_2(t)$ disebut faktor korelasi

$$\phi = \overline{x_1(t) \cdot x_2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(t)x_2(t)dt$$



Gambar 317: Dua Cara Untuk Memproses Konvolusi

Konvolusi dalam rentang waktu sering menghadapi kesulitan matematika yang cukup besar dalam penyelesaian integral konvolusi. Program komputer hampir selalu memilih rute melalui rentang frekuensi. FFT dan IFFT adalah prosedur standar yang cepat dan perkalian tidak menimbulkan kesulitan. DASYLab juga mengikuti rute terakhir.

untuk durasi yang tidak terbatas. Untuk durasi terbatas, berikut ini berlaku

$$\phi = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} x_1(t)x_2(t)dt$$

Istilah standar

$$\rho = \frac{\phi}{\phi_{\max}} \quad \text{whereby} \quad -1 \leq \rho \leq 1$$

disebut koefisien korelasi. Notasi berikut juga dapat diterapkan:

$$\phi(\tau) = k \int_{-T}^{+T} x_1(t) \cdot m(t + \tau) dt$$

Di sini, $m(t)$ adalah fungsi pola. Dengan mendefinisikan nilai k , beberapa bentuk sinyal diklasifikasikan:

$$k = \begin{cases} 1 \\ 1/2T \\ \lim_{T \rightarrow \infty} 1/2T \end{cases}$$

dengan sinyal aperiodik

dengan sinyal periodik (batas integral $-T$ bis $+T$)

dengan sinyal acak

Pada nilai yang pasti dari \max hasil. Kemiripan rumus ini dengan konvolusi terlihat jelas. Awalnya nilai tetap dari (integral dt bukan $d\tau$) digunakan dalam perhitungan. Sebaliknya, selama konvolusi satu sinyal digeser melewati yang lain, dan dengan demikian diubah secara konstan.

$m(t)$ awalnya merupakan fungsi pola arbitrer. Ini memutuskan proses sinyal apa yang terlibat:

- Jika $m(t) = e^{-j\omega t}$, hasil FT transformasi FOURIER
- Jika $m(t) = x_1(t)$, hasil ACF fungsi autokorelasi
- Jika $m(t) = x_2(t)$, fungsi korelasi silang CCF ($x_2(t)$ tidak sama $x_1(t)$)

Struktur perkalian dalam integral ini tampaknya mencakup bentuk proses sinyal yang paling penting seperti analisis dan sintesis sinyal serta karakteristik statistik pola dan ekstraksi informasi tertentu dari noise.

Petunjuk ini akan ditindaklanjuti dengan melihat lebih dekat pada ACF dan CCF dan dengan menurunkan koneksi lebih lanjut. Berikut adalah sekali lagi definisi:

Fungsi autokorelasi:

$$\phi_{x_1 x_1} = x_1 \circ x_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(\tau) x_1^*(\tau - t) d\tau$$

Fungsi korelasi silang:

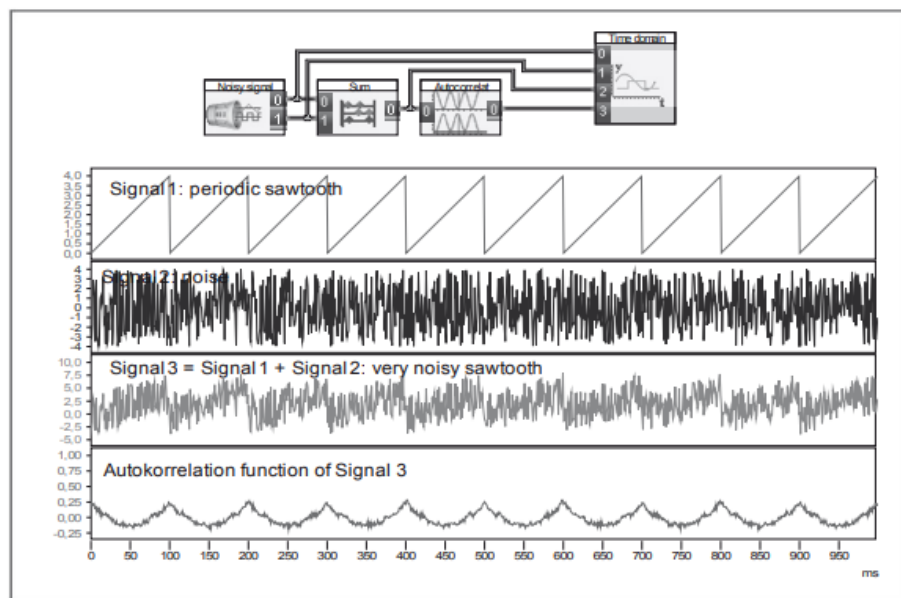
$$\phi_{x_1 x_2} = x_1 \circ x_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(\tau) x_2^*(\tau - t) d\tau$$

catatan:

- Jika kita memiliki sinyal input yang kompleks, dalam perkaliannya satu sinyal harus konjugasi kompleks ke sinyal lainnya, yaitu kedua sinyal harus melakukan counter-rotate pada bidang GAUSSI. Hanya dengan cara ini, nilai maksimum $|x_1|^2$ atau $|x_1 x_2|$, dapat dicapai yang valid menurut aturan perkalian (lihat Gambar 303). Secara umum, berikut ini berlaku untuk sinyal kompleks dalam notasi simbolik :

$$x(t) \cdot x^*(t) = x(t) \cdot x(-t) \text{ bzw. } X(\omega) \cdot X^*(\omega) = X(\omega) \cdot X(-\omega)$$

- ACF menunjukkan korelasi fungsi waktu $x_1(t)$ dan fungsi pergeseran temporal $x_1(t+\tau)$. NS. Jadi, ACF adalah ukuran analogi bagian yang lebih baru dan lebih awal dari suatu sinyal, ukuran kecenderungan bawaannya untuk mempertahankan dirinya sendiri, untuk prediksi kurva waktu serta kemampuan interferensi dengan dirinya sendiri.
- Dalam osilasi sinus ACF (lihat Gambar 317), amplitudo dan frekuensi fungsi waktu muncul kembali, tetapi bukan sudut fase nol. Sebagai hasil dari ACF informasi fase umumnya hilang karena rata-rata.



Gambar 318: Beberapa Sinyal Waktu Dan Fungsi Autokorelasinya

Mulai proses DASYLab untuk melihat informasi fase yang umumnya hilang karena rata-rata. Perbandingan antara sinyal "bersih" dan sinyal bising menunjukkan bagaimana menyaring "kecenderungan mempertahankan" masing-masing frekuensi/durasi siklus yang tepat dengan autokorelasi.

Autokorelasi derau murni tidak menunjukkan kecenderungan untuk bertahan. Hal ini juga menunjukkan kebisingan masing-masing murni acak.

Teorema WIENER-KHINTSHINE-

Bagaimana fungsi autokorelasi dapat dihitung oleh komputer dengan cara yang paling mudah? Seperti halnya konvolusi, ini dapat dilakukan dengan bantuan FFT dan IFFT.

Dalam kasus sinyal waktu nyata, nilai rata-rata produk dari sinyal waktu ditentukan oleh fungsi autokorelasi. Karena kita berurusan di sini terutama dengan sinyal $u(t)$ atau $i(t)$ yang muncul dengan pengukuran nilai fisik, output listrik dapat ditentukan melalui fungsi autokorelasi bahkan dalam kasus yang lebih rumit, misalnya, dengan sinyal bising pada komponen elektronik:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = i(t)^2 R = \frac{u(t)^2}{R}$$

Teorema WIENER-KHINTSHINE menyatakan bahwa nilai rata-rata dari keluaran derau spektral adalah fungsi autokorelasi ini, yang telah ditransformasi FOURIER, atau bahwa fungsi korelasi otomatis adalah IFT dari rapatan daya spektral:

$$\phi_{x_1 x_1} = x_1 \circ x_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(\tau) x_1^*(\tau - t) d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Teorema PARSEVAL

Untuk derivasi teorema WIENER- KHINTCHINE konteks berikut diperlukan:

Dengan asumsi bahwa FT dan IFT ada untuk sinyal

$$x_1(t) \xrightarrow{FT} X_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{bzw.} \quad x_2(t) \xrightarrow{FT} X_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_2(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$X_1(\omega) \xrightarrow{IFT} x_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_1(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{bzw.} \quad X_2(\omega) \xrightarrow{IFT} x_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_2(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Teorema PARSEVAL berlaku

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) \cdot x_2^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_1(\omega) \cdot X_2^*(\omega) d\omega$$

Penurunan:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) \cdot x_2^*(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_2^*(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \right] dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} X_2^*(\omega) \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) e^{-j\omega t} dt \right] d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_1(\omega) \cdot X_2^*(\omega) d\omega \end{aligned}$$

Turunan dari teorema WIENER-KHINTCHINE

$$\begin{aligned}
 \phi_{x_1 x_1} &= x_1 \circ x_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(\tau) x_1^*(\tau-t) d\tau \quad \text{vow IFT} \{x_1(\tau) x_1^*(\tau-t)\} \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_1(\omega) \cdot X_1^*(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{time shift: IFT} \{x_1^*(\tau-t)\} = X_1^*(\omega) e^{j\omega t}) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |X_1(\omega)|^2 e^{j\omega t} d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad , \text{ if } \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |X_1(\omega)|^2 = S(\omega)
 \end{aligned}$$

Penurunan:

Kerapatan kebisingan spektral rata-rata dapat dinyatakan sebagai daya rata-rata per frekuensi

$$S_t(f) = \frac{d\bar{P}}{df} \quad \text{bzw.} \quad S_\omega(\omega) = 2\pi \frac{d\bar{P}}{d\omega}$$

Untuk menghitung daya rata-rata, kita mulai dari energi total E_Σ

$$E_\Sigma = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$$

Sekarang gunakan teorema PARCEVAL

$$\bar{P} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega \quad \text{choose now } \frac{1}{T'} = \frac{1}{4\pi T}$$

dan kamu mendapatkan

$$\bar{P} = \lim_{T' \rightarrow \infty} \frac{1}{T'} \int_{-T'}^{T'} |X(\omega)|^2 d\omega = S(\omega)$$

Ini adalah nilai rata-rata daya spektral atau kerapatan daya kebisingan spektral rata-rata S

Teorema Korelasi Silang

Untuk hasil korelasi silang sebagai berikut sesuai dengan derivasi yang diuraikan di atas:

$$\phi_{x_1 x_2} = x_1 \circ x_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(\tau) x_2^*(\tau-t) d\tau = FT \{X_1(\omega) \cdot X_2^*(\omega)\}$$

Aplikasi CCK yang paling umum mungkin dalam metode lokalisasi kesalahan atau dalam masalah pengenalan pola, yang penyebabnya adalah pergeseran sinyal. Jika ada sinyal $x(t)$ dan sinyal pergeseran waktu $x(t - t_0)$, fungsi korelasi silang maksimum menggambarkan persis pergeseran waktu t_0 . Jika, misalnya, Anda mengirim sinyal akustik dan menunggu gemanya, CCF sinyal dan gema menunjukkan dengan penundaan berapa gema kembali. Contoh serupa adalah pipa air pecah, di mana pada awal pipa $x_1(t)$ dan pada akhir $x_2(t)$ dilakukan pengukuran akustik (lokasi cacat). Metode ini masih bekerja cukup baik jika kedua sinyal berisik.

Perhitungan oleh komputer kembali beroperasi dengan FFT dan IFFT.

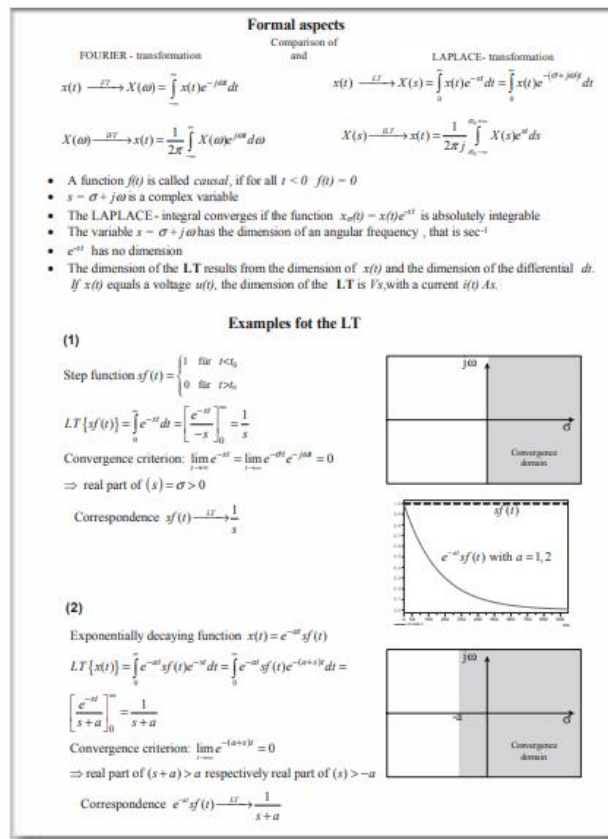
Transformasi- LAPLACE

Dari sudut pandang matematis, transformasi LAPLACE LT merupakan tambahan yang masuk akal untuk transformasi FOURIER-FT. Dibandingkan dengan FT di sini hanya eksponen fungsi e yang diubah: alih-alih kita memiliki e-(s)t= e. Gambar 318 membandingkan FT dan LT. LT sudah disebutkan dalam bab 6 (Gambar 114, 115). Apa efek dari penambahan ini?

Interpretasi fisik:

Karena tambahan suku e-t dapat diartikan sebagai faktor redaman, jika bilangan real > 0. Untuk sinyal x(t), menjalani LT, berikut ini valid karena perkalian dengan e-σt (jika cocok)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) e^{-\sigma t} \rightarrow 0$$



Gambar 319: Perbandingan struktur FT dan LT dan dua contoh LT

Fungsi langkah sf(t) adalah fungsi standar dari proses turn-on. Dalam kedua contoh, wilayah konvergensi (ROC) menghasilkan kriteria konvergensi (berbeda). Dalam contoh kedua, daerah konvergensi lebih besar, karena e-at telah melakukan beberapa "pekerjaan dasar" untuk batas 0. Di hampir semua buku teks teknis, ada ringkasan tabel transformasi LAPLACE- untuk hampir semua fungsi eksitasi yang berarti x (T). Derivasi dari ILT dapat ditemukan berikut ini.

Karena itu, LT memungkinkan kita untuk memeriksa respons transien atau reaksi sistem linier yang bergantung pada frekuensi terhadap proses penyalaan secara rinci (dalam Gambar 308, rangkaian osilasi umum dihitung hanya dalam keadaan tunak). Ini sangat penting untuk sirkuit atau sistem yang bekerja dengan umpan balik/umpan balik negatif. Di sini, risiko ketidakstabilan ada, yaitu osilasi kuat yang tidak terduga mungkin muncul yang tidak sesuai dengan kinerja yang direncanakan. Dalam praktiknya, sistem kemudian bergerak ke batas yang ditentukan dan menciptakan distorsi non-linier (lihat Gambar 124).

Perhatikan bahwa dalam teknologi pengukuran, Anda dapat memeriksa kembali transien tersebut dengan bantuan "trik" menggunakan FT, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 115.

Interpretasi Matematika

Setiap informasi tentang karakteristik dan keunggulan FT juga berlaku untuk LT. Anda dapat mentransfer persamaan diferensial linier yang sangat penting untuk fisika dan, terlebih lagi, teknik, ke dalam persamaan aljabar yang lebih sederhana. Berbeda dengan FT, LT tidak memberikan hasil langsung yang dapat ditafsirkan secara fisik. Sebenarnya ini mewakili skema formal murni dan sedikit menarik bagi metrologi.

Dalam beberapa kasus, integral FT tidak dapat diintegrasikan, yaitu tidak memiliki nilai yang terbatas. Misalnya, fungsi langkah tidak dapat diintegrasikan dari 0 hingga tetapi fungsi $x(t)$ untuk kapital t dapat diarahkan ke nol dengan bantuan "fungsi peluruhan" (seperti yang ditunjukkan di atas), sehingga membuatnya dapat diintegrasikan. $e^{-\sigma t}$ karena itu disebut faktor konvergensi.

Operasi switching dimulai pada $t = 0$ detik, oleh karena itu area integrasi LT hanya mengarah dari 0 ke ∞ . Jika tidak, untuk $t < 0$ $e^{-\sigma t}$ akan menjadi faktor divergensi Teorema konvolusi memiliki kepentingan yang sama untuk LT dan FT, tetapi kita tidak akan berurusan dengan mereka lebih lanjut pada saat ini.

Turunkan invers LAPLACE- transformasi ILT

LT didefinisikan sebagai

$$x(t) \xrightarrow{LT} X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt = \int_0^{\infty} x(t)e^{-(\sigma + j\omega)t} dt$$

Perbandingan dengan IFT yang sesuai dari $x(t)$ menunjukkan bahwa $X(s)$ yang ditransformasi LAPLACE mewakili transformasi FOURIER dari fungsi $x(t)e^{-\sigma t}$.

Jika sekarang Anda mengalikan persamaan ini dengan faktor $e^{j\omega t}$, hasilnya adalah

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(s)e^{st} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(s)e^{(\sigma + j\omega)t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(s)e^{st} d\omega$$

Variabel di sini hanya ω , karena $\sigma = 0$ konstan dan memiliki tempat yang terdefinisi dengan baik di bidang konvergensi. Oleh karena itu $ds = j d\omega$. Jadi hasil ILT sebagai berikut:

$$X(s) \xrightarrow{ILT} x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma_c - j\infty}^{\sigma_c + j\infty} X(s)e^{st} ds$$

Di sini, hanya gambaran singkat tentang LT dibandingkan dengan FT yang dimaksudkan. Pemahaman yang lebih mendalam membutuhkan alat matematika tambahan yang cukup besar. Namun, penekanan buku ini adalah pada pemrosesan sinyal yang dapat dijelaskan dan dibuktikan secara fisik menggunakan teknik pengukuran.

Kalkulus operator

Tinjauan teknis dan historis dapat ditemukan di Wikipedia dan akan dikutip di sini:

Dalam elektro-teknologi dan teori sistem rekayasa telekomunikasi, kalkulus operasional dipahami sebagai beberapa kalkulus yang berevolusi secara historis untuk menggambarkan kinerja sistem invarian waktu linier.

Alih-alih deskripsi "klasik" dengan persamaan diferensial dan sistem persamaan diferensial dan solusi ekstensifnya, kalkulus operasional menggambarkan kinerja komponen dasar dan sistem kompleks oleh operator sehingga mengurangi persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar.

Secara matematis terdapat ruang vektor dengan dimensi berhingga yang selalu dapat juga dirumuskan secara eksplisit dalam istilah aljabar.

Sebuah sistem di sini dijelaskan oleh konteks berikut:

Efek = Karakteristik sistem • penyebab

Dalam semua kalkulus operasional, perbedaan antara sinyal dan karakteristik sistem menghilang. Keduanya diwakili secara setara oleh masing-masing operator.

Kalkulus operasional yang berbeda berkembang dalam urutan sejarah berikut:

Kalkulus arus bolak-balik kompleks

Metode simbolis ini (disebut "jωcalculus") memperkenalkan operator resistor kompleks (dan lainnya), tetapi masih terikat pada sinyal sinusoidal stasioner. Pengenalan frekuensi kompleks ke dalam metode simbolis yang diperluas pada prinsipnya tidak dapat mengubah ini.

Kalkulus HEAVISIDE

Oliver HEAVISIDE memperluas metode simbolis kalkulus AC untuk sinyal arbitrer secara empiris dengan memperkenalkan operator diferensial dan menggunakannya sebagai variabel "normal". Kalkulus operasional HEAVISIDE terkadang menghasilkan hasil yang salah, karena interpretasi ("agak sulit") (dalam keadaan yang tidak mungkin untuk ditentukan secara konkret). Dasar matematisnya tidak didefinisikan secara tepat.

Transformasi LAPLACE

Thomas BROMWICH, Karl Willy WAGNER, John R. CARSON dan Gustav DOETSCH mengembangkan transformasi LAPLACE ke titik di mana dimungkinkan untuk menggunakannya dalam praktik. Ini berusaha untuk menghilangkan masalah yang timbul dengan transformasi FORIER dengan transformasi fungsional. Namun, jumlah fungsi waktu yang dapat dideskripsikan harus dikurangi dan beberapa masalah batas diselesaikan. Demonstrasi proposisi transformasi LAPLACE sering kali secara matematis “sangat menantang”.

Kalkulus operasional MIKUSINSKI

Kalkulus operasional berbasis aljabar ini dikembangkan pada 1950-an oleh matematikawan Polandia Jan MIKUSINSKI. Ini didasarkan pada kalkulus operasional HEAVISIDE dan mendasarkannya kembali menggunakan metode aljabar dengan cara baru yang tepat secara matematis.

Kelebihan kalkulus operasional MIKUSINSKI:

- operator secara instan mewakili model matematis dari sistem.
- tidak ada jalan memutar melalui domain gambar (domain frekuensi) diperlukan, Anda selalu bekerja di domain asli (domain waktu).
- Penilaian konvergensi dan keterbatasan yang dihasilkannya tidak diperlukan.
- Bekerja dengan distribusi untuk menggambarkan impuls DIRAC- (dan sinyal serupa) tidak diperlukan.
- Kekurangan dari kalkulus operasional MIKUSINSKI:
- Dasar aljabar secara matematis sangat abstrak. Berlatih insinyur dengan pengetahuan terbatas tentang aljabar mungkin merasa sulit untuk memvisualisasikan.
- Transisi ke "frekuensi imajiner" sering digunakan dalam praktik dan dengan demikian demonstrasi spektral sinyal tidak segera terlihat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ablowitz, M.J. and Joka, A.S. (1997). Complex Variables, Cambridge University
- Allan V. Oppenheim, Alan S. Willsky: Signals and Systems; Prentice Hall, New Jersey, 1997; ISBN 0-13-814757-4
- Barbara Burke Hubbard: The World According to Wavelets: The Story of a Mathematical Technique in the Making, Second Edition 1998, A.K. Peters, Nattick, Massachusetts
- Christopher M. Bishop: Neural Networks for Pattern Recognition, Oxford University Press, 2005, ISBN 978-0-19-853864-6
- Craig Marven and Gillian Ewers: A simple approach to Digital Signal Processing; Texas Instruments 1993; ISBN 0-904047-00-8
- Daubechies, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets, CBSM-NSF Regional Conf. Series in Applied Mathematics, SIAM: Philadelphia,
- Gasquet, C. and Witomski, P. (1991). Analyse de Fourier et Applications, Masson.
- Haykin, S. (1989). An Introduction to Analog and Digital Communications, Wiley: New York.
- Hirsch, M.W. and Smale, S. (1974). Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra, Academic Press: San Diego.
- Hwei P. Hsu: Signals and Systems, (Schaum's Outlines), McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-030641-9
- Kodaira, K. (1984). Introduction to Complex Analysis, Cambridge University Press.
- Lighthill, M.J. (1980). An Introduction to Fourier Analysis and Generalized Functions, Cambridge University Press.
- Murray R. Spiegel: Laplace Transforms (Schaum's Outlines), McGraw-Hill, 1965
- Nussbaumer, H.J. (1981). Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms, Springer-Verlag: New York.
- Orfanidis, S. (1985). Optimal Signal Processing, McMillan: New York.
- Papoulis, A. (1984). Signal Analysis, McGraw-Hill: New York.
- R.B.Randall: Frequency analysis: Brüel & Kjaer, Glostrup, Denmark 1987; ISBN 87-87355-07-8
- Rudin, W (1966) Real and Complex Analysis, McGraw-Hill: New York.

Ulrich Reimers: Digital Video Broadcasting; Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York 1998;
ISBN 3 – 540 –60946-6

Vetterli, M. and Kovačević, J. (1995). Wavelets and Sub-Band Coding, Prentice-Hall: Englewood
Cliffs, NJ.