

memberikan bayangan khusus berwarna merah. Ini sama halnya dengan sinyal radio dan elektrik telekomunikasi. Biasanya kita tidak membahas sebuah frekuensi tunggal tetapi sekelompok, atau seberkas frekuensi yang menempati wilayah tertentu.

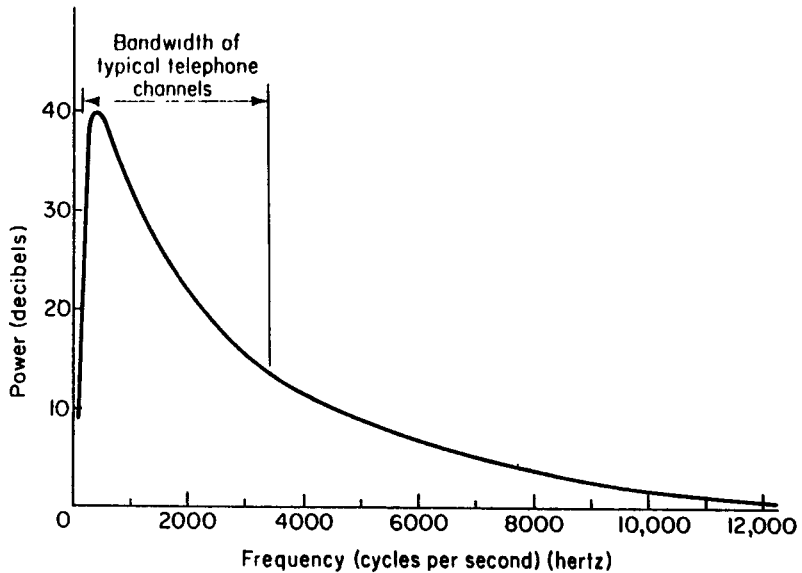
SPEKTRUM SUARA PEMBICARAAN

Telinga manusia dapat mendeteksi bunyi sebanyak sejumlah frekuensi; dengan kata lain, telinga dapat mendengar bunyi yang berlainan frekuensinya. Telinga sensitif dapat mendengar bunyi yang frekuensinya menjangkau dari 30 Hz sampai dengan 20.000 Hz, meskipun sebagian besar orang memiliki jangkauan yang agak kurang dari itu.

Bila kita menyebut bunyi dari frekuensi yang ada, kita maksudkan bahwa udara bergetar dengan jumlah osilasi itu per detik. Untuk mentransmisikan bunyi ini, mikropon telepon mengubah bunyi menjadi osilasi elektrik per detik yang jumlahnya setara. Channel telepon yang akan kita gunakan untuk mengirimkan data selanjutnya dirancang untuk mentransmisikan osilasi elektrik yang jangkauannya setara dengan frekuensi suara manusia, meskipun frekuensi ini seringkali diubah untuk keperluan transmisi, seperti yang akan kita bahas pada bagian transmisi digital.

Sebenarnya rangkaian telepon tidak mentransmisikan semua suara manusia. Terbukti bahwa tidaklah perlu untuk memahami pembicaraan dan pengenalan pembicara. Gambar 10.1 menggambarkan karakteristik percakapan manusia dan menunjukkan bahwa kekuatannya berbeda-beda pada frekuensi yang berlainan. Sebagian besar energi dicurahkan pada frekuensi antara 300 sampai dengan 3100 Hz, dan setiap channel telepon dirancang untuk bertransmisi pada jangkauan ini. Ini adalah keputusan yang didasarkan pada pertimbangan ekonomis. Ini memungkinkan jumlah maksimal percakapan telepon dikirimkan secara seketika melalui berbagai media fisik yang dibahas pada Bab 11 sambil masih membuat suara manusia menjadi jelas dan si pembicara dapat dikenali.

Gambar 10.1 dapat disebut sebagai *diagram spektrum*. Sidang pembaca seharusnya mulai mengenal bentuk diagram ini karena ini akan digunakan berturut-turut untuk menjelaskan teknik-teknik yang digunakan dalam transmisi data. Gambar 10.1 berhubungan dengan frekuensi yang dapat didengar. Diagram yang digunakan pada halaman berikutnya berhubungan dengan frekuensi sinyal yang tidak



Gambar 10.1 Spektrum pembicaraan manusia. Untuk mentransmisikan pembicaraan agar si pembicara dapat dikenal dan dapat dipahami, hanya wilayah yang diindikasikan yang dikirimkan.

dapat didengar. spektrum bunyi atau spektrum sinyal elektrik secara luas setara dengan spektrum cahaya yang mungkin lebih pembaca kenal.

Seberkas sinar dapat dipecah menjadi beberapa frekuensi yang berbeda-beda dengan spektrometer sehingga menghasilkan berkas aneka warna persis seperti sinar matahari diuraikan oleh hujan sehingga membentuk pelangi. Kadangkala spektrum itu dapat berisikan berkas sinar yang terus menerus, dan di lain waktu, jalur-jalur spektrum tajam. Sebagaimana yang akan kita bahas pada Bab 17, berbagai frekuensi cahaya dapat digunakan untuk transmisi data dalam rangkaian (sirkuit) serat optik. Diagram spektrum yang seharusnya kita gunakan untuk keperluan penjelasan ini berfungsi sama untuk aneka ragam frekuensi dalam sinyal elektrik, dan beberapa diagram, seperti pada Gambar 13.11, menunjukkan jalur spektrum tajam dan bukannya spektrum terus-menerus.

Lintasan spektrum (gelombang cahaya maupun gelombang elektrik) berhubungan dengan pentransmisian hanya pada sebuah frekuensi. Untuk sebuah frekuensi, transmisi ini dapat digambarkan melalui persamaan

$$a = A \sin 2 \pi f t$$

dimana a adalah amplitudo seketika, yang merupakan fungsi waktu t , dan A adalah amplitudo maksimum.

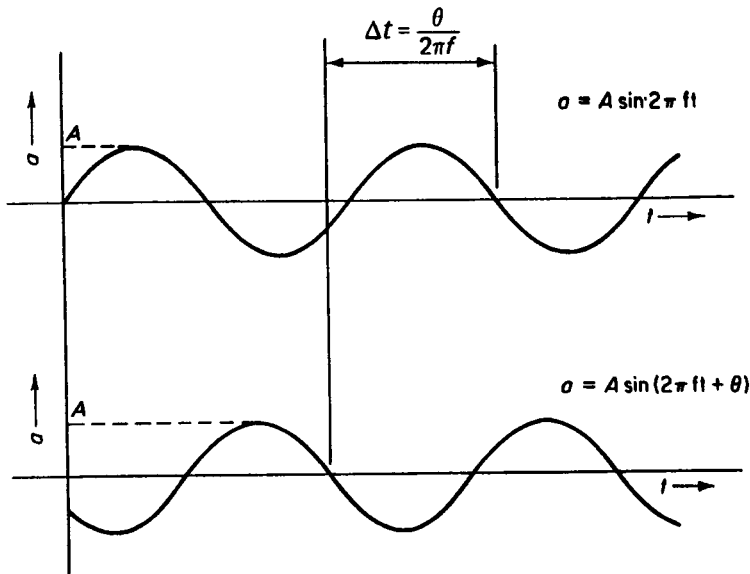
Kita akan berkali-kali berhubungan dengan gelombang sinus ini. Ini digambarkan pada Gambar 10.2. Ada puncak f dari tipe pada diagram ini yang muncul setiap detik — yaitu yang kita maksudkan ketika kita menyatakan bahwa “frekuensinya” adalah f hertz. Ada f siklus lengkap per detik, dua diantaranya dilukiskan pada masing-masing diagram pada Gambar 10.2.

FASE

Gambar 10.2 menunjukkan dua buah gelombang sinus yang keduanya memiliki frekuensi sebanyak f , yang dipindahkan dari satu sama lain pada waktunya sehingga puncak-puncaknya tidak muncul secara serentak. Dengan demikian, gelombang itu dikatakan berbeda fasenya. Bila sebuah gelombang dirumuskan dengan $a = A \sin 2\pi ft$, maka yang lainnya dirumuskan sebagai

$$a = A \sin (2 \pi f t + \theta)$$

dimana θ disebut sebagai perbedaan fase.



Gambar 10.2 Dua gelombang sinus dari frekuensi f dengan perbedaan fase θ .

Waktu untuk sebuah siklus gelombang sinus, atau, waktu $1/f$, adalah ekuivalen dengan perbedaan fase atau sudut $\theta = 360^\circ$ (2π radian). Dua gelombang yang frekuensinya sama tetapi berbeda fasenya sampai 360° adalah identik. Salah satu metode pengiriman informasi digital yang akan dibahas di Bab 13 adalah mentransmisikannya dalam fase yang bervariasi. Perbedaan fase maksimum untuk keperluan ini adalah kurang dari 360° karena perubahan sebanyak 360° akan tidak dapat dibedakan dengan aslinya.

Dua gelombang sinus yang berbeda waktunya sebanyak Δt memiliki perbedaan fase $\theta = 2\pi f \Delta t$ radian. Perbedaan waktu Δt , dengan demikian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.2, adalah $\theta/2\pi f$.

DESIBEL

Umumnya satuan yang digunakan untuk menyatakan kekuatan sinyal dalam telekomunikasi adalah *desibel* (dB). Satuan ini juga digunakan untuk menyatakan perolehan (gain) atau kehilangan (loss) dalam kekuatan sinyal. Diagram spektrum seperti pada Gambar 10.1 memiliki desibel pada sumbu vertikal. Satuan ini mengukur *perbedaan* dalam kekuatan sinyal, bukan kekuatan absolut sinyal, dan merupakan satuan logaritmis, bukan linier. Kedua fakta ini kadangkala membingungkan. Kotak 10.1 memberikan informasi yang harus diketahui oleh pembaca mengenai desibel dan satuan-satuan yang mirip tersebut.

Pertama kali desibel digunakan sebagai satuan yang berhubungan dengan bunyi. Wajarlah bila menyebut tingkat bunyi dengan satuan logaritmis karena respon

KOTAK 10.1 desibel, dBv, dBm, dan neper.

Desibel

Unit yang normalnya digunakan untuk memperlihatkan perbedaan dalam kekuatan signal dalam telekomunikasi adalah desibel. Desibel adalah unit dari kekuatan rasio. Bukan merupakan unit yang absolut tapi merupakan unit yang dipekerjakan untuk membandingkan kekuatan dari 2 signal. Rasio signal ke suara, normalnya dikutip sebagai contoh, dalam desibel.

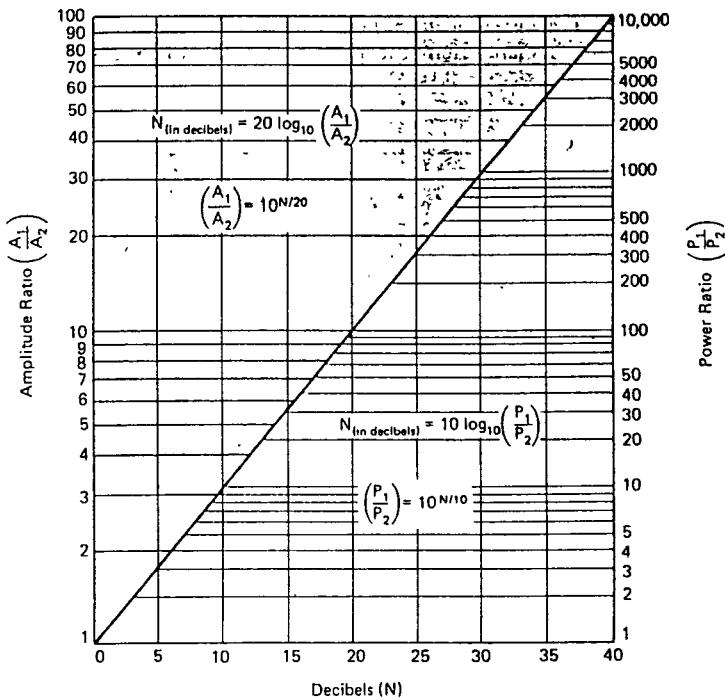
KOTAK 10.1 (lanjutan)

Satu desibel sama dengan 10 kali logaritma (dasar 10) dari rasio kekuatan:

$$\text{jumlah desibel} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

di mana P1 adalah kekuatan yang lebih besar (biasanya) dan P2 yang lebih kecil.

Desibel juga digunakan untuk didefinisikan sebagai unit dari pengecilan yang disebabkan oleh 1 mil standar no. 19 kabel tantangan pada frekwensi 866Hz, walaupun definisi ini sekarang sudah dianggap usang. Pengecilan satu desibel berarti bahwa sebuah signal telah menurun menjadi 0.794 dari kekuatan aslinya. Perolehan satu desibel berarti bahwa sebuah signal telah meningkat menjadi 1.259 dari kekuatan aslinya.

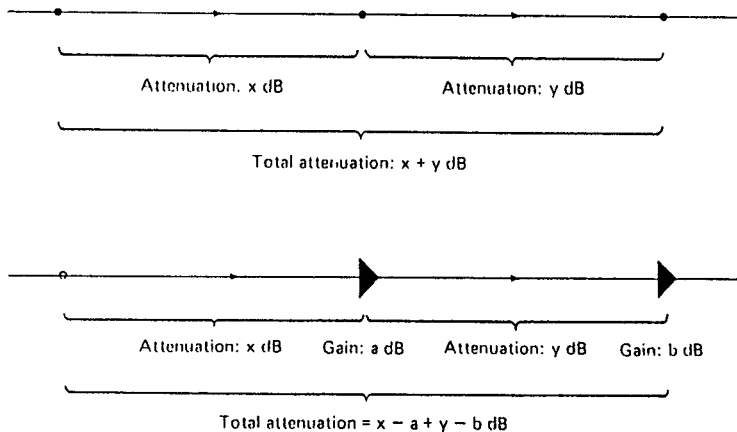


BOX 10.1 (lanjutan)

Voltase dan rasio yang terbaru juga dikutip dalam desibel. Kekuatan seimbang terhadap pangkat amplitudo dari sebuah signal. Rasio kekuatan dari 100, misalkan adalah sama dengan rasio amplitudo sebesar 10. Karna itu, di mana 2 tingkat yang terbaru adalah a_1 dan a_2 , atau kedua tingkat voltase adalah V_1 dan V_2 , kita mempunyai:

$$\text{jumlah desibel} = 20 \log_{10} \frac{a_1}{a_2} \text{ atau } 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2}$$

Desibel digunakan untuk menyatakan jumlah yang diperoleh dalam amplifiers, tingkat suara, kehilangan dalam garis transmisi, dan juga perbedaan dalam intensitas suara. Desibel merupakan unit yang berharga untuk komunikasi karna kehilangan atau perolehan dalam kekuatan signal mungkin ditambahkan atau dikurangi kalau mereka mengarah dalam desibel sebagaimana diperlihatkan dalam gambar di bawah.



Misalkan ada sebuah signal yang ditransmisikan melalui sebuah garis yang mengurangi kekuatannya dalam rasio 20 : 1. Kemudian signal tersebut melalui bagian lain dari garis yang menguranginya pada rasio 7 : 1. Pengurangan jaringan ada dalam rasio 140:1. Menyatakannya dalam desibel, pengurangan pertama adalah $10 \log 10 20 = 13.01$ desibel, dan pengurangan kedua adalah $10 \log 10 7 = 8.45$ dB. Pengurangan jaringan merupakan penjumlahan dari 21.46 dB ($10 \log 10 140 = 21.46$ dB).

KOTAK 10.1 (lanjutan)

Dengan cara yang sama, kalau kita mengatakan bahwa garis kehilangan adalah 2 dB per mil, maka kehilangan di akhir garis 25 mil adalah 50 dB. Karna itu kita membutuhkan amplifier dengan perolehan 50 dB untuk menghasilkan signal dari kekuatan asli.

Grafik pada halaman 173 akan memungkinkan pembaca untuk merubah bentuk kekuatan secara cepat atau rasio amplitudo menjadi desibel, dan sebaliknya.

1 desibel pengurangan berarti 0.79 kekuatan input tertinggal

3 desibel pengurangan berarti 0.50 kekuatan input tertinggal

10 desibel pengurangan berarti 0.1 kekuatan input tertinggal

20 desibel pengurangan berarti 0.01 kekuatan input tertinggal

30 desibel pengurangan berarti 0.001 kekuatan input tertinggal

40 desibel pengurangan berarti 0.0001 kekuatan input tertinggal

dBV, dBm, dan dBW

Istilah dBV adalah pengukuran voltase didefinisikan dengan persamaan

$$\text{dBV} = 20 \log_{10} \frac{\text{voltase (volts)}}{1 \text{ volt}}$$

Istilah dBm adalah pengukuran kekuatan didefinisikan dengan persamaan

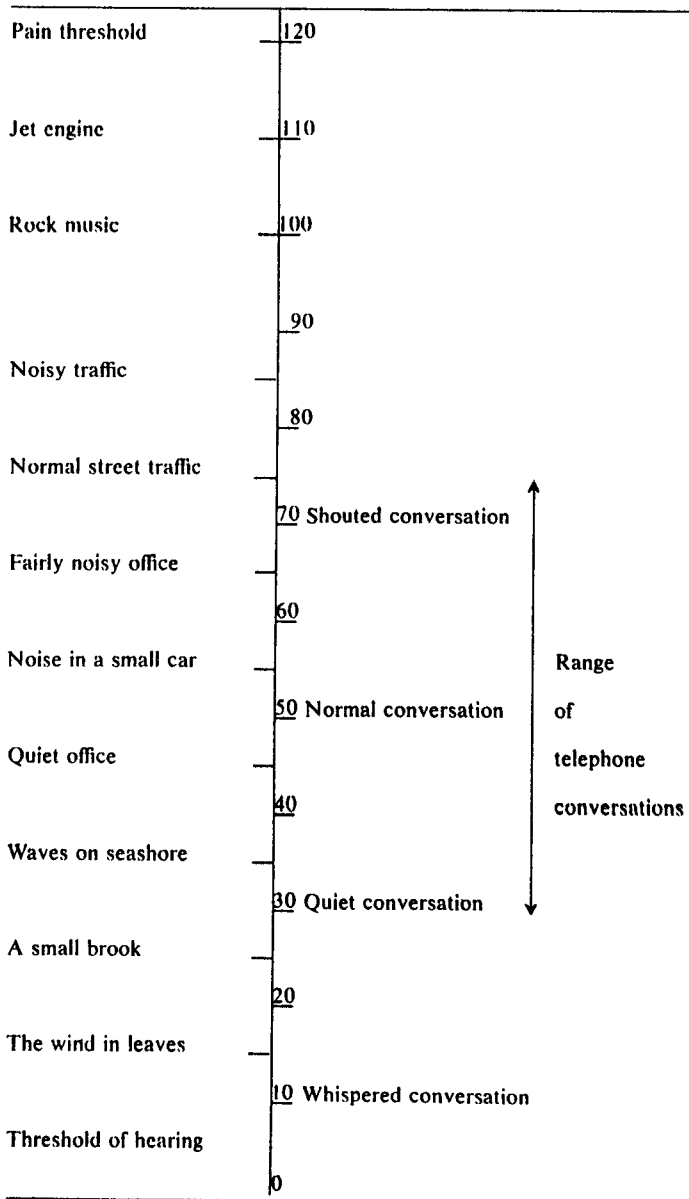
$$\text{dBm} = 10 \log_{10} \frac{\text{Power (milliwatts)}}{1 \text{ milliwatt}}$$

Istilah dBW adalah pengukuran kekuatan didefinisikan dengan persamaan

$$\text{dBW} = 10 \log_{10} \frac{\text{Power (watts)}}{1 \text{ watt}}$$

telinga manusia adalah sebanding dengan logaritma energi bunyi, tidak pada energi itu sendiri. Bila suatu bunyi terdengar dua kali lipat bunyi lainnya, sebenarnya kekuatannya tidak dua kali lipat tetapi kira-kira 2 dB lebih besar. Energi bunyi yang sampai ke telinga anda di terowongan (subway) di New York mungkin 10.000 kali lebih besar daripada di ruangan tempat anda membaca buku ini, tetapi ini tidak berbunyi sepuluh ribu kali lebih besar. Sumber bunyi itu sekitar 40 kali lebih besar—anda harus berteriak 40 kali lebih keras agar dapat didengar oleh

Tabel 10.1 Intensitas bunyi-bunyi umum diukur dalam desibel dihubungkan dengan awal pendengaran.



seseorang pada jarak yang sama. Kekuatan bunyi sebanyak sepuluh ribu kali lipat disebut “40 dB lebih besar”.

Tabel 10.1 menunjukkan intensitas beberapa sumber bunyi biasa yang diukur dalam desibel relatif pada saat pertama pendengaran manusia mendengar sumber bunyi itu. Wajarlah bila menghubungkan *transmisi* dengan dengan satuan logaritmis karena kekuatan sinyal turun *secara logaritmis* sewaktu bunyi itu merambat di sebuah kabel; maka kita dapat menyebutnya penurunan konstan per mil.

BANDWIDTH (LEBAR GELOMBANG)

Bila frekuensi yang membentang antara 300 sampai dengan 4000 atau malah antara 300-3000 Hz cukuplah memuaskan untuk transmisi suara, maka musik akan terdengar jelek sekali karena akan diklip oleh frekuensi yang lebih tinggi dan lebih rendah yang menentukan kualitasnya. Untuk mereproduksi nada-nada rendah dari perkusi atau dobel bass yang sebenarnya, kita harus menurunkannya sampai 30 Hz, dan untuk mereproduksi harmoni tinggi yang menyebabkan instrumen-instrumen itu terdengar realistik (nyata) diperlukan frekuensi sebesar sampai dengan 15.000 Hz atau, lebih baik, 18.000 Hz. Mengarah ke ekstrimitas inilah para penggemar hifi berusaha keras.

Radio AM mentransmisikan bunyi sampai dengan 5kHz; sehingga mampu mereproduksi muik yang tidak terlalu terdistorsi tetapi bukan hifi. Radio FM dapat menghasilkan seluruh jangkauan yang diperlukan untuk reproduksi hifi. Kita mengatakan bahwa radio AM menggunakan *lebar gelombang (bandwidth)* 5 kHz, sedangkan radio FM mempunyai lebar gelombang (bandwidth) sebesar 18 kHz. Lebar gelombang (bandwidth) berarti *jangkauan* frekuensi yang ditransmisikan. Channel telepon yang mampu mengirimkan sinyal dari 300 sampai dengan 3300 Hz mempunyai lebar gelombang 3kHz.

Gelombang FM tidak benar-benar merambat pada frekuensi 30 sampai dengan 18.000 Hz. Transmisi ini terjadi pada frekuensi kira-kira 100 juta Hz (MHz). Konsiderasi serupa juga terjadi pada radio AM dan media berfrekuensi tinggi yang digunakan sebagai pembawa (carrier) channel telepon atau transmisi data.

Media transmisi akan bekerja secara efisien hanya pada frekuensi sekitar, katakanlah 70 sampai dengan 150 MHz (1 juta cycle per detik disebut 1 megahertz). Dengan demikian frekuensi tinggi ini dengan cara tertentu harus dibuat agar dapat membawa frekuensi yang lebih rendah. Dengan kalimat lain, frekuensi rendah harus memodulasi frekuensi carrier (pembawa) agar dapat menghasilkan sinyal

yang dapat ditransmisikan secara efisien dan dari frekuensi itu, setelah transmisi, frekuensi yang lebih rendah ini dapat dipulihkan.

Kita misalkan bahwa lebar gelombang 4000 digunakan untuk transmisi suara dan bahwa frekuensi pembawa (carrier) adalah 30 kHz. Proses konversi akan mengubah frekuensi gelombang (band) dari 0—4000 menjadi 30.000—34.000 Hz. Lebar gelombang masih 4000 dan masih akan membawa kuantitas informasi sama, apakah itu suara atau pun data.

Dengan demikian, istilah *bandwidth (lebar gelombang)* tidak ada hubungannya dengan frekuensi transmisi; istilah ini hanya menunjukkan ukuran jangkauan frekuensi. Secara formal dapatlah dinyatakan bahwa kuantitas informasi yang dapat dibawa oleh suatu channel adalah berbanding lurus dengan lebar gelombangnya (bandwidthnya).

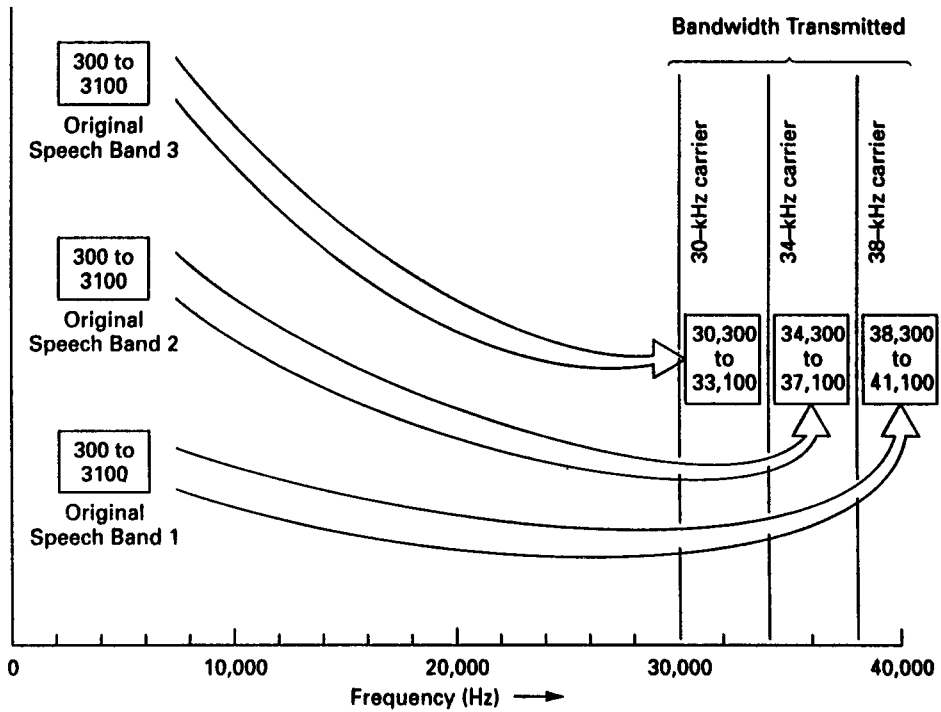
PEMULTIPLEKSAN (MULTIPLEXING)

Kabel fisik dan hubungan radio yang digunakan oleh common carrier untuk mentransmisikan sinyal (dijabarkan pada bab berikutnya) memiliki bandwidth tinggi — berlipat-lipat lebih tinggi daripada bandwidth 4kHz yang digunakan untuk pembicaraan. Untuk menggunakannya secara ekonomis, banyak channel pembicaraan bersama-sama ditransmisikan sebagai suatu sinyal tunggal yang menempati bandwidth fasilitas fisik. Untuk keperluan efisiensi, channel pembicaraan dipak bersama serapat mungkin, seperti sarden kalengan. Tiap channel pembicaraan menempati tidak lebih dari 4 kHz dari bandwidth yang tersedia.

Untuk mencapainya, setiap channel pembicaraan dinaikkan frekuensinya sampai kunci/slot 4kHz yang ditetapkan untuknya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.3. Proses ini disebut *multiplexing (pemultipleksan)* dan dijabarkan lebih rinci dalam Bab 14. “Multiplexing” artinya setiap proses yang *memungkinkan lebih dari sebuah sinyal terpisah ditransmisikan secara simultan melalui sebuah channel fisik*. Bila sebuah segmen spektrum frekuensi ditetapkan pada setiap sinyal, maka prosesnya disebut Frequency-division-multiplexing (FDM).

MODULASI

Bagaimanakah pembicaraan dinaikkan frekuensinya seperti pada Gambar 10.3? Ini dilakukan oleh suatu proses yang disebut *modulasi*. Gelombang sinus pada frekuensi tinggi dimodifikasi oleh pembicaraan yang ditransmisikan dengan suatu



Gambar 10.3 Multiplexing telepon. Setiap channel dinaikkan frekuensinya untuk dimasukkan pada bandwidth 4 kHz yang ada yang telah ditetapkan untuknya.

cara sedemikian rupa sehingga gelombang itu “membawa” pembicaraan itu. Gelombang sinus yang dimodifikasi ini disebut *carrier* (*pembawa*). Pada Gambar 10.3, ada tiga carrier yang masing-masing mempunyai frekuensi 30, 34, dan 38 kHz. Masing-masing dimodulasikan oleh band frekuensi 300 sampai dengan 3100 Hz untuk membentuk sebuah blok frekuensi yang agak lebih tinggi daripada frekuensi carrier. Carrier 30.000 Hz dimodulasikan agar memberi sinyal dalam jangkauan (range) 30.300 sampai dengan 33.100 Hz dan sebagainya. Sinyal ini ditransmisikan bersama dalam sebuah blok frekuensi yang berjangkauan antara 30.000 sampai dengan 42.000 Hz (atau lebih besar). Setelah pentransmisian sinyal ini dipisahkan dan *didemodulasi* sehingga menjadi tiga sinyal kembali pada range 300 sampai dengan 3100 Hz.

Transmisi radio AM dan FM, berurutan, yang merupakan singkatan dari “amplitudo modulation” dan “frequency modulation”, adalah dua teknik pengiriman bunyi pada frekuensi dimana kita *mengetune* radio domestik. “*Tuning*” adalah proses pemi-

lihat salah satu dari sekian banyak channel yang diterima secara simultan pada tingkat frekuensi yang agak berbeda. Amplitudo modulation dan frequency modulation, dan variasi lain juga digunakan untuk mengirimkan data melalui saluran telekomunikasi. Sistem modulasi berbeda memiliki kelebihan yang beragam pula, yang tergantung pada keperluan sistem, dan perencana sistem dapat dihadapi dengan keharusan untuk memilih metode modulasi. Ini dibahas pada Bab 13 dan 15.

BANDWIDTH CHANNEL TELEPON

Seperti kita ketahui, percakapan telepon dapat merambat melewati banyak proses multiplexing. Namun, multiplexing direkayasa untuk mempresisi standar dan properti channelnya yang dirasakan oleh para penggunanya adalah benar-benar mirip.

Gambar 10.4 menunjukkan properti sebuah contoh channel yang telah melewati peralatan multiplexing. Gambar ini menunjukkan betapa kekuatan sinyal bervariasi frekuensinya. Ada sedikit penurunan sinyal antara 300 dan 3100 Hz, tetapi di luar batas ini kekuatannya menurun dengan cepatnya. Energi utama percakapan manusia terletak dai antara jangkauan frekuensi ini, seperti terlihat pada Gambar 10.1.

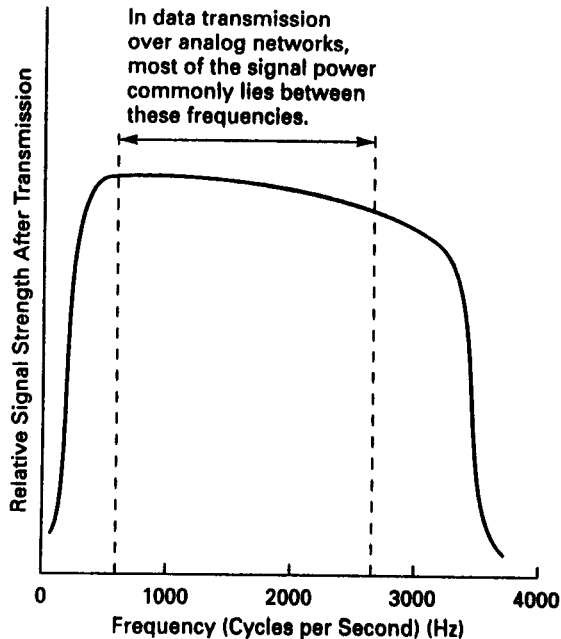
Elektronika gedung telepon telah dengan sengaja memotong sinyalnya sehingga nampak seperti pada Gambar 10.4 dan sepenuhnya sesuai dengan irisan 4 kHz. Ada bagian yang dibuang diantara irisan itu, yang meninggalkan suatu gap (celah) di antara channel itu. Celah ini diperlukan untuk mengurangi interferensi atau “silang percakapan” antar channel.

LOOP LOKAL (LOCAL LOOP)

Bila dilakukan panggilan lokal yang hanya memerlukan loop lokal untuk pertukaran telepon, dapatlah dicapai suatu bandwidth yang lebih lebar daripada yang ada pada Gambar 10,4 dan dapat ditransmisikan tingkat data yang lebih cepat.

Beberapa loop lokal panjang diberi koil pemuatan. Ini mengurangi penurunan, tetapi potensial bandwidth dan jumlah bit yang dapat digunakan menjadi lebih rendah. Agar transmisi berkecepatan tinggi dapat dicapai, maka koil pemuatan harus dibuang.

Frekuensi sampai dengan satu megahertz atau lebih dapat dapat ditransmisikan melalui loop telepon. Untuk mentransmisikan frekuensi tinggi semacam ini,



Gambar 10.4 Kurva ini menunjukkan betapa amplitudo suatu sinyal bervariasi frekuensinya setelah transmisi melalui rangkaian telepon. Sinyalnya diterima dengan kuat di antara frekuensi 300 sampai 3400 Hz. Saat data ditransmisikan, data ini harus dimanipulasikan dengan modem untuk menyesuaikannya pada frekuensi itu. Sayangnya sinyal kontrol perusahaan telepon untuk saluran umum juga ditransmisikan pada band ini seperti yang terlihat pada Gambar 25.3 dan 25.4 dan tidak boleh diinterferensi oleh transmisi data.

level sinyal harus benar-benar dikoordinasikan untuk menghindari interferensi dengan pelayanan lain yang mungkin menggunakan frekuensi yang lebih tinggi pada pasangan lain dalam kabel yang sama. Umumnya, gainnya harus disetarakan pada interval pendek. Tingkat transmisi data baseband sebanyak 250.000 bps umumnya dapat dicapai melalui loop lokal yang tidak dimuati. Fakta ini membentuk basis untuk distribusi transmisi ISDN yang menyediakan dua buah channel 64.000 bps dan channel signaling 16.000 kepada setiap pelanggan. Ini dibahas secara lebih rinci pada Bab 19. Karena loop lokal dengan cepat didigitalisasi, maka koil pemuatan menjadi berlebihan.

MENGIRIM DATA MELALUI CHANNEL TELEPON

Data yang dikirim melalui channel telepon analog harus tepat dengan bandwidth yang ditunjukkan pada Gambar 10.4. Karena channel telepon sangat tersebar luas,

maka diperlukan pembuatan proses elektronik yang akan memungkinkan data setinggi mungkin diselipkan ke spasi yang ditunjukkan dalam Gambar 10.4 tetapi tanpa menimbulkan tingkat kesalahan yang semakin tinggi.

Ini dicapai dengan proses modulasi lainnya. Maka digunakanlah suatu sarana yang disebut *modem*. (Modem adalah singkatan dari kata “modulasi” dan “demodulasi”). Beberapa perusahaan telepon menyebut modem sebagai *perangkat data (data set)*. Sekali lagi, carrier (pembawa) gelombang sinus dimodulasikan. Saat ini frekuensi carrier dipilih oleh perusahaan pembuat peralatan dan dimodulasikan sedemikian rupa sehingga komponen sinyal penting berada di dalam bandwidth pembicaraan. Ini dimodulasi oleh data yang harus dikirimkan dengan cara yang sedemikian rupa sehingga sinyal yang ada dengan tepat mengisi bandwidth yang tersedia.

Gambar 10.5 menunjukkan beberapa contoh modem, dan Gambar 10.6 mengilustrasikan cara kerjanya. Modem pada rangkaian telepon beroperasi pada kecepatan sampai dengan 19,2 bps. Pada umumnya modem ini digunakan pada kecepatan yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Banyak PC berisi modem yang sudah terpasang di dalamnya. Modem ini berupa papan kecil rangkaian yang dicat yang ditaruh pada board prosesor utama komputer.

Sinyal baseband tertentu dapat dikirimkan melalui loop telepon lokal tanpa modem. Aliran bit cepat dapat ditransmisikan dengan cara ini bila loopnya diberi koil lokal. Namun, sinyal baseband mempunyai bagian subsatansial dari energinya pada frekuensi di bawah 30 Hz, dan ini tidak dapat ditransmisikan melalui channel pada Gambar 10.4. Loop telepon menggunakan transformator untuk memutus pasangan kabel itu sehingga tidak dapat menangani sinyal baseband yang bisa jadi berisikan lintasan voltase tetap. Sinyal baseband dapat dikondisikan sebelum transmisi untuk memastikan bahwa sinyal itu mempunyai kemampuan yang memadai dan tidak ada lintasan voltase tetap.

SINYAL KONTROL

Ada kerumitan tambahan yang serius yang akan kita bahas pada Bab 28. Pada saluran telepon umum (misalnya pemutaran nomor), perusahaan menggunakan beberapa frekuensi pada band di Gambar 10.4 untuk signaling kontrol miliknya. Ini disebut dikenal sebagai *in-band signaling*. Suatu alternatif untuk ini yang digunakan dalam jaringan digital, yang disebut *out-band signaling*, dibahas pada Bab 28. Modemnya harus dirancang sedemikian rupa sehingga tidak dapat berin-

terferensi dengan sinyal-sinyal kontrol ini. Sinyal kontrol tidak digunakan pada saluran sewaan, sehingga modem untuk saluran umum selain lebih rumit daripada yang digunakan pada saluran sewaan juga mentransmisikan tingkat bit lebih rendah, hanya karena menghindari interferensi. Sejenak melongok ke depan, Gambar 28.4 dan 28.5 memperlihatkan sinyal kontrol pada band suara.

Tidaklah mustahil bila terdapat beraneka ragam proses modulasi, dan ini dibahas lebih mendalam pada Bab 13. Ada banyak ruang lingkup untuk kemampuan dalam pendesainan modem, dan peningkatan kecepatan pengiriman data melalui saluran telepon analog kebanyakan disebabkan oleh pengembangan rancangan modem. Fungsi modem yang lebih mendalam adalah melindungi saluran common carrier dari sinyal yang tidak dikehendaki yang mungkin menyebabkan interferensi dengan pengguna lain atau dengan sistem signaling jaringan lainnya.

DUA PROSES MODULASI TERPISAH

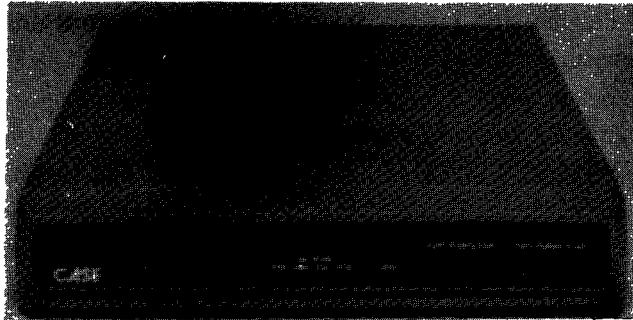
Akan terlihat bahwa, dalam lintasan mereka antara mesin pemrosesan data melalui saluran telepon, bit-bit ini mungkin mengalami dua proses modulasi yang sangat terpisah, sebuah dilakukan oleh modem di tempat sang pelanggan dan yang lain dilakukan oleh peralatan multiplexing di tempat perusahaan telepon. Perusahaan Telepon dapat menunjukan sinyal tersebut ke banyak urutan operasi multiplexing, yang kita bahas pada pada bab selanjutnya.

Pengguna dapat melakukan kontrol hanya pada salah satu proses ini — yaitu pemilihan modem. Apa yang dilakukan perusahaan terhadap sinyal setelah memasuki saluran perusahaan tidak dapat dikontrol oleh si pengguna.

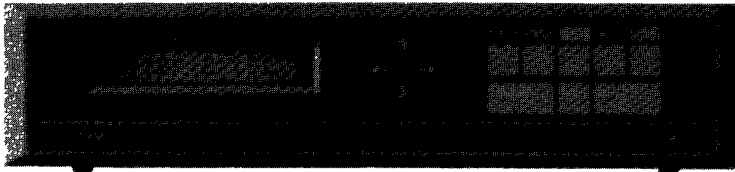
EFEK BANDWIDTH YANG TERBATAS

Untuk merasakan efek bandwidth-terbatas dalam jaringan analog pada transmisi data, pembaca dapat membayangkan sinyal elektrik yang kita bahas ini sebagai campuran gelombang sinus seperti pada Gambar 10.2, yang berbeda frekuensinya sebanyak f , dan amplitudonya A . Diagram spektrum yang kita gunakan memplot A terhadap f dan dengan demikian menganalisis campuran ini.

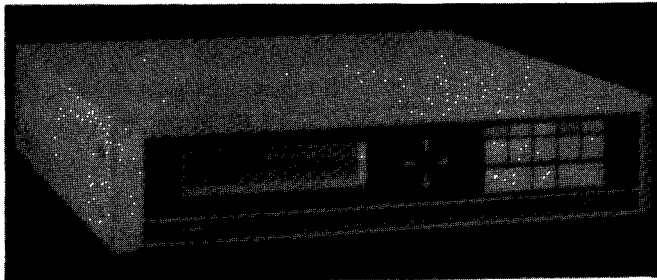
Dinyatakan oleh Fourier bahwa setiap fungsi periodik dapat diwakili oleh sejumlah fungsi sinusoidal sederhana. Setiap fungsi dengan periode T (dan dengan



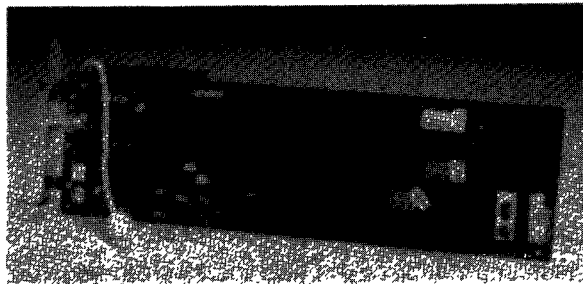
(a) 300/1200-bps modem



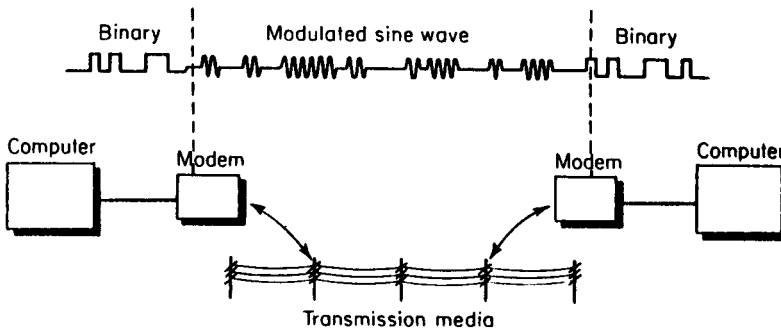
(b) 2400-bps modem



(c) 9.6-bps modem



Gambar 10.5. Contoh beberapa macam modem yang tersedia. (*Seijin CASE Communication*).



Gambar 10.6 Cara kerja modem.

demikian frekuensi $f = 1/T$) dapat dianggap sebagai jumlah fungsi sinus yang frekuensinya merupakan kelipatan integral dari f .

Teorema Fourier ini dengan demikian dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F(t) = & A_0 + A_1 \sin (2\pi ft + \theta_1) \\
 & + A_2 \sin (2\pi \times 2ft + \theta_2) \\
 & + A_3 \sin (2\pi \times 3ft + \theta_3) \\
 & \vdots \\
 & + A_n \sin (2\pi \times nft + \theta_n) \\
 & \vdots
 \end{aligned}
 \tag{10.1}$$

Fungsi yang dibicarakan ini di sini diwakili oleh serangkaian komponen sinusoidal (garis spektrum) amplitudo yang berbeda pada frekuensi f , $2f$, $3f$ dan seterusnya. Ini disebut “harmonik.” Biola yang digesek yang memancarkan nada “C naturel” pada frekuensi 200 Hz mempunyai harmonik pada frekuensi 400, 600, 800 Hz dan seterusnya.

Singkatnya, seperti pada senar biola, amplitudo A_n dari harmonik yang lebih tinggi sangatlah kecil dan akan semakin kecil bila n -nya semakin besar.

Bila kita ingin mentransmisikan sinyal asli dengan akurasi mutlak, kita harus mentransmisikan semua harmoni yang merupakan jarak yang pasti dan menjaga hubungan fase mereka. Bila kita tidak mentransmisikan semua harmoni ini, maka sinyal yang ada kemudian hanya akan merupakan pendekatan (kemiripan) dari aslinya.

Nada C naturel biola terdengar realistik bila direproduksi pada perangkat hifi yang frekuensinya berjangkauan sampai dengan 18.000 Hz. Ini dapat dikenal melalui radio AM yang frekuensi atasnya 5000 Hz. Bila seseorang memainkan biola untuk anda melalui telepon, bandwidth yang hanya 3 kHz akan membuatnya nyaris tidak dikenal sebagai suara biola. Dan bila anda mendengarkan hanya beberapa harmoni pertama sampai dengan, katakanlah 600 Hz, nada itu dapat dipastikan tidak akan dikenal sebagai suara biola tetapi *mungkin* dikenal sebagai “C tengah (naturel).”

Situasi ini juga terjadi pada transmisi data. Kita hanya memiliki persediaan bandwidth terbatas, dan kita ingin mentransmisikan jumlah bit per detik yang semaksimal mungkin melalui bandwidth ini. Dengan demikian, kita tidak mentransmisikan semua harmoni ini tetapi cukuplah bila bitnya dikenal sebagaimana adanya.

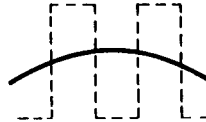
Ini diilustrasikan pada Gambar 10.7 yang memperlihatkan bagaimana “bit” seringkali menjadi terdistorsi pada transmisi sesungguhnya. Misalnya kita mentransmisikan pulsa-pulsa seperti yang terlihat pada gambar teratas. Tingkat datanya adalah 2000 bps. Bila kita mentransmisikan harmoni keempat, seperti yang ditunjukkan pada gambar terbawah, bentuk pulsa yang ada sangatlah mirip dengan aslinya. Ini akan semakin mirip bila kita mentransmisikan, katakanlah, harmoni ke delapan. Untuk mentransmisikan harmoni ke empat, diperlukan bandwidth yang sedikit di atas 8000 dan untuk harmoni ke delapan, lebih dari 16.000. Pada bandwidth sebesar 4000 Hz, pulsanya sangat mirip dengan aslinya dan, pada tingkat 2000, dengan peralatan yang baik, tentunya dapat dideteksi sebagai bit “1” dan “0”. Pada tingkat 1000 Hz, pulsanya agak mirip dengan bentuk aslinya, tetapi peralatan deteksi yang dirancang dengan ahli dapat memulihkan bit aslinya. Pada tingkat 500 Hz, tidak ada harapan untuk merekonstruksi aslinya.

Gambar 10.7 tidak menunjukkan efek noise (tingkat kebisingan) dan distorsi. Efek tersebut akan semakin mengubah bentuk pulsanya, kadangkala malah menyusahkan, sebagaimana dibahas pada bab-bab berikutnya. Kemungkinan kesalahan pada pengenalan bit akan lebih besar pada bit-bit salah bentuk yang ditransmisikan melalui bandwidth yang lebih kecil.

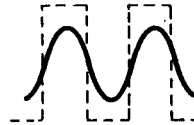
Pulses Before Transmission:
Pulse rate 2000 per second



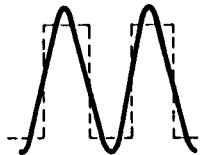
Pulses After Transmission:
Bandwidth 500 Hz



Bandwidth 1000 Hz



Bandwidth 2000 Hz
(First harmonic)



Bandwidth 4000 Hz
(Second harmonic)



Bandwidth 6000 Hz
(Third harmonic)



Bandwidth 8000 Hz
(Fourth harmonic)



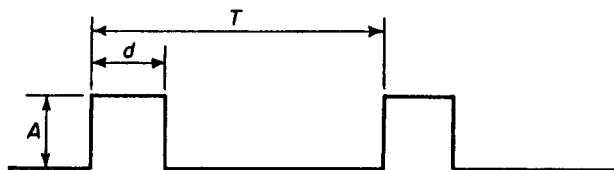
Gambar 10.7 Efek bandwidth pada kualitas transmisi pulsa.

ANALISIS FOURIER

Untuk memahami cara kerja peralatan transmisi data dan modem, adalah bermanfaat bila menganalisis sinyal yang ditransmisikan ke frekuensi komponen-komponennya. Sebagian analisis Fourier yang relatif sederhana dapat diaplikasikan pada sebuah pola bit repetitif dengan bit yang berbentuk empat persegi panjang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.8. Suatu bit yang diwakili oleh satu pertambahan empat persegi panjang dalam voltase sebanyak A ditransmisikan setiap T detik sekali. Dengan kata lain, pola ini diulang dengan frekuensi f , dimana $f = 1/T$. Durasi bitnya adalah d detik. Ditunjukkan oleh Fourier bahwa pertambahan dalam voltase ini merupakan fungsi sinusoidal, V_t , sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V(t) = \frac{Ad}{T} &+ \left(\frac{2Ad \sin \pi d/T}{T \pi d/T} \right) \cos 2\pi ft \\
 &+ \left(\frac{2Ad \sin 2\pi d/T}{T 2\pi d/T} \right) \cos 2\pi \cdot 2ft \\
 &+ \left(\frac{2Ad \sin 3\pi d/T}{T 3\pi d/T} \right) \cos 2\pi \cdot 3ft + \dots \\
 &+ \left(\frac{2Ad \sin n\pi d/T}{T n\pi d/T} \right) \cos 2\pi \cdot nft + \dots
 \end{aligned} \tag{10.2}$$

Ini terdiri atas komponen sinusoidal (kosinus) pada frekuensi f , $2f$, $3f$, dan seterusnya sampai tak terhingga. Dengan kata lain, ini merupakan sekumpulan gelombang sinus yang berlapis di puncak masing-masing. Ini disebut “harmonik”



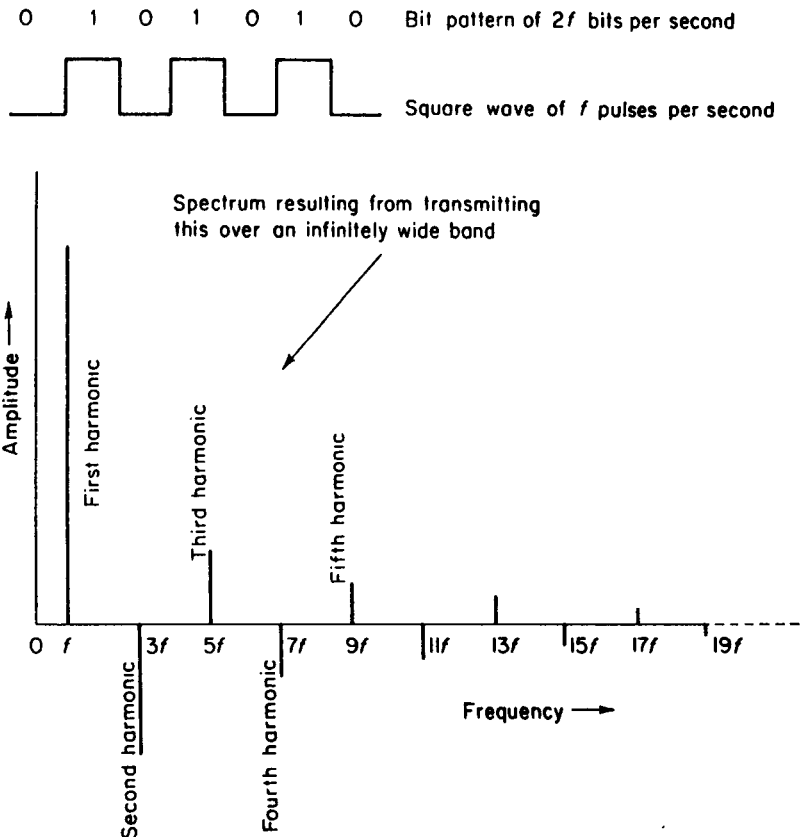
Gambar 10.8

dari frekuensi dasar f . Amplitudo adalah istilah dalam tanda kurung. Untuk harmoni tinggi (n -nya besar) amplitudonya kecil.

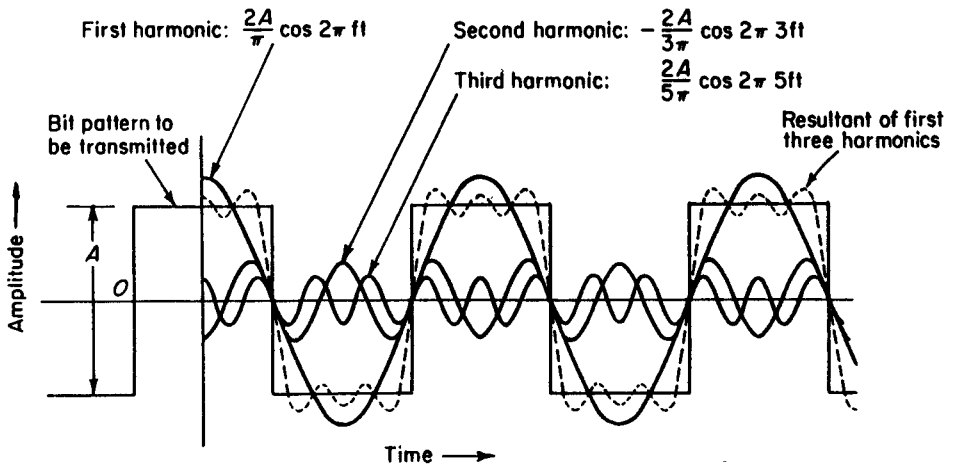
Bilamana $d = T/2$, gelombang persegi yang terjadi dapat dianggap sebagai pola bit 0 1 0 1 0 1 . . . , dan spektrum yang timbul digambarkan pada Gambar 10.9.

Pada Gambar 10.10 tiga harmoni pertama dipolakan: $2A/\pi \cos 2\pi ft$, $-2A/3\pi \cos 2\pi \cdot 3ft$, dan $2A/5\pi \cos 2\pi \cdot 5ft$. Jumlah gelombang ini ditunjukkan sebagai garis terputus-putus, dan akan terlihat bahwa ini secara kasar memperkirakan gelombang persegi yang ditransmisikan.

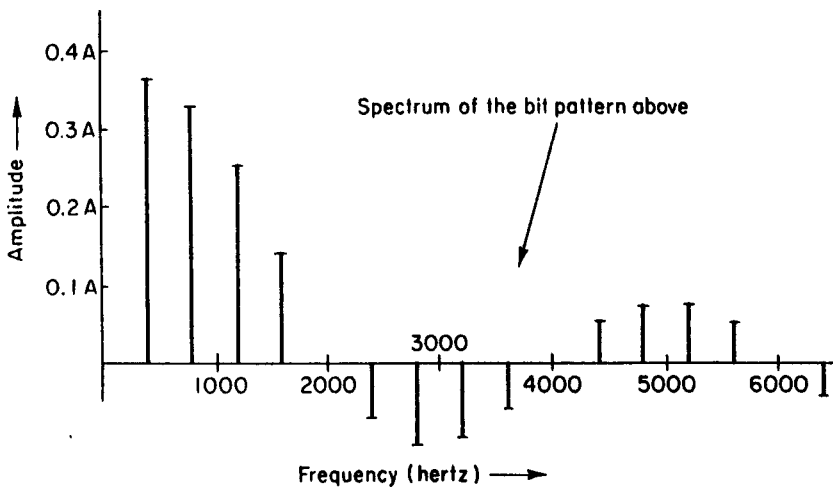
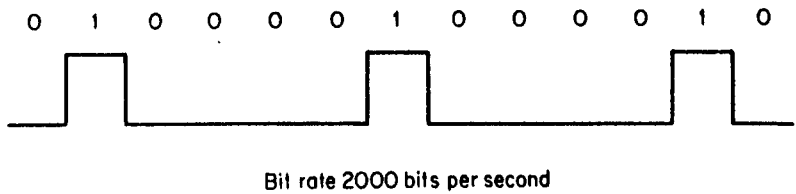
Gelombang persegi 0 1 0 1 0 1, ... adalah pola yang sangat repetitif, dan oleh karenanya memberikan garis spektrum yang relatif sedikit dalam Gambar 10.9,



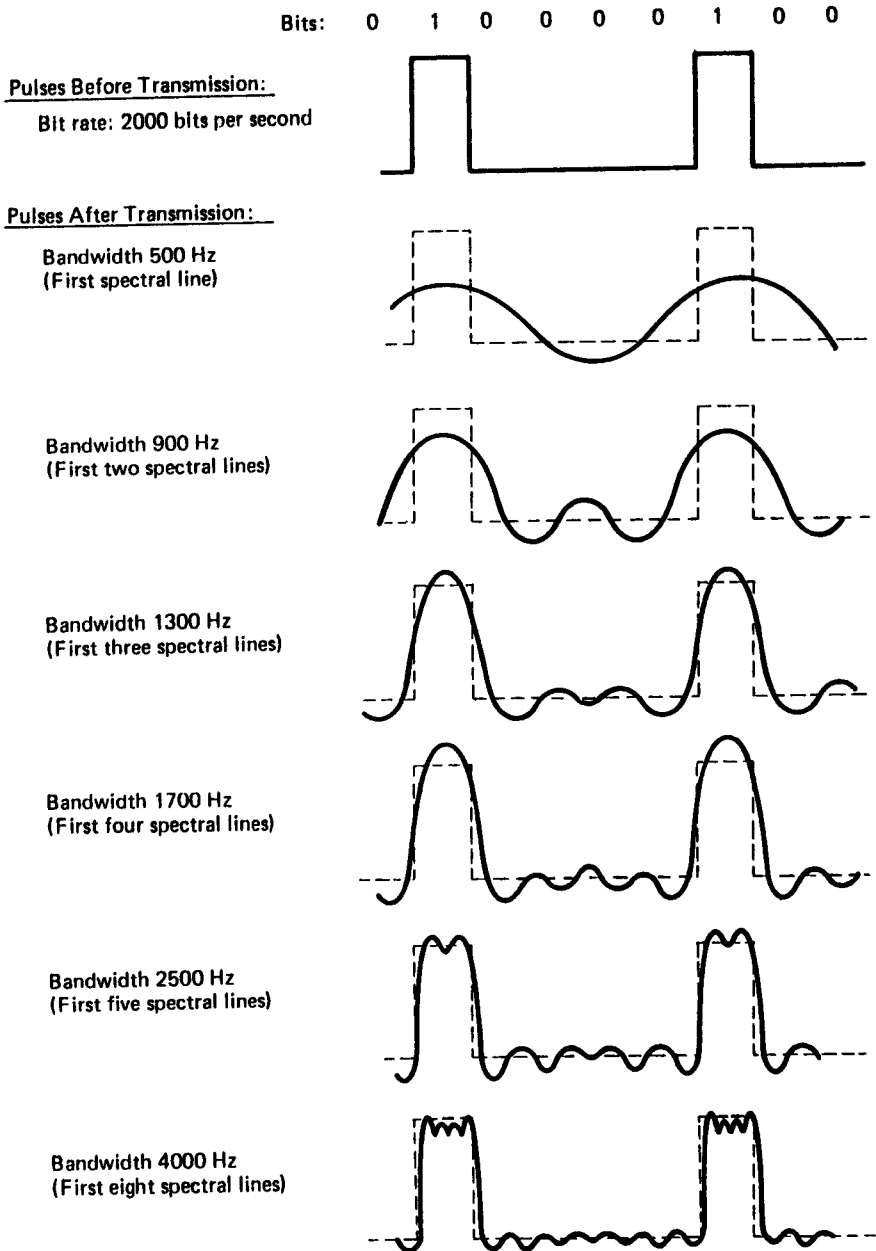
Gambar 10.9 Komponen spektral gelombang persegi yang mewakili pola bit 0 1 0 1 0 1, Hanya melalui bandwidth terbataslah harmoni yang lebih rendah dapat ditransmisikan.



Gambar 10.10 Tiga harmonik pertama yang menyusun pola bit 0 1 0 1 0 1 0 1, ... Jumlah ketiga harmoni pertama perkiraan mewakili pola gelombang bit yang ditransmisikan.



Gambar 10.11 Spektrum pulsa empat persegi panjang dengan pemisahan lima kali lebar pulsa.



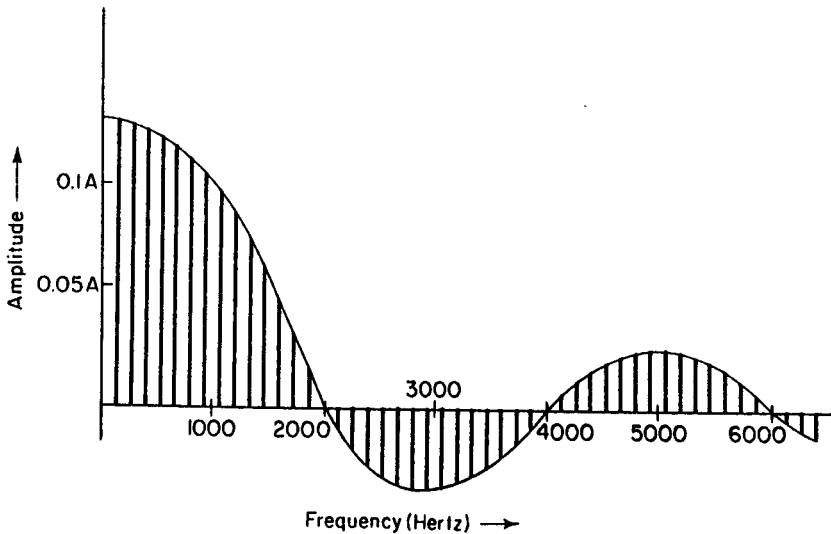
Gambar 10.12 Efek pentrasmisiian pulsa-pulsa pada Gambar 10.11 melalui bandwidth pembeda.

yang merupakan dasar frekuensi perulangan gelombang persegi dasar. Bila pola bit ini kurang repetitif daripada ini, jumlah garis spektrumnya bertambah.

Ini terlihat masing menggunakan analisis sederhana dari persamaan 10.2 dengan menambah jarak antara pulsa. Misalnya bit 1 0 0 0 0 diulang-ulang sehingga T/d -nya sekarang 5. Komponen spektrum menjadi

$$\begin{aligned} & \frac{2A \sin \pi/5}{\pi} \cos 2\pi ft \\ & \frac{A \sin 2\pi/5}{\pi} \cos 2\pi \cdot 2ft \\ & \frac{2A \sin 3\pi/5}{\pi} \cos 2\pi \cdot 3ft \quad \text{dan seterusnya} \end{aligned} \quad (10.3)$$

Ini digambarkan pada Gambar 10.11. Gambar 10.12 menunjukkan bentuk gelombang yang terjadi dari rangkaian semacam itu bila bandwidth belainan memungkinkan untuk dikirimkannya jumlah garis spektrum yang belainan.



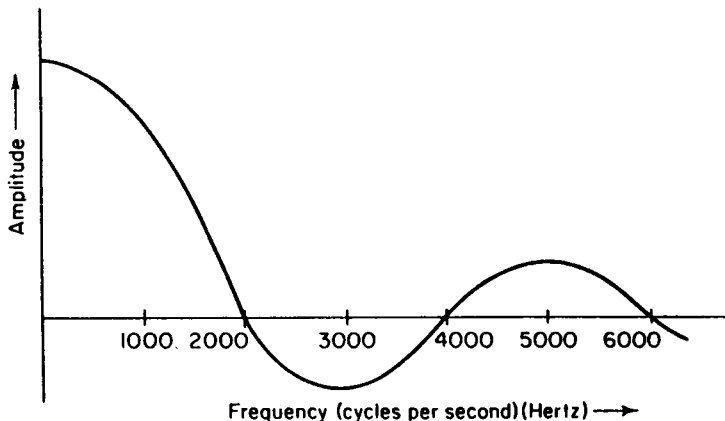
Gambar 10.13 Spektrum yang timbul dari pulsa dengan lebar d berulang-ulang dengan interval T , dimana $T/d = 15$. Lebar pulsa adalah $1/2000$ detik. Jumlah bit 2000 bps.

Bila jumlah transmisinya 2000 bps, garis spektrum pertama akan berada di tingkat 400 Hz, yang ke dua di 800 Hz, dan seterusnya. Seperti terlihat pada Gambar 10.12, dua garis spektrum pertama hampir tidak mencukupi untuk memulihkan sinyal aslinya. Bilamana tiga garis spektrum ditransmisikan, pola bitnya mulai dapat dikenal. Bandwidth yang jumlah signalingnya dua kali lipat dalam bps menghasilkan pulsa yang benar-benar persegi, tetapi pola bitnya dapat dipulihkan dengan bandwidth yang kurang dari itu.

Sejumlah besar garis muncul bila lebar pulsa, d -nya, adalah seperduabelas frekuensi pengulangan. Amplitudo garis spektrum membentuk suatu sinc berbentuk amplop, dimana $x = n\pi d/T$ atau dalam hal ini $x = n\pi/12$. Gambar 10.13 digambarkan, seperti pada Gambar 10.11, untuk tingkat bit 2000 dan lebar bit, d , $1/2000$ detik, yang mengasumsikan bahwa kemunculan suatu pulsa mewakili bit 1 dan kekosongannya dengan bit 0.

Bila pola bitnya tidak teratur, dan bukannya langsung repetitif, sebagaimana pada contoh terdahulu, jumlah garis spektrumnya ditambah sampai, untuk pola bit acak atau untuk bit 1 untuk dirinya sendiri, garis itu bergabung menjadi spektrum kontinyu.

Gambar 10.14 memperluas rasio T/d lebih jauh daripada di Gambar 10.13 dan 10.11, sehingga menyebabkan T -nya tak terhingga. Dengan kata lain, Gambar 10.14 menggambarkan sebuah pulsa tunggal, yang lebarnya sama dengan yang ada di Gambar 10.11 dan 10.13. Spektrum tersebut sekarang kontinyu. Energinya



Gambar 10.14. Spektrum kontinyu dari suatu pulsa tunggal dengan lebar $1/2000$ detik.

tersebar di seluruh spektrum bukannya terkumpul menjadi garis-garis spektrum tunggal. Namun titik nol dalam spektrum masih terjadi pada tempat yang sama seperti pada Gambar 10.13 dan 10.11, dan amplitudo relatif amplopnya yang berisi garis spektrum adalah sama. Kasarnya, konsiderasi bandwidth yang sama masih beraplikasi seperti yang digambarkan pada Gambar 10.12.