

23

Kapasitas Maksimum Suatu Channel

Kapasitas channel mungkin digambarkan sebagai rata-rata maksimum pada informasi yang bisa dikirim tanpa ada kesalahan, dan untuk maksud transmisi data, mungkin diukur dalam bit per detik.

Rata-rata yang kita dapat mengirim data pada channel sebanding dengan bandwidth channel itu. Hartley [1] tahun 1928 membuktikan bahwa bandwidth yang ada \times waktu yang diperlukan untuk mentransmit jumlah informasi yang ada. Hal ini bisa digambarkan dengan membayangkan catatan fonograf dengan data yang tercatat di dalamnya pada titik dan tanda garis pisah kode Morse. Bila kita menggandakan pemrosesan catatan, membagi dua waktu yang diperlukan untuk merelai data yang berkode ini. Pengandaan kecepatan catatan itu menggandakan frekuensi suara, demikian juga bandwidth yang dipakai. Lagi pula kita mungkin mengembangkan kecepatan dan merelai data itu sangat cepat dengan memberikan

adanya beberapa cara penginterpretasian bunyi decit yang ada. Bila kita melambatkan kecepatan tertentu, suara itu tidak akan lagi bisa didengar karena kita telah melampaui frekuensi yang terdeteksi oleh telinga manusia. Telinga manusia memiliki bandwidth yang terbatas.

Pada tahun 1924 dan 1928, Nyquist [2] menerbitkan kertas berkenaan dengan kapasitas channel tak bersuara. Nyquist itu menunjukkan bahwa, bila seseorang mengirimkan $2W$ nilai voltase yang berbeda per detik (atau simbol yang lain), ini bisa dilakukan oleh signal tanpa frekuensi yang lebih besar dari pada W . Jika frekuensi yang lebih besar dari pada W dikirim, frekuensi itu *berlebihan*, tidak perlu rekonstruksi rangkaian nilai signal pada penerima.

Dengan kata lain, satu bandwidth bisa membawa $2W$ nilai voltase terpisah per detik. Bila seseorang mengirim signal digital (biner), voltase yang dikirimkan itu memiliki satu dari dua nilai terpisah (0 atau 1). Oleh karena itu, seseorang bisa mengirimkan $2W$ bps. Tetapi bila seseorang mengirimkan dua bit secara *simultan* dengan memiliki *empat* level voltase yang memungkinkan pada satu saat, maka bandwidth W bisa dipakai untuk memberi kode $4W$ bps. Delapan nilai voltase alternatif pada satu saat bisa dipakai untuk memberi kode 3 bit dan memperoleh rata-rata penandaan $6W$ bps.

Pada umumnya, n bit bisa dikirim pada satu saat dengan menggunakan satu dari level signal 2^n . Oleh karena itu, dengan level signal 2^n yang berbeda dan mungkin, rata-rata penandaan $2nW$ bps bisa ditransmit melalui channel dengan W hertz bandwidth.

Jika L jumlah level penandaan,

$$2n = L$$

$$\therefore n = \log_2 L$$

Maka kapasitas channel, C , dengan tidak adanya noise, ditunjukkan dengan

$$C = 2W \log_2 L$$

Pertanyaan yang muncul: Berapa banyak level signal yang bisa ditransmit dan secara terpisah bisa dibedakan pada receiver? Suara dan gangguan pada saluran, fluktuasi lemah, dan batas pada power signal yang bisa dipakai secara jelas membatasinya.

BAUDS

Kecepatan saluran transmisi kadang-kadang ditunjukkan sebagai jumlah *bauds* tertentu. Istilah ini biasanya dipakai untuk menghubungkan kecepatan penandaan yang benar dipakai pada suatu saluran, tidak pada kapasitas saluran. Hal ini *mengacu pada jumlah waktu perubahan kondisi jalur per detik*. Bila kondisi saluran menunjukkan adanya atau tidak adanya 1 bit, maka kecepatan penandaan pada bauds sama sebagai bit per detik. Tetapi, bila saluran itu pada salah satu state yang memungkinkan, yaitu, $L = 4$, maka satu kondisi saluran akan menunjukkan “dibit”, yaitu, 2 bit selain 1 ($n = 2$), x baud akan sama seperti $2x$ pbs. Pada beberapa modem mentransmit data pada dibit; setiap pasangan bit diberi kode sebagai salah satu empat kombinasi yang mungkin. Bila signal diberi kode delapan state yang mungkin, satu kondisi saluran menunjukkan tiga bit. Satu baud sama dengan 3 bit, dan seterusnya.

Pembaca seharusnya mencatat bahwa istilah *baud* kadang-kadang diartikan “bit per detik”. Meskipun dengan saluran ini benar, karena menggunakan dua penandaan state, pada umumnya tidak benar. Untuk beberapa saluran yang tidak menggunakan dua penandaan state adalah salah. *Kadang-kadang istilah baud terbukti membingungkan, dan kita menghindari menggunakannya dalam buku ini.*

PENSINYALAN CHANNEL DENGAN NOISE

Shannon [3], 20 tahun setelah Nyquist, secara matematis telah membuktikan bahwa suatu channel memiliki kapasitas maksimum terbatas. Dia membahas channel itu terus-menerus seperti seseorang yang mentransmit nilai yang berlainan. Kerja pertamanya berhubungan dengan channel tak bersuara dan kemudian, lebih menarik lagi dalam kasus kita, pada satu channel dengan noise.

Shannon membuktikan bahwa, jika daya signal S terhadap channel dikaucan oleh white noise (secara serampangan, sebagai misal, Gaussian, fluktuasi) daya N , kapasitas channel dalam bit per detik adalah

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (23.1)$$

dimana W = bandwidth channel itu.

Rumus ini menunjukkan rata-rata penandaan maksimum terhadap channel komunikasi dalam batasan tiga parameter yang diketahui dan bisa diukur. Hukum Shannon merupakan salah satu hukum telekomunikasi yang paling fundamental.

Menurut hukum ini, jumlah data bit maksimum yang bisa dikirim lewat channel pada waktu T detik adalah

$$WT \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Hukum Shannon berhubungan dengan pentransmitan urutan yang benar-benar tidak bisa diprediksi. Seperti yang dibahas dalam bab ini selanjutnya, jika ada beberapa cara mengantisipasi urutan bit non random, rata-rata transmisi mungkin bertambah. Tetapi untuk urutan bit yang tak bisa diprediksi, pembuktian Shannon menunjukkan bahwa tidak ada cara yang mungkin melampaui jumlah informasi ini untuk parameter channel. Seorang insinyur mendesain teknik modulasi yang sangat canggih dan memperluas sistem pengkodean tetapi dicoba bila mungkin, dia tidak akan pernah mengirim lebih dari jumlah bit ini terhadap channel itu jika ia tidak mengembangkan bandwidth yang ada atau signal menuju rasio noise.

Anggaplah bahwa bagian saluran telepon tertentu diketahui memiliki signal ke rasio noise 20 dB. Dengan kata lain daya noise dari saluran itu seperseratus dari daya signal yang ditransmit. Kita berharap menggunakan saluran ini untuk mentransmit data, dan bandwidth yang ada sama dengan 2600 Hz. Dengan menggunakan semua ini pada Eq.(23.1), kita akan memperoleh kapasitas saluran itu

$$C = 2600 \log_2 \left(1 + \frac{100}{1} \right)$$

$$\log_2 x = (\log_2 10)(\log_{10} x) = 3.32 \log_{10} x$$

$$\therefore C = 2600 \times 3.32 \times \log_{10} 101 = 17,301$$

Rata-rata kemungkinan maksimum pada data yang bisa ditransmit pada saluran suara ini adalah kira-kira 17,300 bps.

Bila signal ke rasio noise sama dengan 30 dB — figur yang lebih kas, maka kita akan mendapatkan hasil

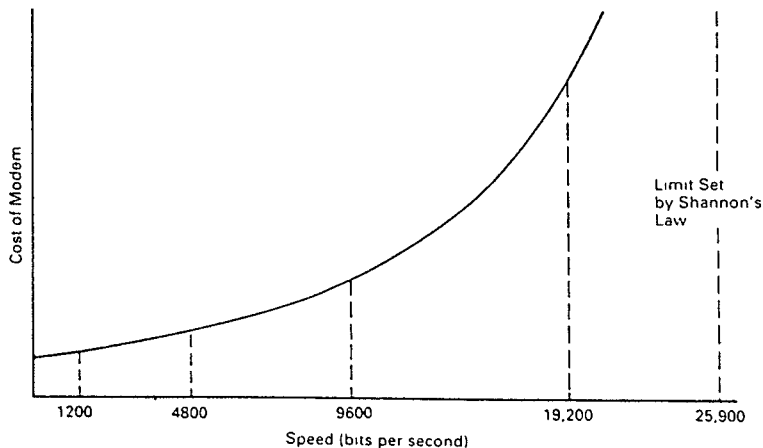
$$C = 2600 \log_2 \left(1 + \frac{1000}{1} \right) = 25,900 \text{ bps}$$

Satu cara untuk memperbaikinya adalah menentukan perubahan fundamental pada susunan saluran yang akan meningkatkan daya pentransmitan amplifier, meningkatkan bandwidth, atau mengurangi noise. Hal ini bisa dilakukan dengan

menempatkan amplifier secara bersama-sama. Tidak ada yang bisa dilakukan dengan cara desain alat terminal yang canggih yang akan menunjukkan rata-rata bit lebih tinggi dari pada figur ini. Bila carrier umum menunjukkan saluran ciri yang ada, hukum Shannon menunjukkan rata-rata transmisi maksimum yang bisa kita peroleh.

Para penemu yang canggih secara kebetulan mengusulkan skema yang akan berlaku lebih baik dari pada Eq. (23.1). Tetapi begitu fundamental hukum Shannon yang merupakan skema yang mungkin seharusnya disatukan dengan kerja yang sama seperti penemuan mesin gerak sebelumnya. Bila skema terdapat kekurangan, dan seseorang bisa mengatakan dengan jaminan bahwa skema ini tidak akan bisa kerja.

Sistem yang dipakai pada saluran suara melakukan kecepatan jauh lebih rendah dari pada yang ada di atas. Adalah umum menemukan skema transmisi yang beroperasi pada 1200 dan 2400 bps pada saluran seperti itu. Kadang-kadang bagian bandwidth yang bisa dipakai untuk pentransmitan itu kurang dari 2600 Hz karena pertimbangan penandaan. Tetapi pada saluran yang kualitasnya baik dengan bandwidth penuh yang ada, kecepatan yang dipakai secara normal tidak lebih besar dari pada 17.2 kbps. Sebagian alasannya adalah bahwa bila seseorang mendekati maksimum Shannon, pengkodean yang perlu menjadi sangat kompleks, dengan semakin lama panjangnya kaca itu dan oleh karena itu semakin lama menunda pengkodean dan pendekodean. Biaya modem itu meningkat dengan kecepatan transmisi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23.1.



Gambar 23.1 Biaya modem meningkat dengan kecepatan transmisi saluran ciri yang ada. Biaya itu menjadi sangat tinggi sebelum mendekati rangkaian batas hukum Shannon. Gambar pada chart berhubungan dengan saluran telepon analog khusus.

WHITE GAUSSIAN NOISE

Noise yang mengacu pada persamaan Shannon sama dengan Gaussian noise. Ini berarti bahwa amplitudo signal noise itu bermacam-macam pada level tertentu dalam model random dengan respek pada waktu. Amplitudo signal noise itu mengikuti distribusi Gaussian. Persamaan Shannon terbukti menggunakan asumsi ini.

Ini mungkin mirip dengan asumsi yang tidak benar supaya dibuat. Bagaimana kita tahu bahwa amplitudo noise itu mengikuti distribusi Gaussian? Noise yang saya dengar di apartemen New York tentu tidak mengikuti pola seperti itu. Ini terdiri dari pintu di samping televisi, letusan ritmik dari pipa, dan raungan mobil polisi pada malam hari. Tetapi jika saya membuka jendela dan mendengarkan suara dari kejauhan, dengungan suara dari kota besar, suara kecil yang tidak menentu memang kedengaran mendekati distribusi Gaussian.

Dalam sirkuit telekomunikasi akan ada bahwa noise yang bukan Gaussian, seperti bunyi klik dan peluit yang kadang-kadang kita dengar pada telepon. Tetapi pada sirkuit elektronik ada background noise random yang tenang. Kadang-kadang hal ini dianggap sebagai noise *thermal*.

Atom dan molekul dari semua zat bergetar secara konstan pada setiap menit yang menyebabkan sensasi (perasaan) panas. Temperatur yang semakin tinggi semakin tinggi pula getaran ini. Bila atom itu bergetar, atom itu mengeluarkan gelombang elektromagnetik dan bila ada banyak atom, kita mendapatkan kecacuan gelombang elektromagnetik dari semua frekuensi. Elektron pada konduktor elektrik bergerak dalam pola random yang mirip. Gerakan-gerakan ini membentuk background noise yang tidak bisa dihindari pada semua proses elektronik. Ini merupakan noise Gaussian terus menerus seperti suara kota yang jauh.

Maka kita harus mengirim signal data terhadap background variasi random yang tidak pernah berhenti ini pada amplitudo, biasanya intensitasnya rendah. Bila seseorang bisa mendengarnya suaranya seperti desis. Bila volume radio FM dipindah sewaktu tidak ada program yang masuk, seseorang bisa mendengarkan desisan noise ini.

Noise Gaussian pada sirkuit elektronik ini dianggap sebagai *white noise*. Yang disebut "white" karena berisi semua frekuensi spektral yang sama rata-ratanya, hanya bila lampu putih itu berisi semua warna pelangi. Kedengarannya seperti desisan berbeda dengan suara dimunitip dari kota yang jauh karena meskipun Gaussian ini bukan "putih", karena semuanya berisi frekuensi rendah dari pada frekuensi tinggi. Frekuensi tinggi diserap dari frekuensi rendah bila suara itu melalui udara dan terefleksi jauh dari tanah dan bangunan. Gambar 23.3 menunjukkan noise Gaussian.

Bila alat elektronik itu sempurna, gangguan eksternal yang terinsulasi, masih akan ada white noise, konduktor elektrik merupakan sumber daya white noise, N , dimana

$$N = kTW \quad (23.2)$$

Dimana T sama dengan temperatur dalam derajat Kelvin,

W sama dengan bandwidth, dan

k sama dengan konstan Boltzmann: 1.37×10^{-23} joule/derajat.

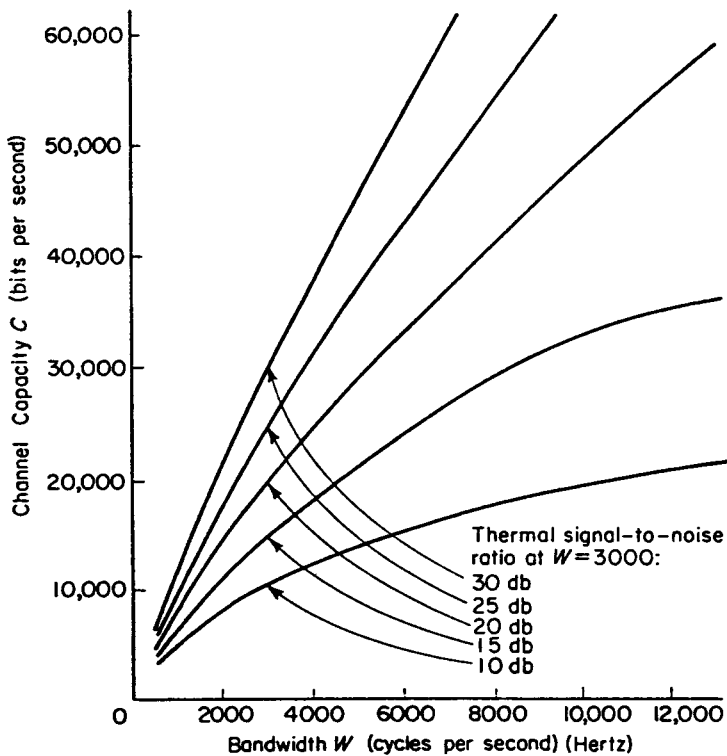
Daya white noise sebanding terhadap temperatur mutlak. Fakta ini merupakan nilai kecil pada hubungan komunikasi batas pada bumi tetapi penting dalam menerima transmisi jarak jauh dari ruang angkasa. Transmitter bisa beroperasi pada daya yang sangat dikurangi pada kedalaman es ruang angkasa bila dari sinar matahari. Stasiun bumi satelit komunikasi pertama menggunakan elektronik yang diperdingin oleh helium cair.

Thermal noise yang disebabkan oleh gerakan elektron random, merupakan minimum yang tidak bisa dikurangi. Sirkuit praktis pada modulator dan amplifier akan menunjukkan noise secara khusus, tetapi melebihi thermal noise dengan beberapa 5 sampai 25 dB. Jumlah alat-alat yang besar dimasukkan pada sirkuit panjang; sehingga Gaussian noise pada akhir channel melebihi thermal noise dengan banyak desibel. Rasio signal ke noise dalam channel telekomunikasi yang baik jarang lebih baik dari pada 30 dB.

Daya thermal noise; tidak seperti beberapa tipe noise yang lain yang dibahas dalam bab berikutnya, sebanding dengan bandwidth. Untuk daya pentransmitan yang ada seperti yang akan terlihat dari Eqs. (23.1) dan (23.2), *kapasitas channel itu sangat tidak sebanding dengan bandwidth*. Doublynya bandwidth channel itu



Gambar 23.2 Thermal (random, Gaussian) noise.



Gambar 23.3. Hubungan di antara kapasitas dan bandwidth untuk channel dengan level yang berbeda Gaussian noise.

tidak mengandakan kapasitasnya. Channel A 40,000-Hz tidak akan membawa banyak data sampai sepuluh channel 4000 Hz. Gambar 23.3 menunjukkan hubungan. Bandwidth yang tidak tentu akan menjadi tentu, jumlah bit maksimum perdetik.

TRANSMISI DIGITAL DENGAN MENGGUNAKAN MODEM

Menjadikan penggunaan bandwidth yang ada kenyataannya adalah dengan tingkat yang tergantung pada desain modem, dan di dalamnya terletak skrup kecanggihan.

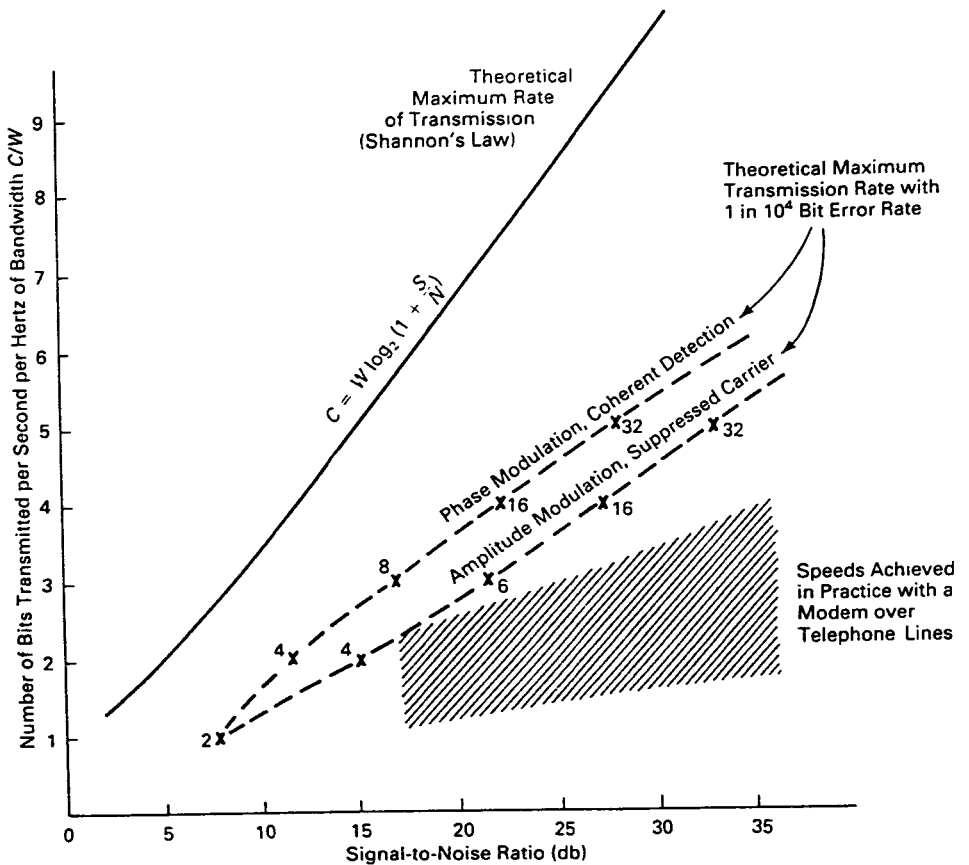
Hanya dengan menentukan white noise kecepatan penandaan pada bandwidth yang ada bisa dievaluasi secara teroiritis pada masing-masing tipe modulasi. Ini bisa dibuat sebagai fungsi signal ke rasio noise dan rata-rata kesalahan yang mungkin [4]. Ekspresi rata-rata penandaan maksimum bisa diperoleh supaya seperti yang diharapkan, menunjukkan rata-rata yang lebih rendah dari pada formula Shannon.

Gambar 23.4 menempatkan bentuk Shannon dengan menunjukkan kecepatan perputaran bandwidth dalam batasan signal ke rasio noise pada channel telepon. Area yang terlindungi dibawah kurva ini menunjukkan indikasi kecepatan yang diperoleh pada kenyataannya sekarang. Hal ini akan terlihat bahwa semuanya sangat kurang dari pada batas Shannon. Kenyataannya, bila satu setengah batas Shannon dicapai, akan dianggap sebagai sistem yang cepat dan pintar.

Gambar 23.4 menunjukkan kecepatan penandaan maksimum dengan dua jenis modem umum, dengan menganggap bahwa kecepatan itu beroperasi dengan adanya Gaussian noise dengan rata-rata kesalahan 1 bit pada 10^4 . Ini merupakan kesalahan yang lebih besar dari pada yang diterima kenyataannya; maka, kecepatan ini tidak dijumpai pada sistem aktual. Gambar pada kurva garis ini menunjukkan jumlah state signal yang ada pada satu instant. Sebagai misal, satu signal biner bisa berada pada salah satu dari *dua* state. Tetapi bila ada empat level voltase yang mungkin dari pada dua, hal ini akan menunjukkan dua bit pada satu instant selain hanya 1. Delapan level itu bisa menunjukkan tiga bit, level 2^n bisa menunjukkan bit n pada satu instant. Tetapi bila jumlah level voltase yang harus dibedakan bertambah, jaraknya berkurang, dan amplitudo noise fluktuasi secara random lebih cenderung rusak.

Jelas bahwa satu cara untuk meningkatkan kapasitas channel adalah menaikkan signal ke rasio noise. Seperti yang sudah kita lihat, level white noise ditentukan oleh fenomena alami diluar kontrol kita. Jenis noise yang lain bisa dikontrol meskipun tidak seluruhnya, dan banyak ukuran yang bisa dipakai untuk melakukan ini. Tetapi ada satu level dibawah N yang tidak bisa di dorong. Jika jarak di antara repeater itu besar, kekuatan signal jatuh dimana level noise itu dibuat pada semua poin saluran tetap sama. Terlalu besarnya pemisahan repeater menunjukkan terlalu rendahnya rasio S/N dengan meningkatkan jumlah repeater meskipun di luar poin tertentu tidak ekonomis untuk melakukannya.

Bagaimana meningkatktan S ? sebagai carrier umum hal ini juga merupakan pertanyaan ekonomi. Diluar level tertentu menjadikan mahal meningkatkan daya penandaan. Untuk pelanggan telepon ada batasan pada kekuatan signal yang akan dia transmit.



Gambar 23.4 Kecepatan transmisi data maksimum yang dicapai secara prakteknya pada sirkuit analog lebih rendah dari pada maksimum teoritis Shannon. Kecepatan ini jatuh di atas area bayangan. Garis putus-putus merupakan kecepatan maksimum teoritis dengan dua tipe modulasi umum (Bab 13), dengan adanya Gaussian noise, dan dihitung untuk rata-rata kesalahan 1 bit yang salah pada setiap 10,000 yang tertransmit. (Kurva yang dihasilkan dari Ref. 4).

Selama lebih dari seratus tahun yang lalu industri komunikasi mempelajari pelajaran yang lebih sulit tentang menjadikan S terlalu besar. Setelah beberapa percetakan keuangan yang sangat sulit. Pada abad ke 19 dan lebih dari satu tahun kegagalan yang memilukan pada lautan tinggi, kabel telegraf transatlantik pertama dibuat—prestasi impresif yang cemerlang pada masanya. Ini bekerja sangat pelan, mengambil jangka setengah hari untuk menstransmit data yang bisa kita kirim pada kabel yang ada dalam satu detik. Tetapi headline yang ada sensasional diluar preseden yang bisa di harapkan. Dr. Whitehouse, ahli telekomunikasi di Inggris, memutuskan bahwa voltase yang lebih tinggi diperlukan. Teman-

nya, Dr. William Thomson (Lord Kelvin) tidak setuju). Tetapi Whitehouse mendesak menggunakan kumparan induksi besar yang telah ia buat. Insulasi saluran itu perlahan-lahan menurun dan 2500 ton kabel menjadi tidak berguna. Selama 8 tahun sebelum kabel lainnya di keluarkan. Sebuah surat kabar Amerika mengklaim bahwa kabel itu sudah merupakan kebohongan dan seorang penulis Inggris “membuktikan” bahwa belum pernah dikeluarkan sama sekali.

CHANNEL DIGITAL

Seperti yang kita komentari pada bab sebelumnya elektronik pada saluran pemasangan kawat bisa diubah sehingga menjadi channel digital kecepatan tinggi dari pada channel analog. Repeater regeneratif digital dipakai selain amplifier analog, dan rata-rata bit yang ditransmit jauh lebih tinggi jika semua channel telepon analog pada kawat yang ditransmit pada batas Shannon. Apakah transmisi 2.048 Mbps terhadap pasangan kawat telepon itu mempengaruhi hukum Shannon?

Jawabannya tidak. Apa yang terjadi pada channel PCM adalah bawah frekuensi yang lebih tinggi sedang ditransmit; bandwidth yang lebih tinggi sedang dipakai. Ini menunjukkan jauh lebih jelek signal pada rasio noise, tetapi dua faktor itu mengimbangi defisiensi itu. Pertama, repeater-repeater itu lebih dekat sehingga signal itu tidak masuk pada background noise. Kedua satu bit biner dikirim, sehingga hanya adanya atau tidak adanya bit yang dideteksi—bukan merupakan jarak amplitudo yang dibutuhkan dalam transmisi analog.

Signal pada rasio noise lebih jelek, tetapi bandwidth itu lebih tinggi, dan persamaan Shannon menunjukkan bahwa selagi kapasitas secara proporsional meningkat pada bandwidth, hal ini hanya meningkatkan log dari signal ke rasio noise. 10 lipatan naik pada bandwidth mengimbangi 1000 lipatan turun pada signal ke rasio noise.

Demikian pula pada channel yang lain dengan meningkatkan frekuensi yang dipakai pada biaya signal ke rasio noise bisa merupakan penjualan yang baik. Rata-rata bit yang sangat tinggi bisa ditransmit pada kabel koaksial pada channel serat optik.

CHANNEL SATELIT

Pada channel rasio signal ke noise merupakan bagian yang terpisah karena jarak transmisi yang luas dan terpisah karena kenyataan daya itu merupakan sumber

pada satelit. Perancang satelit dengan persediaan daya yang terbatas bisa menggunakannya untuk meningkatkan rasio signal ke noise untuk meningkatkan bandwidth efektif total dengan menggunakan jarak channel yang lebih dekat atau untuk mendukung banyak transponder dan antena direksional. Persamaan Shannon menunjukkan bahwa kapasitas yang jauh lebih banyak bisa dibeli dengan meningkatkan bandwidth efektif dari pada dengan meningkatkan daya transmisi transponder.

Dengan kata lain daya yang lebih yang dipakai untuk penerimaan dan transmisi pada satelit itu menjadikan biaya stasiun bumi lebih rendah. Bila mungkin ada jumlah stasiun bumi yang besar dan kapasitas satelit yang sudah memadai ini bisa merupakan penjualan yang lebih baik.

ENTROPY

Formula Shannon klasik berhubungan dengan data yang bila 1 bit atau karakter dikirim, kita tidak memiliki petunjuk seperti apa bit atau karakter berikutnya. Ini secara normalnya merupakan masalah dengan teknik komputer yang dipakai sekarang. Ini tidak mungkin, atau kalau mungkin, mesin itu berusaha tidak menaksirkan kemungkinan bit berikutnya 1 atau karakter berikutnya A atau 6.

Ini tidak benar hubungannya dengan komunikasi manusia. Di sini sering ada kesempatan baik untuk menduga huruf atau kata apa nantinya. Bila kita mengirim karakter ELEPHAN, penerima akan mengharapkan karakter berikutnya menjadi T. Bila telegram mulai dengan "CHRISTMAS COMES BUT ONCE A," logis bila menduga bahwa kata berikutnya akan menjadi "YEAR".

Jika kita menduga bit, karakter, atau kata berikutnya, informasinya, pada beberapa tingkat, berlebihan; sehingga kita mungkin mampu menemukan skema kode yang mengarahkan kita mengirim informasi yang lebih dari pada kapasitas channel yang akan ada.

Yang sama menerapkan pada noise. Kita hanya membahas white noise, yang mana kita tidak memiliki petunjuk seperti pada apa implitudo noise saat itu. Kita tahu bahwa mungkin meletakkan range tertentu, dengan distribusi kemungkinan Gaussian. Mungkin ada situasi noise yang lain, tetapi kita bisa menentukan tak-siran kemungkinan pola noise tertentu lebih bisa diketahui.

Dugan kerja yang ditunjukkan ini mengikuti bagian penting disiplin *teori informasi* matematis. Pada lembar kerja klasik Shannon, "Teori Komunikasi Matematis," sebelum ia mencapai bentuk $C = W \log_2 (1+S/N)$, dia telah membahas

pertanyaan pilihan dan ketidaktentuan pada kode informasi. Untuk melakukannya dia memakai konsep entropy.

Entropy adalah ukuran ketidaktentuan atau kerandoman. Ini merupakan konsep yang dipakai oleh para ahli fisika untuk beberapa waktu, terutama hubungannya dengan termodinamik, dan entropy ini membangkitkan semangat untuk menemukannya dengan mengubah disiplin yang sangat berbeda.

Dalam dunia fisik tingkat kerandoman itu berkembang secara tetap. Cahaya lampu paralel yang menjangkau suatu gedung berpecah dalam jutaan arah random. Panas mesin yang diorganisir dalam area temperatur tinggi dan area temperatur rendah cenderung mengalir dari temperatur tinggi menjadi rendah. Lagi pula pada saluran komunikasi, voltase yang di buat pada pulsa tepi persegi 1 dan 0 menjadi terganggu dan bila tidak dibuat dengan alat eksternal, akhirnya menjadi begitu terganggu yang mana semuanya tidak bisa dipisahkan dengan latar belakang noise. Dengan kata lain, entropy, ukuran kerandoman, meningkat. Ini nampak menjadi salah satu hukum alam yang paling fundamental, dan kadang-kadang ditunjukkan sebagai cara satu-satunya menetapkan hukum termodinamik ke dua.

Usaha agen intelegen saat ini bisa meningkatkan tingkat susunan pojok dunia fisik yang kecil, tetapi meninggalkan alat-alatnya sendiri, alam yang menyimpan kekacauan dan entropy berkembang. Semua nampaknya salah dalam arus panjang untuk meratakan hubungan state dengan noise Gaussian.

Entropy hubungan dengan pesan mengakibatkan ukuran ketidaktentuan apa yang harus diikuti dalam pesan itu. Bila simbol berikutnya yang dikirim terdiri dari 6 bit, maka entropy yang dihubungkan dengan simbol itu bisa bermacam-macam dari 0 sampai 6 bit. Bila pasti, sebelum dikirim, apa masing-masing bit dalam simbol itu jadinya, kemudian entropy hubungannya dengan simbol itu sama dengan nol. Bila tidak tentu apa jadinya, dengan kata lain, masing-masing bit memiliki probabilitas sama baik 0 maupun 1—maka entropy itu sama dengan 6 bit tiap simbol.

Simbol 6 bit bisa menjadi $2^6 = 64$ state yang berbeda yang mungkin. Mari kita jumlah dari 1 sampai 64, dan biarkan probabilitas simbol pada state ke i menjadi P_i . State 64 merupakan satu-satunya state yang mungkin; oleh karena itu

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{64} = 1$$

Entropy H didefinisikan sebagai jumlah faktor $P_i \log_2 P_i$ untuk setiap state yang mungkin bisa menjadi

$$H = (P_1 \log_2 P_1 + P_2 \log_2 P_2 + P_3 \log_2 P_3 + \dots + P_{64} \log_2 P_{64})$$

Bila nilai simbol itu pasti salah satu nilai $P = 1$ dan semua yang lainnya sama dengan nol. Oleh karena itu,

$$H = -\log_2 1 = 0$$

Entropy sama dengan nol karena simbol itu akan tidak pasti.

Ditunjukkan bahwa nilai maksimum ungkapan sebelumnya terjadi bila $P = P_2 = P_3 = \dots = P_{64} = \frac{1}{64}$. Dengan kata lain ada probabilitas kejadian state yang sama.

Maka

$$H = -64 \times \frac{1}{64} \log_2 \frac{1}{64} = 6$$

Pada umumnya, bila simbol itu terdiri dari bit x masing-masing bisa 1 atau 0, maka entropy itu akan berjarak dari nol sampai x .

Untuk suatu simbol, kata, atau pesan state n yang mungkin, entropy itu diartikan sama seperti

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i$$

dan jaraknya dari minimum nol sampai maksimum $\log_2 n$. Sebagai contoh, pertimbangkan lemparan mata dadu. Jika bila mata dadu yang bersisi enam normal, hal ini menunjukkan probabilitas yang sama dari hasil beberapa nomor dari 1 sampai 6. Entropy yang dihubungkan dengan lemparan itu menjadi

$$-\left(6 \times \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6}\right) = 2.58$$

Jika tiga sisi sama—mari kita katakan bahwa tiga sisi terbaca 1, 2 dan 3, dan tiga sisi yang lain dibaca 4—maka entropy itu akan menjadi

$$-\left(3 \times \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2}\right) = 1.79$$

Lagi pula dengan transmisi data, bila simbol-simbol, kata-kata, pesan-pesan berisi beberapa ukuran redundansi, atau kemampuan prediksi, entropy yang dihubungkannya akan kurang bila semuanya random.

Shannon yang didefinisikan entropi dengan cara ini [3, p. 401], terus membuktikan bahwa *untuk channel tak bersuara dengan metode yang berlainan dari penandaan seperti kapasitas maksimumnya sama dengan C bps, rata-rata maksimum yang datanya bisa ditransmit sama dengan C/H .*

Shannon terus menunjukkan bahwa untuk signal terus menerus entropy distribusi Gaussian sama dengan

$$H = W \log_2 2\pi eS \text{ bit per detik}$$

dimana W = bandwidth yang dipakai pada hertz dan S sama dengan power signal rata-rata. Jika n sama dengan daya noise putih rata-rata dan $H_{(N)}$ sama dengan entropy noise ini,

$$H_{(N)} = W \log_2 2\pi eN$$

jika signal dan noise pada channel terus menerus bersama-sama membentuk rakan daya rata-rata $S + N$ Gaussian, maka entropy dari $H_{(S+N)}$ sama dengan

$$H_{(S+N)} = W \log_2 2\pi e(S + N)$$

Shannon yang ditunjukkan bahwa kapasitas channel maksimum itu ditunjukkan oleh

$$\begin{aligned} C &= H_{(S+N)} - H_{(N)} \\ &= W[\log_2 2\pi e(S + N) - \log_2 2\pi eN] \end{aligned}$$

dan maka persamaan $C = W \log_2 (S+N)/N$ dicapai.

Maka kita tahu bahwa rumus Shannon $C = W \log_2 (S+N)/N$ cocok dengan pola bit yang tidak bisa diprediksi dan noise yang mengikuti distribusi Gaussian. Bila pola bit adalah pada beberapa yang bisa diprediksi, skema kode bisa dibiarkan memindahkan hal yang bisa diprediksi atau redundansi. Oleh karena itu pesan itu akan dikirim berupa bit yang lebih sedikit dan pola bit asli yang diterima pada penerimaan.

Suatu aplikasi tipe sistem kode ini dipakai pada komunikasi video. Sekali bayangan asli ditransmit dan direkonstruksi pada akhir penerimaan, satu-satunya porsi bayangan yang mengubah adalah ditransmit. Sebagai misal bila layar konferensi video menunjukkan gambar kepala dan bahu individu, bayangan seluruhnya awalnya akan diberi kode dan ditransmit. Jika orang menggerakkan kepalanya

tetapi menyembunyikan bahunya, hanya bit informasi yang berhubungan dengan gerakan kepala diberi kode dan ditransmit. Dengan menggunakan teknik ini, bayangan video kualitas baik bisa ditransmit pada 384 kbps. Jika kecepatan transmisi lebih rendah dipakai (sebagai misal 64 kbps), kualitas bayangan itu tetap beralasan selama para peserta tetap tenang. Jika mereka terlalu menggerakkan jumlah data hubungannya dengan gerakan yang harus diberi kode dan ditransmit meningkat, dan hasil pada bayangan ini nampak pecah. Jika noise memiliki sedikit entropy dari pada noise Gaussian, rata-rata bit yang secara teoritis lebih tinggi akan menjadi mungkin.

Noise yang dipakai secara praktek sering memiliki paku tajam yang pendek dari amplitudo yang jauh lebih besar dari pada latar belakang dari white noise. Hal ini merusak atau menambah bit dan menghasilkan rata-rata kesalahan yang jauh lebih tinggi dari pada yang akan diharapkan dari teori yang menganggap noise Gaussian konstan.

Teori informasi itu merangkai maksimum pada apa yang mungkin kita harapkan supaya memperoleh channel yang ditunjukkan. Hal ini memberikan target kepada para insiyur untuk bekerja lebih lanjut. Hal ini terus menghasilkan teori tentang ciri kode signal dan pendeteksian kesalahan dan kode pembetulan yang mungkin membantu memperoleh rata-rata transmisi maksimum terhadap bandwidth yang ada.