Revisi Maret 2004

Modul 2

EE 4712 Sistem Komunikasi Bergerak

Overview of Wireless Digital Communication System

Oleh :
Nachwan Mufti A, ST

Mobilecomm.Labs Lead you to mobile society

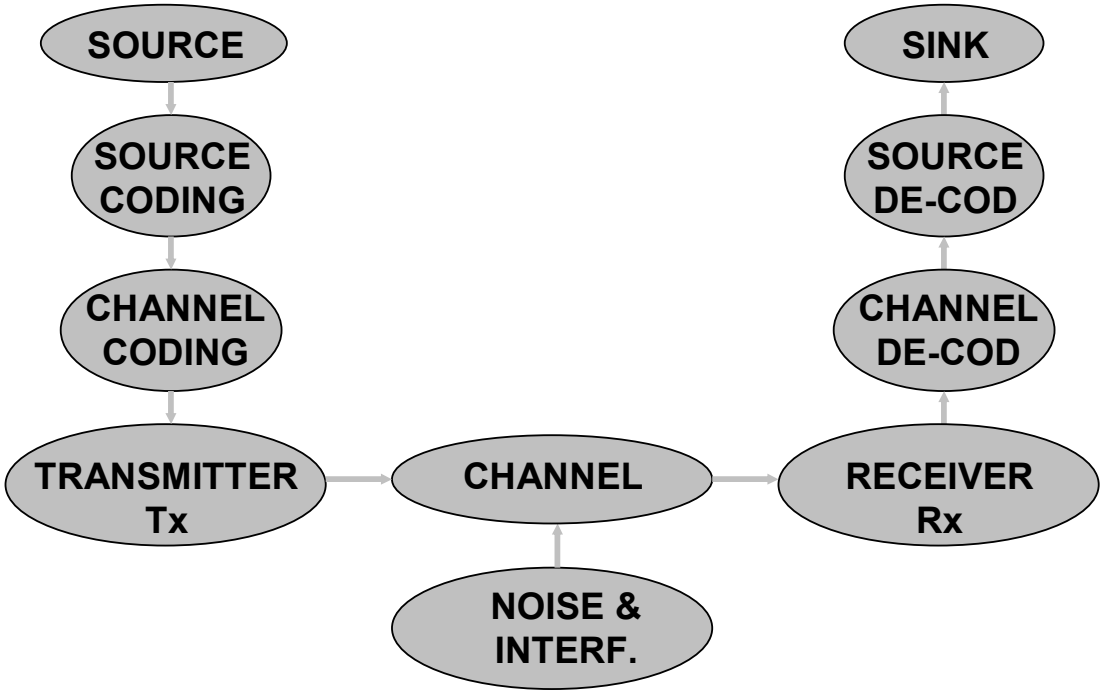
Organisasi

Modul 2 Overview of *Wireless Digital Communication System*

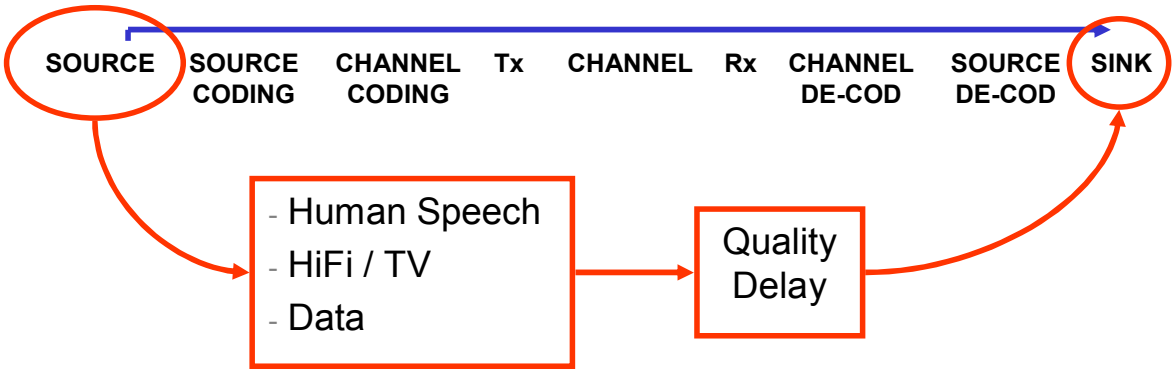
- A. Pendahuluan page 3
- B. Source Input page 13
- C. Informasi Suara dan Pengkodeannya page 17
- D. Informasi Gambar dan Pengkodeannya page 26
- E. Informasi Video dan Pengkodeannya page 30
- F. Tantangan Riset page 33
- G. Channel Coding page 34
- H. Modulator dan Demodulator page 40

A. Pendahuluan

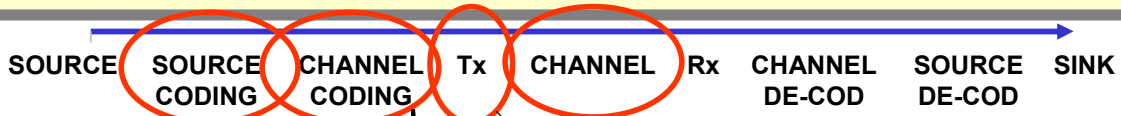
Model Komunikasi ...



A. Pendahuluan



A. Pendahuluan



" The process of efficiently converting the output of either analogue or digital source into a sequence of binary digits is called: "

SOURCE CODING

1. Electromagnetic representation (current)
2. Quantization/ Digitalization
3. Compression (minimize redundancy)

" The introduction of controlled redundancy into a signal to compensate for any sources of noise and interference is called: "

CHANNEL CODING

- repetition (no intelligence)
- other coding (intelligence)
- Input k bits → Output n bits: k/n code rate

The medium between Tx and Rx is called:

CHANNEL

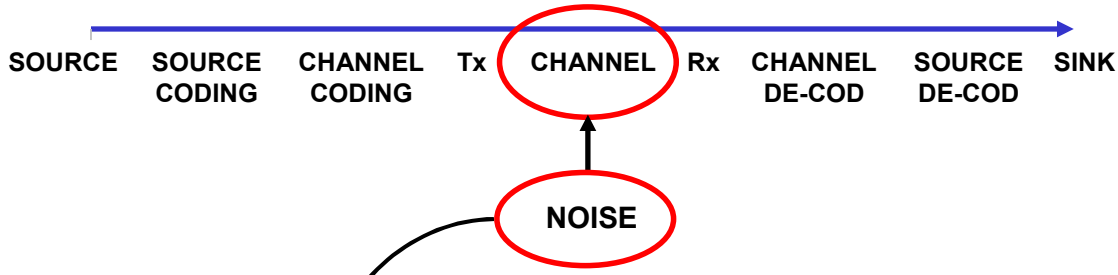
- **Wireless**
- **Telephone**
- **Fiber cable**

Each of the channels has unique features with respect to signal distortion and noise. Thus each is treated separately and the modulation schemes differ!

The interface which modulates the digital bit stream onto an appropriate waveform, capable of propagating through the communication channel, is called:

MODULATOR or TRANSMITTER

A. Pendahuluan



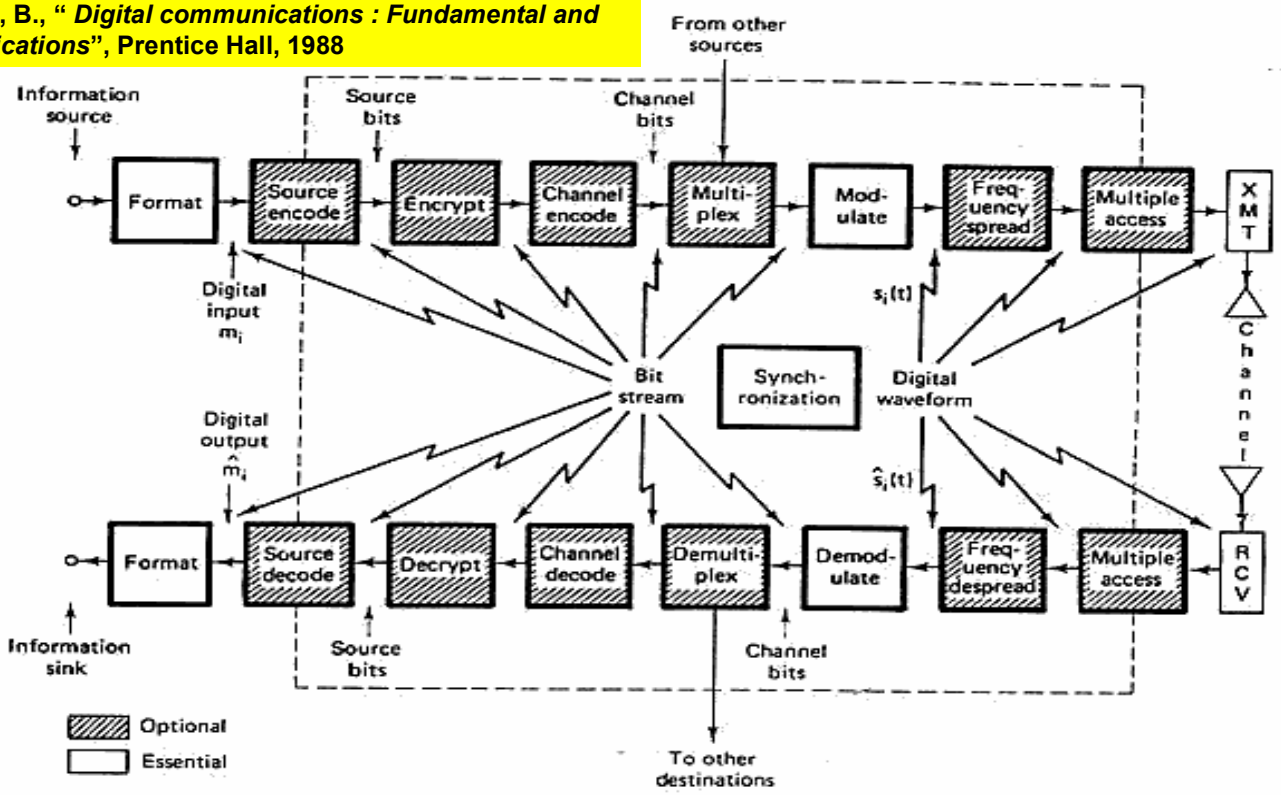
All processes which degrade the signal in an additive manner (and which autocorrelation function is a Dirac delta) are called:

NOISE

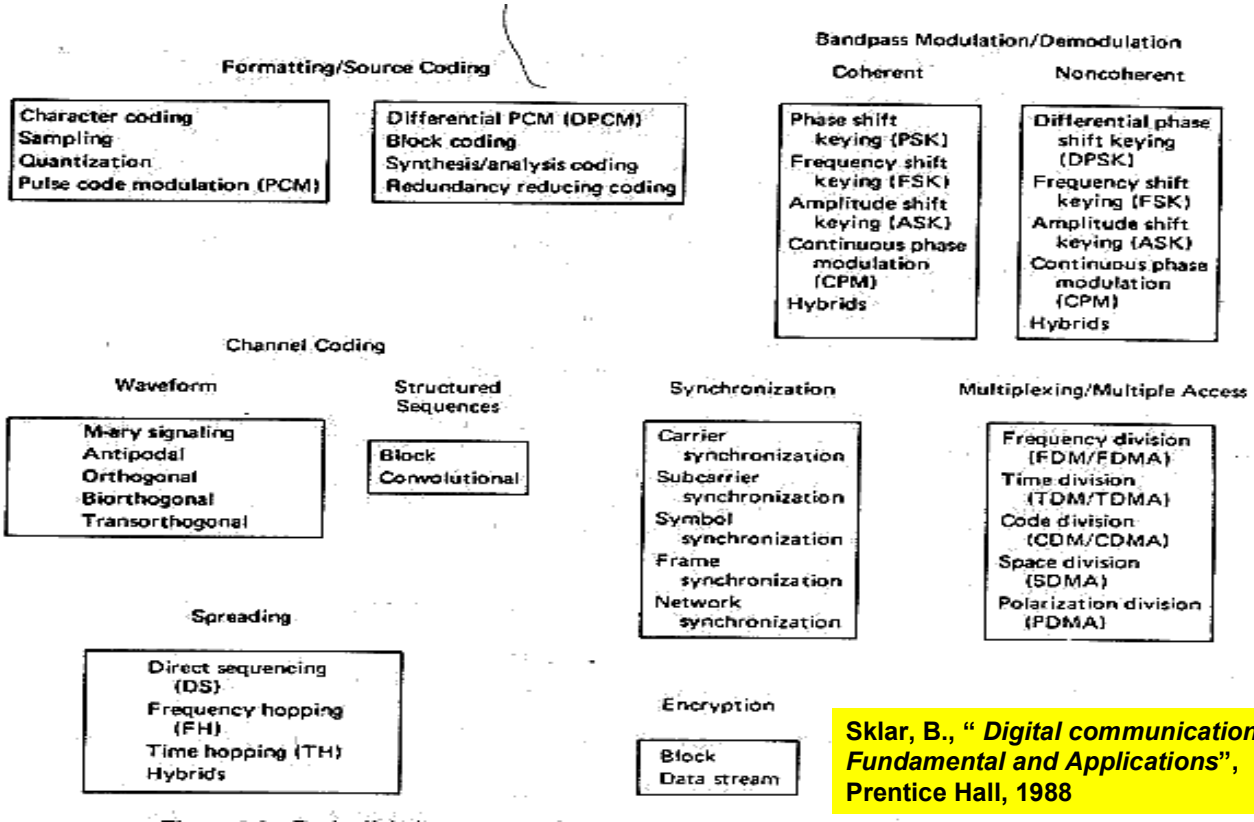
- Thermal noise (Tx, cable, Rx)
- Natural and man-made noise
- Interferences (usually from other man operated systems)

A. Pendahuluan

Sklar, B., " *Digital communications : Fundamental and Applications*", Prentice Hall, 1988



A. Pendahuluan



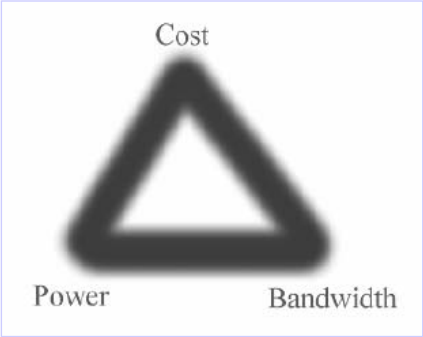
Sklar, B., " *Digital communications : Fundamental and Applications*", Prentice Hall, 1988

Ideas...

- Sistem elektrik menggunakan variasi arus dan tegangan untuk menyimpan dan menyalurkan informasi dari suatu titik ke titik lain menggunakan suatu jalur / link atau jaringan
- Pesan-pesan telekomunikasi ditransmisikan melalui media transmisi yang berbeda seperti kabel tembaga, microwave, kanal radio, ataupun serat optik
- Sinyal yang dikirimkan harus diadaptasikan terhadap transmisi dan medianya dengan menggunakan **modulasi** dan **coding**

Desain sistem komunikasi

- **Trade off** antara ketiga hal disamping
- Secara teknis memiliki beberapa tujuan :
  - memaksimumkan bit rate yang dilewatkan
  - meminimumkan probabilitas error
  - meminimumkan daya yang dibutuhkan, atau meminimumkan rapat spektral daya energi terhadap noise
  - meminimumkan bandwidth sistem yang dibutuhkan
  - maksimum utilisasi sistem (maksimum user, minimum delay, maksimum keandalan terhadap interferensi)
  - minimum kompleksitas sistem, beban komputasi, dan system cost



Pembahasan selanjutnya akan dikonsentrasikan pada ***Sistem Komunikasi Digital***

Sklar, B., " *Digital communications : Fundamental and Applications*", Prentice Hall, 1988

A. Pendahuluan

Sklar, B., " *Digital communications : Fundamental and Applications*", Prentice Hall, 1988

Shannon-Hartley capacity theorem (batas Shannon)

Niquist theoretical minimum bandwidth requirement

- **Tujuan Desain**
  - Maksimum bit rate
  - Minimum probabilitas error
  - Minimum daya /minimum rapat spektral daya energi terhadap noise
  - Minimum bandwidth sistem
  - Maksimum utilisasi sistem
  - Minimum kompleksitas sistem, beban komputasi, dan system cost

Tradeoff !

Regulasi pemerintah

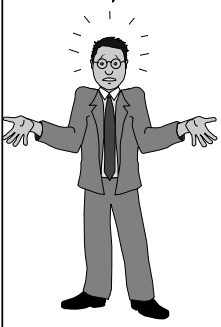
Batasan-batasan teknologi

Persyaratan dari sistem yang lain (mis: orbit satelit, dst)

A. Pendahuluan

Pengolahan Sinyal Informasi

Kenapa diolah ?



- Menghadapi keterbatasan bandwidth (atau media penyimpan data)→ **kompressi**
- Kerahasiaan informasi → **security & authentikasi**
- Ketidakpastian kanal tansmisi, menyebabkan burst error → perlu **error correction**

B. Source Input (Informasi)

Informasi { analog, digital } → **digitalisasi !**

Prinsip utama : sampling dan kuantisasi

Kenapa digital ?

- Lebih handal dan dapat diproduksi dengan biaya lebih murah
- Lebih fleksibel dalam implementasi, serta fitur yang lebih beragam

Representasi informasi digital

- Informasi analog harus didigitalkan
- Hanya ada 2 simbol yang merepresentasikan informasi digital …

“ 0 atau 1 “

- Jumlah bit yang semakin banyak akan ***merepresentasikan*** kejadian yang semakin banyak, semakin ‘presisi’, semakin baik, tetapi kapasitas media penyimpan dan bandwidth yang dibutuhkan juga semakin besar

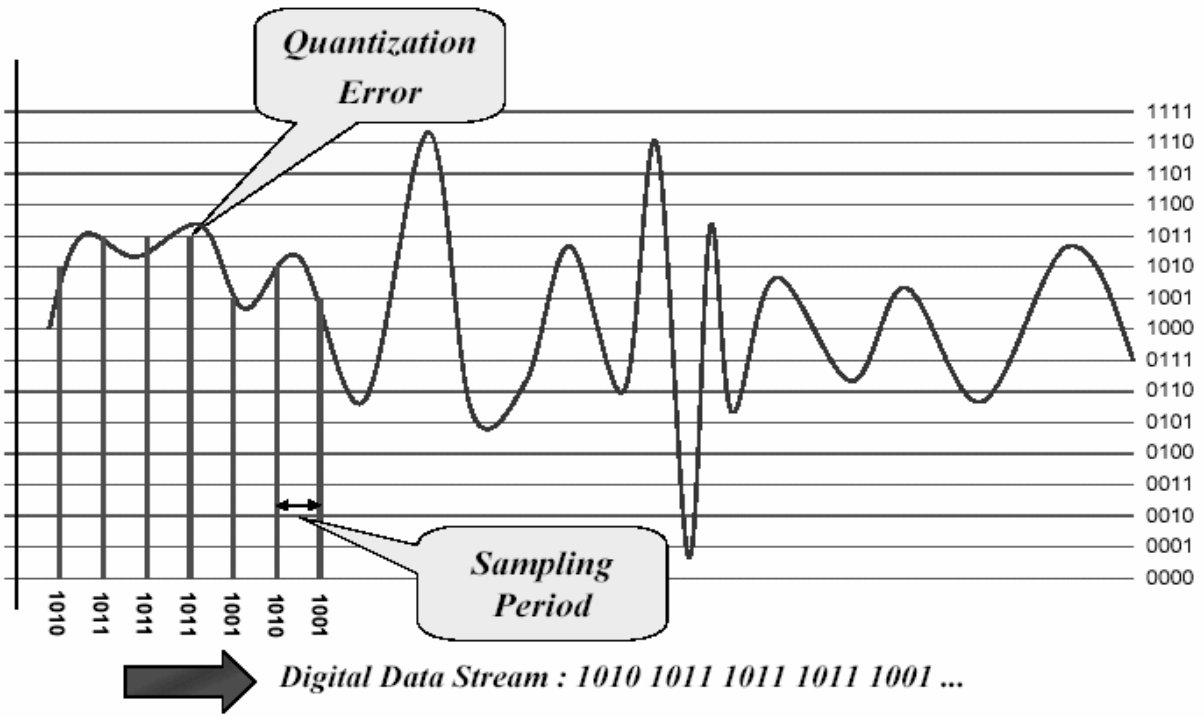
B. Source Input (Informasi)

Input informasi

- Suara
- Data (karakter, fax, dst)
- Gambar
- Video

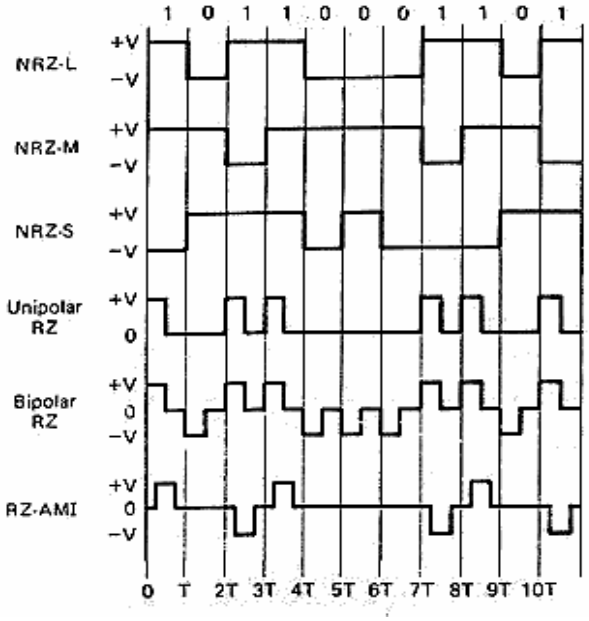
Karakteristik masing-masing informasi di atas berbeda, standar QoS yang harus dicapai berbeda

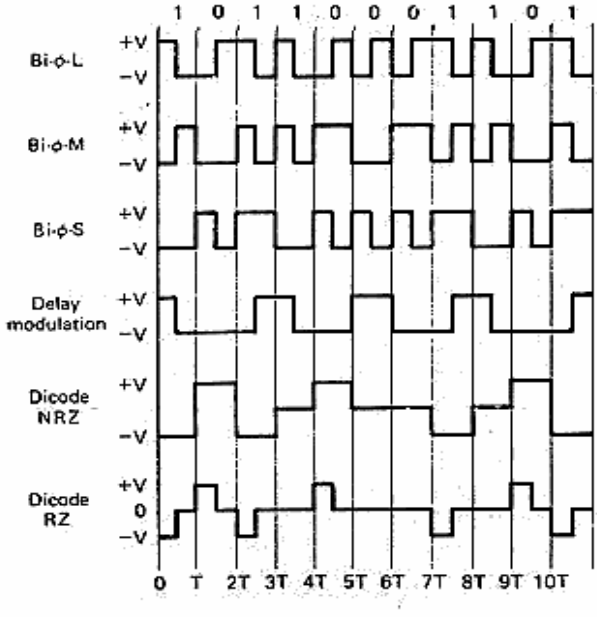
Sampling dan kuantisasi



Pengkodean sumber

- → Untuk transmisi data yang efisien dan mencegah kemungkinan error
- → Pilahan umumnya tergantung dari tipikal burst data (kontinyu, bursty, dsb)
- → **Kompressi umumnya masuk juga pada kelas source coding**

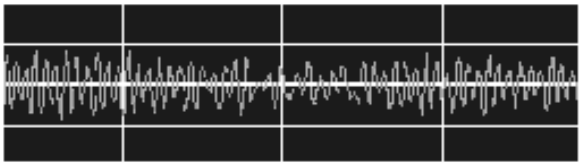




C. Informasi Suara dan Pengkodeannya

Suara

- Suara manusia, sebenarnya terdiri dari gelombang audio yang terdiri dari beberapa komponen frekuensi / nada
- Dalam domain waktu, antara nada-nada tidak bisa dipisahkan
- Dalam domain frekuensi, antar komponen-komponen frekuensi dapat dipisahkan
- Jadi, pemisahan suara asli dengan noise latar umu dilakukan dlm domain frekuensi



domain waktu

domain frekuensi

C. Informasi Suara dan Pengkodeannya

Contoh:

- Suara yang bisa didengar manusia : 2 Hz –20 kHz
- Suara percakapan manusia : maksimum sampai 3400 Hz, dibulatkan kira-kira 4 kHz
- Maka sampling yang diperlukan : 2 x 4 kHz = 8 kHz (artinya : 8000 sample per-detik) → (*Niquist rate*)
- **Contoh lain :**

Berapa kapasitas lagu 5 menit dengan standar CD audio ?

CD audio : sampling 44,1 kHz (artinya 44100 sample perdetik)

1 sample diwakili 16 bit (2 byte)

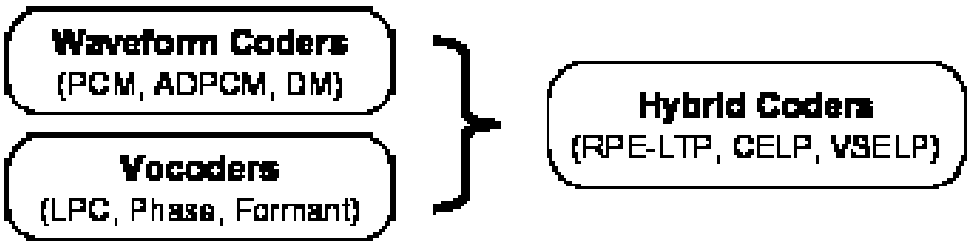
Jadi, kapasitas data lagu =

(44100 sample/detik) x (2 byte/sample) x (5x60 detik) ≈ 25 MB

Stereo : (2 kanal) ; kapasitas ≈ 25 x 2 = **50 MB**

Speech Coding dalam Siskom Wireless

- Tujuan adalah mendigitalkan dan melakukan kompressi suara, mentransmisikan dengan kualitas terbaik yang mungkin dan sesedikit mungkin bit representatif
- Tiga kategori dalam speech coder :



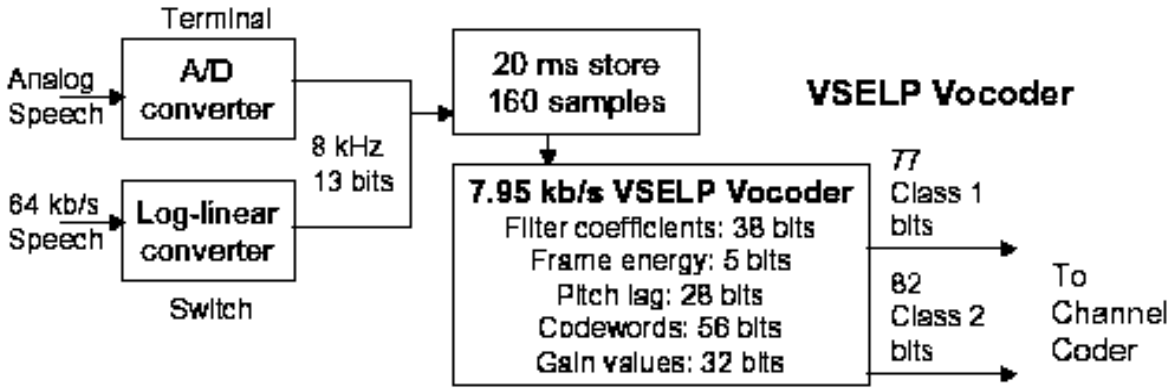
- Mayoritas sistem wireless menggunakan hybrid coder, karena isu bandwidth yang sangat kritis → tetapi harus memperhatikan kualitas. Low tier PCS umumnya menggunakan ADPCM

Vocoder (Speech Coding) dalam berbagai standar komunikasi Wireless

- ***TIA/EIA-95 CDMA***

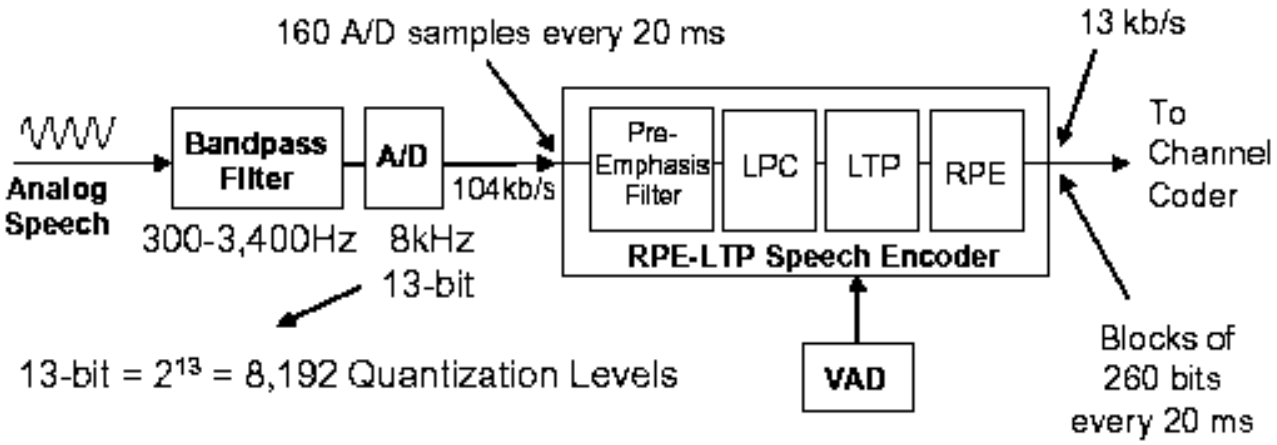
  - ✓ Menggunakan ***Qualcomm Code Excited Linear Prediction*** (Q-CELP)
  - ✓ Teknologi CELP menggunakan codebook untuk memilih dan mentransmisikan vektor-vektor yang paling dekat dlm merepresentasikan sample suara asli
  - ✓ Pengembangan CELP adalah suatu vocoder baru yang disebut EVRC (***Enhanced Variable Rate Codec***), atau IS-127, telah diluncurkan.

- ***TIA/EIA-136 TDMA***
  - ✓ Menggunakan ***Vector Sum Excited Linear Prediction*** (VSELP) pada rate 7,95 kbps
  - ✓ Algoritma ini sekarang ditingkatkan menjadi ***Algebraic Code Excited Linear Prediction*** (ACELP), atau IS-641. ACELP menggunakan rate yang lebih rendah dari 7,4 kbps, sehingga memberi bandwidth yang lebih besar bagi channel coding.



- **GSM** (***Global System for Mobile Communication***)
  - ✓ Menggunakan **Regular Pulse Excitation – Long Term Prediction (RPE-LTP)** pada 13 kbps untuk full rate
  - ✓ GSM generasi sekarang menggunakan ***Enhanced Full Rate*** (EFR) yang berbasis pada vocoder ACELP. Dapat menurunkan rate hingga 12,2 kbps sehingga memberi ekstra bandwidth pada channel coding → kualitas akan menjadi lebih bagus
  - ✓ Riset-riset saat ini adalah mengenai ***Adaptive Multirate Codec*** (AMR). AMR akan memberikan rate pengkodean yang variabel tergantung karakteristik informasi, sehingga kompressi menjadi lebih efektif dan diklaim akan memberikan peningkatan kapasitas 50-100%

GSM RPE-LTP Speech Codec



Catatan: Decoder meliputi interpolasi, filter lowpass, converter 13-8 bit, dan tidak termasuk VAD

Vocoder Quality Measurements

- **Vocoder dinilai berdasarkan prosedur-prosedur subyektif yang diberikan di : ITU-T Recommendation P.830**
- **Dua prosedur utama:**
  - *Absolute Category Rating* (ACR)
  - *Comparison Category Rating* (CCR)
- ***Absolute Category Rating***
  - Partisipan mendengar sample suara terkode dan menilai kualitas suara-nya pada suatu skala absolut. Hasilnya adalah ***Mean Opinion Score*** (MOS)
- ***Comparison Category Rating***
  - Partisipan mendengar sample suara terkode dan sample suara asli. Dua sample tersebut dibandingkan pada suatu skala relatif. Hasilnya disebut sebagai ***Comparison Mean Opinion Score*** (CMOS)

Mean Opinion Score (MOS)	
Excellent	5
Good	4
Fair	3
Poor	2
Bad	1

Comparison Mean Opinion Score (CMOS)	
Much Better	3
Better	2
Slightly Better	1
About the Same	0
Slightly Worse	-1
Worse	-2
Much Worse	-3

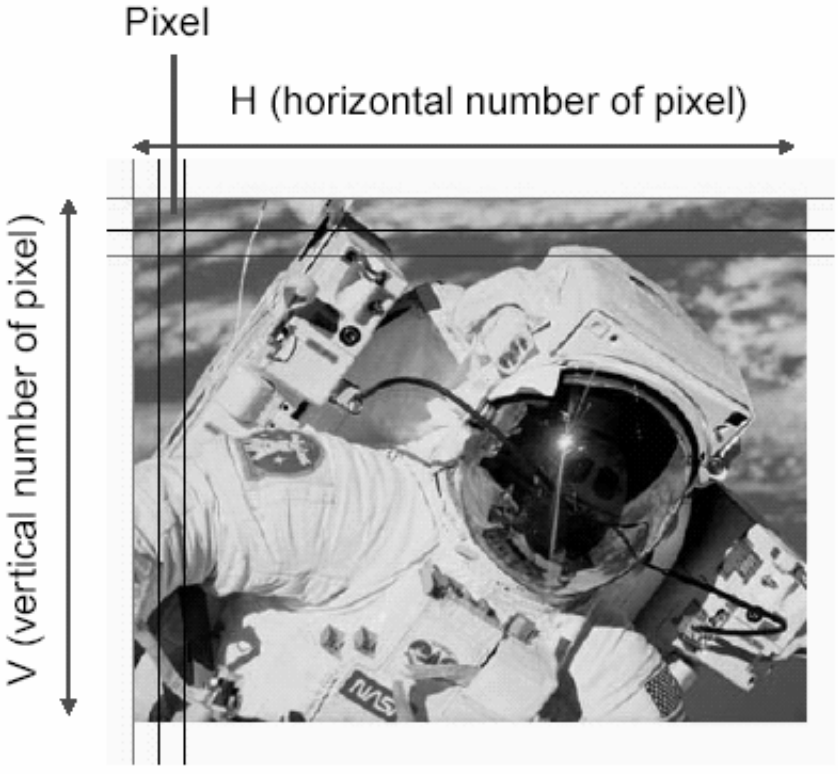
Mayoritas vocoder wireless memiliki rangking MOS 3,4 hingga 3,9 pada lingkungan RF yang baik.

PCM 64 kbps memiliki MOS 4,3

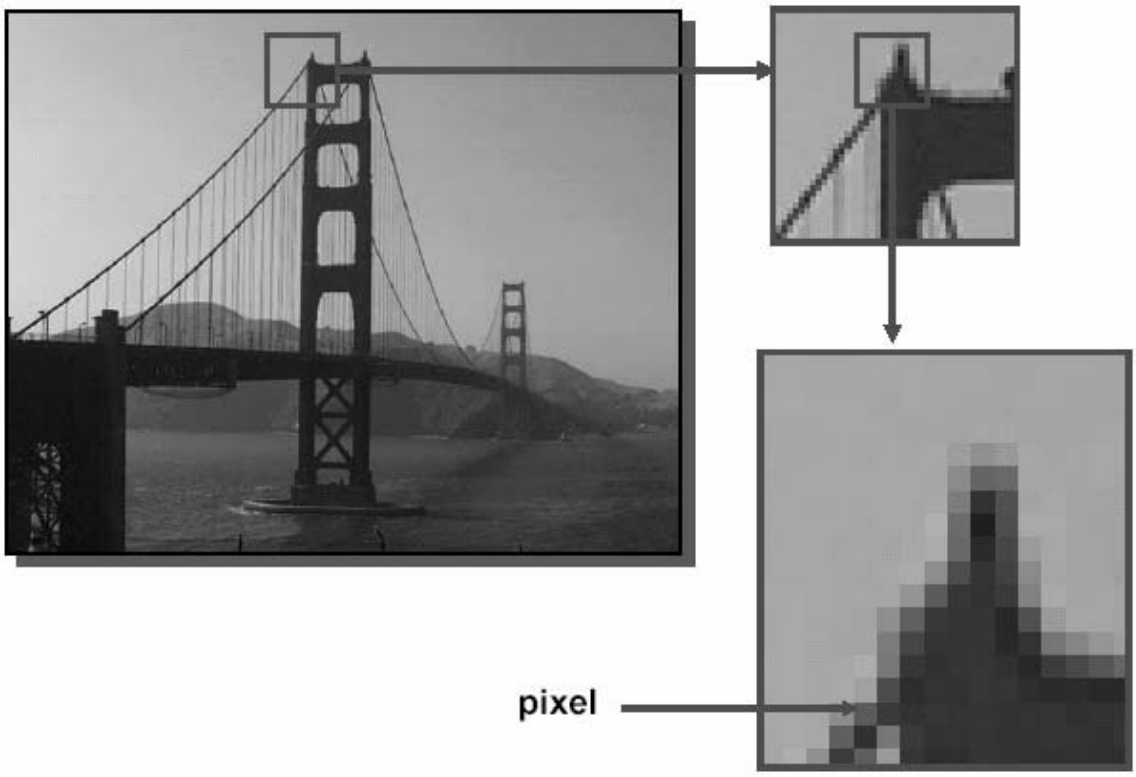
D. Informasi Gambar dan Pengkodeannya

Citra (*Image*)

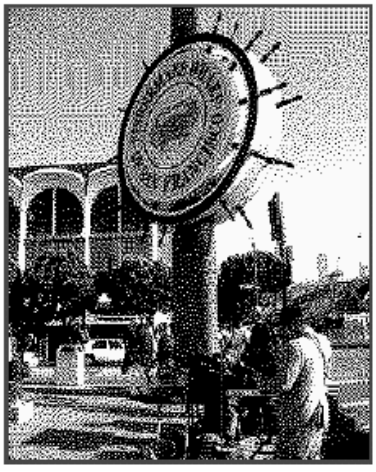
- Image adalah **kumpulan titik-titik (pixel)**
- 1 pixel diwakili oleh bit-bit, semakin banyak bit yang mewakili 1 pixel → semakin bagus image-nya
- Total jumlah pixel dalam satu image = H x V



D. Informasi Gambar dan Pengkodeannya



D. Informasi Gambar dan Pengkodeannya



1 pixel diwakili oleh ….

- 1 bit (black and white)
- 1 byte (gray scale)
- 1 byte (256 color)
- 2 byte (64k color)
- 3 byte (16M color)
- 4 byte ….dst

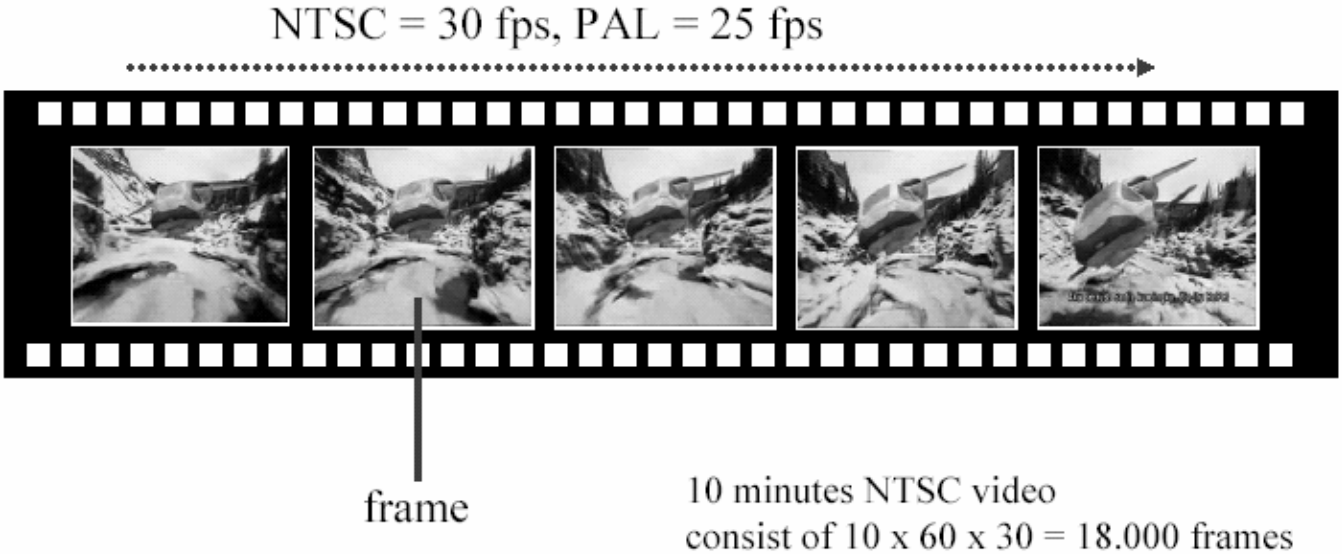
Semakin banyak bit yg mewakili warna gambar → kualitas gambar semakin baik

Pengkodean Gambar

Kita sangat familiar dengan berbagai istilah yang merupakan berbagai jenis teknik kompresi citra sebagai berikut:

- JPEG
- GIF
- BMP
- dst

Video



Video → Example :

- Supaya tidak patah-patah, terdapat konvensi : fps ≥ 25 fps (fps = frame per-second)
- NTSC = 30 fps ; PAL = 25 fps
- **Contoh :**

  Berapa kapasitas dari suatu video 10 menit !

  - PAL ; (353 x 288 pixel) x (3 byte per-pixel) x (25 fps x 10 menit x 60 detik per-menit) = ….
  - NTSC ; (352 x 240 pixel) x (3 byte per-pixel) x (30 fps x 10 menit x 60 detik per-menit) ≈ **4,5 GB ! (tanpa kompresi)**

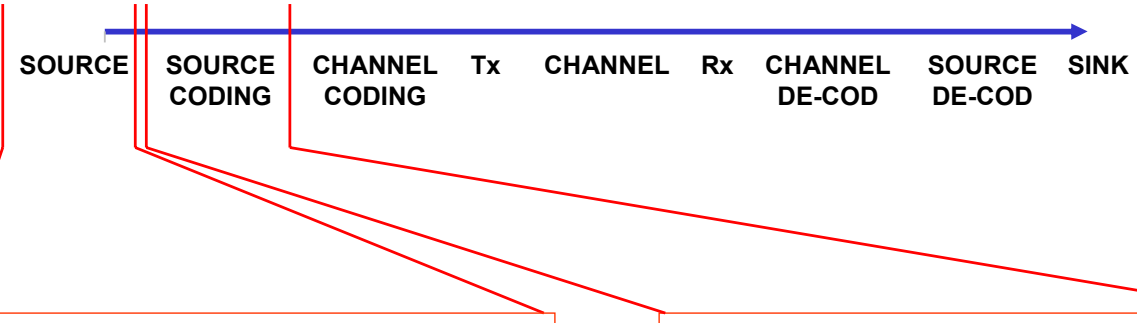
  2 jam NTSC VCD → kalikan sendiri !

Pengkodean Video

Pernahkah anda menjumpai istilah berikut ?

- MPEG
- MPEG 4
- dst

F. Tantangan Riset



Tantangannya adalah :

1. Bagaimana memodelkan pola kedatangan informasi
2. Manakah informasi yang paling bermakna (bagi pengguna informasi)
3. Bagaimana karakteristik informasi (misalkan untuk speech recognition)

Tantangannya adalah :

1. Bagaimana pengkodean sumber yang tepat (biasanya didasarkaan pola kedatangan informasi)
2. Bagaimana membuat pengkompressi informasi, tetapi masih bisa diterima pengguna informasi

G. Channel Coding

Motivasi menggunakan coding ...

- **Coding dilakukan (pengkodean kanal) untuk deteksi dan/atau koreksi error yang disebabkan noise, interferensi, serta distorsi**

- **Prinsip *Channel Coding*** → Penambahan bit-bit redundant untuk menaikkan kinerja pada proses deteksi sinyal (Shannon theorema)
- **Dua kategori channel coding:**
  - ***Error detection coding*** → deteksi error
  - ***Error correction coding*** → koreksi error
- **Coding Gain** adalah perbedaan S/N yang diberikan oleh sinyal terkode terhadap sinyal yang tidak dikodekan , untuk suatu Bit Error Rate tertentu

Two Types of Channel Codes

1. Block Codes

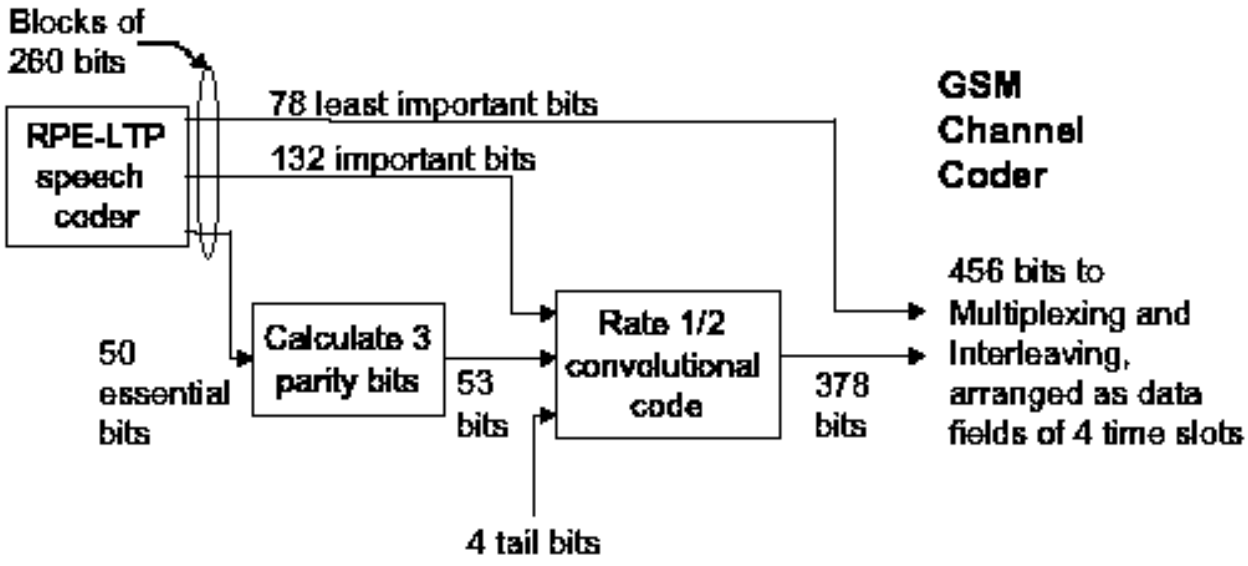
- Forward Error Correction (FEC) codes that allow a limited number of errors to be detected and corrected
- "**k**" information bits are encoded into "**n**" encoded bits
- The number of redundant bits added is "**n-k**"
- Block code is subsequently called **n,k code**
- The rate of the codes is subsequently = **k/n**
- Major types include: CRC, BCH, Reed-Solomon, etc.

Two Types of Channel Codes (cont.)

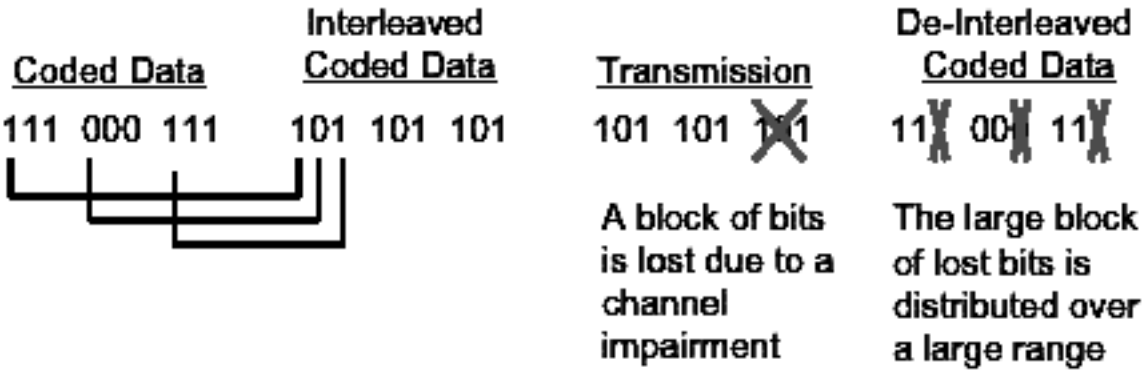
2. Convolutional Codes

- Information is not grouped into blocks
- Code is generated by passing information through a shift register. The shift register has "**N**" stages (called the constraint length) with "**k**" bits in each stage. Information is shifted k-bits at a time.
- The number of output bits for each k input bit = "**n**" bits
- Just like block coding, the coding rate then = **k/n**
- Convolutional codes can usually obtain a higher coding gain than block codes

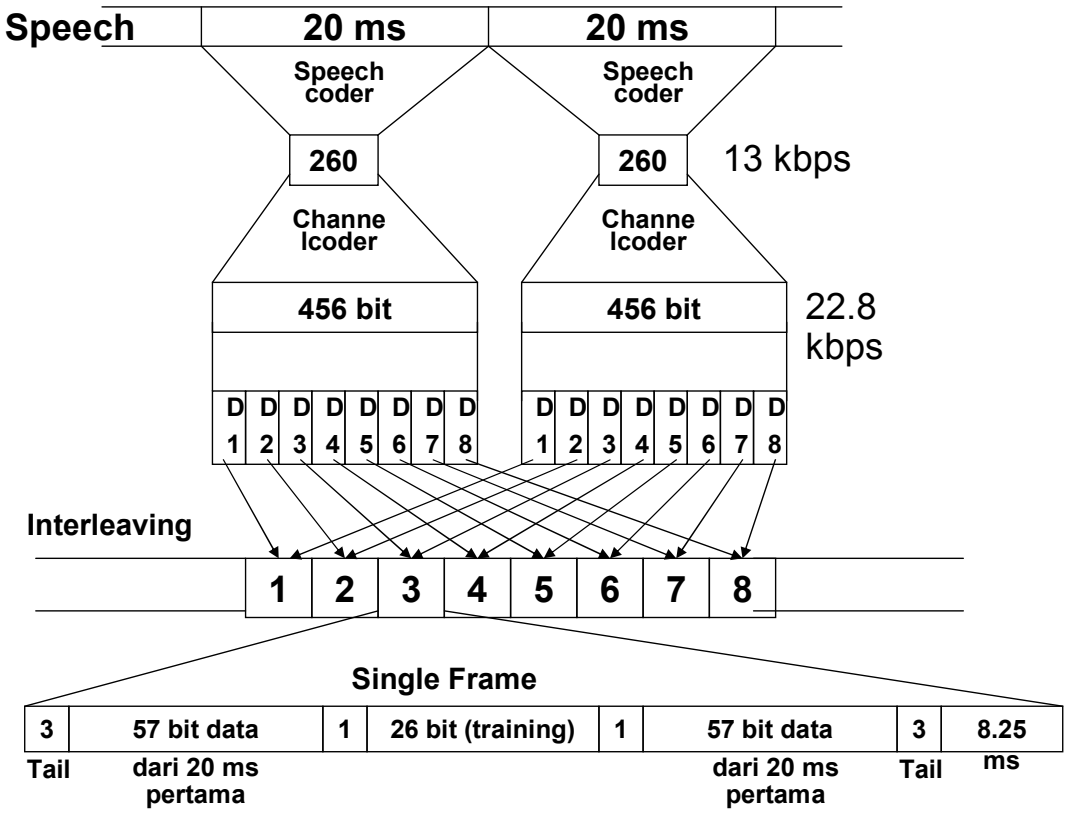
- GSM (like most standards) uses a combination of Block and Convolutional Coding



Interleaver



G. Channel Coding



H. Modulator dan Demodulator

Modulasi adalah proses untuk mengkodekan informasi dari sumber pesan dalam bentuk yg cocok untuk transmisi

Motivasi menggunakan modulasi ...

- Modulasi dilakukan agar bisa menggunakan media transmisi untuk pengiriman pesan

- Skema modulasi dipilih berdasarkan :
  1. Jenis pesan yang ditransmisikan (voice, data)
  2. Jenis kedatangan trafik (continous atau bursty traffic)
  3. Media transmisi yang digunakan / tipikal kanal yang digunakan

Teknik Modulasi

- Modulasi dapat dilakukan dengan mem-variasi-kan:
  - Amplituda
  - Phasa, atau
  - Frekuensi

  dari frekuensi carrier 'berkaitan' dengan amplituda sinyal informasi.
- **Demodulasi** adalah operasi inversi: meng-*ekstrak pesan baseband dari carrier-nya*, sedemikian agar dapat diproses pada receiver

Analog/Digital Modulation

- Analog Modulation
  - Input adalah sinyal kontinyu analog
  - Digunakan dalam sistem komunikasi bergerak generasi pertama spt AMPS di USA.
- Digital Modulation
  - Input adalah deretan waktu simbol dan pulsa.
  - Digunakan pada generasi siskomber saat ini dan akan datang

Goal dari modulasi

- Modulasi adalah persoalan yg sulit dalam kaitan kanal radio komunikasi bergerak
  - Terdapat kondisi fading: Small-scale fading → multipath , efek doppler
- Goal skema modulasi adalah:
  - Mengirimkan sinyal pesan melalui kanal radio dengan **kualitas** terbaik yang mungkin
  - Menggunakan sesedikit mungkin **spektrum radio**

FM vs AM

- **Frequency Modulation (FM)**
  - Teknik modulasi analog paling populer
  - Amplitude sinyal carrier dijaga konstan (constant envelope signal), frekuensi sinyal carrier diubah berdasarkan amplitude sinyal pesan pemodulasi ; Sehingga info dibawa dalam **phase** atau **frequency** carrier-nya.
  - Memiliki ketahanan terhadap noise yang lebih baik:
    - Impulse noise dan atmosfir dapat menyebabkan fluktuasi yg cepat dari amplitudo sinyal yg diterima
  - Unjuk kerja yg lebih baik pada lingkungan multipath
    - Small-scale fading menyebabkan fluktuasi amplitudo.
  - Penggunaan bandwidth lebih besar akan meningkatkan performansi.
    - Meningkatkan bandwidth occupied akan meningkatkan SNR ratio.
  - Hubungan antara daya yang diterima dengan kualitas bersifat tidak linier.
    - Peningkatan dramatis pada kualitas didapat pada peningkatan daya terima .
    - Tahan terhadap co-channel interference (capture effect).

- **Amplitude Modulation (AM)**
  - Mengubah amplitudo sinyal carrier berdasarkan amplitudo sinyal pesan
  - Semua informasi dibawa di amplitudo carrier
  - Terdapat hubungan linear antara kualitas sinyal yang diterima dengan daya sinyal yang diterima.
  - Sistem AM selalui menggunakan bandwidth yang lebih kecil daripada sistem FM.
  - Sinyal carrier AM memiliki envelope yang berubah terhadap waktu.

Amplitude Modulation

- Amplitudo sinyal carrier divariasikan berdasarkan amplitudo sesaat sinyal pesan pemodulasi, m(t).

Signal carrier : $A_c \cos(2\pi f_c t)$

Sinyal pesan pemodulasi : $m(t)$

AM Signal : $s_{AM}(t) = A_c[1 + m(t)]\cos(2\pi f_c t)$

Indeks modulasi sinyal AM

Untuk sinyal pesan sinusoidal $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$

Index didefinisikan: $k = \frac{A_m}{A_c}$

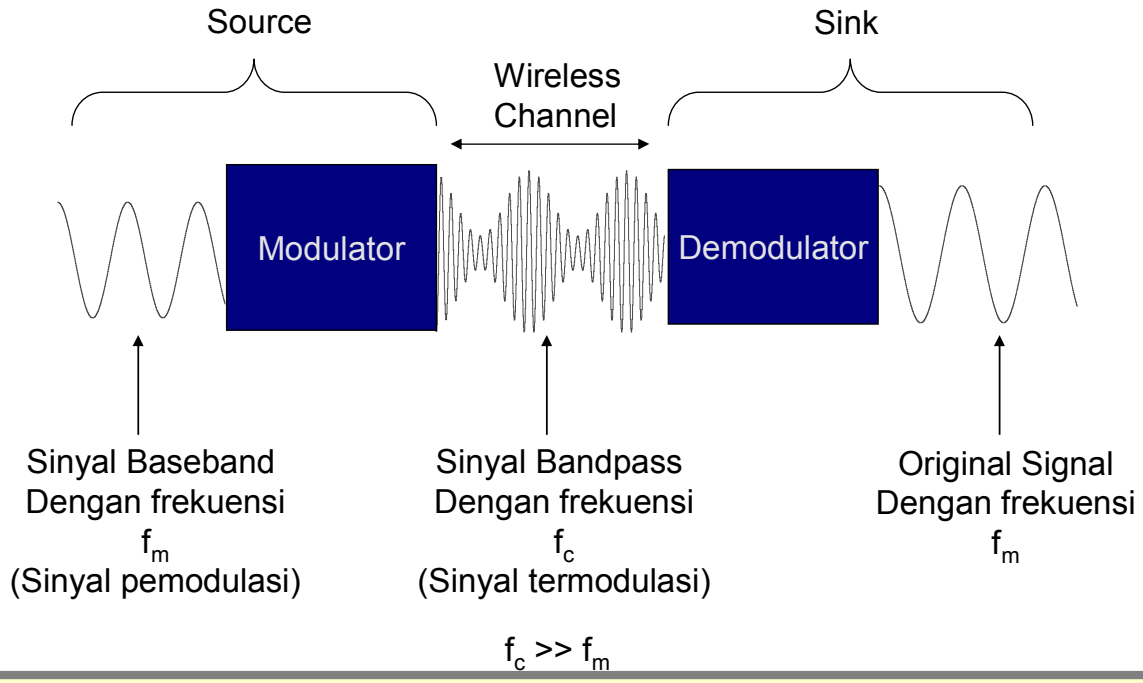
$S_{AM}(t)$ dapat juga diekspresikan sebagai:

$$s_{AM}(t) = \mathrm{Re}\{g(t)e^{j2\pi f_c t}\}$$

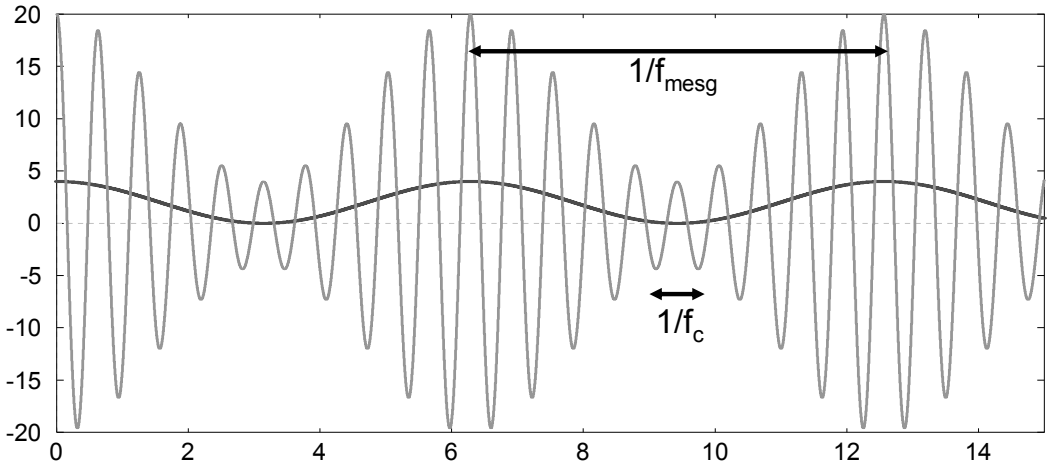
$$\text{dimana } g(t) = A_c(1 + m(t)]$$

g(t) disebut sampul kompleks (*complex envelope*) dari sinyal AM.

AM Modulation/Demodulation



AM Modulation - Contoh



Message signal : $m(t) = 2 + 2\cos(t)$

Carrier signal : $A_c \cos(2\pi f_c t) = 4\cos(10t)$

$s_{AM}(t) = A_c[1 + m(t)]\cos(2\pi f_c t)$

AM Signal : $s_{AM}(t) = 4[1 + 2 + 2\cos(t)]\cos(2\pi f_c t)$

$$f_c = \frac{10}{2\pi} \cong 1.6Hz$$

$$f_{mesg} = \frac{1}{2\pi} = 0.16Hz$$

Modulasi Sudut – *Angle Modulation*

- Sudut fasa carrier divariasikan berdasarkan amplitudo sinyal baseband pemodulasi.
- Dua kelas dari teknik modulasi sudut:
  - Frequency Modulation (FM)
    - Frekuensi sesaat sinyal carrier divariasikan secara linier berdasarkan sinyal pesan, m(t).
  - Phase Modulation (PM)
    - Phasa carrier θ(t) divariasikan secara linier berdasarkan sinyal pesan, m(t).

Angle Modulation

FREQUENCY MODULATION

$$s_{FM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta(t)] = A_c \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(x)dx\right]$$

k_f adalah konstanta deviasi frekuensi (kHz/V)

Jika sinyal modulasi adalah sinusoidal dengan amplitude A_m, dan frekuensi f_m:

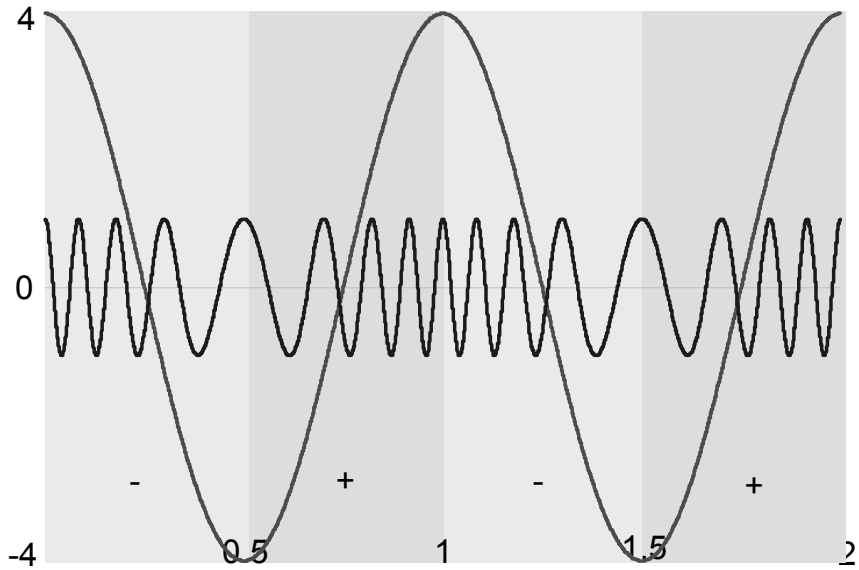
$$s_{FM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \frac{k_f A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t)]$$

PHASE MODULATION

$$s_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_\theta m(t)]$$

k_θ konstanta deviasi fasa

FM Example:



Message signal $m(t) = 4\cos(2\pi t)$

FM Signal $s(t) = \cos[2\pi 8t + 4\sin(2\pi t)]$

Carrier Signal $\cos(2\pi 8t)$

Indeks FM

$$\beta_f = \frac{k_f A_m}{W} = \frac{\Delta f}{W}$$

W: Bandwidth maksimum sinyal pemodulasi
Δf: Deviasi frekuensi puncak transmitter.
A_m: peak value dari sinyal pemodulasi

Contoh: Diberikan **m(t) = 4cos(2π4x10³t)** adalah sinyal pesan dan konstanta deviasi frekuensi (k_f) of 10kHz/V;
Hitung *peak frequency deviation* dan *modulation index*!

Jawab: f_m=4kHz

Δf = 10kHz/V * 4V = 40kHz.
β_f = 40kHz / 4kHz = 10

Spektrum dan Bandwidth Sinyal FM

Sinyal FM memiliki 98% dari total daya yg ditransmisikan pada bandwidth RF, B_T

Carson's Rule

$$B_T = 2(\beta_f + 1) f_m$$ Batas atas

$$B_T = 2\Delta f$$ Batas bawah

Contoh:
FM analog AMPS menggunakan indeks modulasi B_f = 3 dan f_m = 4kHz.
Menggunakan Hukum Carson: AMPS memiliki batas atas 32kHz dan batas bawah 24kHz untuk bandwidth yg diperlukan

FM Demodulator

- Konversi dari frekuensi sinyal carrier ke amplituda sinyal pesan
- Teknik deteksi FM :
  - Deteksi Slope
  - Deteksi Zero-crossing
  - Diskriminasi Phase-locked
  - Deteksi Quadrature

Contoh: Slope Detector

$$v_1(t) = V_1 \cos\left[2\pi f_c t + \theta(t)\right] = V_1 \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(x)dx\right]$$

$$v_2(t) = \frac{dv_1(t)}{dt} = -V_1\left[2\pi f_c + \frac{d\theta}{dt}\right]\sin\left(2\pi f_c t + \theta(t)\right)$$

$$v_{out}(t) = V_1\left[2\pi f_c + \frac{d}{dt}\theta(t)\right]$$

$$= V_1 2\pi f_c + V_1 2\pi k_f m(t)$$ ← Proporsional terhadap sinyal pesan asli

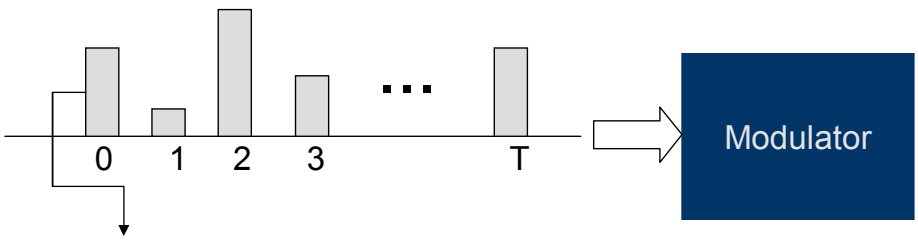
Digital Modulation

- Input adalah sinyal diskret
  - Deretan waktu pulsa-pulsa atau simbol
- Memberikan banyak kelebihan
  - Kokoh terhadap ketidaksempurnaan kanal
  - Lebih mudah dalam multiplexing bermacam sumber informasi, seperti: voice, data, video.
  - Dapat mengakomodasi kode-kode error-control
  - Memungkinkan enkripsi sinyal yang ditransfer
    - » Lebih secure

Digital Modulation

Sinyal pemodulasi direpresentasikan deretan waktu symbol atau pulsa-pulsa.

Tiap simbol memiliki *m* state terbatas: yang berarti tiap simbolmembawa *n* bit Informasi , dimana : $n = \log_2 m$ bit/symbol.



Satu symbol
(memiliki *m state* – level tegangan)
(merepresentasikan $n = \log_2 m$ bit informasi)

Faktor[2] yang mempengaruhi pemilihan teknik modulasi digital

- Skema modulasi yg diinginkan :
  - Memberikan bit-error rate yang rendah pada SNR yg juga rendah
    - Efisiensi daya
  - Performansi yang baik pada lingkungan multipath dan fading
  - Menggunakan bandwidth kanal RF minimum
    - Efisiensi bandwidth
  - Mudah dan cost-effective untuk diimplementasikan
- Tergantung pada keinginan akan aplikasi dan sistem khusus, terdapat berbagai tradeoff dalam memilih skema modulasi.

Efisiensi Daya Modulasi

- Efisiensi daya adalah kemampuan teknik modulasi untuk melindungi pesan pada pada tingkat daya rendah.
- Dalam mendapatkan *good fidelity*, daya sinyal perlu ditingkatkan.
  - Tradeoff antara fidelity dan daya sinyal.
  - Efisiensi daya menggambarkan seberapa efisien tradeoff dibuat.

$$\text{Power Efficiency} : \eta_p = \left[\frac{E_b}{N_0} \text{ yg diperlukan pada input receiver utk PER tertentu} \right]$$

E_b: signal energy per bit
N_0: noise power spectral density
PER: probability of error

Bandwidth Efficiency of Modulation

- Kemampuan skema modulasi untuk mengakomodasi data dalam bandwidth yg terbatas.
- Efisiensi bandwidth merefleksikan seberapa efisien bandwidth yg dialokasikan digunakan dlm transmisi data

$$\text{Bandwidth Efficiency}: \eta_B = \frac{R}{B} \text{ bps/Hz}$$

R: the data rate (bps)
B: bandwidth occupied by the modulated RF signal

Batas Shannon

Terdapat batas fundamental yang dapat dicapat pada efisiensi bandwidth. Teorema Shannon memberikan hubungan antara bandwidth kanal dan maksimum data rate yang dapat ditransmisikan melalui kanal, memperhatikan juga noise yang ada pada kanal, dengan hubungan berikut:

Shannon's Theorem

$$\eta_{B\max} = \frac{C}{B} = \log_2(1 + \frac{S}{N})$$

C: channel capacity (maximum data-rate) (bps)
B: RF bandwidth
S/N: signal-to-noise ratio (no unit)

Tradeoff antara Efisiensi BW dan Efisiensi Daya

- Terdapat tradeoff antara efisiensi bandwidth dan efisiensi daya
  - Penambahan kode-kode error control
    - Meningkatkan efisiensi daya
      - » Mengurangi daya terima yg dibutuhkan untuk bit error rate tertentu
    - Mengurangi efisiensi bandwidth
      - » Meningkatkan penggunaan bandwidth
  - M-ary keying modulation
    - Meningkatkan efisiensi bandwidth.
    - Mengurangi efisiensi daya
      - » Daya terima diperlukan lebih tinggi pada receiver

Contoh:

- SNR untuk kanal wireless adalah 30dB dan bandwidth RF 200kHz. Hitung maksimum data rate teoritis yang dapat ditransmisikan melalui kanal ?
- Jawab:

$$\frac{S}{N} = 10^{\left[\frac{30dB}{10}\right]}$$

$$C = B\log_2(1+\frac{S}{N}) = 2x10^5 \log_2(1+1000) = \boxed{1.99Mbps}$$

Kanal Noiseless dan Teorema Nyquist

Untuk kanal tanpa noise (*noiseless channel*), teorema Nyquist theorem memberikan hubungan antara bandwidth kanal dan maksimum data rate yang bisa ditransmisikan pada kanal sbb:

Nyquist Theorem

$$C = 2B \log_2 m$$

C: kapasitas kanal (bps)
B: RF bandwidth
m: jumlah state terbatas pada simbol dari sinyal yg ditransmisikan

Contoh: Kanal noiseless dengan bandwidth 3kHz dapat ditranmisikan maksimum 6Kbps jika simbolnya adalah binary.

Power Spectral Density dari Sinyal Digital dan Bandwith

- Apa arti bandwidth sinyal?
- Jawaban adalah berdasarkan pada Power Spectral Density (PSD) dari sinyal
- Untuk sinyal random w(t), PSD didefinisikan:

$$Pw(f) = \lim_{T \to \infty} \left(\frac{\overline{|W_T(f)|^2}}{T} \right)$$

$W_T(f)$ adalah transformasi fourier dari $w_T(t)$

$$w_T(t) = \begin{cases} w(t) & -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

Analisis Fourier

Joseph Fourier memperlihatkan bahwa fungsi periodik F(f) dengan periode T, selalu dapat dibangun dari penjumlahan (mungkin juga tak terbatas) sejumlah fungsi sinus dan cosinus.

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_T t) + b_n \sin(n\omega_T t)$$

$$\omega_T = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0$$

Dekomposisi tersebut disebut sbg *Deret Fourier* dan koefisiennya disebut *Koefisien Fourier* .

Penggambaran garis amplitudo dari komponen-komponen deret Fourier sdapat digambarkan sebagai fungsi frekuensi . Gambar ini kemudian disebut sebagai spektrum atau *frequency spectrum*. f_0 disebut sebagai frekuensi *fundamental*

Bentuk ke-n disebut *harmonik ke-n*. Koefisien dari harmonik ke-n adalah a_n dan b_n.

Analisis Fourier

Koefisien-koefisien didapatkan dari fungsi periodik F(t) sebagai berikut:

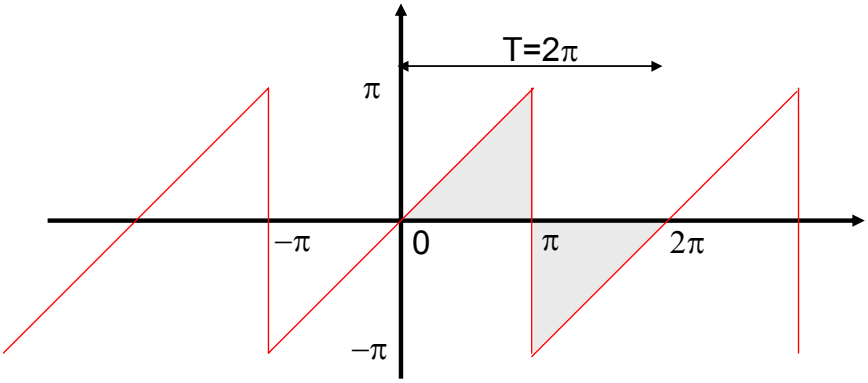
$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)dt$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\cos n\varpi_T t dt, \qquad n = 1,2,...$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\sin n\varpi_T t dt, \qquad n = 1,2,...$$

Contoh: Fungsi Periodik

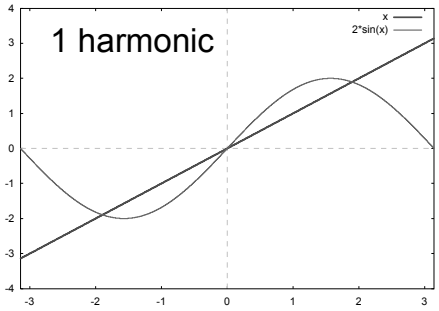
Tentukan deret fourir dari fungsi periodik f(x), dimana
Satu periode f(x) didefinisikan sebagai : f(x) = x, $-\pi < x < \pi$

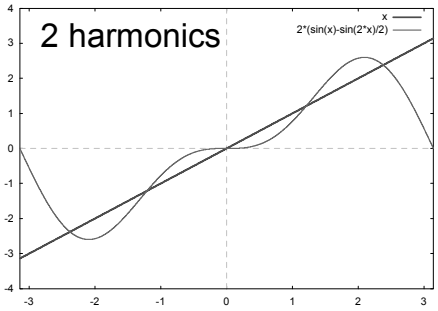


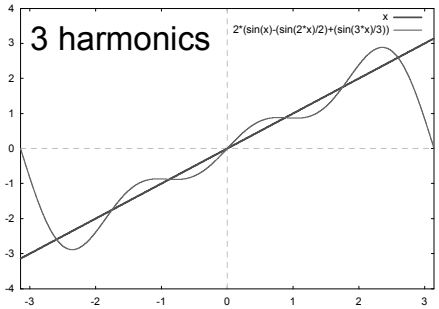
$$T = 2\pi$$

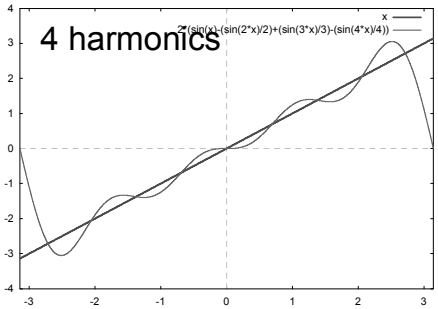
Contoh: Aproksimasi Fourier

Domain: [-π, π]



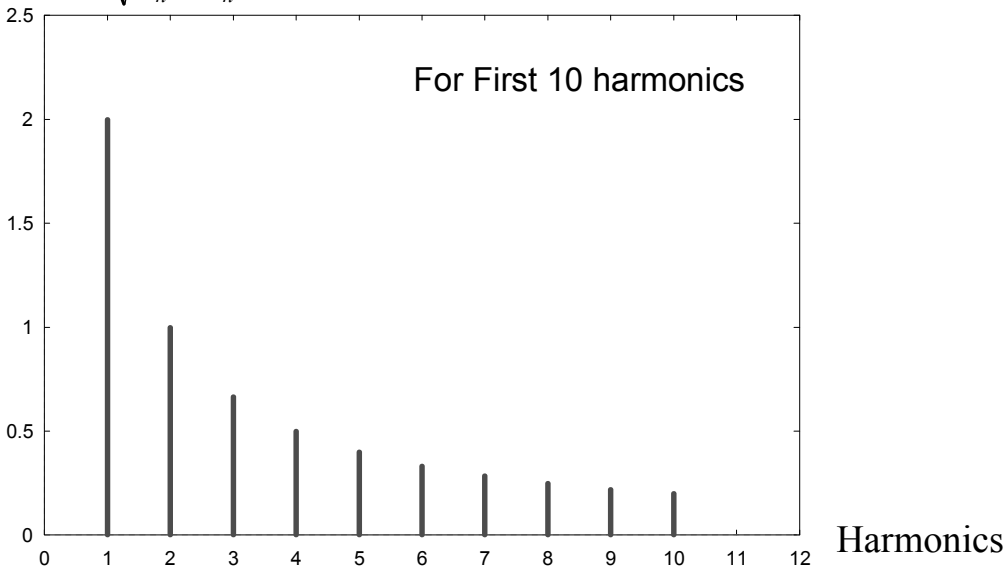






Contoh: Spektrum Frekuensi

Magnitude : $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$



Tiap harmonik berkorespondensi dengan frekuensi yang merupakan perkalian dari Frekuensi fundamental

Bentuk Kompleks Deret Fourier

Dengan substitusi ekspresi Euler's pada ekspansi Fourier:

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

Dapat diperlihatkan sebagai berikut:

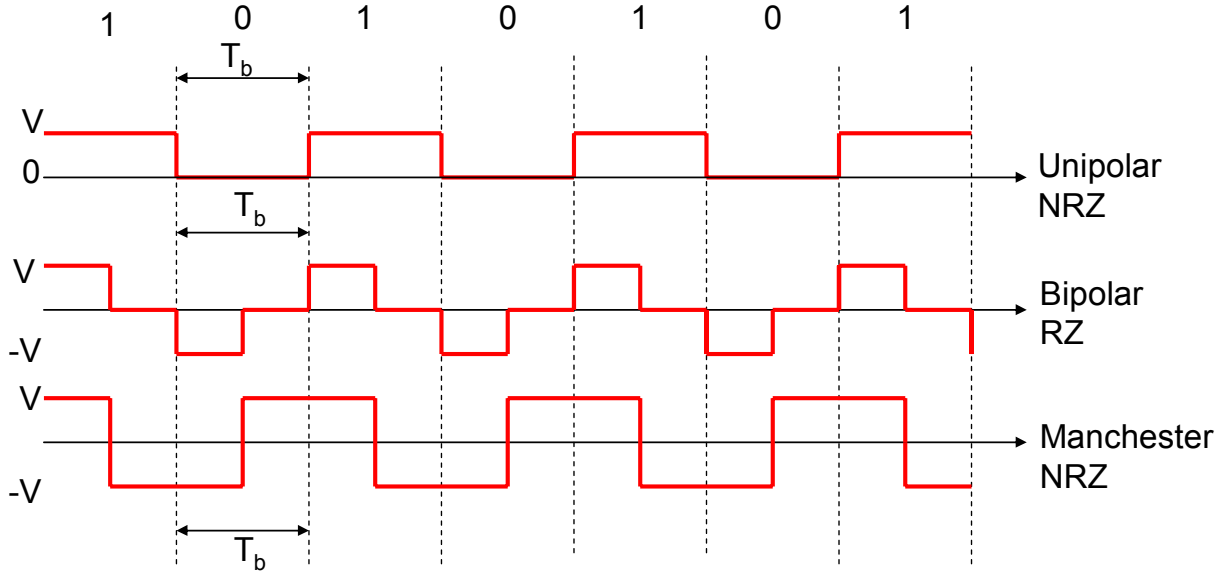
$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_T t} dt$$

$$c_n = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(t) e^{-jn\omega_T t} dt, \quad n = \ldots -2,-1,0,1,2,\ldots.$$

c_n adalah koefisien kompleks Fourier

Digital Modulation - Continues

- Line Coding
  - Sinyal Baseband direpresentasikan sebagai kode-kode line



Representasi Geometris dari Sinyal Modulasi

- Modulasi Digital meliputi:
  - Pemilihan bentuk sinyal khusus untuk transmisi simbol atau sinyal khusus
  - Untuk kemungkinan sinyal sejumlah M , set bentuk gelombang adalah:

$$S = \{s_1(t), s_2(t), \ldots, s_M(t)\}$$

- Untuk modulasi biner, tiap bit dipetakan pada sinyal (2 sinyal)
- Kita dapat melihat elemen-elemen S sebagai titik pada kawasan vektor

Representasi geometris dari sinyal modulasi

- Kawasan vektor (Vector space)
  - Kita dapat merepresentasikan elemen-elemen S sebagai kombinasi linear dari *sinyal basis*
  - Jumlah sinyal basis adalah dimensi vector space.
  - Sinyal-sinyal basis bersifat ortogonal terhadap lainnya.
  - Tiap basis dinormalisasikan terhadap unit energi:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_i^2(t)dt = 1$$

$\phi_i(t)$ adalah sinyal basis ke - i

Contoh

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}\cos(2\pi f_c t) \quad 0 \le t \le T_b$$

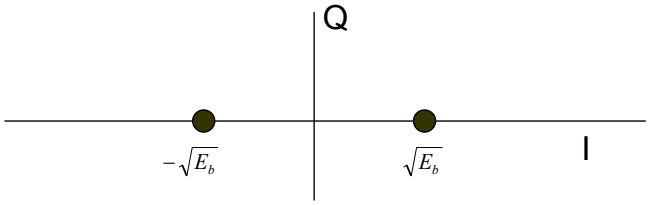
$$s_2(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}\cos(2\pi f_c t) \quad 0 \le t \le T_b$$

Dua bentuk gelombang sinyal yang digunakan saat transmisi

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}}\cos(2\pi f_c t)$$

Sinyal basis

$$S = \left\{\sqrt{E_b}\phi_1(t), -\sqrt{E_b}\phi_1(t)\right\}$$



Constellation Diagram
Dimension = 1

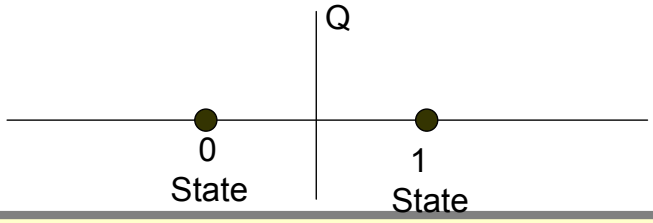
Diagram Konstelasi

- Properti dari skema modulasi dapat disimpulkan dari Diagram Konstelasi
  - Bandwidth yang digunakan oleh modulasi meningkat sebagaimana dimensi sinyal termodulasi juga meningkat
  - Bandwidth yg digunakan berkurang dengan meningkatnya titik-tik sinyal tiap dimensi (lebih rapat)
  - *Probability of bit error* proporsional dengan jarak antara titik-titik terdekat pada konstelasi.
    - » Bit error berkurang dengan berkurangnya jarak.

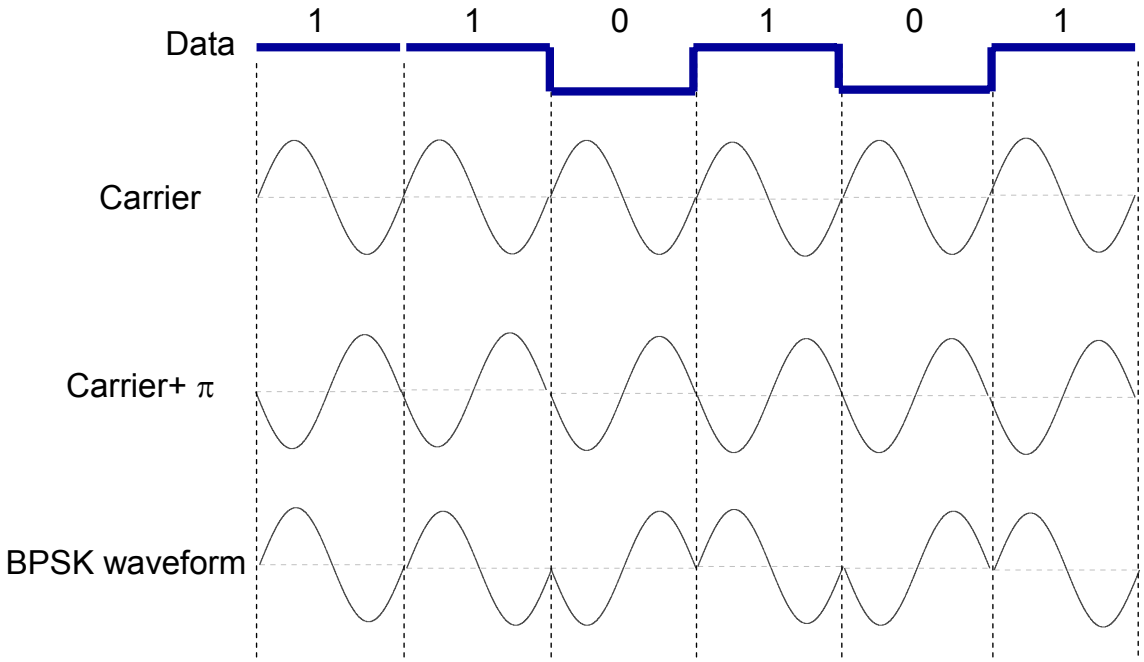
Binary Phase Shift Keying

- Menggunakan alternatif-alternatif fasa gelombang sinus utk mengkodekan bit-bit:
  - Fasa dipisahkan 180 derajat.
  - Sederhana utk diimplementasikan, tidak efisien dalam penggunaan bandwidth.
  - Sangat kokoh, sering digunakan secara extensif pada komunikasi satelit.

$$s_1(t) = A_c \cos(2\pi f_c + \theta_c) \quad \text{binary 1}$$
$$s_2(t) = A_c \cos(2\pi f_c + \theta_c + \pi) \quad \text{binary 0}$$

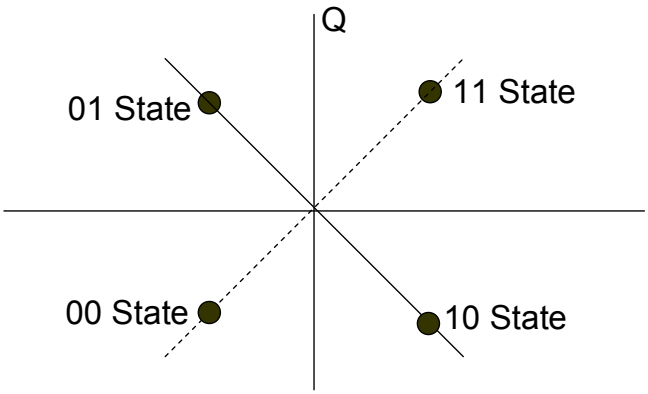


Contoh BPSK



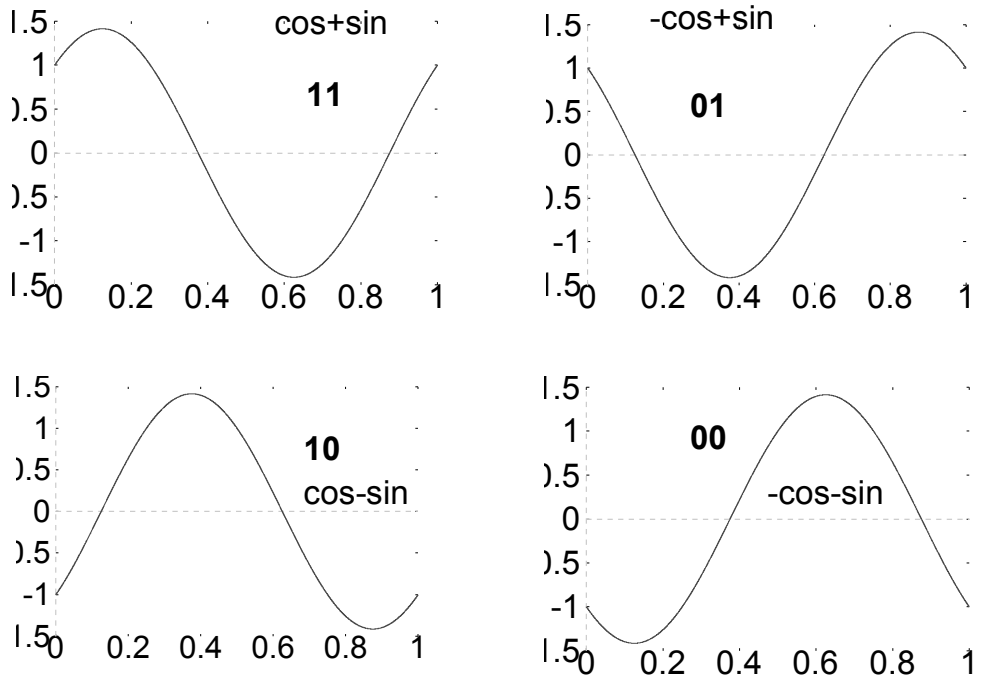
Quadrature Phase Shift Keying

- Teknik modulasi multilevel : 2 bit per symbol
- Lebih efisien spektrum, lebih kompleks receiver.
- Dua kali lebih efisien bandwidth daripada BPSK



Phase of Carrier: $\pi/4$, $2\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$

4 bentuk gelombang berbeda:



Constant Envelope Modulation

- Amplitude carrier konstan, mengabaikan variasi pada amplitudo sinyal pemodulasi
  - Ketahanan lebih baik terhadap fluktuasi akibat fading.
  - Ketahanan lebih baik terhadap noise
  - Lebih efisien daya
- Tetapi menggunakan bandwidth lebih lebar

Frequency Shift Keying (FSK)

- Frekuensi carrier diubah berdasarkan state pesan (high (1) atau low (0)).

$$s_1(t) = A\cos(2\pi f_c + 2\pi\Delta f)t \quad 0 \le t \le T_b \text{ (bit} = 1)$$
$$s_2(t) = A\cos(2\pi f_c - 2\pi\Delta f)t \quad 0 \le t \le T_b \text{ (bit} = 0)$$

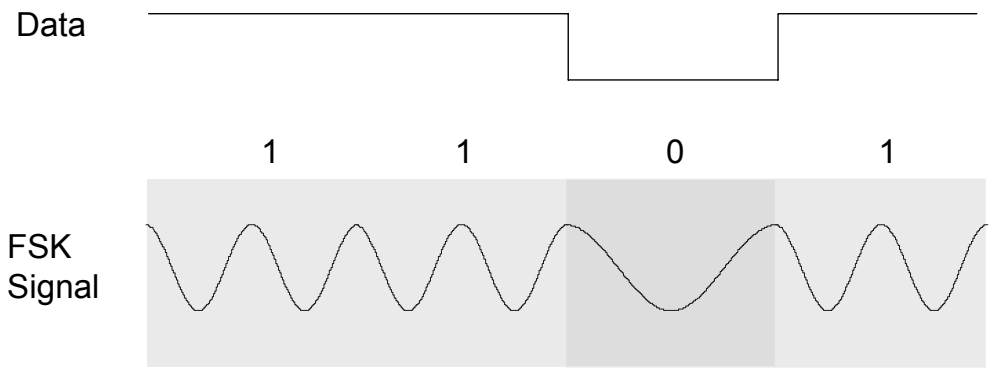
Continues FSK

$$s(t) = A\cos(2\pi f_c + \theta(t))$$

$$s(t) = A\cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(x)dx)$$

Integral m(x) adalah kontinyu.

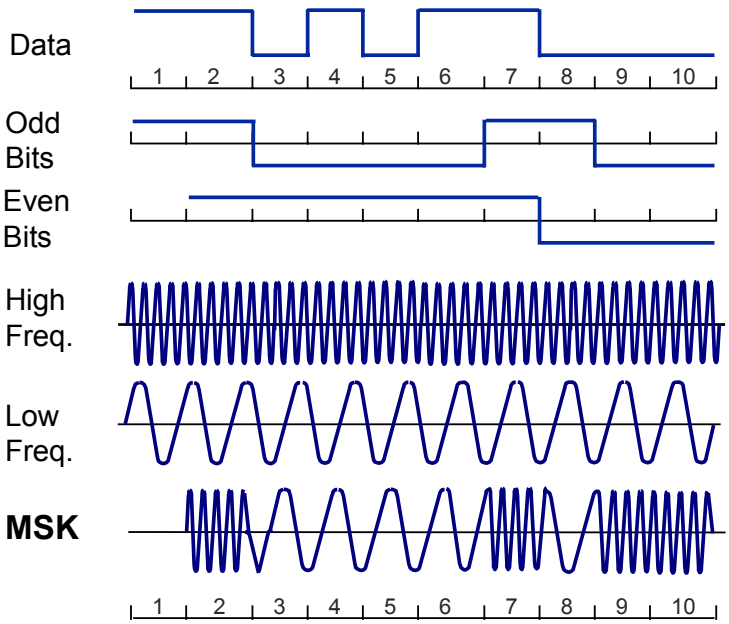
Contoh: FSK



Modulation format	Application
MSK, GMSK	GSM, CDPD
BPSK	Deep space telemetry, cable modems
QPSK, $\pi/4$ DQPSK	Satellite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable (return path), cable modems, TFTS
OQPSK	CDMA, satellite
FSK, GFSK	DECT, paging, RAM mobile data, AMPS, CT2, ERMES, land mobile, public safety
8, 16 VSB	North American digital TV (ATV), broadcast, cable
8PSK	Satellite, aircraft, telemetry pilots for monitoring broadband video systems
16 QAM	Microwave digital radio, modems, DVB-C, DVB-T
32 QAM	Terrestrial microwave, DVB-T
64 QAM	DVB-C, modems, broadband set top boxes, MMDS
256 QAM	Modems, DVB-C (Europe), Digital Video (US)

Contoh : GSM Modulation...

GMSK . . . . . Gaussian Minimum-Shift Keying



BT = 0.3 (defined by specs.)
= (BW_{Filter})(Bit Period)

Rate = **270,833 bps**
=> Bit Period = **3.69μs**
=> BW_{Filter} = **81.3kHz**

MSK Truth Table

Digital Input		*MSK Output*	
Odd	**Even**	**H/L**	**Sense**
1	1	High	+
-1	1	Low	-
1	-1	Low	+
-1	-1	High	-

Adapted from "An Introduction to GSM by Redl, et al.

Referensi-Referensi

[1] Arry AA, “Lecture Notes Database Multimedia”, Pasca Sarjana Teknologi Informasi – ITB

[2] Sklar, B, “ Digital Communication : Fundamental and Application “, Prentice Hall, 1998

[3] Berbagai sumber dari internet yang relevan