
2. De fysieke laag

2.1.1 Fourier-analyse (1)

Elk (redelijk net) periodiek signaal $g(t)$ kan beschreven worden als de som van een aantal sinus- en cosinus-functies:

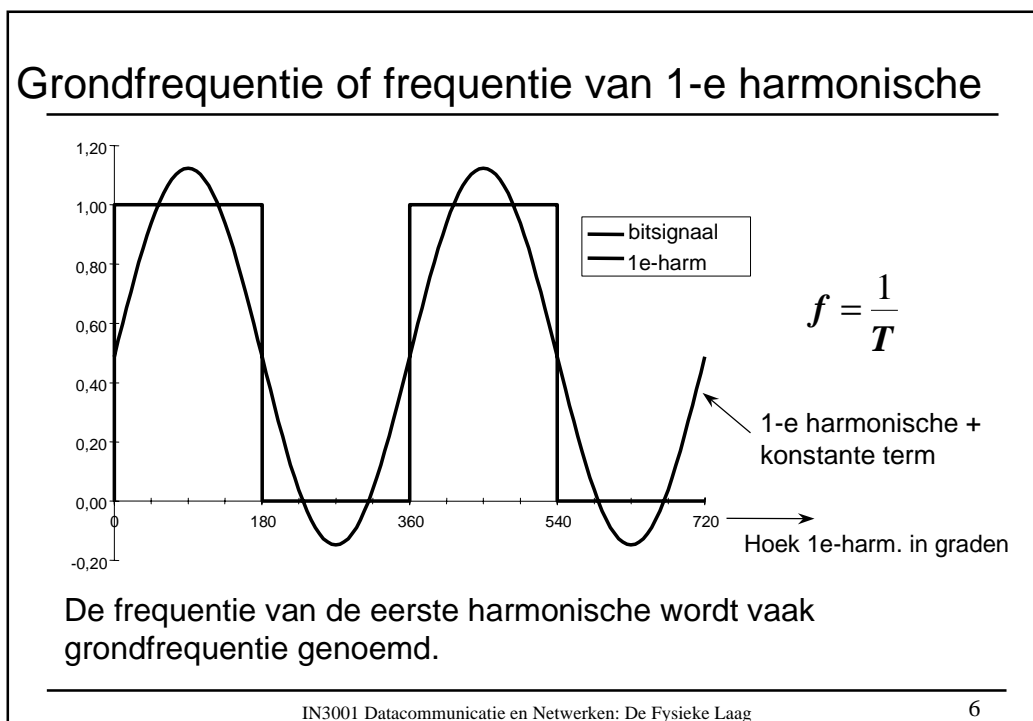
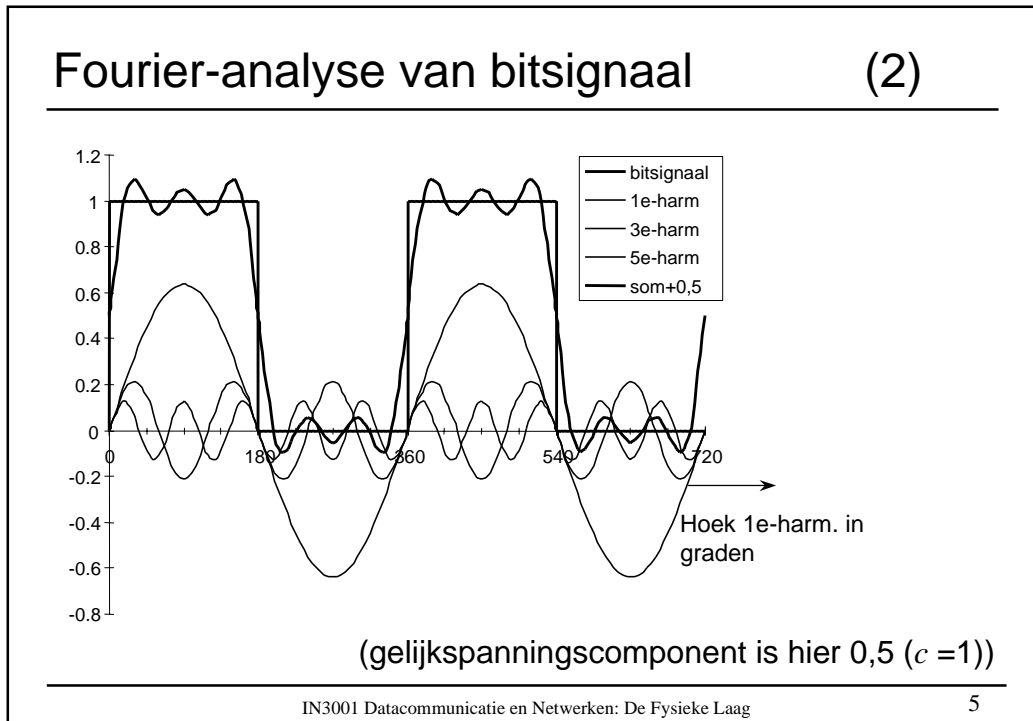
$$g(t) = \frac{c}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

Waarin:

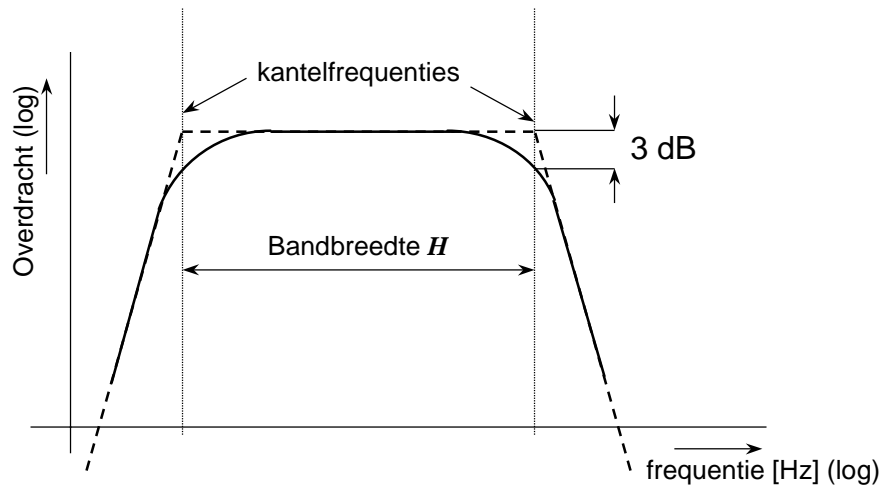
T de periode van het signaal [s]

$f = 1/T$ de grondfrequentie (1-e harmonische) [Hz]

a_n en b_n de amplitudes van sin.- en cos.-component

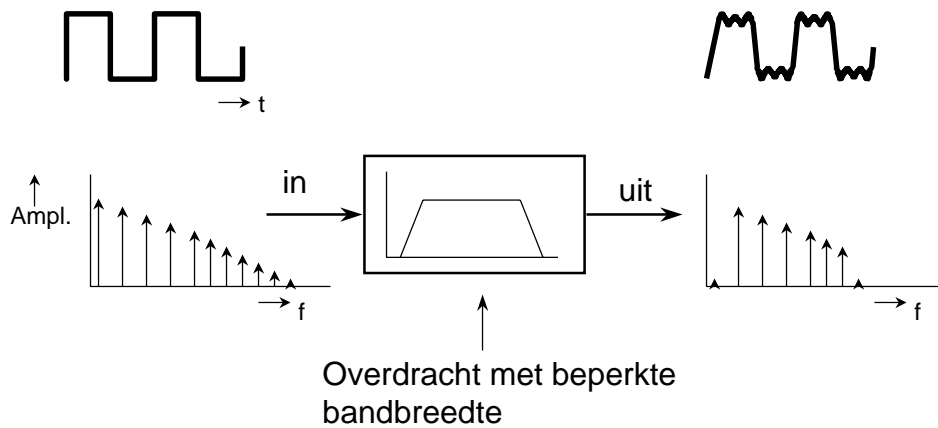


2.1.2 Bandbreedte

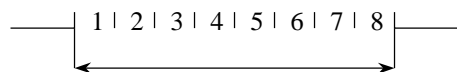


Bandbreedte = het verschil tussen de hoogste en de laagste frequentie die nagenoeg onverzwakt worden overgedragen

Vervorming door beperkte bandbreedte



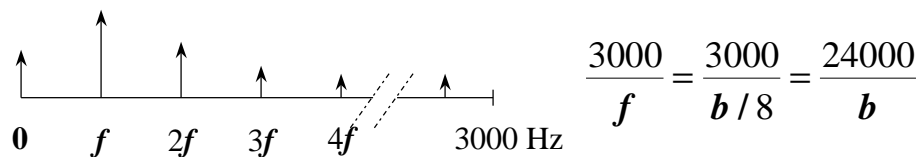
Binair oversturen van 1 byte (8 bits)



$T = \frac{8}{b} \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{b}{8}$ (eerste harmonische = grondfrequentie)

b is bitsnelheid [bit/s]

Bij een bandbreedte van 3000 Hz is het aantal harmonische dat overgezonden kan worden:



Bij $b = 9600$ bit/s, is er ruimte voor

$$24000/9600 = 2 \text{ harmonischen}$$

2.1.3 Seinsnelheid in baud

- De snelheid waarmee gegevens overgezonden kunnen worden (de *bitsnelheid* of *transmissiesnelheid*) hangt af van de snelheid waarmee het signaal kan veranderen (de *signaalsnelheid*).
- Het aantal signaalwisselingen per seconde wordt uitgedrukt in **baud**
- Het verband tussen bandbreedte H [Hz] en maximum seinsnelheid M_{max} [baud] is (ongeacht de codering)

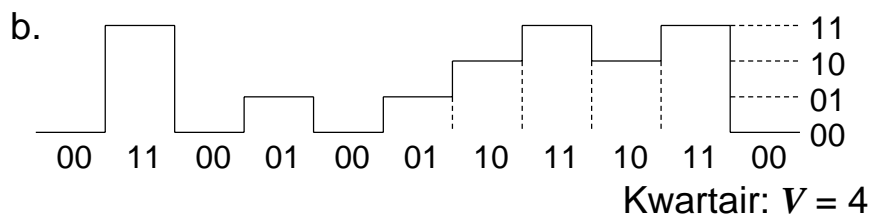
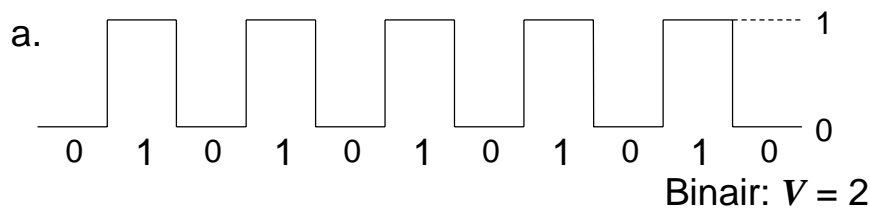
$$M_{max} = 2H$$

Seinnelheid \Leftrightarrow transmissiesnelheid

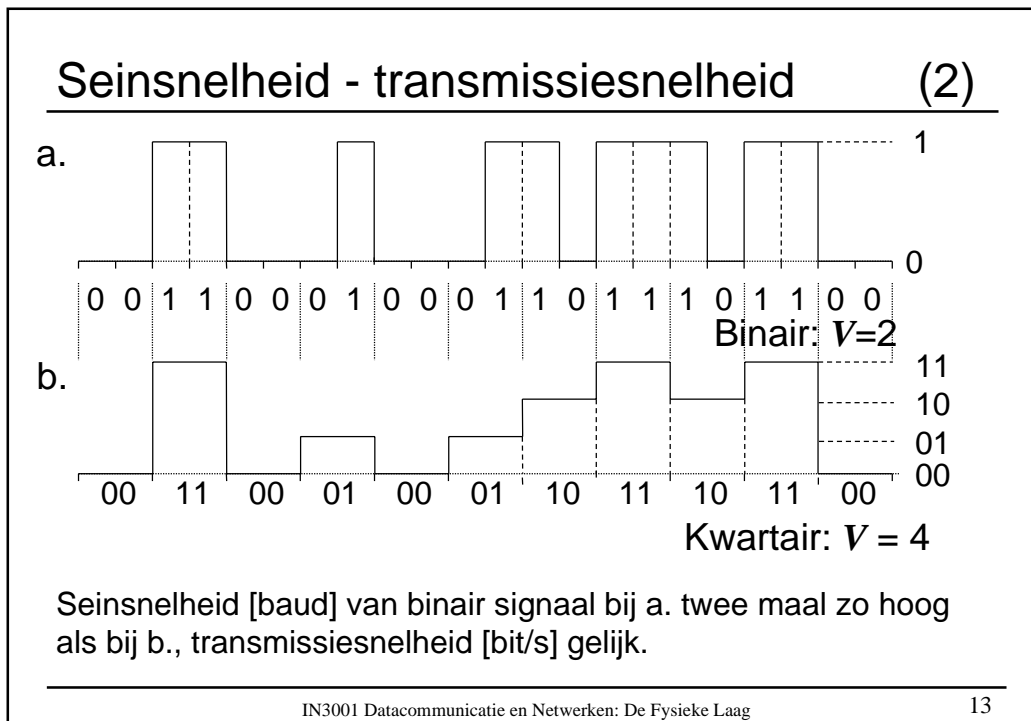
$$C = M \log V$$

- C transmissiesnelheid [bit/s]
(ook bitsnelheid genoemd)
- M seinsnelheid [baud]
(ook baudsnelheid of “signalling rate” genoemd)
- V aantal mogelijke signaaltoestanden

Seinsnelheid - transmissiesnelheid (1)



Seinsnelheid [baud] gelijk, transmissiesnelheid [bit/s] bij b twee maal zo hoog als bij a..



Stelling van Nyquist (1924)

- Transmissiecapaciteit (maximum transmissie-snelheid) is afhankelijk van de bandbreedte en het aantal mogelijke signaaltoestanden:

$$C_N = 2H \log V$$

C_N Transmissiecapaciteit volgen Nyquist [bit/s];

- H Bandbreedte [Hz];
- V Aantal signaaltoestanden.
 V wordt beperkt door:
 - Vervorming (relatie met het verzonden signaal)
 - Storing (geen relatie met het verzonden signaal, bestaat bijv. uit ruis, schakelimpulsen, overspraak).

Stelling van Shannon (1948)

- Transmissiecapaciteit (maximum transmissie-snelheid) van een kanaal met **ruis** is

$$C_{SH} = H \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- C_{SH} Transmissiecapaciteit volgens Shannon [bit/s];
- H Bandbreedte [Hz];
- S Signaalvermogen [W];
- N Ruisvermogen [W].

Signaal-ruisverhouding

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{vermogen van gewenste signaal } s}{\text{vermogen van de ruis } n}$$

Deze verhouding wordt meestal uitgedrukt in decibels [dB]. (1 decibel = 1/10 bel)

$$(S / N)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

Verhouding signaalvermogens in dB

$\frac{P_1}{P_2}$	dB	$\left(= 10 \cdot {}^{10}\log \frac{P_1}{P_2} \right)$
2	3	
10	10	
10^2	20	
10^3	30	
10^4	40	
10^5	50	
10^6	60	
$10 \cdot 10^6$	70	
$100 \cdot 10^6$	80	

Verband tussen Nyquist & Shannon

- Nyquist: $C_N = 2H \cdot \log V$

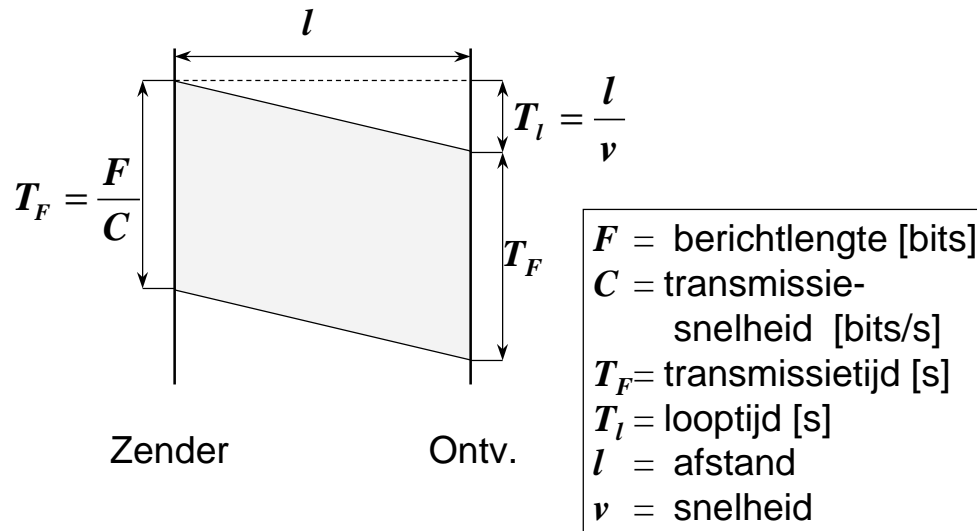
- Shannon: $C_{SH} = H \cdot \log \left(1 + \frac{S}{N} \right)$

$$C_N < C_{SH}$$

Het aantal signaaltoestanden V wordt beperkt door Shannon:

$$V < \sqrt{1 + \frac{S}{N}}$$

2.2 Transmissiemiddelen



Geleidende media

- Magnetsiche informatiedragers
- Getwijdnd draadpaar (engels: twisted pair)
- coaxiaal kabel
- Glasvezel

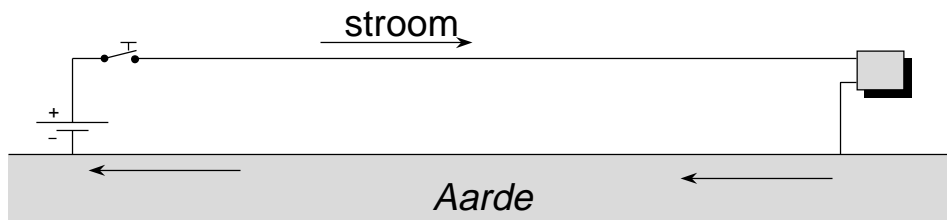
Voortplantingsnelheid

Snelheid van elektromagnetische golven en dus ook van licht:

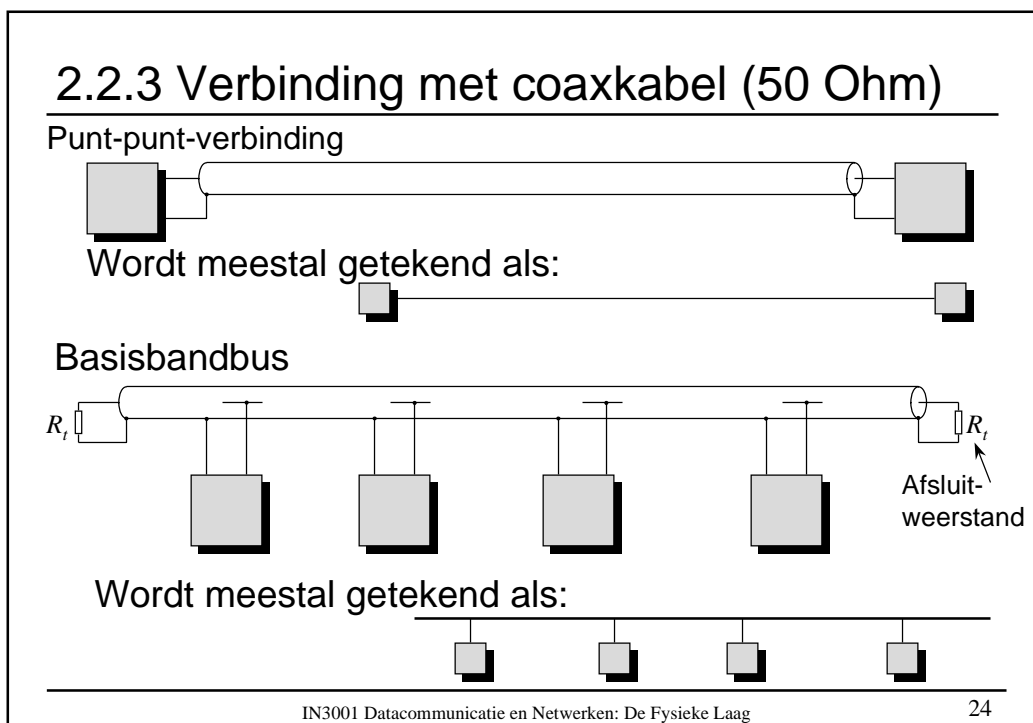
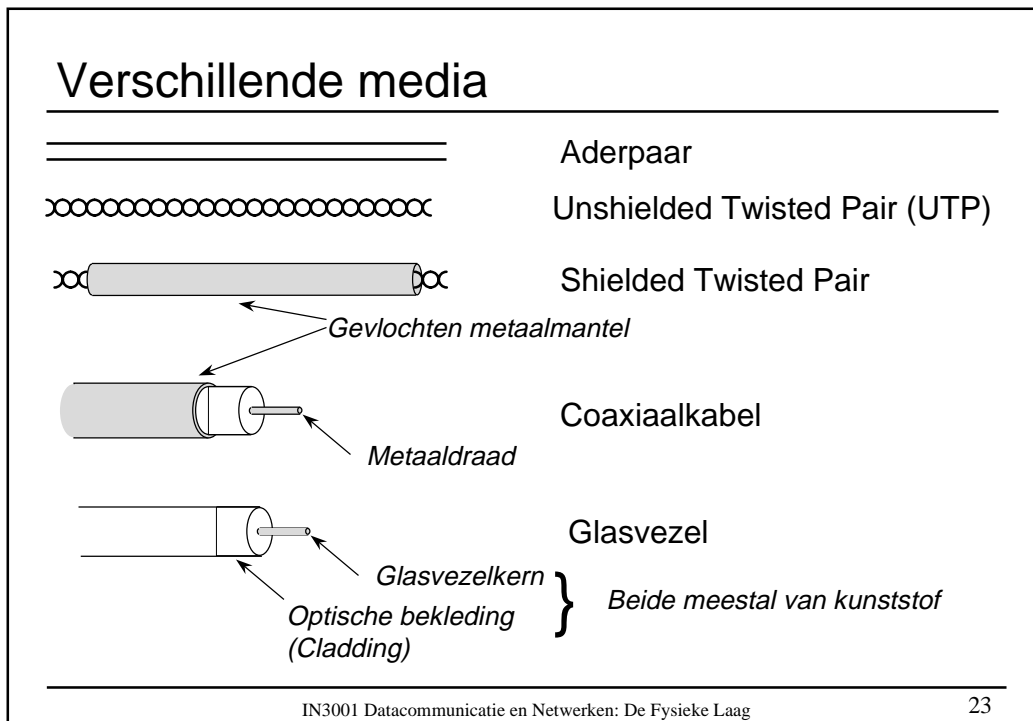
in het luchtledige en (lucht ongeveer) 300 000 km/s
Handig in gebruik vaak de looptijd $\sim 3 \mu\text{s}/\text{km}$

In een geleider ongeveer 200 000 km/s
(looptijd $\sim 5 \mu\text{s}/\text{km}$)

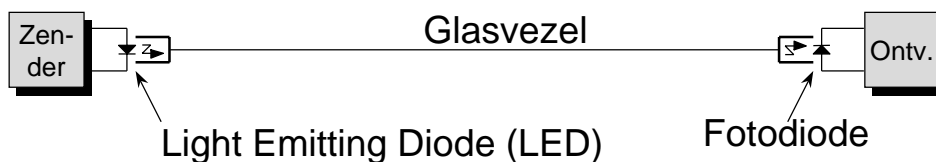
Begin telegrafie



Veel storing onder andere van energievoorziening.



2.2.4 Verbinding met glasvezel



- Snelheid van LED en fotodiode in de praktijk de beperkende factor voor de bitsnelheid.
- Voordeel ten opzichte van coax-kabel vooral de langere afstanden die overbrugd kunnen worden zonder versterking.

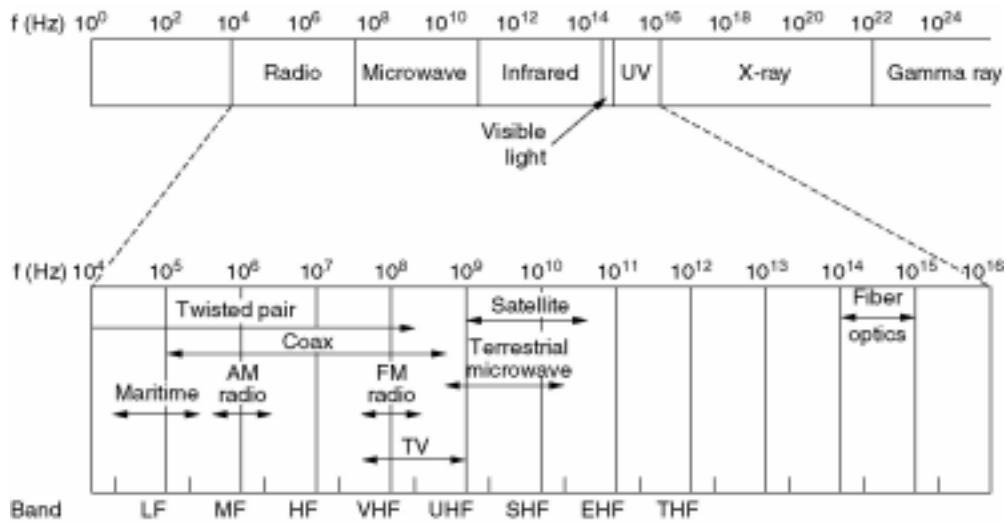
Capaciteit van enige transmissiemedia

Soort	bitsnelheid	bij lengte
Draadpaar	20 kbit/s	100 m
Getwijd draadpaar (UTP) tot 100 Mbit/s (er zijn verschillende kwaliteiten, "klassen")	100 Mbit/s	100 m
Shielded twisted pair	155 Mbit/s	100 m
Coaxiale kabel (basisband)	30 Mbit/s	1 km
Coaxiale kabel (breedband)	300 Mbit/s	10 km
Glasvezel	50 Gbit/s	<100 km
Glasvezel-record (1996) ruim	1 Tbit/s	150 km
Satelliet/radio	600 Mbit/s	

(k = 10³, M = 10⁶, G = 10⁹, T = 10¹²)

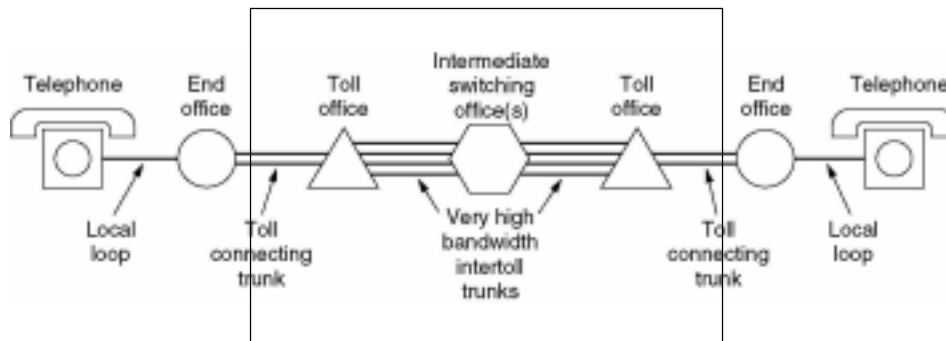
2.3 Draadloze transmissie

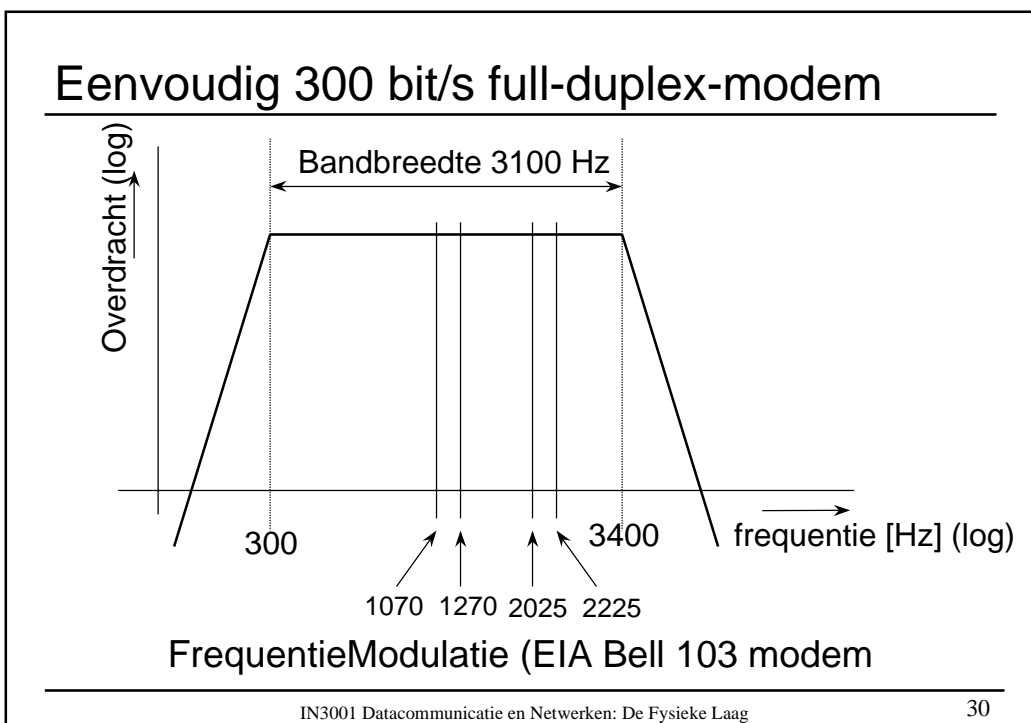
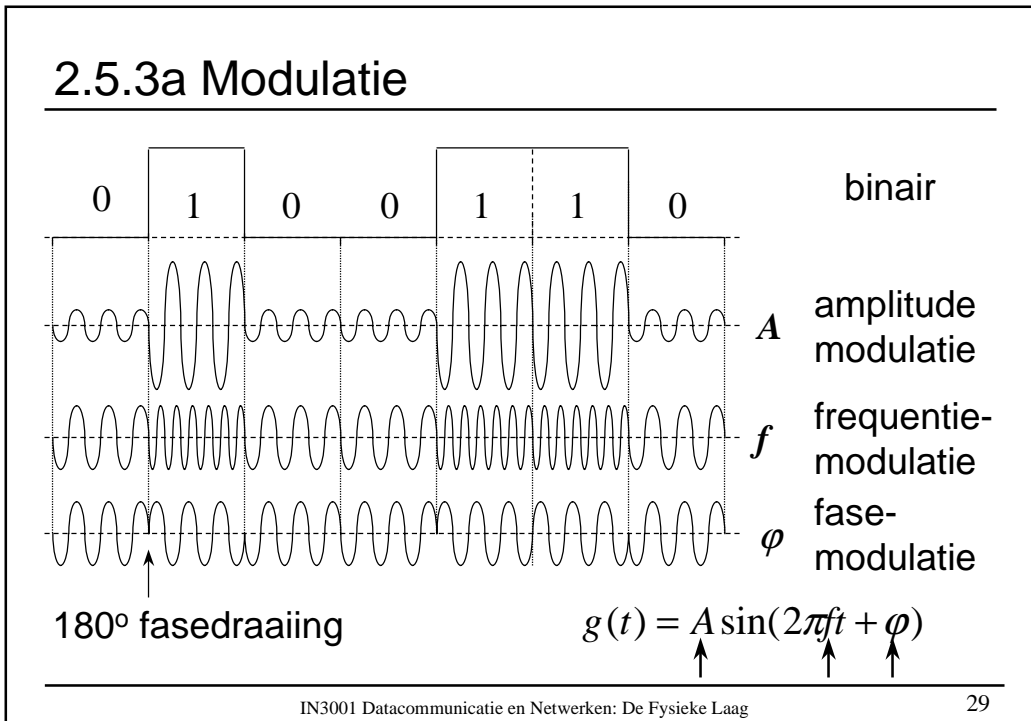
Het elektromagnetisch spectrum

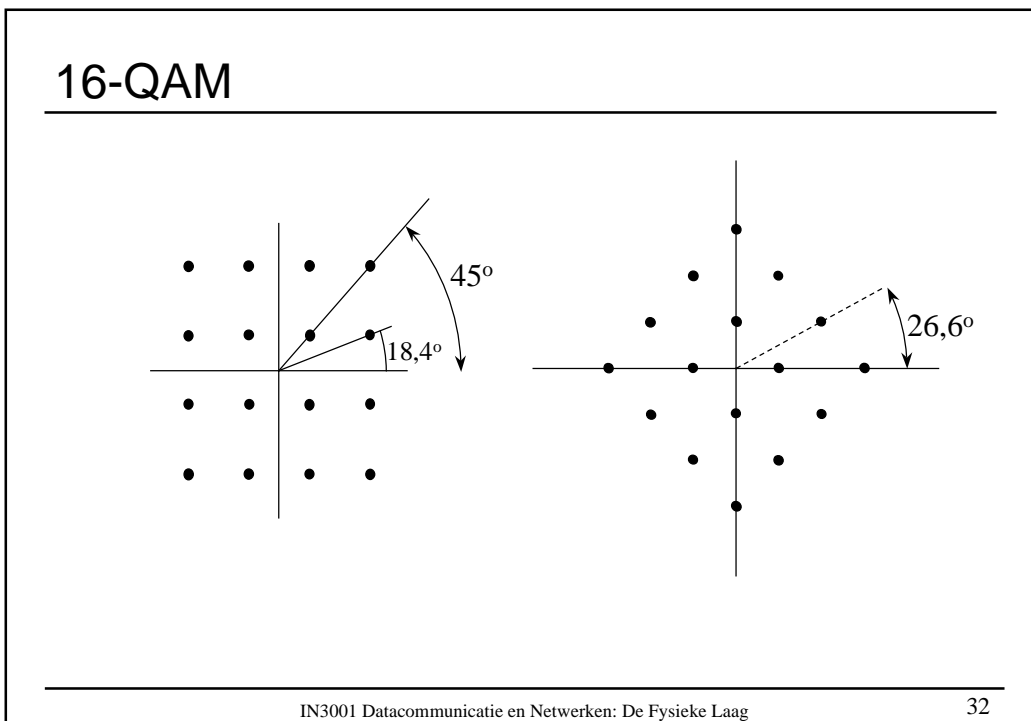
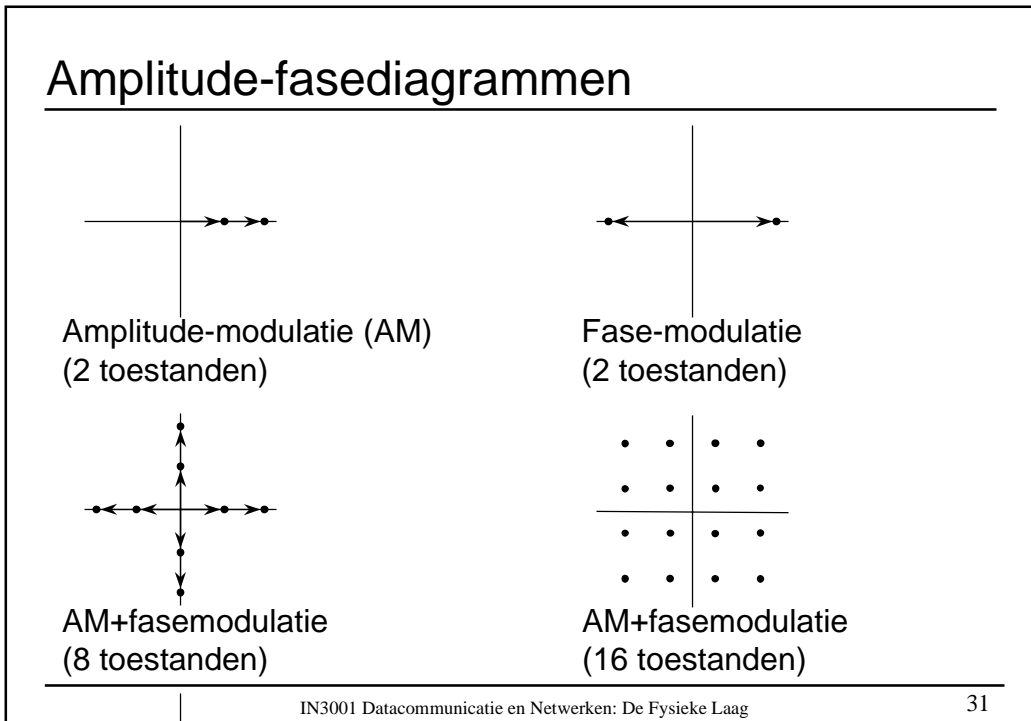


2.5 Het openbare telefoonnetwerk

Telefoonnetwerk





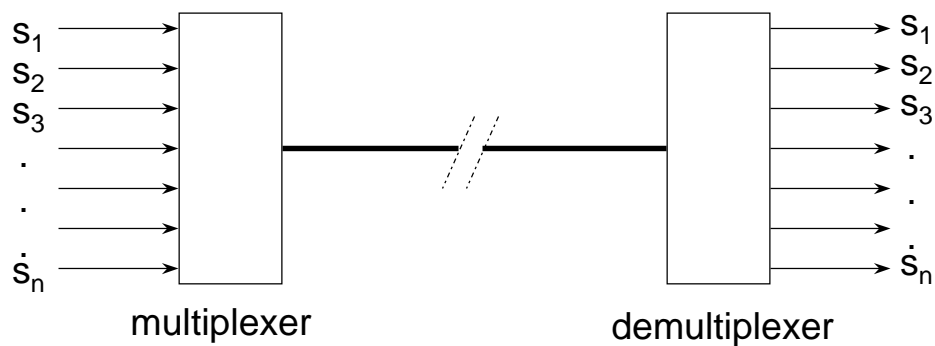


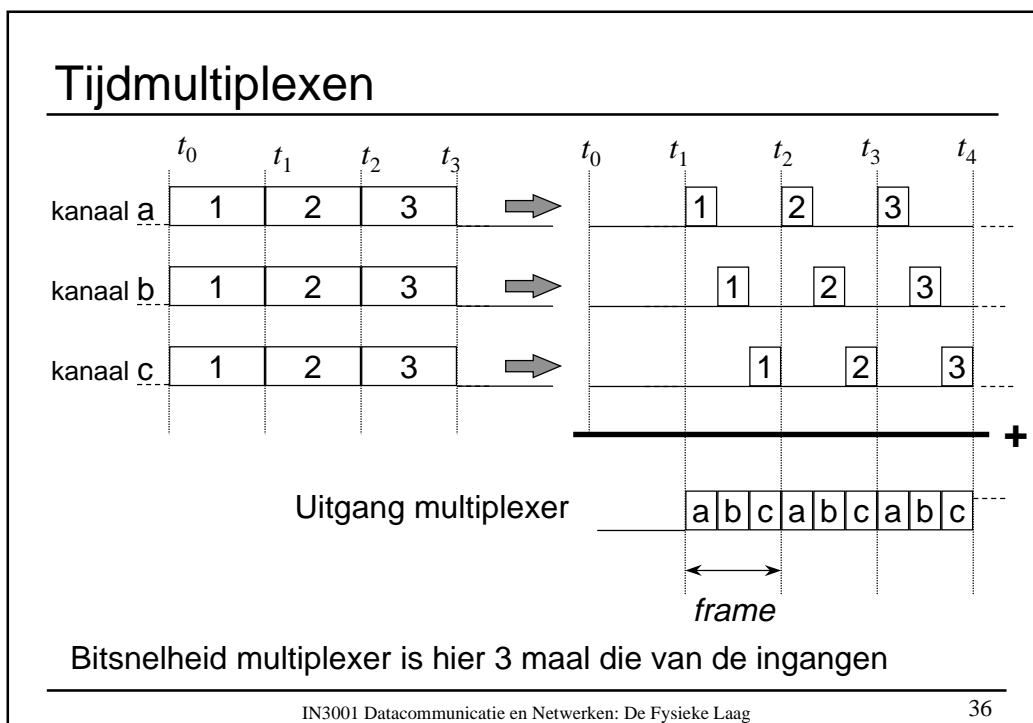
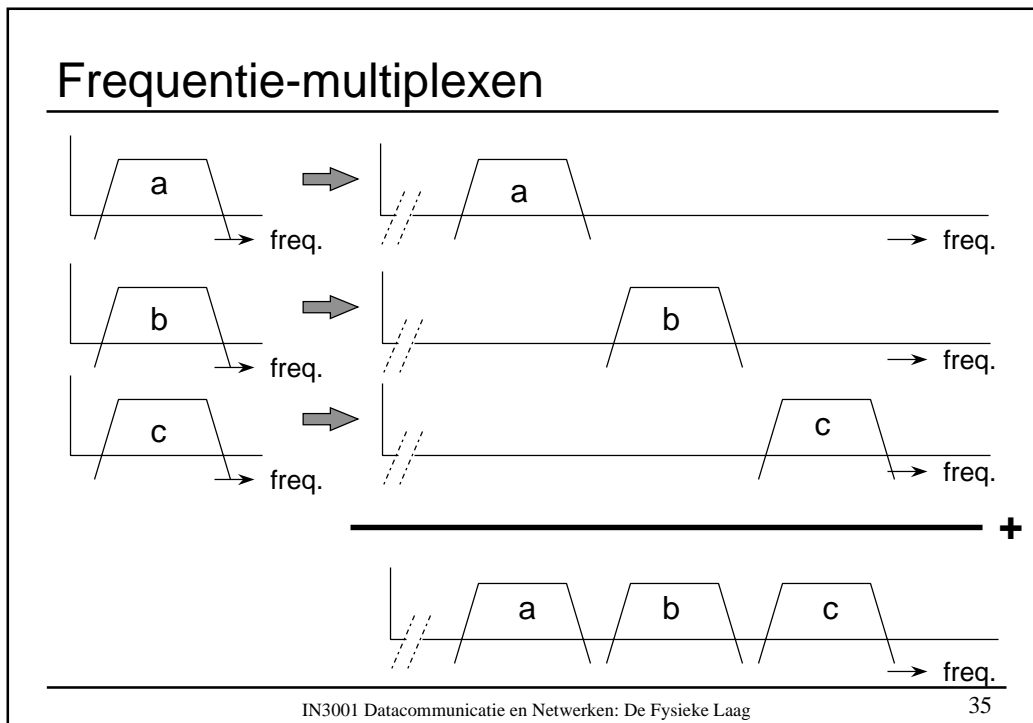
2.5.3b ADSL

- bandbreedte van de local loop is standaard 3100 Hz
- laag gehouden d.m.v filter
- zou op korte afstand van centrale veel hoger kunnen
b.v. 10 Mb/s over 1 km, of 1 Mb/s over 4 a 5 km
- voor ADSL filter verwijderd
- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)
- verschil tussen upstream en downstream
("asymmetric")
b.v. 256 kb/s upstream en 1 Mb/s downstream

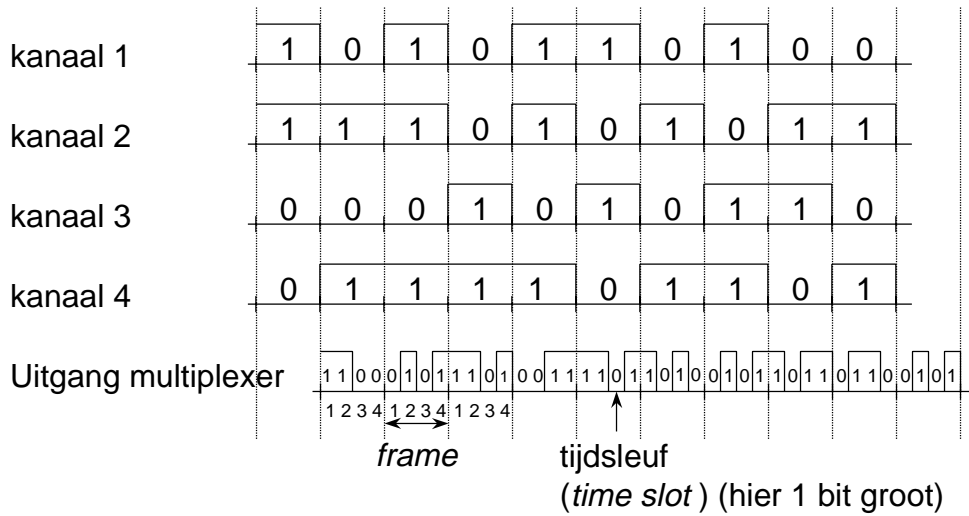
2.5.4 Multiplexing

Verscheidene kanalen samenvoegen tot één
(hoofd)-kanaal

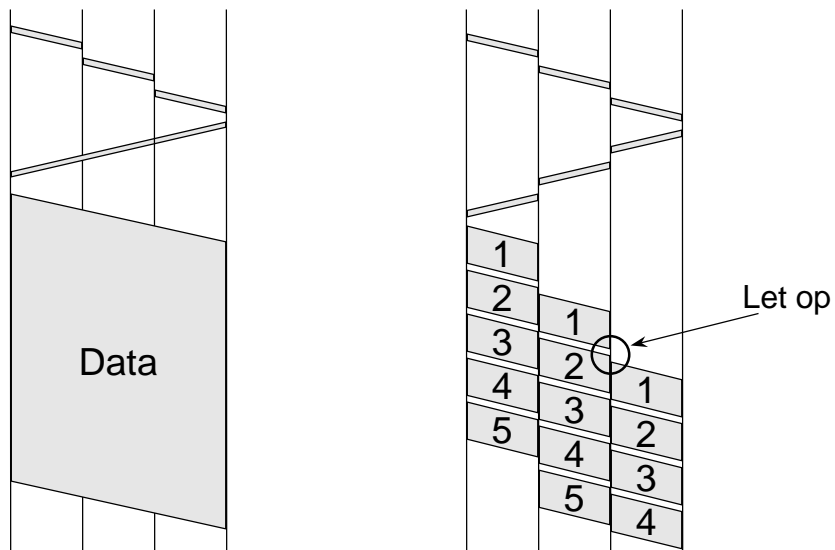




Voorbeeld tijd-multiplexen per bit

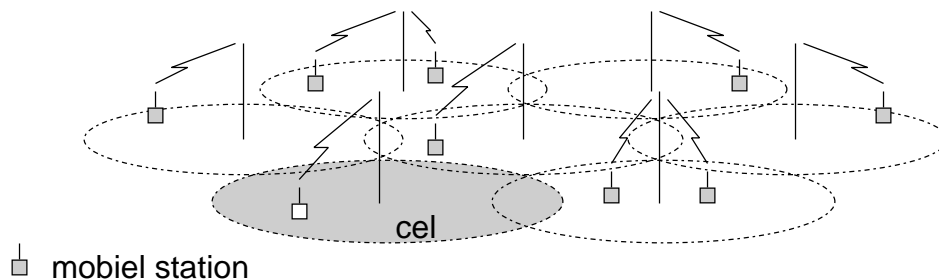


2.5.5 Circuitschakelen - virtuele circuits



2.6 Cellulaire radio

- Een gebied is verdeeld in verzorgingsgebieden, cellen
- Draaggolffrequenties worden na een bepaalde afstand hergebruikt
- Sommige systemen:
Een mobiel station kan tijdens bewegen van cel naar cel zonder dat de verbinding verbroken wordt (*handover*).

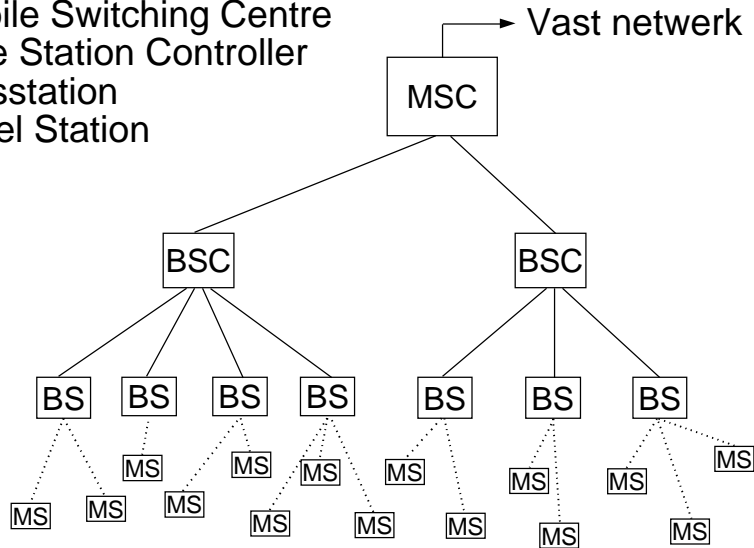


Cellulaire radio

- Oppiepsysteem (*paging system*)
pieper, buzzer, (Am. beeper)
- Draadloze telefoons (*cordless t.*)
 - analoog
 - digitaal
 - CT-2 (b.v. *Greenpoints* van PTT)
 - CT-3 (Dig. Enhanced Cordless Telecomm., DECT)
- Analoge cellulaire telefoon
Een kanaal is een bepaalde frequentie (FDM).
- Digitale cellulaire telefoons (b.v. GSM, DCS 1800)
Een kanaal is een combinatie van FDM en TDM

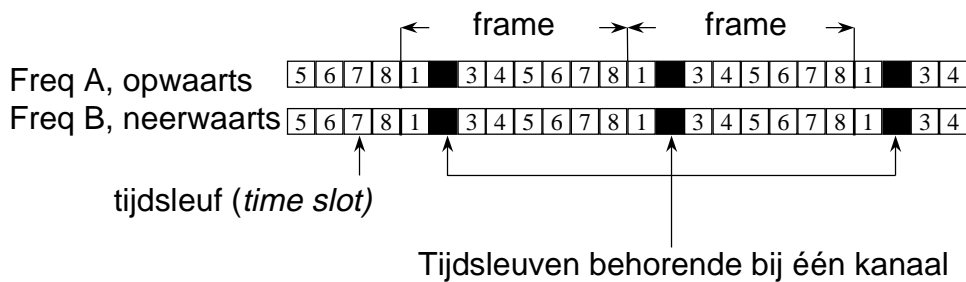
Structuur van een cellulair netwerk

MSC = Mobile Switching Centre
 BSC = Base Station Controller
 BS = Basisstation
 MS = Mobiel Station



Vb.: GSM gebruikt FDM+TDM

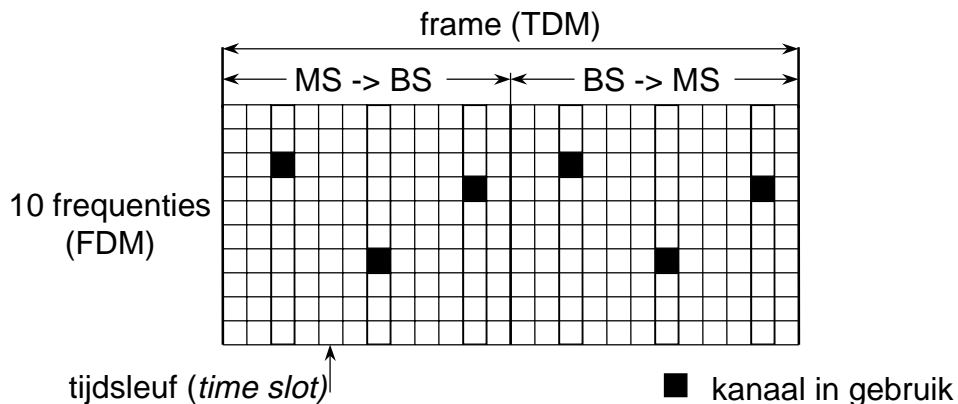
- Een kanaal bestaat uit twee frequentie-tijdsleuf-combinaties (één van BS => MS en één van MS =>BS)
- GSM heeft per frequentiepaar 8 TDM-kanalen
- Elk basistation heeft een aantal frequentieparen van het totaal



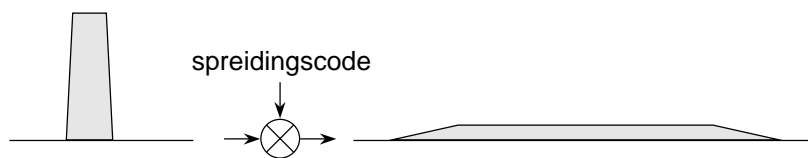
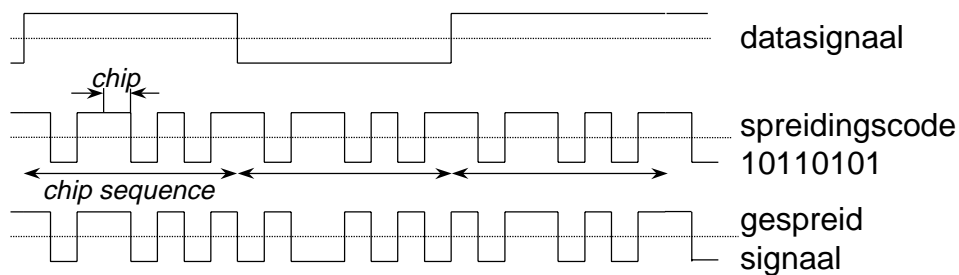
■ kanaal 2 in gebruik voor frequentiepaar AB

Vb.: DECT gebruikt FDM+TDM

DECT gebruikt in totaal 10 frequenties en heeft 2×12 kanalen per frequentie, totaal 240 kanalen.
 Alle basisstations beschikken over alle 10 frequenties.

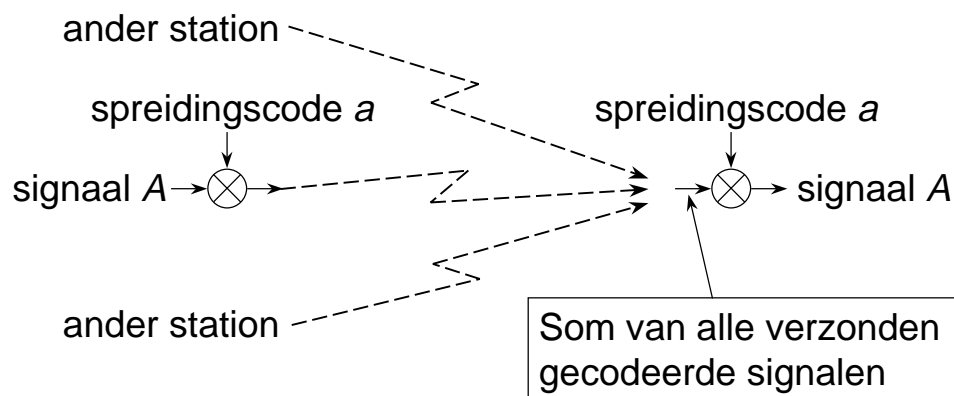


Code Division Multiple Access (CDMA)



Frequentiespectrum van het datasignaal en van het uitgezonden gespreid signaal

CDMA (2)



Aan de ontvangkant wordt het gewenste signaal uitgefilterd met behulp van dezelfde spreidingscode.

CDMA (3)

- Model met bipolaire notatie:
 - Een binaire "1" is gecodeerd als +1
 - Een binaire "0" is gecodeerd als -1
- Spreidingscodes zijn paarsgewijs orthogonaal als hun inwendig product is 0
- Vb. twee orthogonale spreidingscodevectoren S en T

$$\mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3, \dots, S_m)$$

$$\mathbf{T} = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_m)$$

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{T} = \frac{1}{m} (S_1 T_1 + S_2 T_2 + S_3 T_3 + \dots + S_m T_m) = 0$$
- de lengte van de spreidingscode m is typisch 64 of 128 bits

CDMA(4)

- Inwendig product van spreidingscode met zichzelf:

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

$$\boxed{\mathbf{S} \cdot \mathbf{S} = 1}$$

Voor een bit "1" wordt uitgezonden \mathbf{S}

Voor een bit "0" wordt uitgezonden $\bar{\mathbf{S}}$

$$\text{Vb. } \mathbf{S} = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

$$\bar{\mathbf{S}} = (+1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$\boxed{\mathbf{S} \cdot \bar{\mathbf{S}} = -1}$$

CDMA(5) Voorbeeld

- \mathbf{A} , \mathbf{B} en \mathbf{C} zijn de spreidingscodes van A, B en C
- Stel we ontvangen signaalvector \mathbf{S} van een bit dat de som is van de bits verzonden door A, B en C

$$\mathbf{S} = \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{B} + \bar{\mathbf{C}}$$

(bit van A is "0", van B is "1" en van C is "0")

- We willen \mathbf{C} eruit filteren:

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{C} = (\bar{\mathbf{A}} + \mathbf{B} + \bar{\mathbf{C}}) \cdot \mathbf{C} = \bar{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{C} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} + \bar{\mathbf{C}} \cdot \mathbf{C} = \bar{\mathbf{C}} \cdot \mathbf{C} = -1$$

$\begin{array}{ccc} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ 0 & 0 & \text{bit "0"} \end{array}$

CDMA(6) Voorwaarden:

- Synchronisatie op de gewenste zender
- Het **ontvangen** vermogen van alle stations moet hetzelfde zijn; de zender moet zijn zendvermogen zodanig regelen, *power control* (moeilijk)
- Stations moeten weten wie ze een bericht zendt, (moeten spreidingscode weten waarmee ze moeten filteren) of moeten alle berichten decoderen (veel werk).