

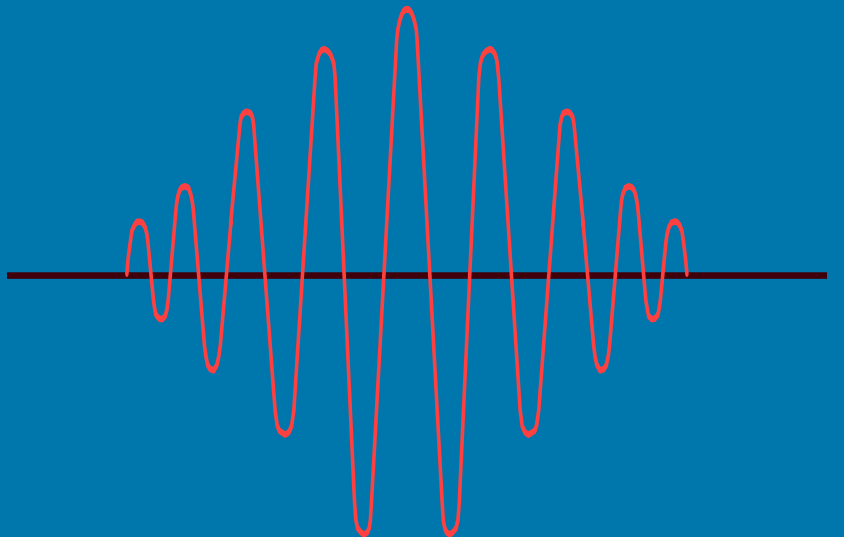
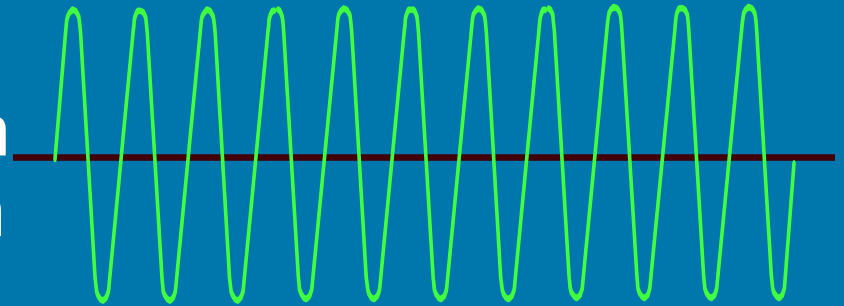
Tiedon koodaus signaaliin

□ bittien koodaukseen käytetään signaalin

- taajuutta
- amplitudia
- vaihetta

□ signalointinopeus

- signaalia / s
- yksikkönä **baudi**



Sinifunktio

- perusesimerkki jaksollisesta funktiosta

$$s(t) = A \sin (2\pi f t + \phi)$$

A maksimiampplitudi

f taajuus

ϕ vaihe

Pelkkä sinifunktio ei pysty sellaisenaan välittämään informaatiota, vaan siinä täytyy olla muutoksia!

Fourier-sarja

- Mikä tahansa (lähes) jaksollinen funktio voidaan esittää Fourier-sarjana
- $g(t) = C/2 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi n f t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(2\pi n f t)$

summissa n saa arvot $[1, 4]$

taajuus $f = 1/T$, jossa $T =$ yhden jakson aika (s)

$A_n, B_n =$ Fourier-kertoimet (harmonics)

$C =$ vakio

Fysikaalinen tulkinta

- mielivaltainen jaksollinen signaali
 - generoidaan tarpeellinen määrä eritaajuisia siniaaltoja
 - siniaaltoja on helppo generoida
 - määrä voi olla myös ääretön
 - käytännössä mukaan vain äärellinen määrä
 - signaali vääristyy
- spektri
 - signaalin siniaaltojen taajuuksien kokoelma

Esimerkki: 'b'-kirjain

□ $b = 01100010$

□ tästä saadaan jaksollinen funktio, kun ajatellaan b :n lähetyksen toistuvan

□ $01100010 \ 01100010 \ 01100010$



$$T = 8; \quad f = 1/T = 1/8$$

$$\square g(t) = 0, \quad 0 \leq t < 1$$

$$1, \quad 1 \leq t < 2$$

$$1, \quad 2 \leq t < 3$$

$$0, \quad 3 \leq t < 4$$

.....

$$1, \quad 6 \leq t < 7$$

$$0, \quad 7 \leq t < 8$$



Kertoimien laskeminen

- ❖ Kun integroidaan lausekkeet A_n , B_n ja C_n käyttäen 'b':n jaksollista funktioita, saadaan 'b'-funktion Fourier-kertoimet.
 - ❖ 'b'-signaalin tarkkaan esittämiseen tarvitaan ääretön määrä Fourier-sarjan kertoimia
 - ❖ signaali voidaan approksimoida äärellisellä määrällä termejä
 - ❖ mitä enemmän kertoimia sitä tarkempi approksimaatio

Spektri ja kaistanleveys (bandwidth)

□ signaalin spektri

- $f_2 - f_1$, missä f_1 on pienin ja f_2 suurin signaalin siniaaltokomponentin taajuus

□ siirtomedian kaistanleveys

- väli $[f_1, f_2]$, jolla alueella olevia taajuuksia media pystyy välittämään
 - vääristämättä niitä liian paljon
- siirtomedian ominaisuus

Kaistanleveys ja tiedonsiirto

- mitä suurempi kaistanleveys, sitä suuremmat taajuudet mahdollisia, sitä useampi Fourier-termi kaistaan mahtuu
==> signaalin muoto säilyy oikeampana
 - ❖ Pieni kaistanleveys => siirtonopeus on myös pieni!
 - ❖ Suuri kaistanleveys sallii suuremmat nopeudet

Kanavan siirtokyky

- siirtonopeus ja siirrettävän tietoyksikön koko ('signaalin pituus bitteinä') \implies tietoyksikön siirtoaika eli sen jaksonpituus T
- 1. Kertoimen taajuus $= 1/T$
- rajallisessa kanavassa voi lähettää vain rajallisen määrän harmonic-termejä
- termien määrä \implies signaalin laatu

Esimerkki

- ❑ kanavan nopeus 9600 bps
- ❑ tietoyksikön koko 8 bittiä ('b')
- ❑ tietoyksikön siirtoaika
$$T = 8/9600 = 0.833 \text{ ms}$$
- ❑ 1. termi = $1/T = 9600/8 = 1200 \text{ Hz}$

Esimerkki jatkuu

- Jos kanavan kapasiteetti on 3000 Hz
(~puhelinlinjalla)
- => kanavaan mahtuu $3000/1200$
eli 2 termiä
- => lähetyksen laatu on huono

Esimerkki jatkuu yhä

- ❑ tiedonsiirtonopeus 38400 bps
- ❑ ja kanavan kaista 3000 Hz
- ❑ => 1. termi = 4800 Hz

- ❑ => binääritietoa eli kaksiarvoista (0, 1) ei voida lähettää, sillä kaistaan ei mahdu yhtään tämän taajuisen signaalin termiä!

Miten suuremmat nopeudet ovat mahdollisia?

- ❑ Kyseessä oikeastaan signaalimuutosten määrä aikayksikössä: baudit
- ❑ signaalilla voi olla useita tasoja
 - kaksi tasoa: 0 ja 1
 - useampia tasoja : esim. 0, 1, 2 ja 3
 - Tasojen määrä kasvattaa yhdessä muutoksessa välittyvää informaation määrää: 1 bitti, 2 bittiä, ... eli \log_2 (tasojen lukumäärä)

Nyquistin kaava

- maksimaalinen tiedonsiirtonopeus häiriöttömällä kanavalla

$$C = 2 H \log_2 V \text{ bps}$$

C = tiedonsiirtonopeus (bps)

H = kaistanleveys

V = tasojen lukumäärä

Näytteiden otto

□ Nyquist =>

□ Jos siirtokanavan kaistanleveys on H , niin kaikki kanavan kuljettama informaatio saadaan ottamalla kanavasta $2H$ näytettä sekunnissa

- tiuhempi näytteiden otto ei enää tuota lisää informaatiota
- Kaikki, mitä tapahtuu havaitaan tutkimalla tilannetta $2H$ kertaa sekunnissa

Esimerkki

- ❑ Modeemi yleisessä puhelinverkossa käyttää 8 tasoa. Verkon kaistanleveys on 3100 Hz. Mikä on tiedonsiirtonopeus?
- ❑ Nyquistin kaava: $C = 2H \log_2 (V)$ bps
- ❑ $C = 2 * 3100 * \log_2 (8)$ bps
= 6200 * 3 bps
= 18600 bps

Kohina

Kohinaksi kutsutaan johtimessa aina taustalla esiintyvää sähkömagneettista aaltoliikettä

– vahvistamaton signaali vaimenee kohinaksi

□ signaali-kohina -suhde SNR

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} (S/N) \text{ dB}$$

S = signaalin teho

N =kohinan teho

- ilmoitetaan desibeleinä
- suuri SNR => hyvä signaalin laatu

Shannonin kaava

- maksimaalinen tiedonsiirtonopeus **kohinaisessa** kanavassa

$$C = H \log_2 (1 + S/N) \text{ bps}$$

H kaistan leveys

S signaalin teho watteina

N kohinan teho watteina

Esimerkki

- Yleisessä puhelinverkossa $H = 3000$ Hz ja $SNR = 20$ dB. Mikä on (teoreettinen) maksiminopeus C ?

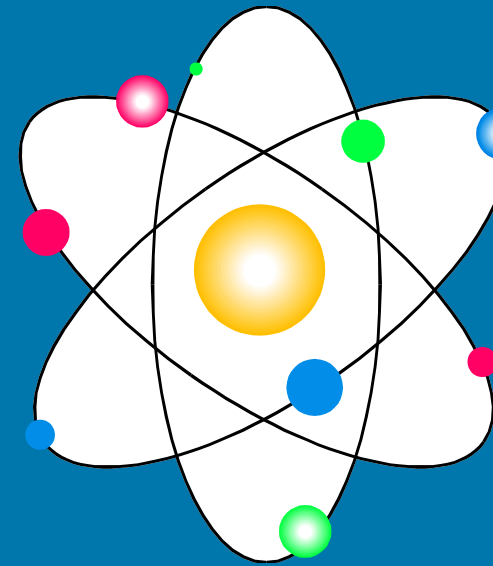
$$SNR = 20 = 10 \log_{10} (S/N)$$

$$2 = \log_{10} (S/N) \text{ eli } S/N = 10^{**2} = 100$$

$$\begin{aligned} C &= H \log_2 (1+S/N) = 3000 \log_2 (1+100) \\ &= 3000 \log_{10}(101) / \log_{10}(2) \\ &= 19974 \text{ bps} \end{aligned}$$

Esimerkki jatkuu

- Tyypillisesti $\text{SNR} = 30 \text{ DB} \implies$
- 3000 Hz:n kanavalla teoreettinen maksimi aina < 30000
- käytettiin koodauksessa kuinka monta tasoa tahansa
- 'luonnonlaki' ~ valon nopeus



Laajaverkot (WAN)

- **Televerkko**

- Modeemi, xDSL, kanavointi, PCM, T1, SONET

- **X.25, kehysvälitys** (Frame Relay)

- **Atm-verkko**

Puhelinverkko

- ❑ Olemassa oleva infrastruktuuri 'tiedon' kuljetukseen
- ❑ ongelma
 - ❑ äänenkuljetusteknologian sopivuus tietokoneiden väliseen kommunikointiin
 - ❑ datalinja 10^{**7} - 10^{**9} bps, BER $\sim 10^{**-12}$
 - ❑ puhelin 10^{**5} bps, BER $\sim 10^{**-5}$ (?)
 - ❑ vrt. 1 km/t \leftrightarrow 100 - 10000 km/t
 - ❑ MTBF 2.8 min \leftrightarrow 53 vuotta

Ristiriita

- ❑ eri taajuudet vaimenevat eri tavoin
- ❑ eri taajuudet etenevät eri nopeudella
- ❑ \implies **kapea kaista**
 - ❑ vähemmän virheitä analogisissa signaaleissa
- ❑ digitaalinen 'kantti'-signaali
- ❑ \implies **leveä kaista**
 - ❑ digitaalisen signaalin muoto säilyy

Digitaalisen signaloinnin edut

- ❑ vaimenee ja vääristyy nopeammin, mutta ylläpidettävissä
 - ❑ vähemmän virheitä
- ❑ eri tietomuodot limitettävissä
 - ❑ ääni, kuva data
- ❑ suuret siirtonopeudet
- ❑ tekniikka yksinkertainen
- ❑ => puhelinverkon digitalisointi

Modeemi

- ❑ muunnokset digitaalisen ja analogisen signaalin välillä
- ❑ kehittynyt modeemi moduloi sekä amplitudia että vaihetta
 - ❑ taajuuden havaitseminen on liian hidasta!
- ❑ 'constellation pattern' ilmoittaa käytetyt vaiheet ja amplitudit

Modeemeja

- ❑ QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
 - ❑ 9600 bps 2400 baudin linjalla, 16 eri 'tasoa' = 4 bittiä
- ❑ V.32bis
 - ❑ 14 400 bps 2400 baudin linjalla, 64 tasoa => 6 bittiä
- ❑ V.34
 - ❑ 28.8 Kbps => 33.6 Kbps (teoreettinen raja (Shannon): 35 Kbps)
- ❑ V.90, V.92
 - ❑ 56 Kbps
 - ❑ "V.90 will be the final analog modem speed standard."

xDSL-modeemit

- digitaalinen paikallissilmukka
 - (Digital Subscriber Loop)
 - kierretyn parin kaistanleveys $\gg 4000\text{Hz}$
 - 4 000 Hz:n rajoitus puhelintekniikasta
- useita hieman erilaisia ratkaisuja
 - ADSL
 - SDSL
 - HDSL
 - VDSL

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop)

- ❑ kaksi eri nopeutta
 - ❑ hidas tilaajalta palvelulle (esim. tilausvideo)
 - ❑ nopea palvelulta tilaajalle
 - ❑ maksimissaan 6 - 8 Mbps alavirtaan, 0.8-1 Mbps ylävirtaan
 - ❑ nopeus riippuu johdon laadusta ja etäisyydestä
- ❑ samanaikainen puhelin- tai ISDN-yhteys
- ❑ menetelmät
 - ❑ DMT (Discrete MultiTone)
 - ❑ CAP (Carrierless Amplitude/Phase Modulation)

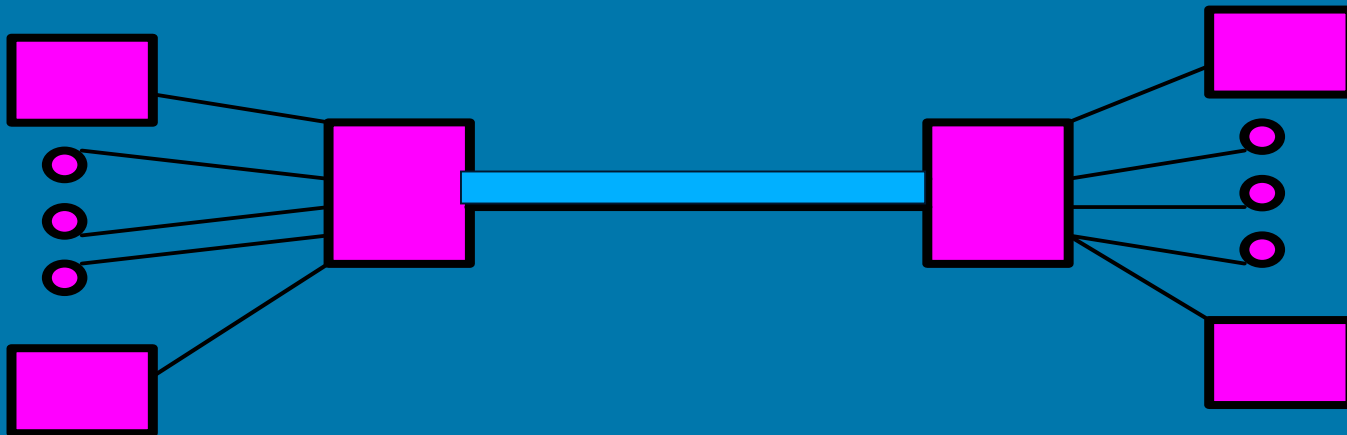
DMT (Discrete multitone)

- jaetaan kaista **alikanaviin** (ANSI T1.413):
 - 256 kappaletta 4 KHz:n alikanavaa,
 - 32 kaksisuuntaista => lähettävät myös ylävirtaan
 - kullakin kanavalla oma QAM-modeemi
 - vaihtelevat bittinopeudet eri kanavilla 0-16 bpHz
 - signallointi sovitettu eri taajuuksien ominaisuuksiin
 - siirrettävän sanoman bitit jaetaan eri kanaville kanavien laadun (\sim SNR) perusteella
 - lähetyskanavan laatua valvotaan ja niiden kuormitusta muutetaan tarpeen mukaan, jopa suljetaan tarvittaessa
 - monimutkainen laskenta => paljon

Kanavointi (multiplexing)

□ Kanavointi (tai limitys)

- runkolinja yhteiskäytössä



Kanavointitekniikat

- FDM (Frequency Division Multiplexing)
 - taajuusjakokanavointi
 - linja jaettu useaan eri kanavaan
 - kukin lähettää omalla kanavallaan

- TDM (Time Division Multiplexing)
 - aikajakokanavointi
 - koko kanava vuorotellen eri lähettäjän käytössä
 - lyhyet ajat => tasainen lähetys kaikilla

Taajuusjakokanavointi

□ puhelinliikenteessä

- kullekin kanavalle varattu 4000 Hz
 - 3000 Hz puhelua varten + varoalue
- eri kanavien taajuusalueet muutetaan erilaisiksi
- kanavat yhdistetään yhdelle linjalle
 - varoalueesta huolimatta hiukan sotkevat toisiaan

WDM (Wavelength Division Multiplexing)

□ valokaapelissa käytetty FDM

- samassa kaapelissa voidaan lähettää useita, 4-32 eri aallonpituutta
 - ~ valo ja sen eri aallonpituudet eroavat prismassa
 - DWDM (Dense wavelength division multiplexing)
- nykyisten kuituyhteyksien nopeudet saadaan moninkertaisiksi
 - yhdessä kuidussa päästään jopa 960 Gbps
 - jakamalla kuitu kanaviin => terabittinopeuksia

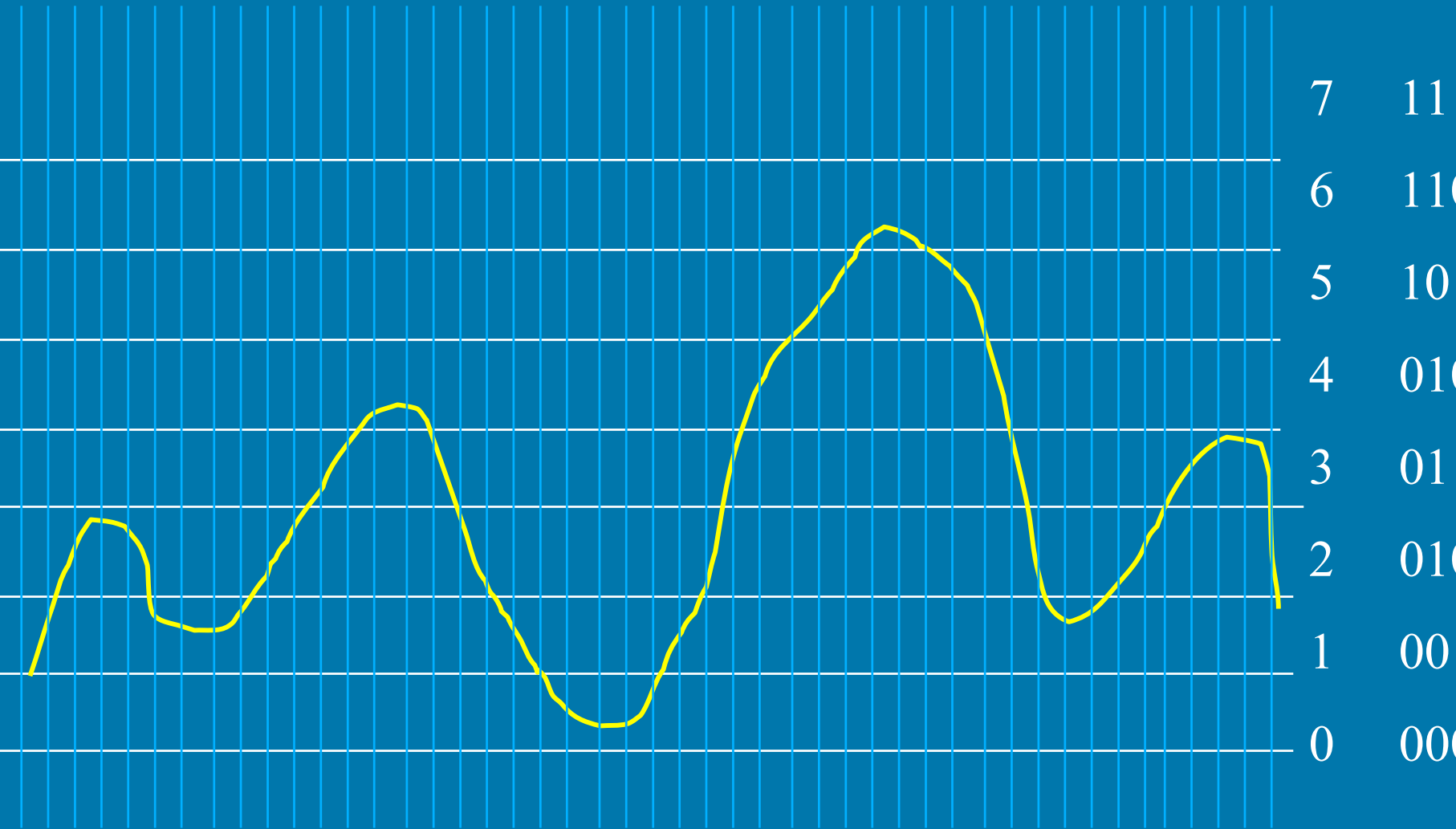
Aikajakokanavointi TDM

- ❑ digitaalikanavan yhteiskäyttö
 - FDM: vain analogisille linjoille
- ❑ TDM vain digitaaliselle datalle
 - puhelinverkossa
 - 'local loop' analoginen
 - runkolinjat digitaalisia
 - tarvitaan muunnos analogisesta digitaaliseen
 - codec: 8000 näytettä/s, 7-8 bittiä/ näyte

PCM (Pulse Code Modulation)

- Tekniikka analogisen signaalin digitalisointiin
 - nykyaikaisen puhelinjärjestelmän ‘peruspalikka’
 - useita erilaisia versioita käytössä
 - USA, Japani: T1 carrier -tekniikka
 - ITU-T (CCITT)
 - otetaan anal. signaalista näytteitä, joiden arvot esitetään kiinteällä määrällä (usein 8) bittejä.

Yleensä tasoja on 256 kappaletta => 8 bittiä



**Näytteitä tarpeeksi tiuhaan
(Nyquist: 2* maksimitaajuus)**

$$2 * 4000 * 8 \text{ b/s} = 64 \text{Kbps}$$

T1 Carrier

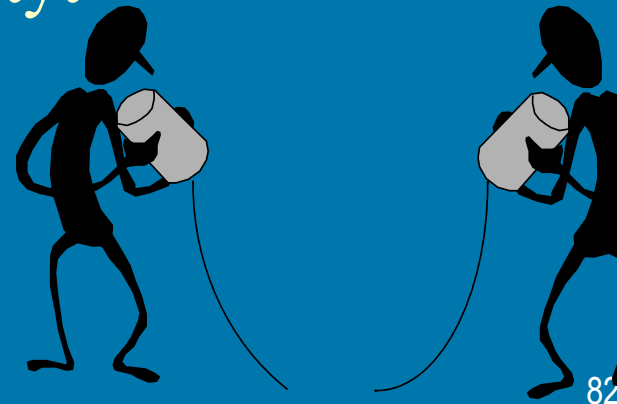
- ❖ 24 äänikanavaa, kanavista näyte vuorotellen
 - näyte = 8 bittiä, joista yksi pariteettibitti
 - $7 * 8000 = 56\ 000$ bps dataa ja 8000 bps signaalointi-
infoa
 - ❖ kehys:
 - $24 * 8 = 192$ bittiä
 - + kehystysbitti: 01010101010101
 - 193 bittiä/125 ms \Rightarrow 1.544 Mbps
 - ❖ eurooppalainen E1 2.048 Mbps

Runkolinjojen yhdistäminen

- ❖ runkolinjoja voidaan yhdistää edelleen
 - 4 T1-linjaa \Rightarrow T2-linja (6.312 Mbps)
 - 6 T2-linjaa \Rightarrow T3-linja (44.736 Mbps)
 - 7 T3-linjaa \Rightarrow T4-linja (274.176 Mbps)
 - joka yhdistämisellä lisätään bittejä kehystystä ja kehysvirheestä toipumista varten
- ❖ useita erilaisia yhdistämistapoja
 - ITU: yhdistetään jatkossa aina neljä joka kerralla
 - 32, 128, 512, 2048, 8192 kanavaa \Rightarrow 2.048 - 565.148 Mbps

SONET/SDH

- ❖ **SONET** (Synchronous Optical NETwork)
 - ❖ **Bellcore**
- ❖ **SDH** (Synchronous Digital Hierarchy)
 - ITU-T
 - eroaa vain hyvin vähän
- ❖ korvaamaan eri tahoilla kehitetyt optiset TDM-käytännöt



Tavoitteet

- ❖ kaukopuhelun fyysisen kerroksen standardi
 - ❖ operaattoreiden yhteistoiminta
 - ❖ aallonpituus, ajoitus, kehysrakenne, ...
 - ❖ PCM-kanavoinnin 'yhtenäistäminen'
 - ❖ digitaalikanavien limitys runkolinjoihin
 - ❖ T3 =>
 - ❖ toiminnan, hallinnan ja ylläpidon tuki
 - ❖ OAM

❖ TDM

- yksi kanava, josta aikaviipaleita alikanaville

❖ synkroninen

- master clock, tarkkuus $\sim 1/10^{**9}$
- bitit lähetään kellon tahdissa

❖ kehys

- 810 tavua , 125 ms välein (\sim PCM-näytteenottoa)
- lähetetään oli dataa tai ei

SONET-kehys

❖ 810 tavua =

9 riviä, jolla kullakin 90 saraketta

- kehyksen 3 ensimmäistä saraketta hallintaa varten
 - kolmella ensimmäisellä rivillä ‘section overhead’
 - kuudella viimeisellä ‘line overhead’
- 87 saraketta käyttäjändataa = >
SPE (Synchronous Payload Envelope)
 - $87 * 9 * 8 * 8000 = 50.112 \text{ Mbps}$

SPE

- ❖ kuljetushallinnon yksikkö
- ❖ alkaa mistä tahansa kohtaa kehystä
 - osoitin alkuun
 - ‘line overhead’ 1. rivillä
 - voi jatkua toiselle kehykselle
 - ei tarvitse odottaa kehyksen alkua
 - esim. atm-solukuorma sopii paremmin
- ❖ SPE:n 1. sarake ‘path overhead’

Datavirtojen limitys

❖ siirtonopeus

- $8 \times 810 = 6480$ bittiä $\Rightarrow 51.84$ Mbps \Rightarrow
STS-1 (Synchronous Transport Signal-1)

❖ limitys

- kolme STS-1 \Rightarrow STS-3
- neljä STS-3 \Rightarrow STS-12
- ... \Rightarrow STS-48

X.25

- ❖ ensimmäinen **julkinen** pakettikytkentäinen teknologia, maks 64 kbps
 - kehitettiin 70-luvun lopussa, käytössä vielä 90-luvulla, tuskin missään enää käytössä
 - vanhanaikaiseen puhelinverkkoon
 - vanhoja kuparikaapeleita => paljon virheitä
 - => **HDLC-tyyppinen siirtoyhteysprotokolla**
 - virhetarkistus ja kuittaus sekä vuonvalvonta joka linkillä
 - tyhmiä päätteitä => älykkyys verkkoon
 - => **virtuaalipiiriverkko**

Kehysvälitys (Frame Relay)

- ❖ “second-generation X.25”
 - kehitettiin 80-lopussa, käytössä 90-luvulla
 - virtuaalipiiriverkko (usein pysyvä)
 - ei virhevalvontaa, ei vuonvalvontaa
 - lasikuitulinkit lähes virheettömiä
 - taattu lähetysnopeus
 - käytetään LANien yhdistämiseen
 - IP-liikennettä yrityksen eri toimintapisteiden välillä
 - luotettavampi kuin Internet
 - 64 kbps ... 1.544 Mbps

ISDN (Integrated Services Digital Network)

• Telelaitosten hyvin suurisuuntainen hanke

- 70- ja varsinkin 80-luvulla: IDN => ISDN
- yhdistää ääni- ja datapalvelut
- evolutionäärinen kehitys
 - N-ISDN (Narrowband ISDN) => mm. Frame Relay
 - 64 Kbps
 - B-ISDN => **atm** (asynchronous transfer mode)
- Internet-käyttö
 - 2B+D => 144 Kbps ~ modeeminopeus 28.8 -56 kbps