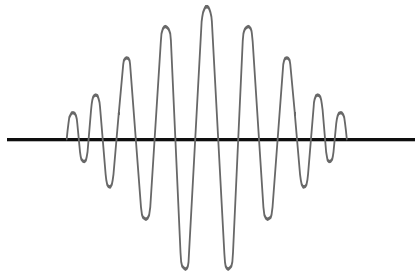
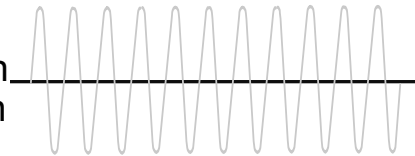


# Tiedon koodaus signaaliin

- 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

$\phi$  vaihe

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

# Fourier-sarja

- Mikä tahansa (lähes) jaksollinen funktio voidaan esittää Fourier-sarjana
- $g(t) = C/2 + 3 A_n \sin(2\pi n f t) + 3 B_n \cos(2\pi n f t)$

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

10/14/2003

45

# 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

10/14/2003

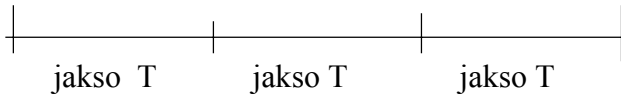
46

## Esimerkki: 'b'-kirjain

□  $b = 01100010$

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

□  $01100010 \ 01100010 \ 01100010$



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

10/14/2003

47

□  $g(t) = 0, \ 0 \leq t < 1$

1,  $1 \leq t < 2$

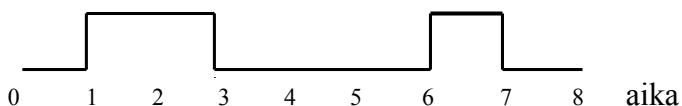
1,  $2 \leq t < 3$

0,  $3 \leq t < 4$

.....

1,  $6 \leq t < 7$

0,  $7 \leq t < 8$



# 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

10/14/2003

49

# 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

10/14/2003

50

## 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

10/14/2003

51

## Kanavan siirtokyky

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

10/14/2003

52

## Esimerkki

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

10/14/2003

53

## Esimerkki jatkuu

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

10/14/2003

54

## 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!

10/14/2003

55

## 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)

10/14/2003

56

# Nyquistin kaava

- maksimaalinen tiedonsiirtonopeus häiriöttömällä kanavalla

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

C = tiedonsiirtonopeus (bps)

H = kaistanleveys

V = tasojen lukumäärä

10/14/2003

57

# Näytteiden otto

- Nyquist =>
  - Jos siirtokanavan kaistanleveys on H, niin kaikki kanavan kuljettama informaatio saadaan ottamalla kanavasta  $2 H$  näytettä sekunnissa
    - tiuhempi näytteiden otto ei enää tuota lisää informaatiota
    - Kaikki, mitä tapahtuu havaitaan tutkimalla tilannetta  $2H$  kertaa sekunnissa

10/14/2003

58



# Esimerkki

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

10/14/2003

59

# 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

10/14/2003

60

# 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

10/14/2003

61

# Esimerkki

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

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

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

$$C = H \log_2 (1 + S/N) = 3000 \log_2 (1 + 100)$$

$$= 3000 \log_{10}(101) / \log_{10}(2)$$

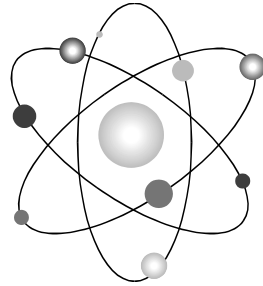
$$= 19974 \text{ bps}$$

10/14/2003

62

# Esimerkki jatkuu

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



10/14/2003

63

# Laajaverkot (WAN)

- ❑ **Televerkko**
  - ❑ Modeemi, xDSL, kanavointi, PCM, T1, SONET
- ❑ **X.25, kehysvälitys** (Frame Relay)
- ❑ **Atm-verkko**

10/14/2003

64

# 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

10/14/2003

65

# Ristiriita

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

10/14/2003

66

## Digitaalisen signaloinnin edut

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

10/14/2003

67

## 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

10/14/2003

68

# 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."

10/14/2003

69

# xDSL-modeemit

- digitaalinen paikallissilmukka
  - (Digital Subscriber Loop)
  - kierretyn parin kaistanleveys >> 4000Hz
    - 4 000 HZ:n rajoitus puhelintekniikasta
- useita hieman erilaisia ratkaisuja
  - ADSL
  - SDSL
  - HDSL
  - VDSL

10/14/2003

70

## **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)

10/14/2003

71

## **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 (~SNR) perusteella
    - lähetyiskanavan laatua valvotaan ja niiden kuormitusta muutetaan tarpeen mukaan, jopa suljetaan tarvittaessa
  - monimutkainen laskenta => paljon

10/14/2003

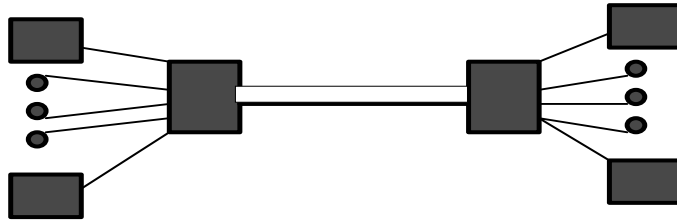
prosessointia

72

# Kanavointi (multiplexing)

## □ Kanavointi (tai limitys)

- runkolinja yhteiskäytössä



10/14/2003

73

# 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

10/14/2003

74



# 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

10/14/2003

75

## **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

10/14/2003

76

# 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

10/14/2003

77

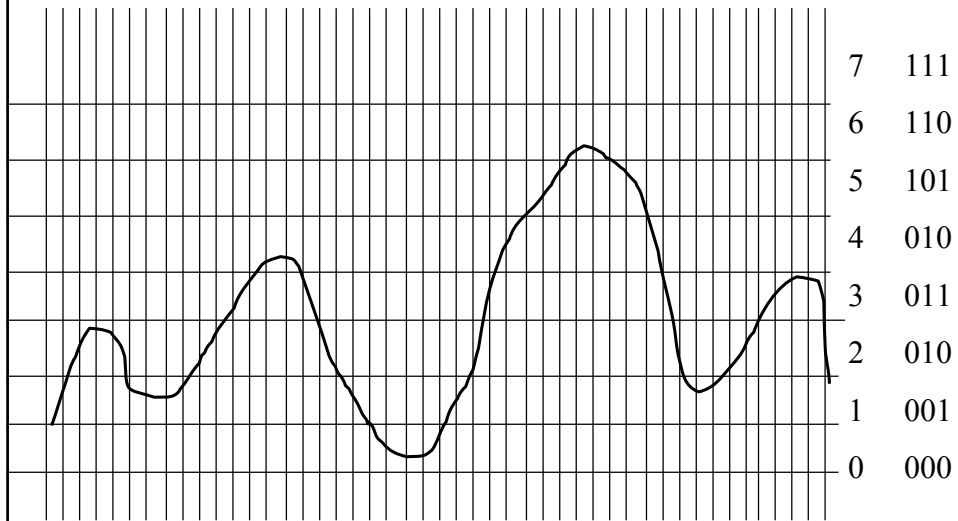
# PCM (Pulse Code Modulation)

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

10/14/2003

78

Yleensä tasoja on 256 kappaletta => 8 bittiä



Näytteitä tarpeeksi tiuhaan  
(Nyquist:  $2 \cdot$  maksimitaajuus)

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

## T1 Carrier

- ❖ 24 äänikanavaa, kanavista näyte vuorotellen
  - näyte = 8 bittiä, joista yksi pariteettibitti
    - $7 \cdot 8000 = 56\,000$  bps dataa ja 8000 bps signaalointi-  
infoa
  - ❖ kehys:
    - $24 \cdot 8 = 192$  bittiä
    - + kehystysbitti: 010101010101 ....
    - 193 bittiä/125 ms => 1.544 Mbps
  - ❖ eurooppalainen E1 2.048 Mbps

# Runkolinjojen yhdistäminen

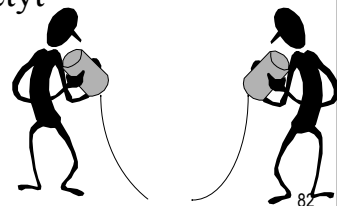
- ❖ runkolinjoja voidaan yhdistää edelleen
  - 4 T1-linjaa => T2-linja (6.312 Mbps)
  - 6 T2-linjaa => T3-linja (44.736 Mbps)
  - 7 T3-linjaa => T4-linja (274.176 Mbps)
  - joka yhdistämisellä lisätään bittejä kehystystä ja kehysvirheestä toipumista varten
- ❖ useita erilaisia yhdistämistapoja
  - ITU: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

10/14/2003

81

# SONET/SDH

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



10/14/2003

82

# Tavoitteet

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

10/14/2003

83

## ❖ TDM

- yksi kanava, josta aikaviipaleita alikanaville

## ❖ synkroninen

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

## ❖ kehys

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

10/14/2003

84

# 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)
  - $87 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 8000 = 50.112 \text{ Mbps}$

10/14/2003

85

# 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’

10/14/2003

86

# 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

10/14/2003

87

# 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  $\Rightarrow$  paljon virheitä $\Rightarrow$  **HDLC-tyyppinen siirtoyhteysprotokolla**
  - virhetarkistus ja kuittaus sekä vuonvalvonta joka linkillä
- tyhmiä päätteitä  $\Rightarrow$  älykkyys verkkoon  
 $\Rightarrow$  **virtuaalipiiriverkko**

10/14/2003

88

## Kehysvälitys (Frame Relay)

- ❖ “second-generation X.25”
  - kehitettiin 80-lopussa, käytössä 90-luvulla
  - virtuaaliipiiriverkko (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

10/14/2003

89

## 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

10/14/2003

90