

S-38.1105

# Tietoliikennetekniikan perusteet

Luento 3

31.1.2007

Informaatioteorian alkeita

Tiedonsiirron perusteet



# Luennon aiheet

- Analogisesta digitaaliseksi signaaliksi
- Signaalin siirtoa helpottavat / siirron mahdollistavat menetelmät
  - Tahdistus
  - Johtokoodaus
  - Virheenkorjaus
  - Yhteyden ohjaaminen
- Modulointi
- Kanavointi



# Ääni

- Mekaanista värähtelyä
- Äänipaine tarkoittaa aaltoliikkeen aiheuttamaa poikkeamaa väliaineen staattisessa paineessa
- Ilmassa yli- ja alipaineen vaihtelua
- Aistittavia ominaisuuksia
  - voimakkuus
  - korkeus
  - sointiväri
- Nopeus riippuu väliaineesta ja lämpötilasta
  - Esim. ilma 330 m/s, vesi 1500 m/s teräs 5km/s



# Kuulo

- Ihmisen kuuloalue 20 Hz - 20 kHz
  - Herkimmillään 3 - 4 kHz
- Äänekkyysaistimus riippuu taajuudesta
  - 100 Hz / 70 dB:n ääni kuullaan yhtä voimakkaana kuin 3000 Hz / 58 dB
- Äänen fysikaalisen intensiteetin yksikkö on desibelit [dB]
- Puheen ymmärtämiseen tarvitaan kaista 300...3400 Hz
- Puhelinverkossa siirretään taajuuskaista 300...3400 Hz



# Peruskäsitteitä

## ■ Taajuus $f$ [Hz]

- aaltojen lukumäärä aikayksikössä
- Hz kertoo kuinka monta värähdystä sekunnissa
- Taajuuskaista  $f_1 \dots f_2$
- Kaistanleveys  $df = f_2 - f_1$
- Oktaavi = taajuuden kaksinkertaistus

## ■ Spektri

- Signaalin intensiteetti (voimakkuus) taajuuden funktiona kuvattuna



# Peruskäsitteitä

- Aallonpituus  $\lambda$  (lambda)
  - yhden värähdyksen pituus [m]
- Amplitudi  $A$ 
  - Värähdyksen laajuus tasapainotilasta ääriasentoon
- desibeli, dB
  - ilmaisee suureen suhteessa toiseen suureeseen tai referenssiarvoon
  - Tehon kaksinkertaistuminen nostaa äänenvoimakkuutta n. 3 dB



# Analogisen signaalin siirto digitaalisessa puhelinverkossa

- Analoginen signaali = jatkuva signaali
  - kaikki arvot mahdollisia
  - → liukuva asteikko
- Digitaalinen signaali
  - vain äärellinen määrä arvoja sallittu
  - → portaittainen asteikko
- Analogisen signaalin muunto digitaaliseksi
  - Joudutaan pyöristämään digitaaliseen portaaseen
  - → ei enää täysin tarkka



# Puheen siirron vaiheet

- Muutetaan analoginen, mekaaninen signaali sähköiseksi
- Otetaan signaalista näytteitä sopivin väliajoin
  - Nyquistin näytteenottoteoreema
- Muutetaan näytteet biteiksi
  - Kvantisointi ja koodaus
  - Pyörityksestä aiheutuva kvantisointisärö
- Siirretään digitaalinen signaali vastaanottajalle



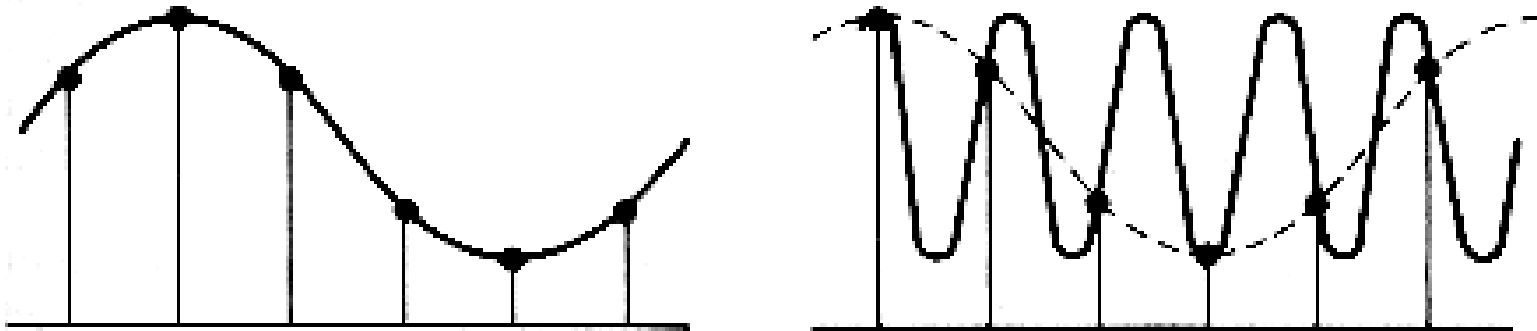


# Näytteenotto

- Signaalista voidaan ottaa näytteitä niin, että niiden perusteella voidaan rekonstruoida alkuperäistä vastaava signaali
- tällöin näytteitä tulee ottaa vähintään kaksinkertaisella taajuudella alkup. signaalissa esiintyvään suurimpaan taajuuteen nähden:  
 $f(\text{näyte}) \geq 2 f(\text{signaali}(\text{max}))$
- puhelinverkon näytteenottotaajuus:
  - puhelinverkon taajuusalue 300...3400 Hz →  
näytteenottotaajuus:  $f(\text{näyte}) \geq 2 * 3400\text{Hz} = 6800\text{Hz}$
- Käytännössä  $f(\text{näyte}) = 8000\text{Hz}$

- liian harva näytteenottotaajuus aiheuttaa laskostumista

## Laskostuminen aikatasossa



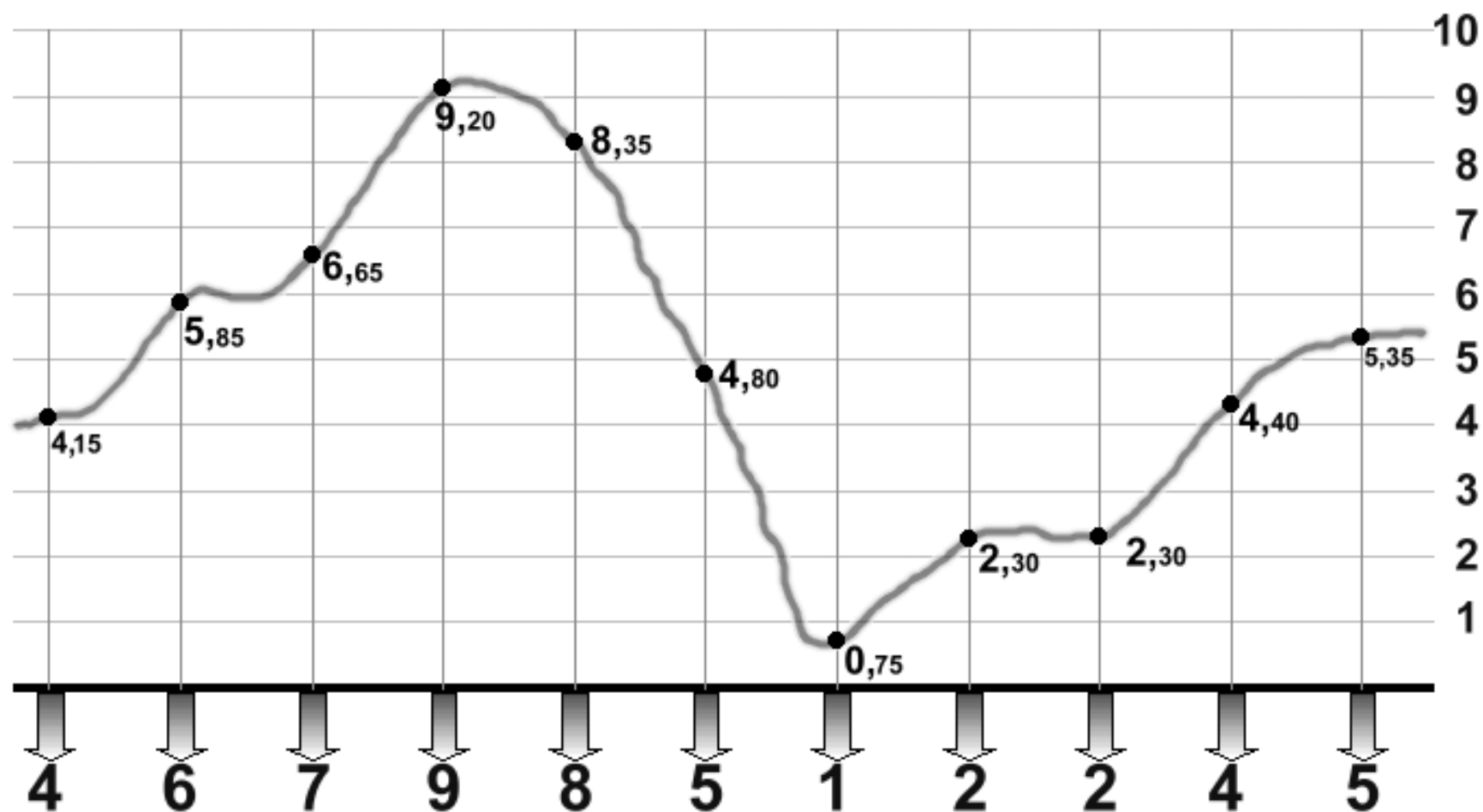
Kuvassa on näytteistetty kaksi eritaajuista sini-signaalia, joilla on kuitenkin samat näytearvot



# Kvantisointi ja koodaus

- Signaalista otettua näytettä verrataan asteikon arvoihin
  - Tarvittaessa pyöristetään
  - -> kvantisointivirhe / -särö
- 8 bittinen tavu ->  $2^8 = 256$ -jakoinen asteikko
- Epälineaarinen kvantisointi
  - Puheen tärkeimmät vivahde-erot pienillä äänipaineilla
  - asteikon tasot tiheämmässä pienillä äänipaineilla

# Analogisen signaalin kvantisointi





# Digitaalitekniikan hyödyt

- kohinan ja häiriöiden sieto paranee
- vahvistamisen sijasta digitaalinen signaali voidaan tunnistaa ja luoda uudestaan eli uudentaa (regeneroida)
- pitemmät siirtoyhteydet kuin analogiatekniikalla
- digitaaliset laitteet ja komponentit
  - luotettavampia
  - edullisempia
  - vievät vähemmän tilaa
  - kuluttavat vähemmän energiaa
  - sopivat tietokoneiden väliseen datasiirtoon paremmin
- digitaalitekniikan avulla voidaan käyttää kehittyneitä kanavointitekniikoita -> siirtotiet tehokkaaseen käyttöön



# Tiedonsiirron yksiköt

- bitti
  - informaation pienin perusyksikkö
  - bit = binary digit ("kaksi-tilainen")
- tavu (B)
  - Vakiokokoinen bittiryhmä (usein 8 bittiä)
  - puhelinverkossa yksi puhelu tuottaa bittivirran  $8000 \text{ 1/s} * 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$
- tietoa siirrettäessä
  - tiedonsiirtonopeuden yksikkö bit/s (bps, bit per second)
  - yksiköiden käyttö horjuvaa, yleensä siirtonopeuksien kilo = 1000
  - tietokoneen muistia mitattaessa "kilotavu"  $1024=2^{10}$  tavua (eli kibitavu, KiB)



- baud (Bd)

- modulointi- eli symbolinopeuden yksikkö
- kuvaa signaalin muutostiheyttä sekunnissa ( $\neq$  bit/s), ei signaalin nopeutta

- dibitti

- kahden bitin ryhmä, bittipari
- (esim. nelitasoisen modulaation bittiparit ja niitä vastaavat vaihemuutokset)

- Kerrannaisyksiköt

- IEC hyväksyi bin. kerrannaisyksiköt 12/1998
- mebitavu 1 MiB = 2<sup>20</sup> B = 1 048 576 B
- megatavu 1 MB = 10<sup>6</sup> B = 1 000 000 B



# Rivissä vai jonossa?

## ■ Rinnakkaismuotoinen siirto

- jokainen bitti lähetetään omassa johtimessaan samanaikaisesti
- Käytössä tietokoneen sisäisessä siirrossa, väylillä
- yhdellä prosessorin kellonjaksolla saadaan siirrettyä yhden merkin kaikki bitit samanaikaisesti kukin omalla johtimellaan
- Bitit saattavat kulkea eri nopeuksilla

## ■ Sarjamuotoinen siirto

- siirretään dataa bitti kerrallaan yhtä johdinta pitkin
- halvempi pidemmällä matkoilla





# Tahdistus

- vastaanottajan tiedettävä milloin bitti alkaa ja loppuu
  - lähettimen ja vastaanottimen synkronoiduttava
  - lukee oletetusta bitin keskikohdasta, puolen bitin mittainen virhe aiheuttaa luiskahduksen (bitin arvo saattaa muuttua)
  - tahdistusta (=synkronointia) ylläpidettävä jatkuvasti
- Synkroninen ja asynkroninen siirtomuoto



## ■ Synkroninen siirtomuoto

- kellojen tahdistus siirron alussa
- linjalla siirretään usein bittejä, vaikka siirrettävää informaatiota ei ole
- Säilyttää bittitahdin suurilla nopeuksilla paremmin kuin asynkroninen siirto

## ■ Asynkroninen siirtomuoto

- bittitahdista huolehditaan sopimalla käytettävästä siirtonopeudesta ennen siirron alkua
- Vastaanottajan kello käynnistyy aina ensimmäisen bitin löytyessä (1 -> 0)
- Siirron loppuun laitetaan lopetusbittejä (ykköstä)
- Aloitus- ja lopetusbitit alentavat siirron tehokkuutta
- Sopii lyhyiden epätasaisin välein lähettävien viestien siirtoon



# Johtokoodaus

- Digitaalisen tiedon siirtämiseen, määrää bittien esitysmuodon
  - NRZ-koodaus: jännitetaso (1 / 0) säilytetään koko bitin keston ajan
  - RZ-koodaus: Kutakin ykkösbittiä kuvaava jännitetaso pidetään vain osan aikaa bitin koko kehosta. Pitoaika ilmoitetaan prosenttina.
  - Manchester-koodaus: jännitetasoa muutetaan jokaisen bitin keskellä
- Johtokoodaus helpottaa vastaanottajaa tahdistuksen säilyttämisessä, kun jännitetaso muuttuu usein



# Virheenkorjaus

- Tiedonsiirrossa saattaa tapahtua virhe, esimerkiksi yksittäinen bitti saatetaan tulkita väärin
  - Virheellisten bittien sijainti on tärkeää havaita, jotta ne voidaan lähettää uudelleen
- Tavallisimpia menetelmiä:
  - Pariteettitarkistus
  - Kaiutus
  - Tarkistussumma



## ■ Pariteettitarkastus

- lähettäjä lisää jokaiseen merkkiin yhden pariteettibitin, yleensä siten, että merkin bittien summa on ennalta sovittuna joko parillinen tai pariton

## ■ Kaiutus

- vastaanottaja lähettää kaiken saamansa datan takaisin lähettäjälle, joka tarkistaa onko data alkuperäisen mukainen
- Käytetään harvoin; vain silloin, kun siirtovirheet olisivat kohtalokkaat

## ■ Tarkistussumma

- Lähettäjä laskee tarkistussumman suuremmasta bittijoukosta eli lohkosta ja lisää sen lohkon loppuun
- Voidaan laskea ykkösbittien lukumäärä, parempi tapa on käyttää jotain polynomimenetelmää, jossa bitit saavat eri painokertoimia niiden sijainnin mukaan



# Vuonohjaus

- Vuonohjauksella pyritään varmistamaan, ettei tietoa pääse katoamaan siirron aikana
  - Estetään lähettävää laitetta täyttämästä ja vuodattamasta yli vastaanottajan datapuskureita.
- Vuonohjaukseen on kaksi tapaa:
  - pehmeä kättely: ohjelmallinen X-ON / X-OFF, ohjausmerkit lähetetään datan seassa
    - ohjausmerkeillä vastaanottaja pyytää lähettäjää odottamaan tai jatkamaan lähetystä
  - kova kättely: käytetään erillisiä johtimia vuonohjaukseen



# Modulaatio

- tarkoittaa siirrettävän informaation lisäämistä kanta-aaltoon
  - kanta-aalto: se suuritaajuinen signaali, jota pienitaajuinen signaali moduloi
  - informaatio voidaan lisätä joko kanta-aallon amplitudiin, taajuuteen (ja) tai vaiheeseen
- moduloiva signaali voi olla analoginen tai digitaalinen
- monitasoinen modulaatio
  - yhdellä muutoksella ilmaistaan useita bittejä kerrallaan
  - siirtonopeus (bit/s) kasvaa
- demodulaatio: informaatio ilmaistaan eli palautetaan kanta-aallosta



# Amplitudimodulaatio AM

- yksinkertaisin modulaatiotapa
  - hyötysignaali muuttaa kanta-aallon amplitudia
  - vastaanottaja suodattaa kanta-aallon pois ja saa alkuperäisen hyötysignaalin esiin
- monet (radio)häiriöt muuttavat signaalin amplitudia
  - AM-lähete herkkä häiriöille (esim. salamaniskuista rutinaa)
- kun moduloiva signaali on digitaalinen, puhutaan ASK-modulaatiosta (Amplitude Shift Keying)



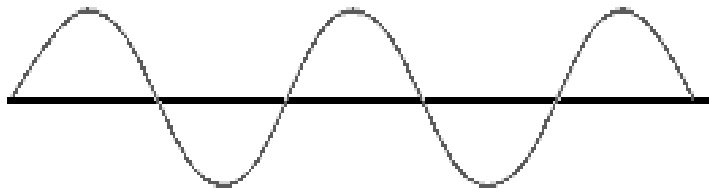


# Taajuusmodulaatio FM

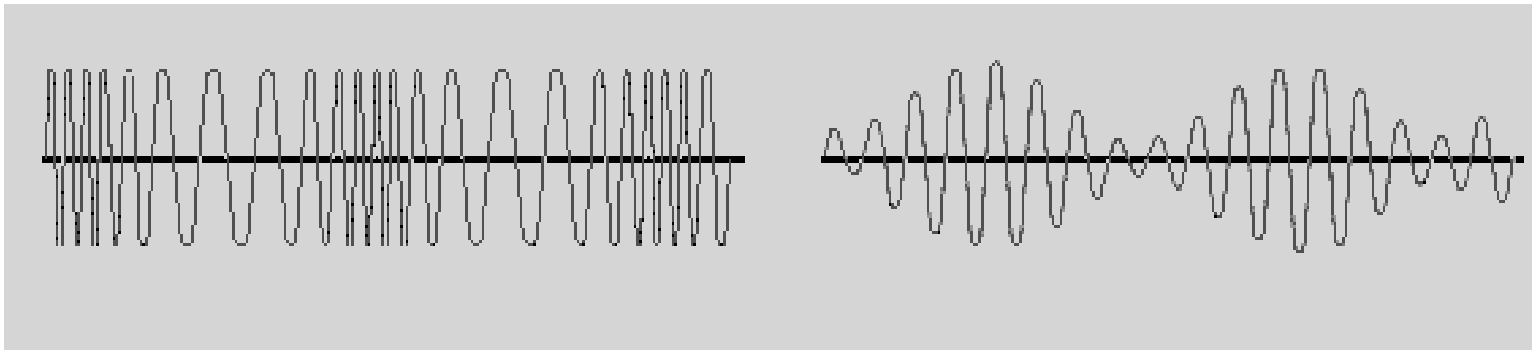
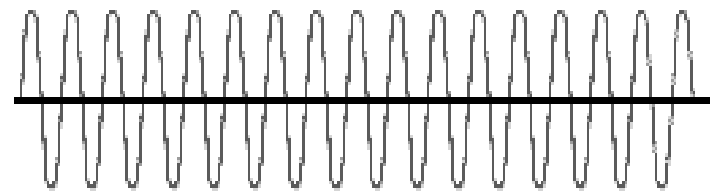
- kantoaallon taajuus muuttuu moduloivan signaalin mukaan
  - kantoaallon amplitudi vakio
  - käytössä esim. paikallisradiolähetyksissä
- FSK-modulaatio: moduloiva signaali on digitaalinen
  - binaarinen FSK-modulaatio helppo tuottaa kahden eritaajuisen oskillaattorin avulla



Informaatiosignaali



Kantoaalto



Taajuusmoduloitu signaali

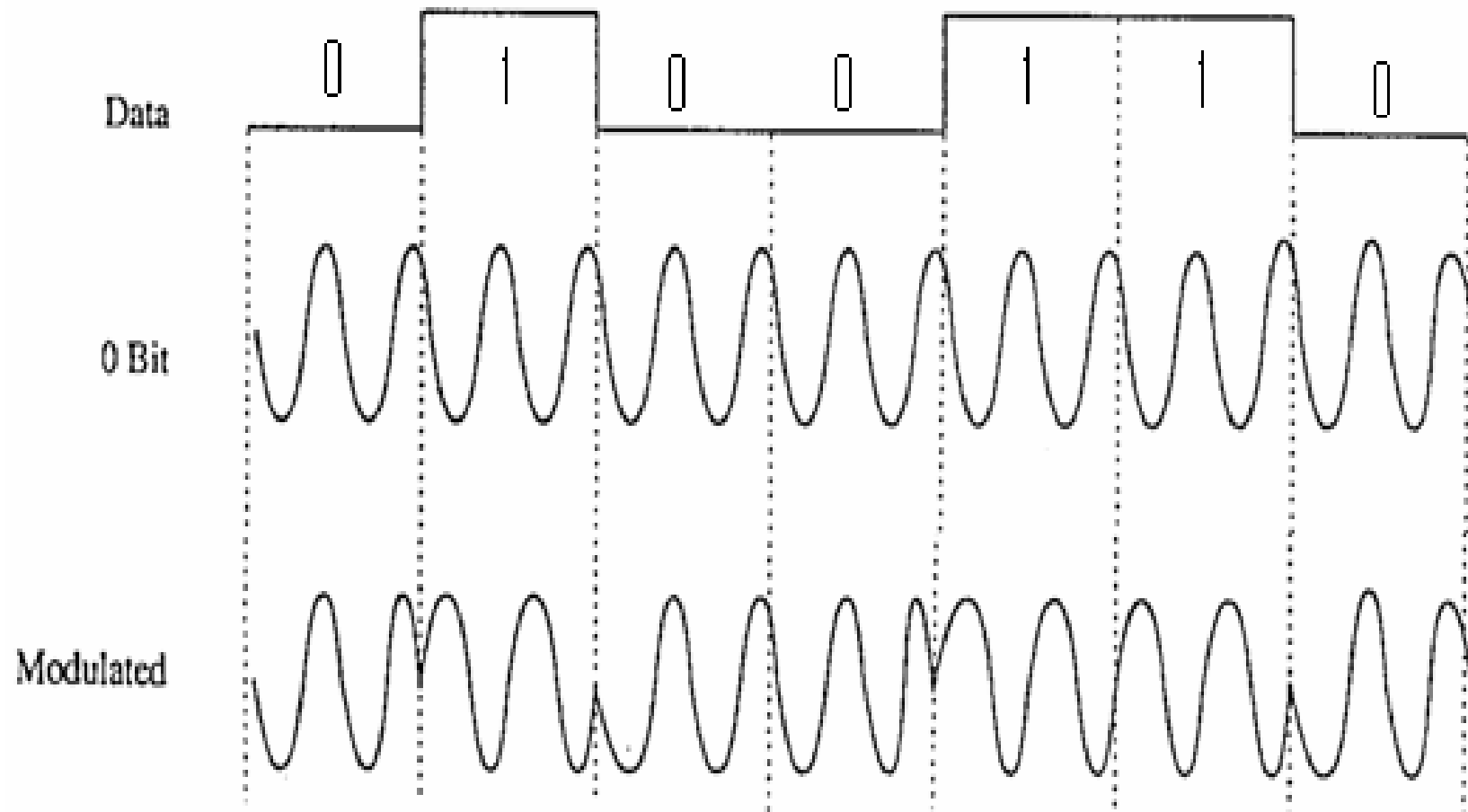
Amplitudimoduloitu signaali



# Vaihemodulaatio PM

- hyötysignaali muuttaa kanta-aallon vaihetta
  - hyötysignaalin positiivinen arvo kiertää vaihetta eteenpäin, negatiivinen taaksepäin
- PSK-modulaatio käytössä etenkin datasiirrossa

# Vaihemodulaatio





# Monitasoisia vaihemodulaatioita

- nelitasoinen vaihemodulaatio (4-PSK)
  - käytetään kahden bitin ryhmiä -> kaikki kombinaatiot neljällä eri vaihemuutoksella
  - moduloitavaa signaalia verrataan referenssisignaaliin
- nelitasoinen vaihe-eromodulaatio (4-DPSK)
  - vaihemuutos lasketaan edellisestä merkistä eikä erillisistä referenssisignaalista
  - vastaanottajalle helpompi kuin vaihemodulaatio: riittää, että kahta peräkkäistä merkkiä verrataan toisiinsa
    - esim. viivästämällä ensiksi tullutta yhden modulaatiovälin verran



# Kanavointi

- tapa siirtää samalla siirtojohdolla useita hyötysignaaleja samanaikaisesti
- yleensä yksi yhteys tarvitsee vain murto-osan siirtomedian kapasiteetista
  - johdot hyötykäyttöön
- kanavointitapoja
  - taajuusjakoinen (FDM, frequency division multiplexing)
  - aikajakoinen (TDM, time-division multiplexing)
  - aallonpituusjakoinen (WDM, wavelength division multiplexing)
  - koodijakoinen (CDM, code division multiplexing)
  - tai edellisten yhdistelmiä



# Taajuusjakoinen kanavointi FDM

- Jaetaan taajuusalue useisiin viipaleisiin eli kanaviin
- Jokaisella kanavalla oma kantoaaltonsa, jota moduloidaan siirrettävällä signaalilla
- Käytetään:
  - Analogiset puhelinyhteydet (jokaisella kanavalla 4 kHz:n kaista)
  - Radio- ja televisiosignaalien siirto taivaalla



# Aikajakoinen kanavointi TDM

- lähetetään useista eri signaaleista otettuja näytteitä samalla johdolla vuorotellen
- kun näytteitä otetaan siirtonopeuteen verrattuna harvakseltaan, sama fyysinen yhteys voi palvella useita loogisia yhteyksiä
- Käytetään:
  - digitaaliset puhelinyhteydet
  - GSM: sekä taajuus- että aikajakoinen kanavointi





# Aallonpituusjakoinen kanavointi

## WDM

- samassa valokuidussa välitetään useita kanavia erivärisillä valoilla eli eri valon aallonpituuksilla
  - vrt. taajuusjakoinen kanavointi
- monikertaistaa esim. Atlantin ylittävien valokuitujen siirtokapasiteetin ilman uusien kaapeleiden vetoa
- Esimerkiksi välille 1.54 – 1.58  $\mu\text{m}$  saadaan mahtumaan 100 rinnakkaista kanavaa, jos lasereiden (kanta-aaltotaajuuksien) taajuudet ovat 50 GHz välein



# Koodijakoinen kanavointi CDM

- Koodijakoisessa kanavoinnissa samaa taajuuskaistaa käyttävät signaalit koodataan omalla koodillaan
  - Vain koodin haltija pystyy erottelemaan lähetyksestä hyötydatan
  - Muut näkevät vain kohinaa
- käytetään 3. sukupolven matkapuhelinverkoissa



# Esim: GSM-verkon kapasiteetti

- GSM-verkossa käytetään
  - taajuusjakoista kanavointia
    - verkon käyttämä taajuusalue jaetaan 200kHz:n levyisiin radiokanaviin
  - aikajakoista kanavointia
    - radiokanavat jaetaan kahdeksaan 577 $\mu$ s pituiseen aikaväliin
- Millä muilla keinoilla voitaisiin lisätä kapasiteettia solukoverkossa?



# Shannonin teoreema

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

- Tutkii signaalin ja kohinan suhdetta

C = yhteyden suurin teoreettinen siirtokyky

B = kaisanleveys

S/N = signaali-kohinasuhde