



S-38.1105

Tietoliikennetekniikan perusteet

Luento 2

25.1.2006

Informaatioteorian alkeita

Tiedonsiirron perusteet



Luennon aiheet

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



Ääni

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



Kuulo

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



Peruskäsitteitä

n 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

n Spektri

- Signaalin intensiteetti (voimakkuus) taajuuden funktiona kuvattuna



Peruskäsitteitä

n Aallonpituus λ (lambda)

- .. yhden värähdyksen pituus [m]

n Amplitudi A

- .. Värähdyksen laajuus tasapainotilasta ääriasentoon

n desibeli, dB

- .. ilmaisee suureen suhteessa toiseen suureeseen tai referenssiarvoon
- .. Tehon kaksinkertaistuminen nostaa äänenvoimakkuutta n. 3 dB



Analogisen signaalin siirto digitaalisessa puhelinverkossa

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



Puheen siirron vaiheet

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

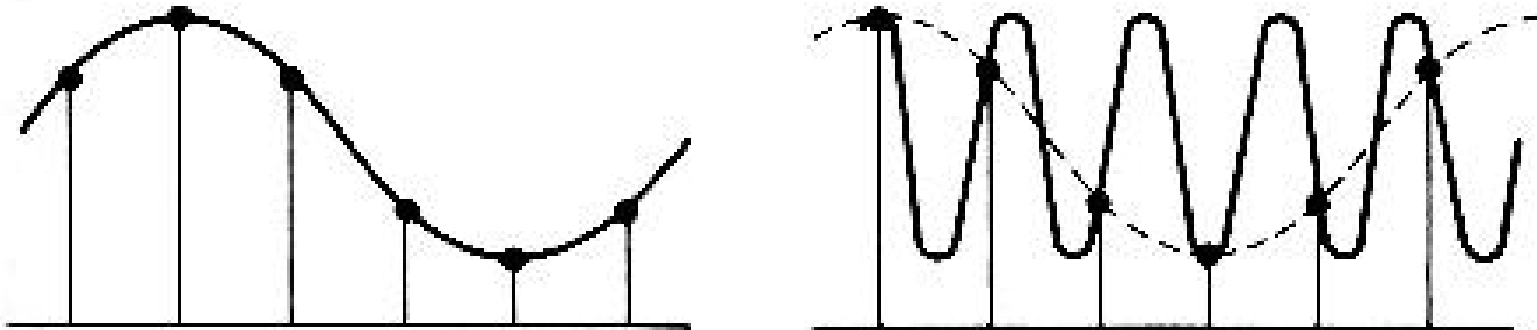


Näytteenotto

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

n liian harva näytteenottotaajuus aiheuttaa laskostumista

Laskostuminen aikatasossa



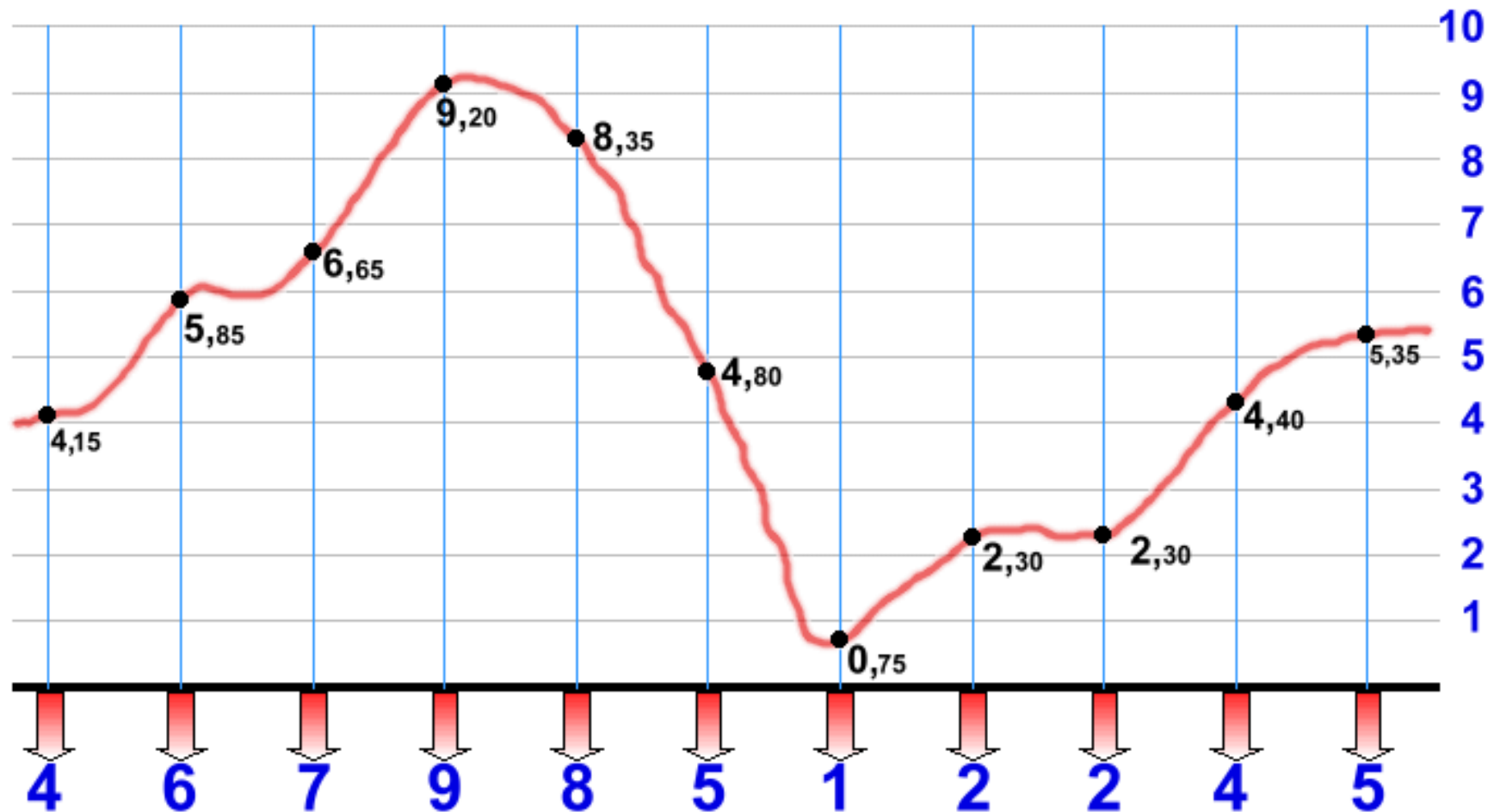
Kuvassa on näytteistetty kaksi eritaajuista sini-signaalia, joilla on kuitenkin samat näytearvot



Kvantisointi ja koodaus

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

Analogisen signaalin kvantisointi





Digitaalitekniikan hyödyt

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



Tiedonsiirron yksiköt

n bitti

- informaation pienin perusyksikkö
- bit = binary digit ("kaksi-tilainen")

n tavu (B)

- Vakiokokoinen bittiryhmä (usein 8 bittiä)
- puhelinverkossa yksi puhelu tuottaa bittivirran $8000 \text{ 1/s} * 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$

n 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)



n baudi (Bd)

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

n dibitti

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

n Kerrannaisyksiköt

- .. IEC hyväksyi bin. kerrannaisyksiköt 12/1998
- .. mebitavu $1 \text{ MiB} = 2^{20} \text{ B} = 1\,048\,576 \text{ B}$
- .. megatavu $1 \text{ MB} = 10^6 \text{ B} = 1\,000\,000 \text{ B}$



Rivissä vai jonossa?

n 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

n Sarjamuotoinen siirto

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



Tahdistus

- n 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
- n Synkroninen ja asynkroninen siirtomuoto



n Synkroninen siirtomuoto

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

n 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

- n 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
- n Johtokoodaus helpottaa vastaanottajaa tahdistuksen säilyttämisessä, kun jännitetaso muuttuu usein



Virheenkorjaus

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



n Pariteettitarkastus

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

n Kaiutus

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

n 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

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



Modulaatio

- n 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
- n moduloiva signaali voi olla analoginen tai digitaalinen
- n monitasoinen modulaatio
 - yhdellä muutoksella ilmaistaan useita bittejä kerrallaan
 - siirtonopeus (bit/s) kasvaa
- n demodulaatio: informaatio ilmaistaan eli palautetaan kanta-aallosta



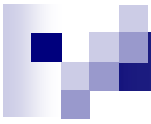
Amplitudimodulaatio AM

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

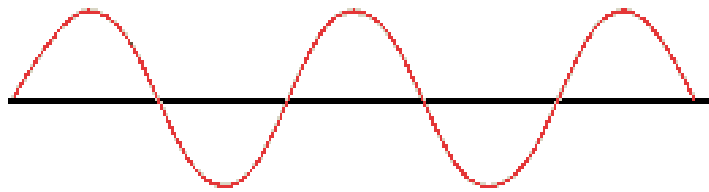


Taajuusmodulaatio FM

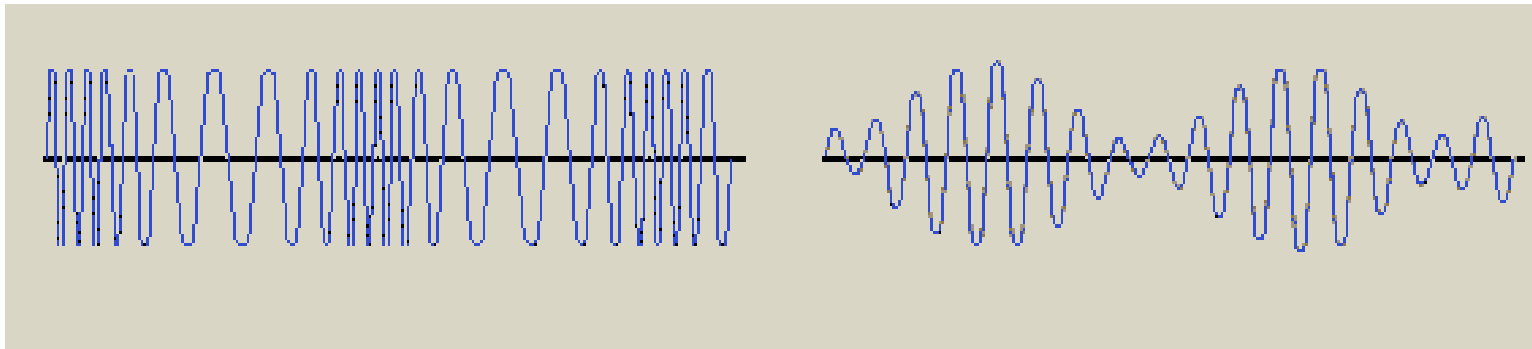
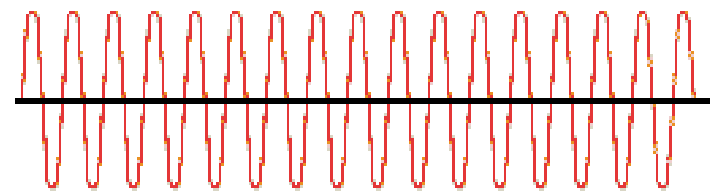
- n kanta-aallon taajuus muuttuu moduloivan signaalin mukaan
 - .. kanta-aallon amplitudi vakio
 - .. käytössä esim. paikallisradiolähetyksissä
- n FSK-modulaatio: moduloiva signaali on digitaalinen
 - .. binaarinen FSK-modulaatio helppo tuottaa kahden eritaajuisen oskillaattorin avulla



Informaatiosignaali



Kantoaalto



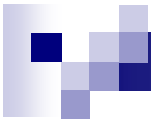
Taajuusmoduloitu signaali

Amplitudimoduloitu signaali

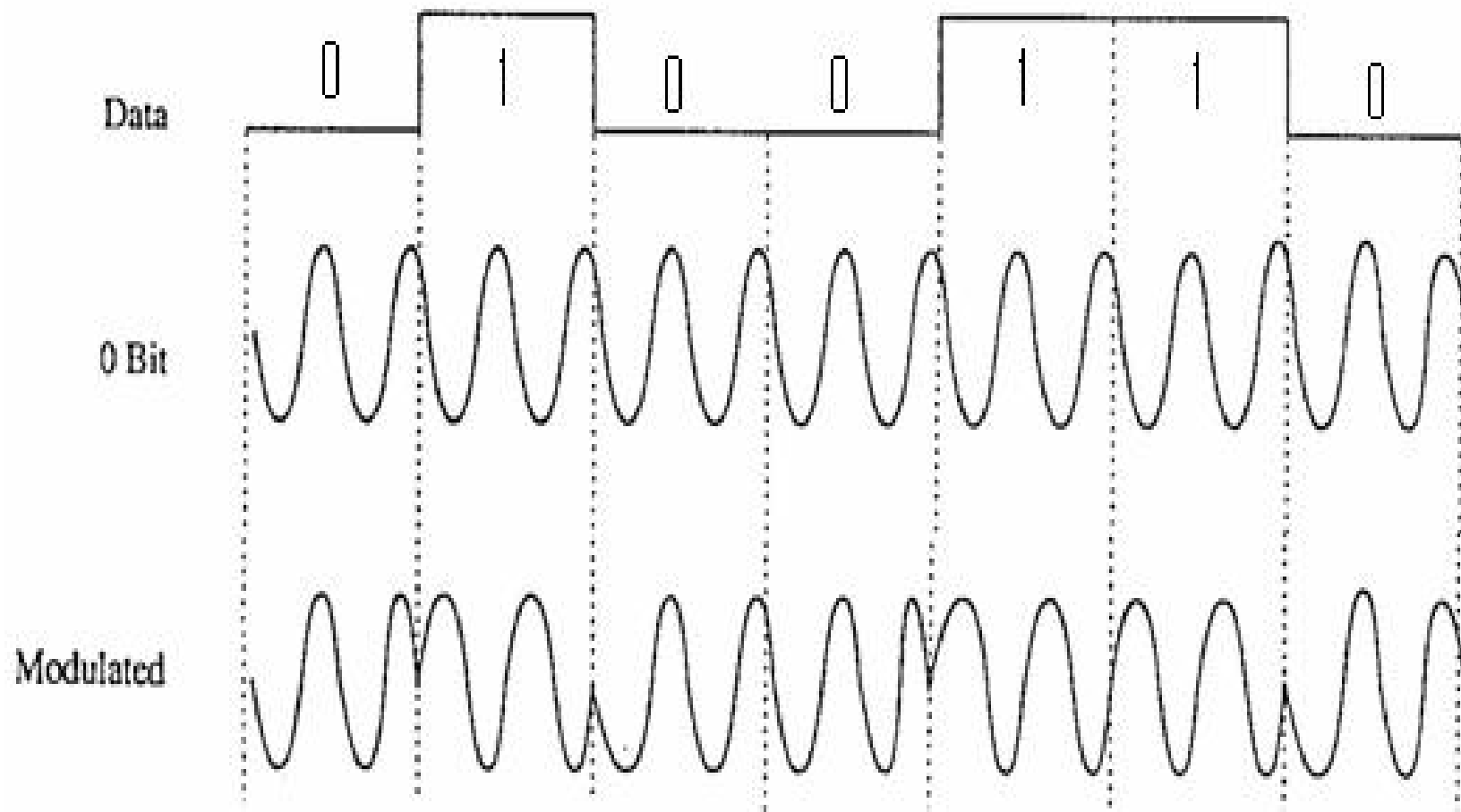


Vaihemodulaatio PM

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



Vaihemodulaatio





Monitasoisia vaihemodulaatioita

n nelitasoinen vaihemodulaatio (4-PSK)

- .. käytetään kahden bitin ryhmiä -> kaikki kombinaatiot neljällä eri vaihemuutoksella
- .. moduloitavaa signaalia verrataan referenssisignaaliin

n nelitasoinen vaihe-eromodulaatio (4-DPSK)

- .. vaihemuutos lasketaan edellisestä merkistä eikä erillisistä referenssisignaalista
- .. vastaanottajalle helpompi kuin vaihemodulaatio: riittää, että kahta peräkkäistä merkkiä verrataan toisiinsa
 - n esim. viivästämällä ensiksi tullutta yhden modulaatiovälin verran



Kanavointi

- n tapa siirtää samalla siirtojohdolla useita hyötysignaaleja samanaikaisesti
- n yleensä yksi yhteys tarvitsee vain murto-osan siirtomedian kapasiteetista
 - johdot hyötykäyttöön
- n 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

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



Aikajakoinen kanavointi TDM

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



Aallonpituusjakoinen kanavointi

WDM

- n samassa valokuidussa välitetään useita kanavia erivärisillä valoilla eli eri valon aallonpituuksilla
 - vrt. taajuusjakoinen kanavointi
- n monikertaistaa esim. Atlantin ylittävien valokuitujen siirtokapasiteetin ilman uusien kaapeleiden vetoa
- n 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

- n eri lähetteet kanavoidaan aika- ja/tai taajuusjakoisesti
 - .. saatuja aikavälejä tai taajuuksia voidaan käyttää mielivaltaisesti, kunhan lähettäjä saa tiedon siitä, mitä kanavia kulloinkin tulee kuunnella
- n käytetään 3. sukupolven matkapuhelinverkoissa



Esim: GSM-verkon kapasiteetti

n GSM-verkossa käytetään

- .. taajuusjakoista kanavointia

- n verkon käyttämä taajuusalue jaetaan 200kHz:n levyisiin radiokanaviin

- .. aikajakoista kanavointia

- n radiokanavat jaetaan kahdeksaan 577 μ s pituiseen aikaväliin

n Millä muilla keinoilla voitaisiin lisätä kapasiteettia solukoverkossa?



Shannonin teoreema

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

n Tutkii signaalin ja kohinan suhdetta

C = yhteyden suurin teoreettinen siirtokyky

B = kaisanleveys

S/N = signaali-kohinasuhde