



Aalto-yliopisto
Teknillinen korkeakoulu

Tiedonsiirron perusteet

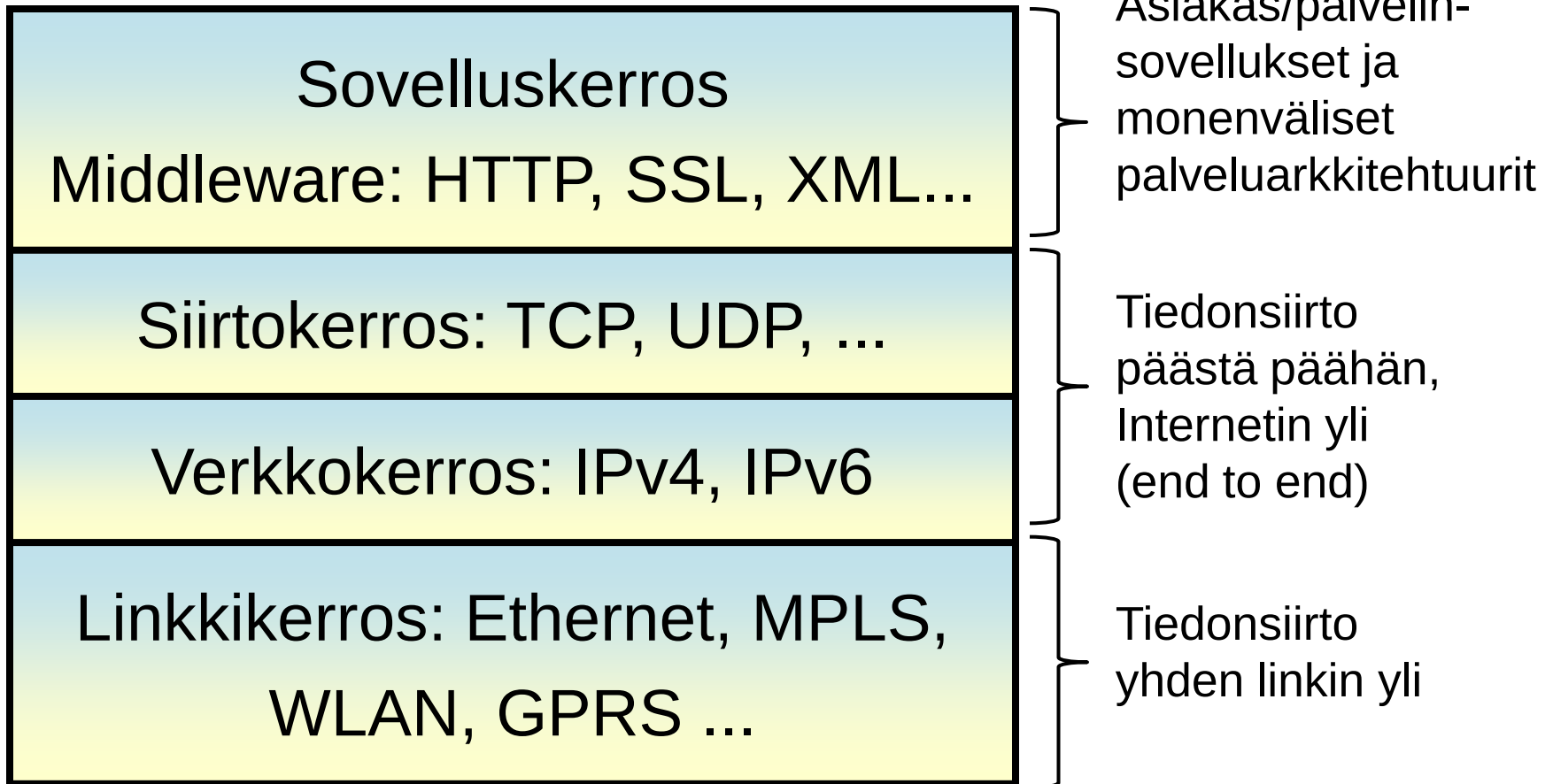
Jouko Kurki

T-110.2100 Johdatus tietoliikenteeseen
kevät 2010

Viime Luennolla

- Datalinkkikerroksen palvelut
 - linkkikerroksella oma osoitteistus (48 bittinen MAC-osoite), jonka perusteella kehykset toimitetaan oikeille vastaanottajille samassa (yhdessä) verkossa.
 - virheiden ilmaisu, joskus virheiden korjaus.
- Piirikytkentäsissä järjestelmissä kiinteä point-to-point yhteys käyttäjien välillä, vakio bittinopeus.
- Ethernetissä jaettu (broadcast) kanava: Monta käyttäjää käyttää samaa tietoliikennekanavaa (esim. kaapeli). Multiple access (monipääsy) yhteyskäytännöt säätelevät käyttöä. Ethernetissä käytössä satunnaispääsy (Random access). Tämä tarjoaa koko linkin kapasiteetin käyttäjälle, jos on vain yksi käyttäjä, mutta ruuhkautuu jos käyttäjiä tulee paljon.
- Eri linkkikerros standardeilla omat toteutusteknologiat
 - Piirikytkentäiset järjestelmät
 - Ethernet
 - kytketyt LAN:it
 - Virtualisoitu verkko linkkikerroksena: MPLS
- Langattomissa verkoissa tarvitaan uusia menetelmiä törmäysten hallintaan: törmäysten välttämistä - CSMA/CA ja WLAN:in RTS/CTS signaali piilotetun terminaalin ongelman välttämiseksi
- Virheiden havaitseminen ja korjaaminen tärkeää verkon liian kuormittumisen välttämiseksi. Langattomissa verkoissa erityisen tärkeää ja siellä käytössä hyvin kehittyneet virheenkorjaustekniikat.

TCP/IP-protokollapino



Luennon sisältö

- Tiedonsiirron perusteet ja fyysinen kerros, haetaan vastausta kysymykseen:
 - Miten bitteinä oleva tieto siirtyy kaapeleissa, kuidussa ja radioaalloilla solmusta seuraavaan (linkkien väli) – pitkiäkin matkoja ?
 - Mitkä tekijät vaikuttavat ja rajoittavat siirtoa ? – mitkä ovat perimmäiset fysikaaliset rajat jotka määräävät tiedonsiirron tehokkuuden ?
- Signaalin (mm. puheen) näytteenotto ja koodaus. 64 kb/s puhelinsignaali. Nyqvistin teoreema näytteenotolle. Bittinopeudet, bittivirhesuhde.
- Kanavanjako / multipleksointi: Aikajako, taajuusjako, koodijako
- Siirron rajoitukset: Kohina, häiriöt radiotaajuuksien tai kaistan riittäminen. Signaalikohinasuhteesta johtuva bittivirhesuhde. Shannon'in teoreema maksimisiirtonopeudelle kanavassa
- Yhteys linkkikerroksen ja fyysisen kerroksen välillä
- 2 Megan tietoliikennesignaali, optinen siirto: piirikytkentäinen tiedonsiirto: PDH ja SDH; Optisen siirron periaatteet: WDM (Wavelength Division Multiplexing) ja OTN (Optical Transport Network)

Data ja informaatio

- Data: koneiden tai ihmisten käsiteltävissä oleva tiedon esitysmuoto
- Informaatio: datan merkityssisältö
- Tieto: ihmisen ymmärrystä
- Näistä määritelmistä on variaatioita ja vaihtelua eri tieteenaloilla
 - Aihe on lähellä filosofiaa ja siitä on kirjoitettu kirjoja
- Esimerkkejä:
 - Pakkaamattomalla TIFF- ja pakatulla GIF-formaatin kuvalla saattaa olla sama informaationsisältö, mutta GIF-kuvan käyttämä datamäärä on pienempi
 - JPEG-pakkaus hävittää kuvasta silmälle näkymätöntä informaatiota
 - TCP ja IP-protokollalle sovellustason siirrettävät tavut ovat dataa; HTTP kohtelee otsaketietoja informaationa mutta siirrettäviä HTML-tiedostoja datana; selaimelle HTML on informaatiota

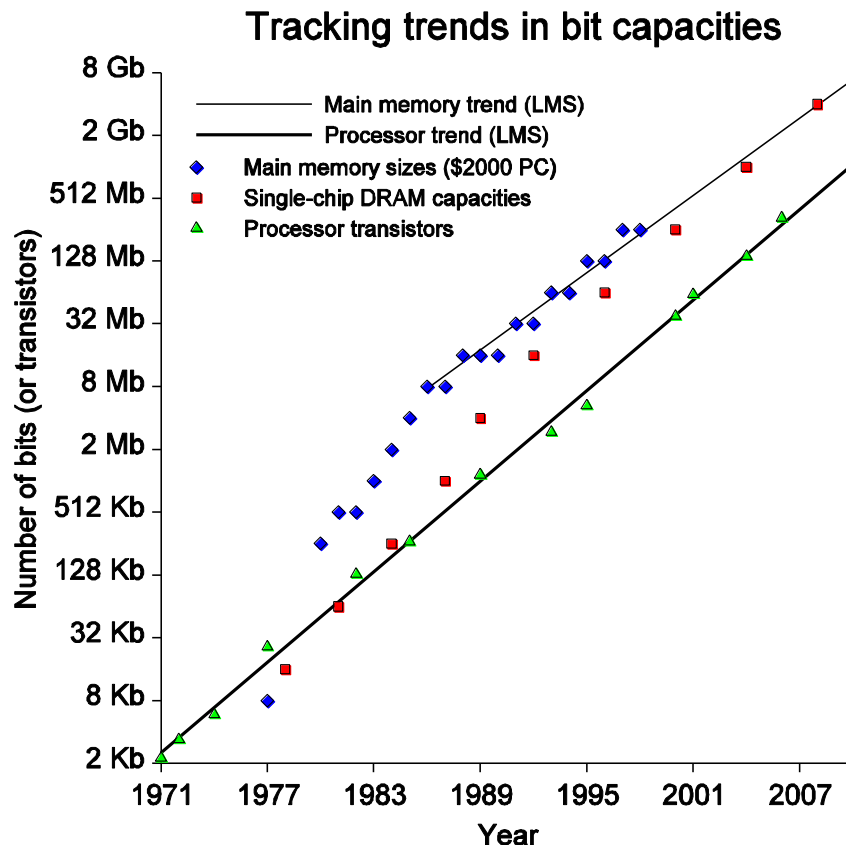
Tiedonsiirto

- Informaatio *koodataan symboleina* dataan, jota siirretään tietyn *kaistanleveyden* ja muita ominaisuuksia omaavan *median* ylitse käyttäen sopivaa *linjakoodausta*

Digitaalisen datan siirtäminen analogisessa maailmassa

- Ensinnäkin: Miksi ylipäänsä informaatio pitää siirtää digitaalisena ?
 - **Digitaalinen siirto on tehokasta.** Mikroelektroniikka kehittyy valtavaa vauhtia (Mooren laki !), tehokkuus kasvaa ja kustannukset pienenevät, erityisesti siirrettävää bittiä kohti.
 - Digitaalinen tiedonsiirto voidaan salata.
 - Digitaalisena informaatiota on helppo varastoida ja siirtää, se ei muutu eikä tietoa häviä varastoitaessa.
 - Kaikki siirto ei ole kuitenkaan digitaalista, esim. FM-radio
- Miten sitten bittejä siirretään ?
 - Bitit on koodattava jotenkin
- Kantataajuusmenetelmässä (baseband) bitit muutetaan suoraan esim. Jännitteeksi (kuparikaapelit) tai valopulsseiksi (valokuitu). Tämä toimii yhteyksillä, joissa on suhteellisen vähän häiriöitä.
- Ilmassa ei voi siirtää jännitettä, mutta sähkömagneettiset aallot (radioaallot ja valo) etenevät ilmassa. Siirrettävällä signaalilla muokataan kantoaaltoa, joka etenee ilmassa. Vastaanottopäässä tehdään päinvastaiset toimenpiteet (de-modulaatio).
 - Amplitudimodulaatio (AM), Taajuusmodulaatio (FM), Vaihemodulaatio (PM)
 - Nykyään on myös monimutkaisempia koodauksia
 - Esim. UMTS:n käyttämä CDMA
 - OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiple Access) valtaa alla uusissa järjestelmissä: WLAN, Digi-TV, Wimax, LTE

Mikroelektroniikan kehitys ja Moore:n laki



Kuvat ja taulukko n. v. 2007

- **Moore:n laki:** ”Tietokoneiden / mikroelektroniikan teho kaksinkertaistuu kahden vuoden välein”
- Tämä ilmenee prosessoritehojen, muistikapasiteettien, tietoliikenteen siirtonopeuksien ym. valtavana kehittymisenä.
- Jo nyt valtava tiedonsiirtokapasiteetti mahdollistaa mm. Internetin välityksellä HD-videot.
- **Tulevaisuuden palvelut ? - kapasiteetin tarjoamista palveluista puhutaan loppukurssista.**

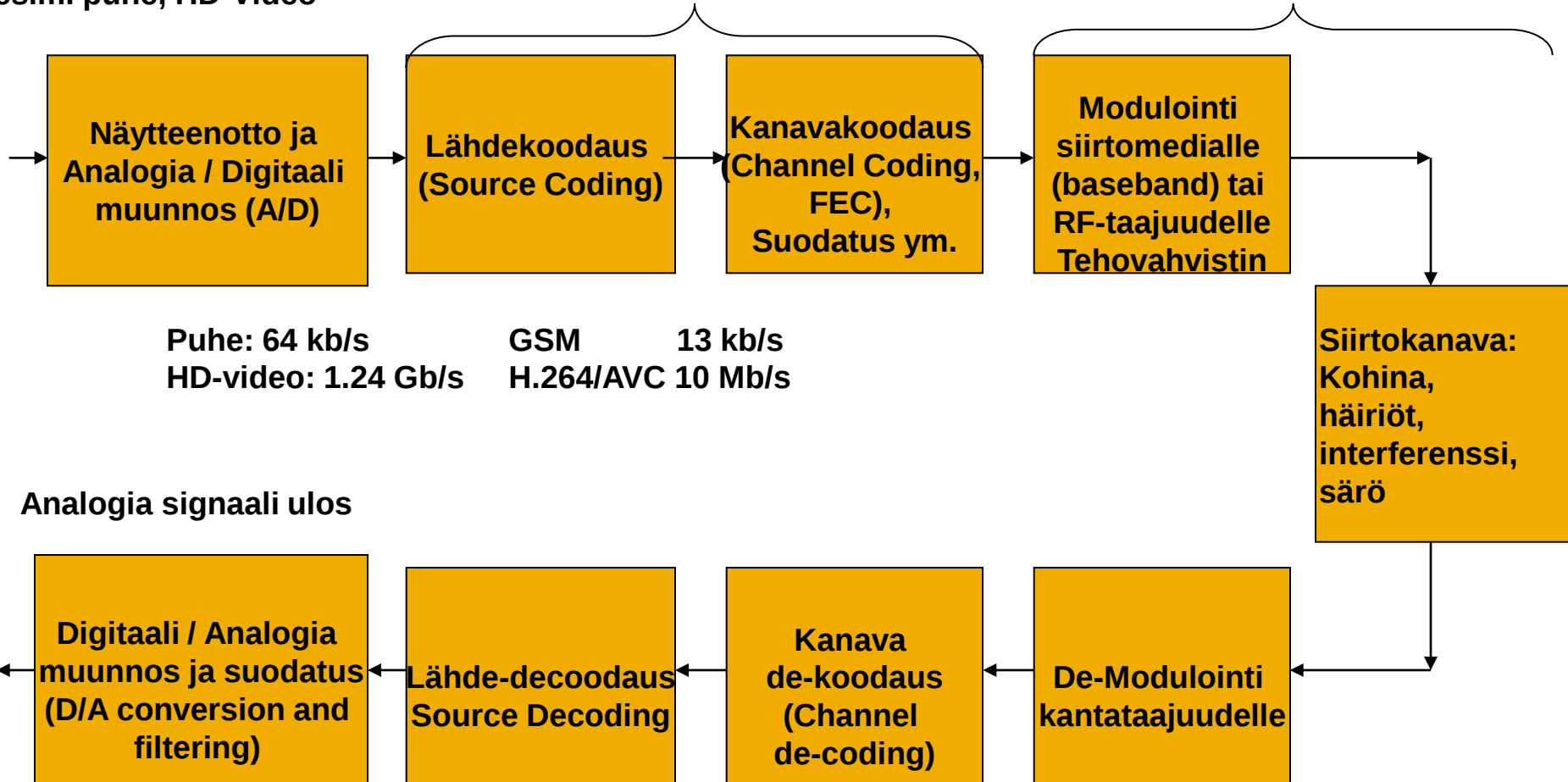
	2001	2005	2010	2016
Microprocessor Speeds (MHz)	1,684	5,173	11,511	28,751
Gate Length (nm)	65	32	18	9
DRAM Cost/bit (micro-cents)	7.7	1.9	.34	.042
DRAM memory size	512M	2G	8G	64G

Tiedonsiirtojärjestelmän osat

Analogiasignaali sisään:
esim. puhe, HD-Video

Kantataajuusprosessointi
Baseband

Siirtokaista (RF)
Passband



Diskreetin informaation koodaus

- Kirjoitettu kieli muodostuu aakkosista eli symboleista, jotka voidaan numeroida
 - ASCII koodi : 7 tai 8 bittiä / merkki kirjaimille a-z, numeroille ja välimerkeille
 - ISO-8859 -perhe: länsimaisille kielille
 - Unicode (ja UTF): kaikille kielille
- Kuvat voidaan digitoida kuten ääni ja muu analoginen data
 - Myös liikkuva kuva

Lähdekoodaus ”pakkaus”

- Lähteestä tuleva informaatio pyritään saattamaan muotoon jossa sen viemä tila varastoitaessa tai siirrettäessä on huomattavasti pienempi.
- Idea perustuu Shannon:in Informaatioteorialle
 - N erilaisen vaihtoehdon esittämiseen tarvitaan $\log_2 N$ bittiä
- Mikäli datassa on toistuvia informaationsymboleja, niiden esittämiseen voidaan käyttää sovittuja bittikuvioita
- Pakkaamiseen ja purkamiseen tarvitaan algoritmi, jonka ohjelmisto- tai rautatoteutus tai on asennettuna valmiiksi
- Lähdekoodaus voi olla
 - Häviötöntä: lähetetty data pystytään palauttamaan täysin alkuperäisenä
 - Häviöllistä: Datasta hävitetään tietoa jota esim. ihmiskorva tai ihmissilmä ei pystyisi kuitenkaan havaitsemaan; tähän perustuvat lähes kaikki nykyiset audion ja videon ”pakkaus” algoritmit
- Algoritmeja ja pakkausformaatteja on paljon ja ne soveltuvat eri datatyypeille:
 - Lempel-Ziv, Huffman, JPEG, MPEG-2, MPEG4/AVC (H.264), (MPEG-1 layer 3 (MP3), AAC jne.
 - Lähdekoodaus käsitellään kurssilla T-111.2350 ”Multimediatekniikka”

Termejä: simplex ja duplex

- Simplex: yksisuuntainen tiedonsiirto
 - Esim. yleisradio
- Half-duplex: vuorotteleva kaksisuuntainen tiedonsiirto
 - Esim. radiopuhelin
- Duplex (full duplex): samanaikainen molemmansuuntainen tiedonsiirto
 - Esim. puhelin
- Internet ja muut tietoverkot voidaan rakentaa yhdistelemällä simplex-yhteyksiä, mm. koska liikenne on epäsymmetristä (kuten WWW-liikenne)
 - Käyttäjälle näkyvä palvelu on kuitenkin duplex

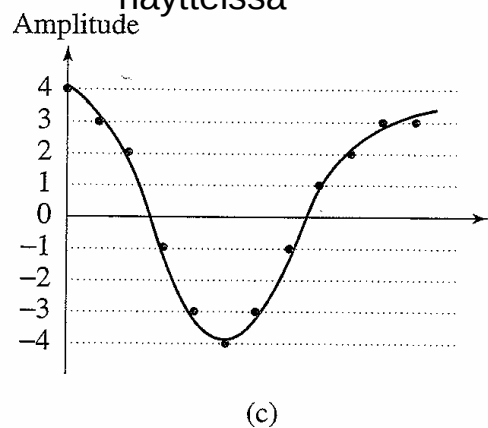
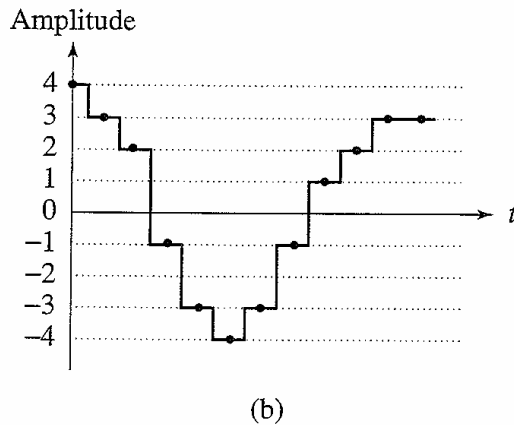
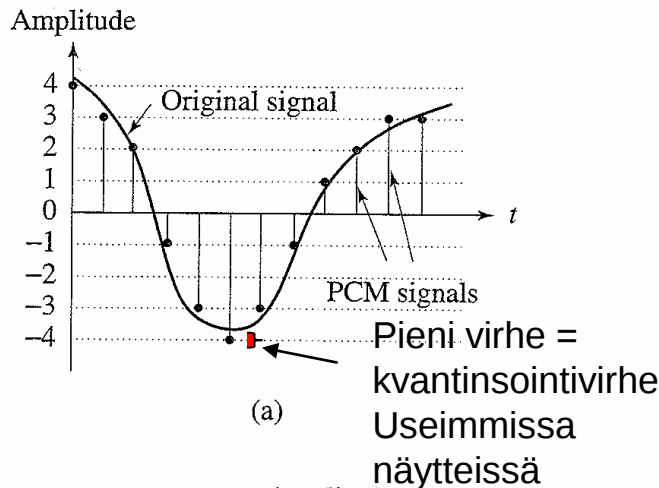
Termejä: montako vastaanottajaa

- Täsmälähetys, **unicast**: lähetetään yhdelle vastaanottajalle
 - Normaali Internet-liikenne
- Yleislähetys, broadcast: lähetetään kaikille vastaanottajille
 - Yleisradioliikenne
 - Tiettyjen palveluiden löytäminen lähiverkossa (ARP...)
- Ryhmälähetys, **multicast**: kohdistetaan ryhmälle (palvelun tilanneita) vastaanottajia
 - Käytetään Internetissä esim. videokuvan jakamiseen, vastaanottaja tilaa liikenteen liittymällä (join) multicast-ryhmään. Kun käyttäjä lopettaa palvelun käytön siitä lähdetään (leave). Multicast säästää tehokkaasti kaistaa, mutta vaatii multicast kykenevät reitittimet.
 - Internetissä käytettävä tällöin multicast IP osoite-alueita:
- Jokulähetys, **anycast**: lähetetään viesti yhdelle vastaanottajalle joukosta, vastaanottaja valitaan ad-hoc

Analogisen informaation siirto digitaalisesti, PCM

- Näytteistys (Sampling)
- Pulssikoodimodulaatio (Pulse Code Modulation, PCM)
- Multipleksointi (Multiplexing)

Näytteenotto ja Pulssikoodimodulaatio, (Pulse Code modulation, PCM)



a) Alkuperäisestä signaalista otetaan näytteitä näytteenottotaajuudella $f_s > 2 \times$ signaalin suurin taajuus (esim. > 40 kHz audiosignaaleille)

a) PCM:ssä näytearvot esim. 8 b = 1 B koodataan lähimpään diskreettiin digitaaliseen koodisanan arvoon. Esim. 8 bitille 2^8 mahdollista 256 arvoa. Nämä 8 bitin näytearvot (esim. 10001000) voidaan siirtää bitteinä vastaanottajalle esim. siten, että "0" = 0 V ja "1" = 3 V (Cu- kaapeleissa).

b) Vastaanottaja muuntaa koodisanat takaisin analogiasignaaliiksi ja suorittaa alipäästösuodatuksen. Tuloksena saadaan sama signaali, joka lähetettiin lukuun ottamatta pientä ns.

kvantintointivirhettä, joka johtuu äärellisestä määrästä näytearvoja.

Näytteenotto ja Nyqvistin teoreema, S/N-suhde

- Näytteenotossa pätee **Nyqvistin teoreema**, jonka mukaan näytteenottotaajuus f tulee olla vähintään

$$f_s > 2 \times \text{signaalin suurin taajuus}$$

- Kun näin on alkuperäinen signaali voidaan palauttaa lukuun ottamatta äärellisestä näytteenottotasojen määrästä tulevaa virhettä => kohinaa.
- Esim. Audion tapauksessa suurin korvin kuultava taajuus n. 20 kHz, jolloin näytteenonttotaajuus pitää olla > 40 kHz (esim. CD audio 44.1 kHz)
- AD muunnoksen bittien määrän, sanelevat signaalin (S, Signal) kohinan (N, Noise) tehot seuraavasti:

$$(S/N) \sim 6 * n \text{ [dB]}, \text{ missä } n \text{ on näytteenoton bittien lukumäärä / näyte.}$$

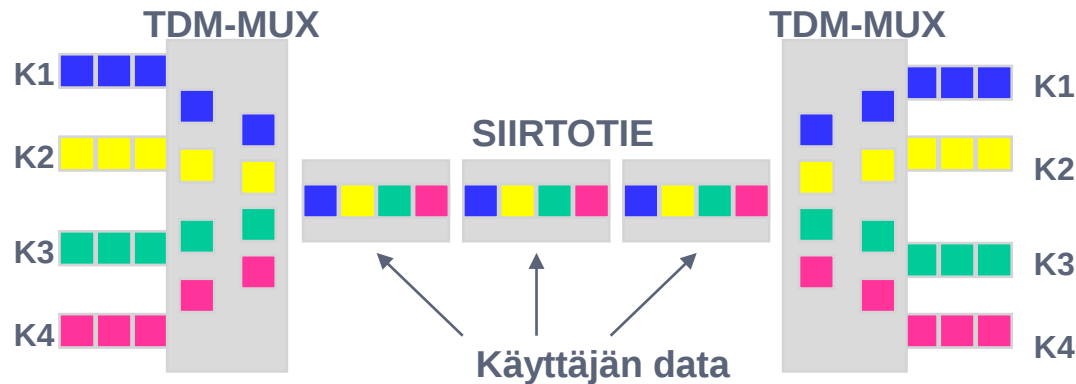
$$\text{Transmission bittinopeus on: } r_b = n * f_s \text{ [b/s]}$$

- Esim. puhelinverkossa näytteenotonopeus on 8 kHz ja bittien lukumäärä =8 b, jolloin $S/N = 6*8 \text{ dB} = 48 \text{ dB}$, ja bittinopeus =8 b*8 kHz = 64 kb/s. Vastaavasti CD audiossa näytteenonttonopeus = 44.1 kHz, ja bittien lukumäärä 16. Tällöin $S/N = 96 \text{ dB}$ ja bittinopeus $16 \text{ b} * 44.1 \text{ kHz} * 2 = 1.41 \text{ Mb/s}$ (tekijä 2 johtuu stereosta). Ts. hyvää laatua saa, mutta se maksaa bittinopeudesta johtuvana kustannuksena.

Aikajakokanavointi (TDM multipleksointi), monta käyttäjää linjalla

Siirron tehostamiseksi **usean käyttäjän tieto** lomitetaan **siirtotielle** joko:

- Tavulomituksella tai
- Bittilomituksella
- Useimmiten käytetään tavulomitusta. Tällöin esim. puhelinsignaalin näytteenoton 8 bittiä = 1 tavu pistetään linjalle, sitä seuraa seuraavan käyttäjän tavu jne.
- Yhteensä 30 + 2 muuta 64 kb/s kanavaa multipleksoidaan yhdeksi $32 \times 64 \text{ kb/s} = 2.048 \text{ Mb/s}$ signaaliksi. Tämän on **puhelinverkon 2 Megabitin signaali**



- Synkroninen aikajako antaa kaikille osapuolille saman palvelutason
- Tämän seurauksena käyttämättömät aikajaksot siirtyvät “tyhjinä”
 - tasapuolisuus säilyy kaikissa tilanteissa,
 - Mutta siirtokapasiteettia jää usein käyttämättä
- Joskus yhdistetään aikavälejä, jolloin siirtonopeus kasvaa. Esim. GPRS käyttää useampaa GSM:n aikaväliä (GSM:ssä 8 aikavälin multipleksointi yhteen TDMA kehykseen)

Bittien siirto - Ohjattu ja ohjaamaton siirtomedia

Ohjattu siirtomedia

- Kuparijohto
- Kierretty parikaapeli
- Koaksiaalikaapeli
- Valokuitu
- Myös massamuistivälineet

Ohjaamaton siirtomedia

- Sähkömagneettinen säteily
- Radioaallot
- Satelliittiyhteydet
- Mikroaallot
- Laser
- Infrapuna
- Ääniaallot (ilmassa)

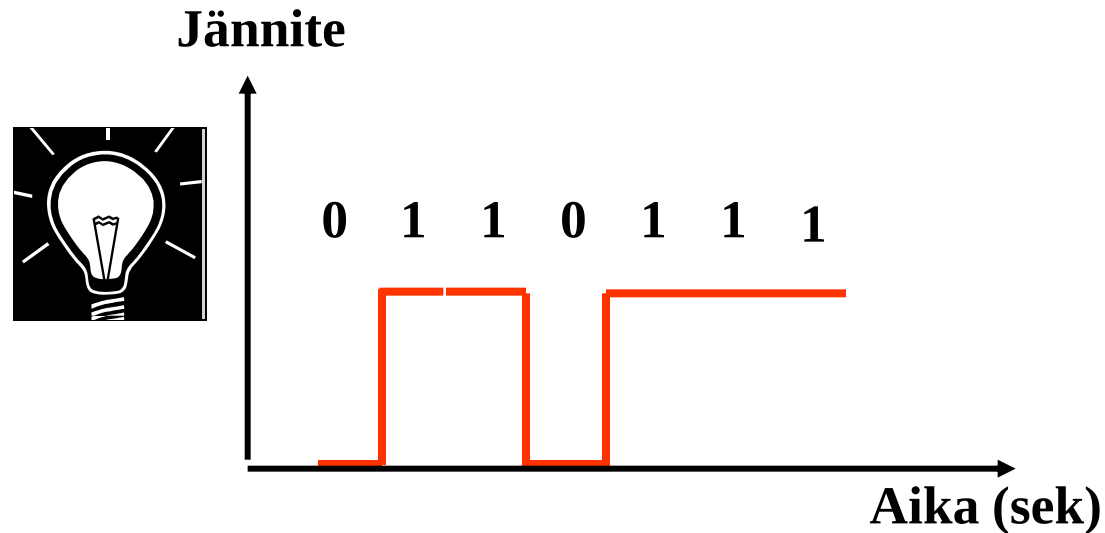
Digitaalisen datan siirtäminen analogisessa maailmassa

- Bitit on koodattava jotenkin
- Kantataajuussirrossa bitit muutetaan suoraan jännitteeksi kuparikaapelissa tai valopulsseiksi kuidussa. Tätä käytetään mm. kaapeleissa ja se toimii yhteyksillä joissa on suhteellisen vähän häiriöitä.
- Jännitettä ei voi siirtää ilma yli; siihen tarvitaan radioaaltoja, signaali muokkaa kantoaaltoa. Tämä auttaa erottamaan signaalin taustakohinasta myös häiriöisillä yhteyksillä kaapeleissa (esim. ADSL laajakaistaliitäntä Cu-parikaapelin avulla koteihin, kaapeli-TV)
 - Amplitudimodulaatio (AM)
 - Taajuusmodulaatio (FM)
 - Vaihemodulaatio (PM)
 - Jne.
- Nykyään käytetään usein monimutkaisempia modulaatioita / koodauksia
 - OFDM modulaatio (WLAN, Digi-TV, LTE, ADSL)
 - Esim. UMTS:n käyttämä CDMA

Bittien siirto kuparikaapelissa

Siirto tapahtuu laittamalla jännitteeksi loogisen nollan kohdalla 0 V ja loogisen ykkösen kohdalla esim. 3 V. Muitakin vaihtoehtoja koodaukseen on.

Siirto aika / jänniteakseleilla



Kantoaallon modulointi digitaaliselle datalle

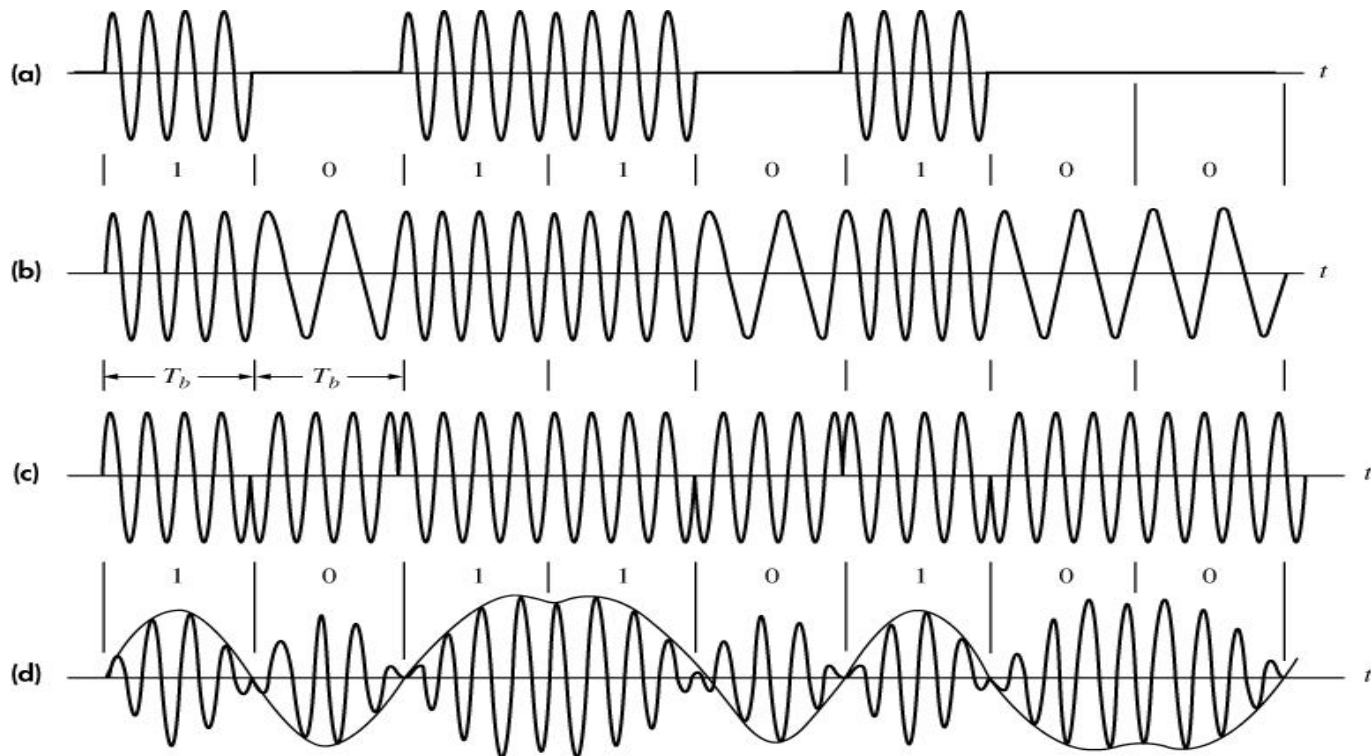
Jännitettä ei voi siirtää ilma yli; siihen tarvitaan radioaaltoja.

Alla esimerkkejä miten siniaaltoja moduloimalla loogiset 0/1 voidaan siirtää

(a) amplitudiavainnuksella (AM, Amplitude Shift Keying),

(b) taajuusavainnuksella (FSK, Frequency Shift Keying) tai

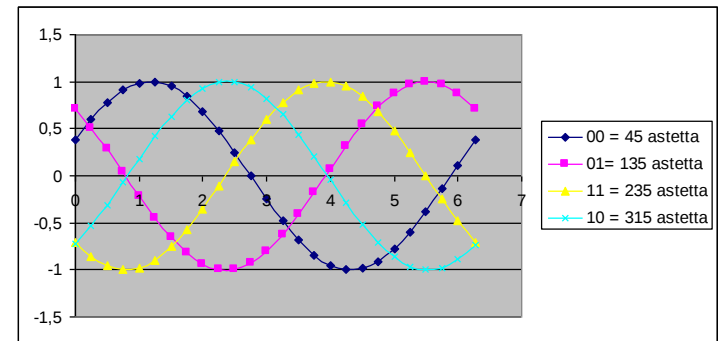
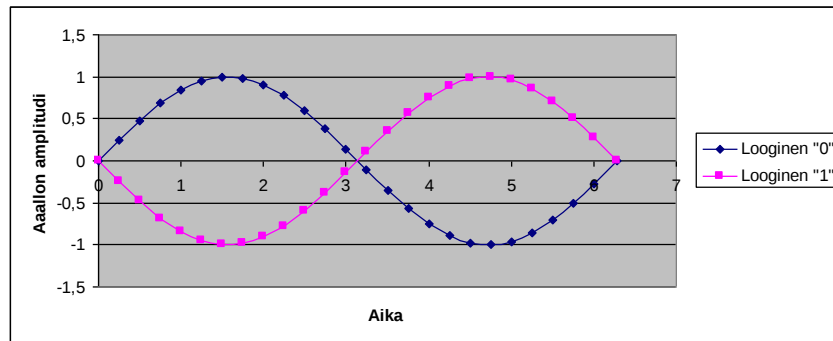
(c) vaiheavainnuksella (PSK, Shift Keying)



Bittien modulointi radiotiellä

Binary Phase Shift Keying (BPSK)

- Muutetaan vaihetta (Phase)
- Sopimus esim. Looginen "0" = yksi siniaalto
- Looginen "1" on siniaallon vaiheeseen lisätty 180 astetta
- BPSK on hyvä häiriöllisessä ympäristössä, mutta ei tehokas, käyttö mm. Signaalintiedon välittämiseen

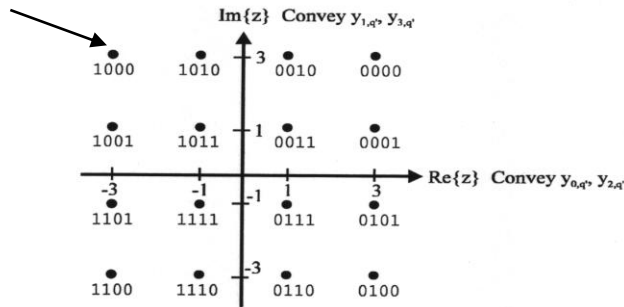


Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)

- Muutetaan vaihetta (Phase), nyt vaihetiloja 4
- Sopimus esim. Looginen "00" = Siniaallolla 45 asteen vaihesiirto, jne.
- Huomataan, että voidaan välittää 2 bittiä / aalto; vaihetiloja $M=4 = 2^2$

QAM ja OFDM

Konstellaatiopiste,
tässä välitetään
bitit "1000"



Yleisesti kun tilojen määrä $M = 2^n$, niin jokaisella modulaatiosymbolilla voidaan välittää n bittiä. Ohessa esimerkkinä tilat 16-QAM modulaatiolle, jossa $M=16$. Tässä kuitenkin pelkkien vaihetilojen lisäksi muutetaan myös aallon amplitudia. QAM:sta käytössä aina 256-QAM radiojärjestelmissä ja jopa 4096-QAM (DVB-C2)

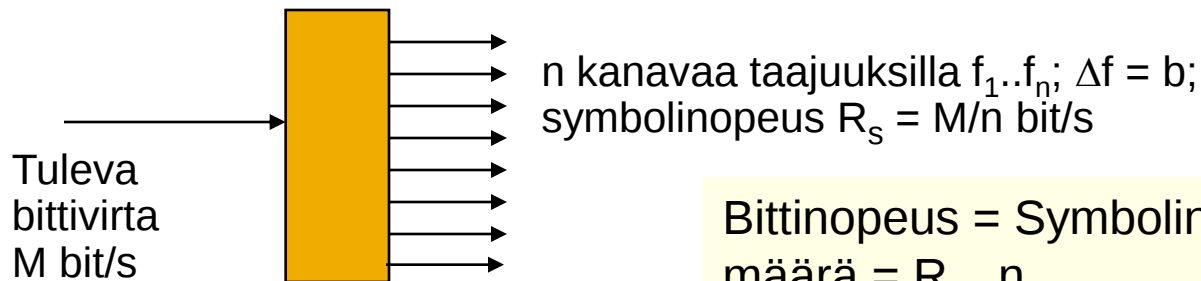
QAM: QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

16-QAM ja 64-QAM

n kpl bittejä (näissä 4/6 bittiä) lähetetään käyttäen yhden konstellaatiopisteen amplitudi ja vaihearvoa.

OFDM modulaatio (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

Tuleva bittivirta jaetaan useille rinnakkaisille kanta-aalloille (taajuudelle), jotka kukin QAM moduloidaan. Laajasti käytössä: WLAN, digi-TV (DVB-T/T2), LTE = "3.9G"

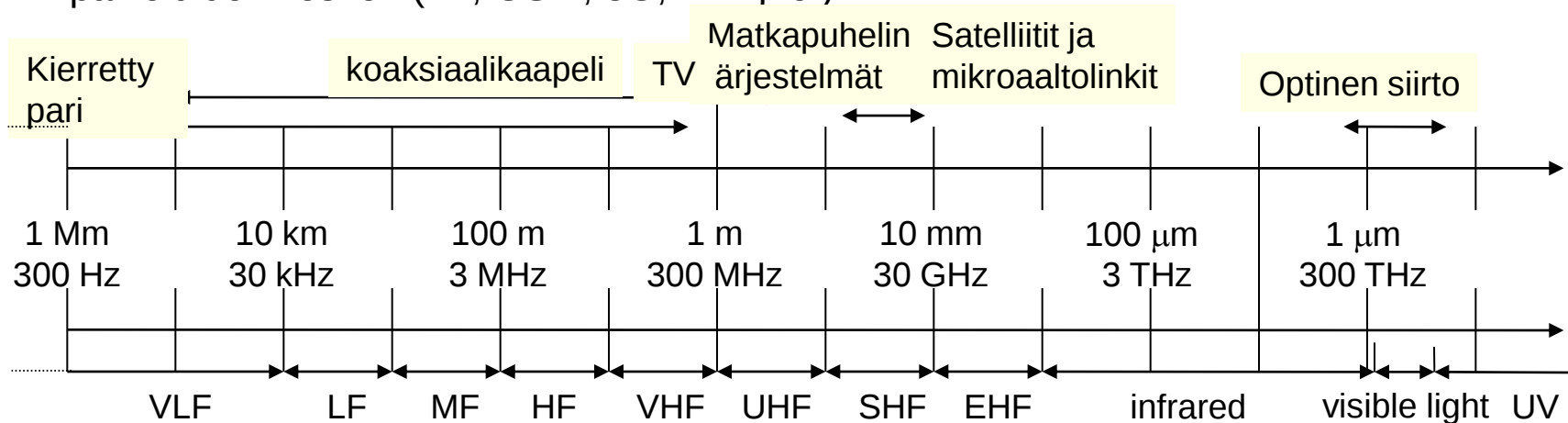


Bittinopeus = Symbolinopeus x tilojen määrä = $R_s * n$

Taajuudet tietoliikenteessä

Kantataajusosaassa suoritettujen moduloimien jälkeen signaali siirretään kantataajudella (mm. kierretty pari) tai **siirretään** vielä **halutulle siirtotaajuudelle**. Esim. eri TV-ohjelmat moduloidaan aina samalla tavalla, mutta ne ”up-konvertoidaan” eri taajuuksille.

Tämä on tarpeen, että käytettävissä oleva taajuusalue saadaan jaettua tarkasti eri palveluiden kesken (TV, GSM, 3G, LTE jne.)



VLF = Very Low Frequency; LF = Low Frequency; MF = Medium Frequency; HF = High Frequency; VHF = Very High Frequency; UHF = Ultra High Frequency; SHF = Super High Frequency; EHF = Extra High Frequency; UV = Ultraviolet Light

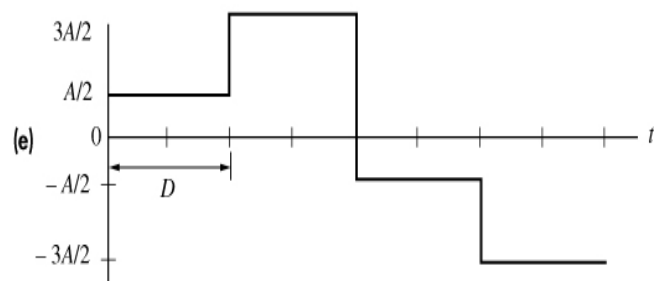
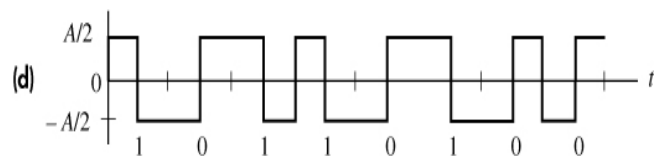
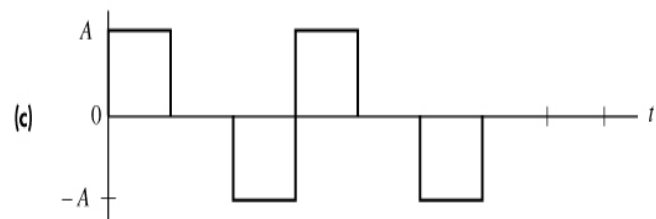
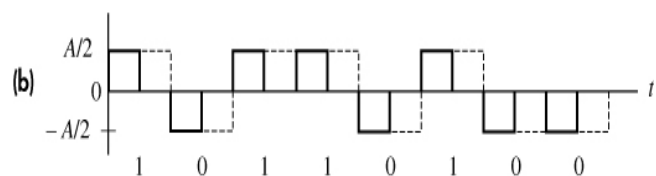
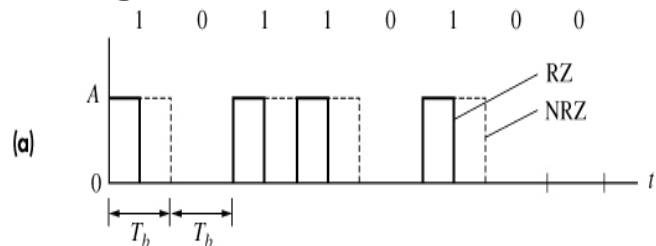
Taajuuden (f) ja aallonpituuden välinen yhteys : $\lambda = c/f$

λ = aallonpituus, valon nopeus $c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 0.3 \text{ km / ms}$, f = taajuus,
Esim.: $\lambda = 0.3 \text{ m @ } 1 \text{ GHz}$, $12 \text{ cm @ } 2.5 \text{ GHz}$.

Synkronoitu ja synkronoimaton tiedonsiirto

- Vastaanottajan pitää tunnistaa data
- Synkronoimattomassa tiedonsiirrossa vastaanottaja tunnistaa viestin alun (yksi tavu dataa) ja ottaa näytteitä riittävän usein saadakseen viestin
 - Esim. start-bitti, 8 databittiä, pariteetti ja stop-bitti
- Yleensä siirto on synkronoitua. Synkronoidussa tiedonsiirrossa lähettäjällä ja vastaanottajalla on kellot samassa ajassa, vastaanottaja tietää milloin bitin pitäisi tulla
 - Tehokkaampaa
 - Tarvitaan kellojen synkronointi molemmissa päissä. Tämä saadaan aikaan tarkoilla kideoskillaattoreilla, joita hienosäädetään tulevan datan mukaan. Siirtoformaatti vaikuttaa siihen kuinka hyvin kellon ”uuttaminen” tulevasta signaalista onnistuu. Esim. Manchester koodaus ja RZ (Return to Zero) koodaus ovat tehokkaita tässä.

Synkronoitu kantataajuuskoodaus



Kaksitaso PAM formaatteja (PAM = Pulse Amplitude Modulation)

(a) Unipolaarinen RZ & NRZ

0v /positiivinen jännite

(b) Polaarinen RZ & NRZ

Positiivinen / negatiivinen jännite

(c) Bipolaarinen NRZ

(d) Jaettu-vaihe Manchester

e) Polaarinen nelitaso NRZ

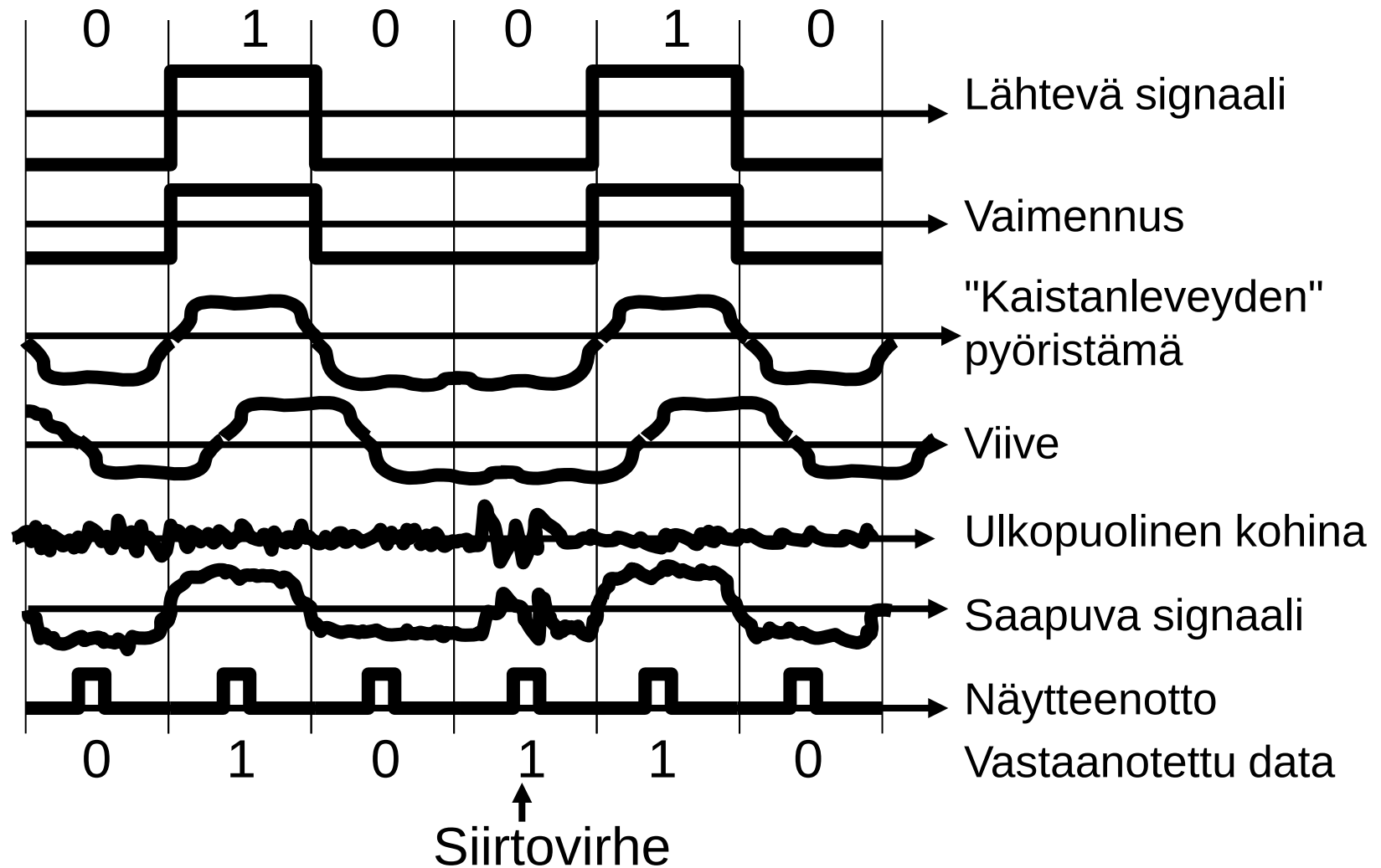
RZ = Return to Zero

NRZ = Non Return to Zero

Siirtotien laatua kuvaavia tekijöitä

- Kaistanleveys (bandwidth)
 - Käytettävissä oleva taajuusalue
- Kohina (noise)
 - Taustalla olevat häiriösignaalit, joista viesti on erotettava
- Siirtokapasiteetti (capacity)
 - Montako bittiä sekunnissa saadaan siirrettyä (lasketaan edellisistä)
- Bittivirhesuhde (Bit Error Rate, BER)
 - Virheellisten bittien määrä/ kaikkien bittien määrällä jollain aikavälillä.
- Viive (latency)
 - Kauanko bitiltä kestää matkata päästä päähän
- Huojunta (jitter)
 - Perättäisten viestien aikavaihtelut
- Vaimennus (attenuation)
 - Kuinka usein signaalia on vahvistettava (riippuu mediasta)

Signaali etenemisen jälkeen

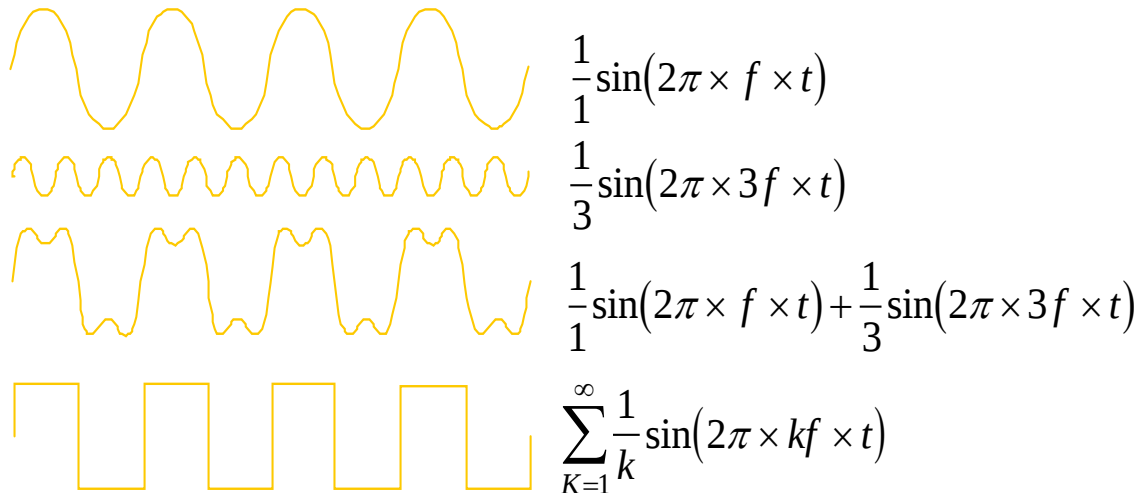


Siirtohäiriöt

- Kohinaa
 - Vaikeuttaa signaalin havaitsemista
 - Signaalin tulovoimakkuus ei ole niin tärkeä kuin signaalin tulovoimakkuus suhteessa kohinaan, josta se erottuu
 - Lämpöenergia komponenteissa
 - Radiolinkeillä muut radiolähetykset ja universumin taustakohina
- Häiriöpurskeita ja ylikuulumista
 - Esim. matkapuhelimet
- Signaalien ylikuuluminen viereisistä johtimista
- Katkoksia

Digitaalisen signaali taajuudet ja kaistanleveys

- Tarkastellaan säännöllistä bittijonoa (alla), jossa nollat ja ykköset peräkkäin. Tällä saadaan kuva minkälaisia taajuuksia tietynlainen bittivirta sisältää.
- Bittinopeudella R olevan signaalin (Non Return to Zero, NRZ) perustaajuustaajuus on $f = R/2$ [Hz], koska yhden sinin jakson aikana ehditään lähettää 2 bittiä: 1 ja nolla. Yo. Kaava merkitsee, että $R = 2 \cdot f$, eli jos $f = 1$ MHz, niin R voisi olla teoriassa jopa 2 Mb/s. Tällöin pulssimuoto on kuitenkin täysin pyöristynyt; tarvitaan korkeampia taajuuksia, jotta signaalista tulee enemmän kanttimainen. Asiaa on havainnollistettu alla lisäämällä perustaajuuden kerrannaisia.

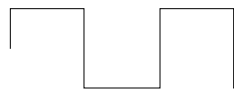


Median rajoitettu kaistanleveys

- Siirtomedian kaistanleveys rajoittaa taajuuksia, jotka pääsevät läpi. Vain taajuudet, jotka ovat pienemmät kuin kaistanleveys pääsevät läpi, muut suodatetaan pois. Signaali vääristyy jos signaalin kaikki taajuuskomponentit eivät pääse läpi.
- Käytännössä NRZ-signaalille (binääri = kaksitaso-koodaus) tarvitaan taajuuksia, jotka ovat n. $f_{\max} \sim R \cdot 0.70$. Yo. Esimerkissä siis $R \sim f/0.7 = \sim 1.4$ Mb/s. Tämä pätee satunnaiselle bittijonolle suhteellisen hyvin (mutta pulssimuoto vaikuttaa).
- Tässä siis 1.4 Mb/s signaali saadaan läpi kun siirtokanavalla on kaistaleveys $f_{\max} = 1$ MHz; eli kanavan läpi menee taajuudet 0...1 MHz.

$$\sum_{K=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(2\pi \times kf \times t)$$

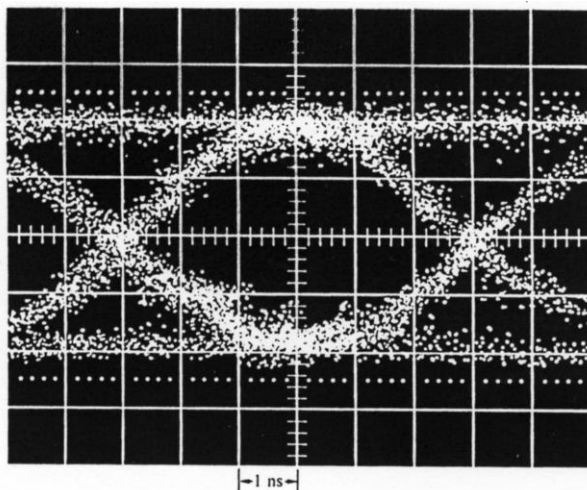
$$\frac{1}{1} \sin(2\pi \times f \times t) + \frac{1}{3} \sin(2\pi \times 3f \times t)$$



Kaistaleveys $f - 3f$



Esimerkki pulssimuodosta kun mukana bittinopeuden kolmas harmoninen taajuus



Eräs (tyypillinen)
todellinen pulssimuoto

Kaistanleveys ja Nyqvistin kaava

- **Kaistanleveys tarkoittaa tietyn kanavan läpäisevää taajuusaluetta**
 - Tyypillisesti siirtotien sähköiset ja/tai optiset ominaisuudet määrittävät lähetettävälle pulssille tietyn minimipituuden, jotta se voitaisiin havaita luotettavasti vastaanottopäässä
 - Pulssin minimipituudesta saadaan vastaava korkein taajuus, joka pitää siirtää: Suuri bittinopeus -> suuri kaistan tarve
 - Kaistaleveys ilmaistaan Hertzeinä, Hz
 - Eri siirtomedioilla kaista rajoittuu fyysisistä syistä. Sääntelyllä allokoidaan radiokaistaa eri palveluille, esim. 3 G kaistaa myydään 5 MHz taajuusalueina.
- **Kapasiteetti on tietyn kanavan läpi siirrettävän datan määrä**
 - Ilmaistaan bitteinä sekunnissa, b/s
- **Nyqvistin teorian mukaan kohinavapaan siirtotien teoreettinen maksimi siirtonopeus on**
 - **$R_{\max} = 2 \times W \times \log_2 M$ [b/s]**
 - W = siirtotien kaistanleveys
 - M mahdollisten siirtotasojen lukumäärä.
- Esim. binäärikoodauksella (2 siirtotasoa) $R_{\max} = 2 \times W$.
- Käytännössä tähän ei päästä, vaan bittinopeus on ainakin n. 25 % pienempi johtuen ei-ideaalisesta pulssimuodosta, äärellisestä suodattimien jyrkkyyksistä yms. Lisäksi langattomassa siirrossa virheenkorjauskoodaus (kanavakoodaus) vie vielä jopa 50 % bittiteistä.

Maksimi siirtonopeus ja kohina

- Siirtoteillä ja vastaanottimessa syntyvä kohina aiheuttaa rajan pienimmälle havaittavissa olevalle signaalin teholle. Mitä suurempi kohina sitä suurempi todennäköisyys virheille biteissä.
- Kohinalle on olemassa monia syitä, tärkeimpänä terminen kohina joka johtuu elektronien satunnaisesta liikkeestä vastuksissa ja puolijohdekomponenteissa, radioteillä muiden radiojärjestelmien aiheuttama ylikuuluminen ja interferenssi sekä universiumin taustakohina.
- Nykyisissä piireissä päästään hyvin lähelle kohinan aiheuttamaa rajaa. Lämpötilan pienentäminen alentaa kohinaa, mutta tekee normaalisovellutuksiin laitteista epäkäytännöllisiä ja hyvin kalliita.
- **Ratkaiseva tekijä on S/N suhde.** Signaalitehoa lisäämällä voidaan tilannetta parantaa joka vastaanottimessa kohinatason ollessa vakio.

Signaali-kohinasuhde ja Shannon'in kaava

S/N (en. Signal-to-Noise ratio, S/N tai SNR) ilmaistaan usein desibeleinä:

$$(S/N)_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{\text{Signaaliteho}}{\text{Kohinateho}}$$

Shannon'in teoreeman mukaan suurin saavutettavissa oleva kapasiteetti C siirtoteillä (b/s), jolla kaistaleveys on W (Hz) on:

$$C = W \log_2 (1 + S/N) \sim 1/3 * W * (S/N)_{\text{dB}} \text{ [b/s]}$$

- Huom.! Kaavan tarkassa alkuosassa S/N on signaalikohinasuhde paljaana lukuna (ei dB); toinen versio oikealla varsin tarkka approksimaatio kun $S/N > 3$ (Lähde Rohde & Schwartz, UMTS)
- Shannonin kaavassa signaalitasojen määrä ei vaikuta, kaava määrittelee suurimman mahdollisen bitinsiirtokapasiteetin.
- Esim. $S/N = 20$ dB eli paljaana lukuna $10^{20/10} = 100 \Rightarrow \log_2 (1 + S/N) \sim 6.7$. Jos oletetaan 3G:n 5 MHz kaistaleveys maksimi bittinopeus olisi $C \sim 6.7 * 5 \text{ Mb/s} = 33 \text{ Mb/s}$. Tätä voi verrata 3G:n HSDPAN lukuun 14.4 Mb/s; jossa ollaan jo suhteellisen lähellä rajaa (S/N suhde ei välttämättä ole lähelläkään 20 dB:tä käytännössä)

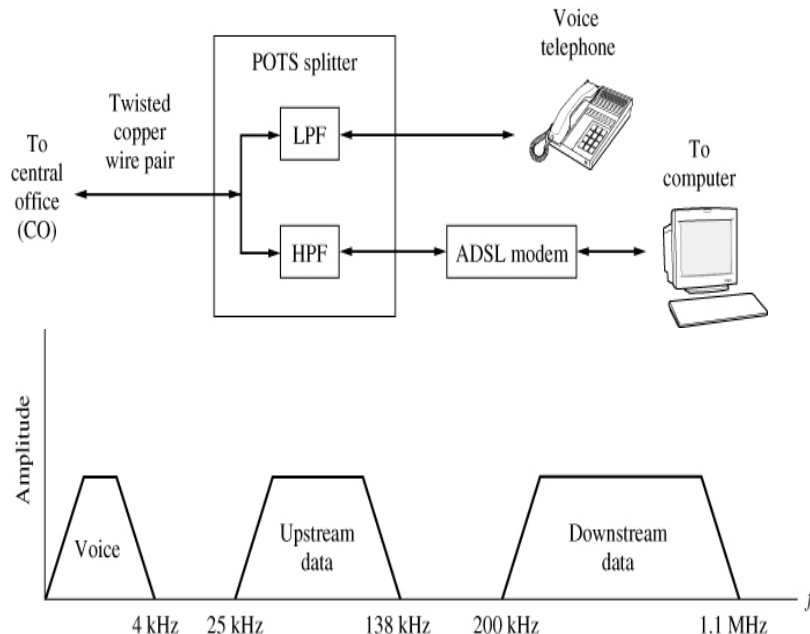
Spektritehokkuus – b/s / Hz

siirtokaista

- Tekijä joka kuvaa siirtotien käytön tehokkuutta on spektritehokkuus (Spectral efficiency), yksikkönä on b/s / Hz
- Spektritehokkuus = kapasiteetti / kaistaleveys = C/W [b/s / Hz], eli spektritehokkuus ilmaisee bittinopeuden yhden hertsin kaistaa kohti
- Esimerkkejä:
 - 3 G järjestelmä, $W = 5$ MHz, perus 3G (rel 99): Bittinopeus $4 * 1.92$ Mb/s; joten spektritehokkuus = $4 * 1.92$ Mb/s / 5 MHz = 1.5 b/s / Hz.
 - HSDPA bittinopeus = $r_b = 15 * 0.96$ Mb/s = 14.4 Mb/s = spektritehokkuus = 2.9 b/s / Hz
 - Long Term Evolution (LTE), bittinopeus (kapasiteetti) $r_b = 173$ Mb/s, kaistaleveys 20 MHz, jolloin spektritehokkuus = 8.65 b/s / Hz.
 - HUOM! Nämä bittinopeudet ovat bittinopeuksia radiotiellä ilman virheenkorjauskoodausta (FEC), FEC pienentää radiotiellä bittinopeuden käytännössä usein 50 %:iin.
- Tässä kohtaa voi huomauttaa, että käyttöönotetulla MIMO moniantenniratkaisulla (Multiple Input Multiple Output) antenneilla rajat rikkoutuvat. Esim. LTE edistyneellä MIMO tekniikalla saavutettavissa n. 350 Mb/s. Eikö siis Shannonin kaava enää päde ?
 - Pätee se, MIMO:ssa pitää vaan ajatellaan niin, että siinä on useampia erillisiä bittivirtoja ja Shannonin kaava pätee niihin erikseen.
- Tässä on oiva esimerkki siitä, että teknisellä innovaatioilla saadaan uusia parannuksia järjestelmiin !

Esimerkki tehostamisesta: ADSL

- ADSL tekniikkaa käytetään kuluttajan laajakaistaliittymässä kun käytössä puhelinkaapeli.
- Puhelinkaapelin vaimennus kasvaa nopeasti pituuden mukaan ja kaista on rajoitettu 1 MHz jälkeen. Tällöin binäärikoodauksella saataisiin luokkaa 1.4 Mb/s kaistaleveys.
- Mutta: ADSL:ssä on käytössä OFDM modulaatio (256 kantoaaltoa n. 1.1 MHz asti) ja QAM modulaatio. Tällöin saadaankin perus ADSL:ssä 8 Mb/s bittinopeus.



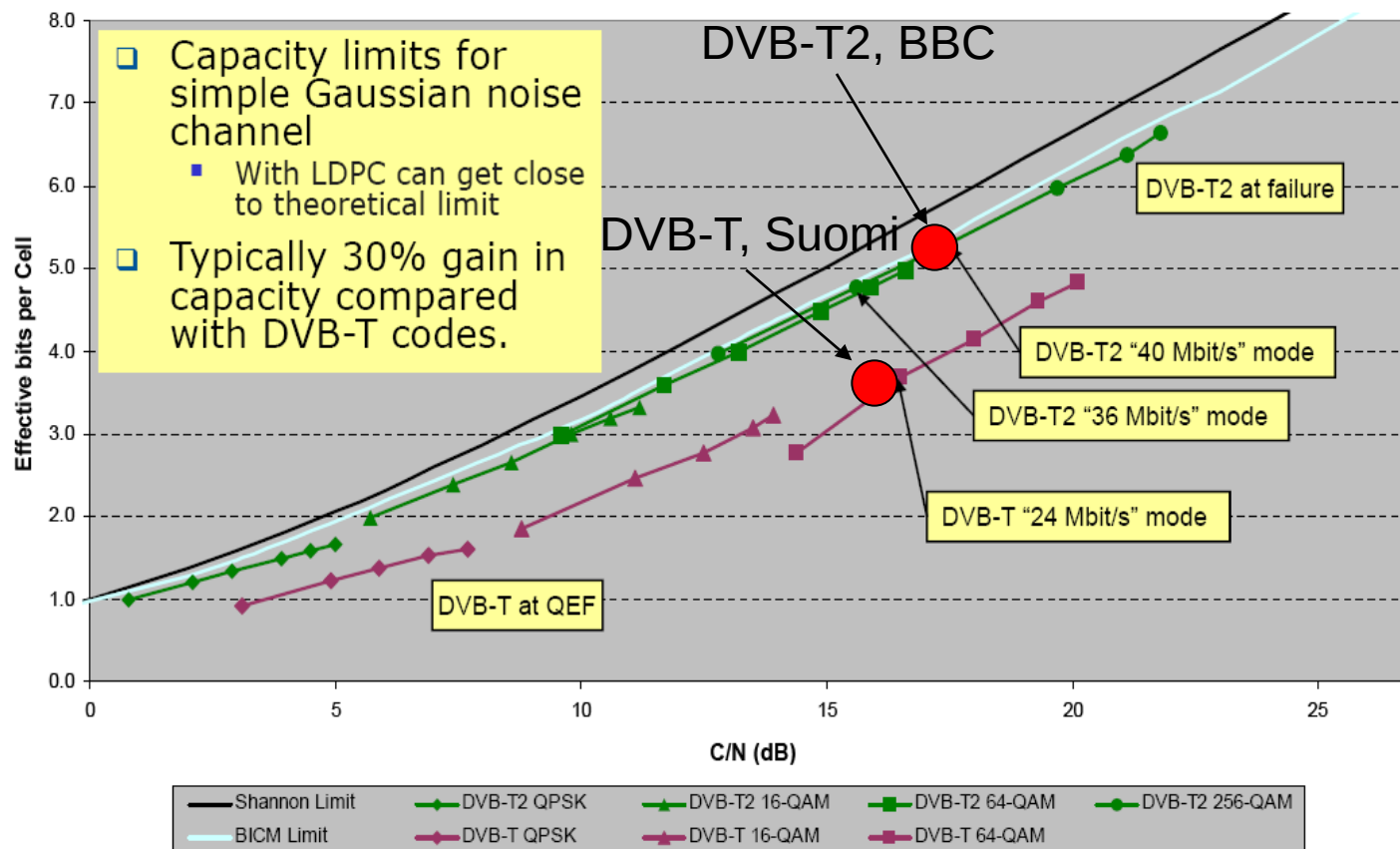
Ylävirtaan Upstream; Alavirtaan, Downstream

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) ja VDSL Very high Speed Digital Subscriber Line

- xDSL (esim. ADSL) käyttää puhelinkaapelin ylemmää (eri !) taajuusaluetta hyväkseen: Puhelin toimii ilman muutoksia kun suodatin (POTS splitter) puhelin- ja laajakaistasignaalit toistaan.
- ADSL 8 Mb/s
 - ADSL2 12 Mb/s
 - ADSL 2+ 24 Mb/s
- VDSL tekniikalla saadaan 50-100 Mb/s Mb/s etäisyyksillä << 500 m.

Esimerkki 2: DVB-T2 - suorituskyky

- Perus digi-TV:n bittinopeus n. 22-24 Mb/s (8 MHz kaista)
- DVB-T2 saavutetaan ~33-36 Mb/s. Englannissa BBC:llä jo käytössä 40.2 Mb/s
- Kuvassa musta viiva on Shannon'in raja (=maksimi teoreettinen bittinopeus), BBC on alle 2 dB signaalikohinasuhteessa ja 4 Mb/s alle teoreettisen rajan ! – vaikea enää parantaa käytännön olosuhteet huomioiden

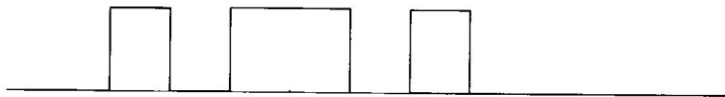


Kohina ja bittivirhesuhde

Kohinan lisääntyminen aiheuttaa signaalin huononemista ja johtaa signaalin heiketessä bittivirheisiin.

Lähetetyt bitit

0 1 0 1 1 0 1

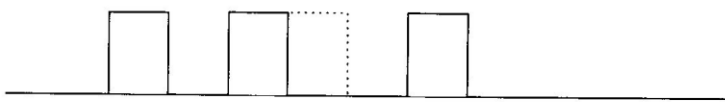


Vastaanotettu signaali (kohinaa, häiriötä)



Vastaanotettu bitit päätöksenteon jälkeen

0 1 0 1 0 0 1

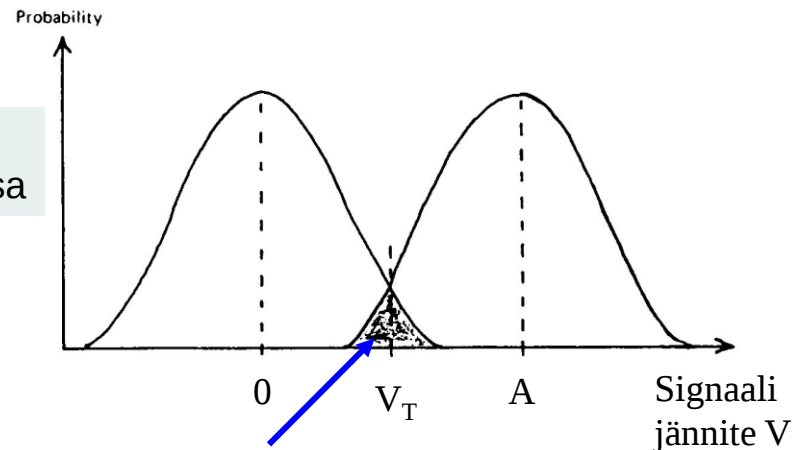


Bittivirhe

Bittivirhesuhde (Bit Error Rate, BER) määritellään:

$$\text{BER} = \frac{\text{Virheellisten bittien määrä}}{\text{Kaikkien bittien määrä}}$$

Jos "0" ja "1" bittien kohina on Gaussin jakauman mukaista signaalin jakautumat suurelle määrälle bittejä näyttävät ao. kuvan mukaiselta



Tumma alue on bittivirheitä: "0" tulkitaan ykköseksi ja päinvastoin

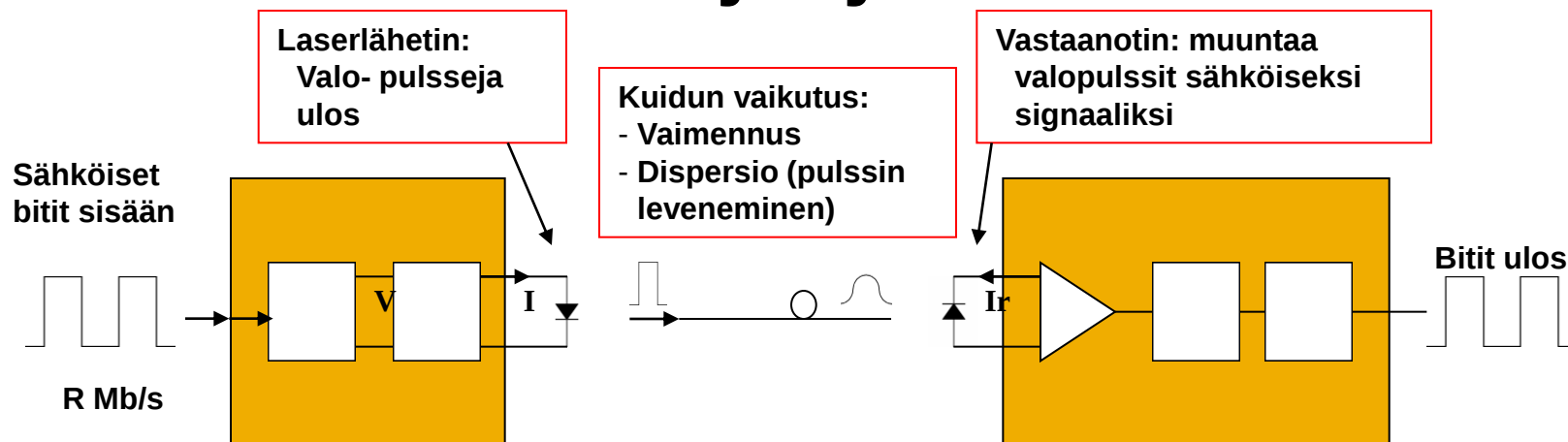
Virheenkorjaus

- Virheet voidaan korjata
 - Etukäteen (Forward Error Correction, FEC) lisäämällä ylimääristä dataa, redundanssia
 - Esim. Hamming-koodaus, vaikkapa 4 bitin viestiin lisätään 3 bittiä dataa, joilla voidaan korjata kaikki yhden bitin siirtovirheet
 - Vrt. tietokoneiden RAID-levyt
 - Jälkikäteen tunnistamalla virheet (esim. CRC-algoritmi) ja lähettämällä viesti uudestaan (ARQ-mekanismit, TCP)
- Jättää korjaamatta
 - Esim. puhe ja video sisältävät usein itsessään niin paljon redundanssia, *että pienet virheet eivät estä ymmärtämästä viestiä*
- Nykyisissä radiojärjestelmissä virheenkorjauskoodaus on oleellinen osa järjestelmää, jota ilman ne eivät toimisi. Käytössä erittäin hienot virheenkorjausmenetelmät, jotka vaativat paljon laskentatehoa. Usein käytetään monta menetelmää yhdessä. Muutamia virheenkorjauskoodaus menetelmiä (ei muistettavaksi):
 - Reed-Solomon; CD-ROM, Digi-TV
 - Konvoluutiokoodaus; WLAN, GSM, Digi-TV /DVB-T
 - Low Density Parity; Check (LPDC): LTE, DVB-T2, DVB-S2

Multipleksointi ja piirikytkentäinen tiedonsiirto

- Optiset siirron periaate
- Optiset siirtojärjestelmät
 - PDH Plesiochronous Digital Hierarchy
 - SDH / SONET (Synchronous Digital Hierarchy / Synchronous Optical Network)
 - WDM (Wavelength Division Multiplexing) ja OTN (Optical Transport Network)
- Käytännössä kaikki pitkän etäisyyden suurten bittinopeuksien siirto on nykyään optista, ja tässä keskitytään vain siihen.

Optinen tiedonsiirtojärjestelmä



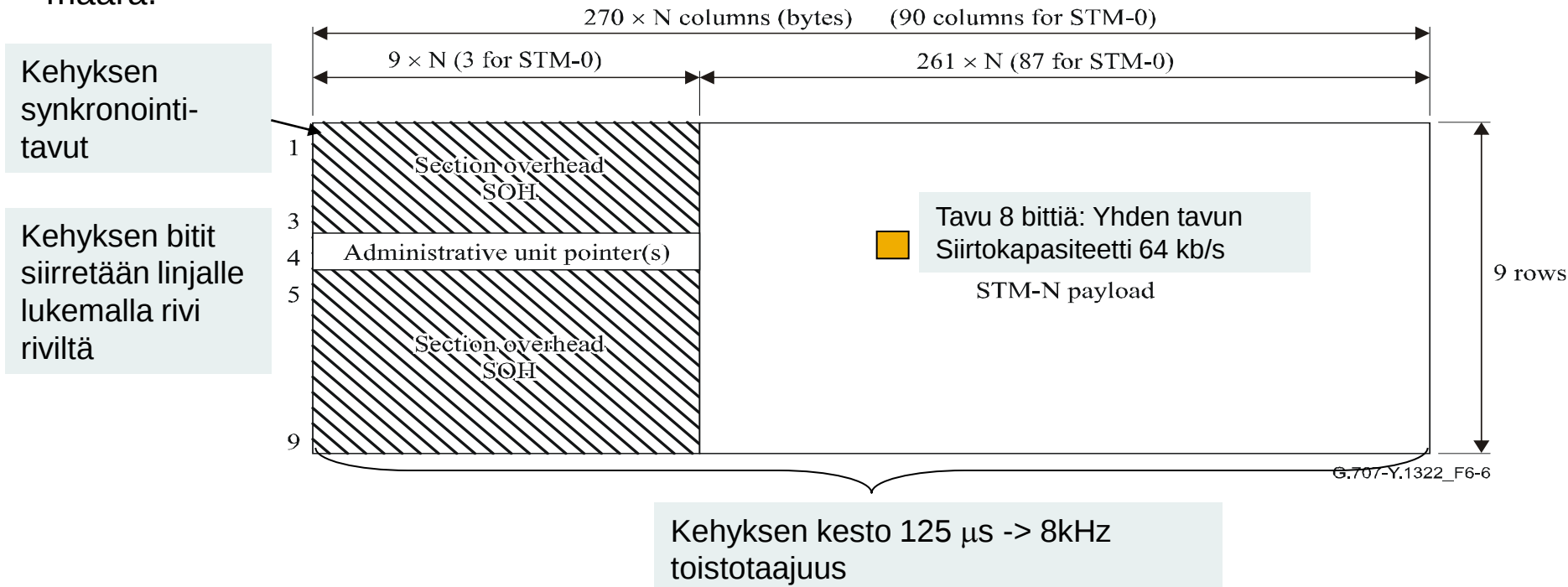
- Optisessa siirtojärjestelmässä laser tai LED muuttaa sisääntulevat bitit valopulsseiksi, jotka kytketään optiseen kuituun, jossa signaali etenee valona
- Vastaanottimessa valodiodi muuttaa signaalin taas sähköiseksi, vahvistuksen ja päätöksentekopiirin jälkeen saadaan samat bitit ulos jotka lähetettiin.
- Optisen järjestelmän ominaisuuksia:
 - Erittäin pitkät siirtoyhteydet, tyypillisesti 100 km ilman vahvistusta, käyttäen optisia vahvistimia satoja kilometrejä.
 - Erittäin suuret bittinopeudet, 10 Gb/s nykyään "helppoa tekniikkaa". 10 Gb/s tarkoittaa 10.000 1 Mb/s laajakaistayhteyttä; Aallonpituusmultipleksoinnilla näitä kanavia voi olla luokkaa 100 !! 100 Gb/s juuri tulossa ja kehitystyö tähtää monen sadan Gb/s siirtoon / aallonpituus.

Multipleksointi, PCM järjestelmät ja PDH

- PCM-järjestelmän perusta on puheen koodaus 8 kHz näytteenottotaajuudella @8b -> 64 kb/s bittinopeus. 32 kanava multipleksoidaan aikajakotekniikalla (TDM) yhteen, jolloin saadaan 2.048 Mb/s signaali. Tämä 32 aikaväliä sisältävä kehys on ns. **E1 kehys**, joka siis toistuu 8 kHz taajuudella.
- Näitä kehyksiä multipleksoidaan seuraavaksi 4 kpl yhteen TDM tekniikalla. Tällöin saadaan n. 8 Mb/s signaali, jossa kehystaajuus on edelleen 8 kHz, mutta nyt kehyksessä onkin 4x32 kanavaa.
- PDH-järjestelmissä seuraava multipleksoitaste on 4x. Yleiset PDH siirtonopeudet ovat: 2.048, 8.448, 34.368 ja 139.264 Mb/s.
- N. vuodesta 1990 alkaen PDH:n on syrjäyttänyt SDH, joka on synkroninen järjestelmä. Siinä peruskehyksellä STM-1 siirtonopeus on 155.52 Mb/s. PDH liitännät on kuitenkin edelleen käytössä. SDH laitteissa on usein liitännät eri PDH signaaleille.
- PDH ja SDH ovat piirikytkentäisiä järjestelmiä. Kun palvelu kytketään käyttöön, käyttäjä saa koko kanavan käyttöönsä.
- Käytännössä useinkin IP-dataa siirretään piirikytkentäisessä suuren bittinopeuden (kuitenkin käyttävässä) kanavassa, bittinopeuden ollessa 2.5-10 Gb/s.

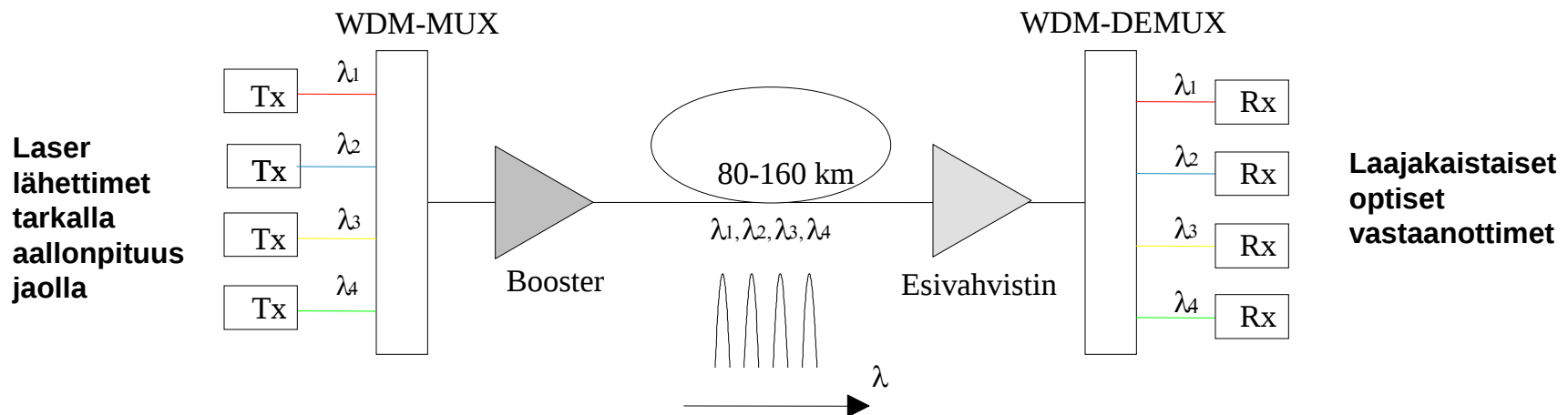
SDH kehys ja siirto

- N. vuodesta 1990 alkaen PDH:n on syrjäyttänyt SDH, joka on paremmin synkroninen järjestelmä. Siinä peruskehys on kooltaan 9x270 tavua. Jälleen kehysnopeus on 8 kHz !
Bittinopeus on: $8 \text{ kHz} * 8 \text{ bit} * (270 * 9) = 155.52 \text{ Mb/s}$
- PCM puhekoodauksen kehysnopeus tarkoittaa sitä, että yhden puhekäyttäjän bitit siirtyvät yhtenä tavuna kehyksen sisällä. Tavun paikka alun synkronointitavut jne. on tarkasti standardoitu.
- SDH:ssa seuraavat suurimmat siirtotaajuudet saadaan kertomalla edellinen neljällä.
STM-1: **155,52**; STM-4: **622.080 Mb/s**; sekä STM-16: **2.488320**, STM-64: **9.953280** ja STM-256: **39.813120 Gb/s**. STM-N merkinnässä N -> STM-1multipleksoitujen signaalien määrä.



Aallonpituusmultipleksointi

- Aallonpituusmultipleksointi, eli WDM (Wavelength Division Multiplexing); perusidea:
- Samaan kuituun kytketään lasersignaaleita, jotka ovat omilla tarkoilla aallonpituuksillaan (taajuuksilla), WDM on siis FDM tekniikka, jolla kuidun kapasiteetti jaetaan osiin.
- Kullakin aallonpituudella bittinopeus voi olla esim. 10 tai 40 Gb/s. Kanavien lukumäärä on useita kymmeniä.. >100. Tällä menettelyllä kuidusta saadaan valtavan suuri kapasiteetti !!

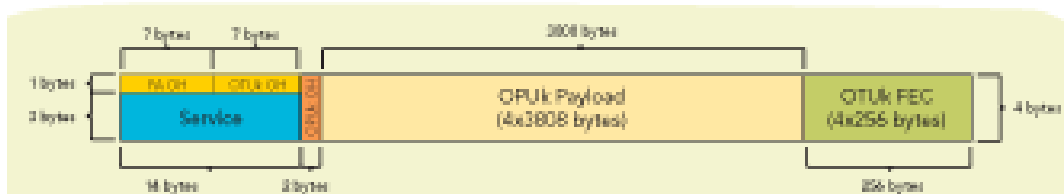


WDM – järjestelmän pääkomponentit:

- Laserlähettimet, jotka on stabiloitu lähettämään tietyllä aallonpituudella
- WDM- multiplekseri (WDM-MUX), yhdistää optisesti eri aallonpituudet etenemään yhdessä kuidussa.
- Optiset vahvistimet: Booster –vahvistin lisää tehoa WDM-MUX:in jälkeen (ja kompensoi WDM-MUX:in häviöt), optinen esivahvistin kompensoi WDM-DEMUX:in häviöt ja lisää vastaanottimen herkkyyttä ~ 10 dB. Huomattakoon, että WDM-DEMUX toimii samalla kapeakaistaisena optisena suotimena päästäten vain halutun aallonpituksen valon ja rajoittaa kohinan pienelle kaistalle !

Optical Transport Network

- Optical Transport Network (OTN) on ITU-T standardi G.709 ultratehokkaalle optiselle runkoverkolle. OTN perustuu “All-Optical-Networking:iin” ja antaa $N \times 10 \text{ Gb/s}$ / 40 Gb/s siirtokapasiteetin. OTN käyttää DWDM:ää (Dense Wavelength Division Multiplexing) perustekniikkana.
- Runkoverkoissa OTN on tekniikka, jota käytetään/tullaan käyttämään laajasti. Uudet laitteet sisältävät jo valmiiksi OTN liitäntöjä. OTN on erityisesti ajateltu Ethernet ja IP-pohjaisen liikenteen kuljettamiseen, mm. 10 Gb/s Ethernet laitteilla OTN-liitäntöjä.
- OTN:ssä on käytössä uusi kehysformaatti, jossa on 4 riviä ja bittinopeuden mukaan vaihtuva sarakemäärä. Kehystaajuus edelleen 8 kHz . Kehyksessä on lisäksi FEC (jota SDH:ssa ei ole), joka poistaa tehokkaasti siirtovirheitä, joita voi tulla optisissa komponenteissa tapahtuvan ylikuulumisen takia sekä lisää siirtoetäisyyttä.
- OTN on tekniikka, jota käytetään aallonpituus reitityksessä (Wavelength Routing) ja optisten ristikytkentälaitteiden (Optical Crossconnect) liitännöissä. Näillä saadaan ultratehokkaita verkkoja, joissa mm. automaattinen kytkentä varareitille kuidun/kaapelin katketessa.

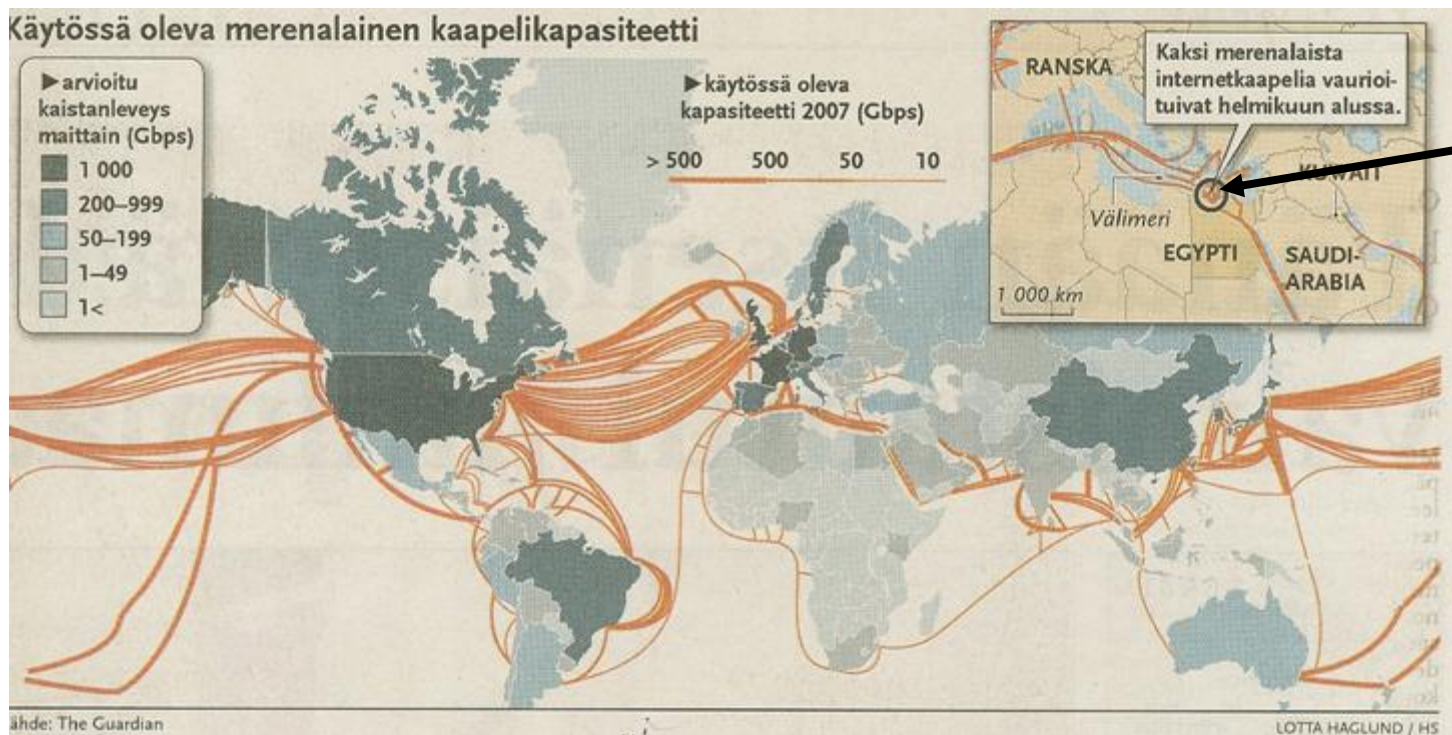


OTN kehys:

Kaikki data (4 x 3808 B) kuljetetaan kehyksissä, joissa FEC (Forward Error Correction). Kehystaajuus on edelleen 8 kHz .

Maailmanlaajuisessa kuitukaapeliverkko

- Maailmanlaajuisessa runkoverkossa tieto siirtyy Valokuiduissa, jotka Merikaapelien sisällä
- Merikaapelissa luokkaa 20 kuitua, eli 10 kaksisuuntaista ”liikenneväylää”
- Joka kuidussa tyypillinen > 8 aallonpituutta (eri ”väriä”), ja jokaisessa luokkaa 5Gb/s siirtonopeus



l. kuidussa

Helmikuu
2008
kaapelirikko

Yhteenveto

- Fyysinen kerros edustaa sovellettuja luonnontieteitä, lähinnä fysiikkaa ja fysiikan ilmiöitä. Nyqvist'in ja Shannon'in kaavat määrittävät suurimman mahdollisen saavutettavissa olevan tiedonsiirtokapasiteetin.
- Fyysiselle kerrokselle on määritelty suuri määrä erilaisia tekniikkoja, joiden avulla tietoa yritetään siirtää: Mm. monitasomodulaatiot Cu-kaapelissa, Optinen tiedonsiirto, radioverkot.
- Pitkien etäisyyksien tiedonsiirto perustuu erittäin suurikapasiteettiseen optiseen siirtoon ja jo nyt laajaan aallonpituusmultipleksointi tekniikan käyttöön. Optisissa runkoverkoissa bittivirhetodennäisyys on erittäin pieni ($BER < 10^{-12}$), jolloin virheenkorjausta ei käytetä (PDH ja SDH), tai käytetään matkojen pidentämiseksi (OTN)
- Radiotiellä signaali moduloidaan symboleille, jotka lähetetään valituilla taajuuksilla.
 - Radiotiellä bittivirhetodennäisyys on huono (esim. luokkaa $BER \sim 10^{-3}$)
 - Tehokkaat virheenkorjausmenetelmät ovat tarpeen, jotta palvelut toimivat
 - Radiotaajuuudet ovat hyvin rajallinen luonnonvara ja kehitystyöllä oleva kapasiteetti pyritään käyttämään niin tehokkaasti kuin suinkin mahdollista.

Ensi luennolla

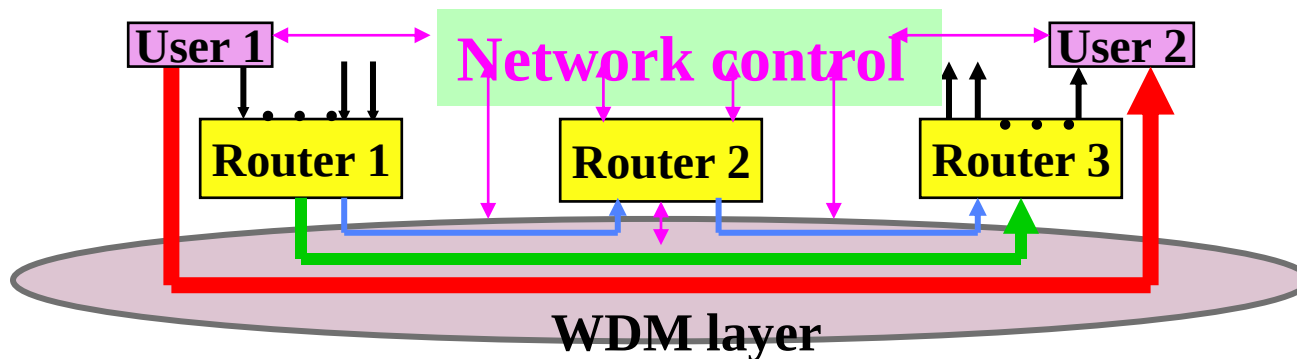
- Solukkonverkon periaate
- Matkapuhelinjärjestelmät: GSM, 3G, LTE

Tenttikysymyksiä

- Shannonin kaava on $C = W \log_2 (1 + \text{SNR})$, jossa C on siirtokapasiteetti, W kaistanleveys ja SNR kohinasuhde. Mitä ADSL-modeemin suunnittelija tekee Shannonin kaavalla? (2 p)
- Asut kerrostalon alimmassa kerroksessa ja olet sijoittanut talon katolle sääaseman, josta tulee pitkä johto asuntoosi. Huomaat sääaseman näytön osoittavan välillä selvästi vääriä tuloksia. Kuvaile ainakin kaksi tekijää, jotka saattavat aiheuttaa tämän. (2 p)
 - Signaali vaimenee pitkässä johdossa
 - Johto toimii antennina ja ottaa vastaan häiriöitä
- Perustele lyhyesti oikein/väärin
 - Näytteenotossa ei katoa informaatiota signaalista.
 - Kantoaalto helpottaa moduloidun signaalin tunnistamista.
- Milloin käyttäisit virheen korjausta etukäteen, jälkikäteen tai jättäisit korjaamatta? anna esimerkki kustakin ja perustele."

Tulevaisuuspohdintaa: Monikerrosreititys (Multi-layer Routing)

- IP kerroksen reititys on ja tulee olemaan Internetin pullonkaula.
- Yksi ratkaisumalli: reititetään pitkäkestoisia tietovirtoja alempien (WDM) kerrosten kautta



- Tavanomainen pakettireititys
- Optinen ohitus suurille liikennemäärille optisella reitityksellä
- Päästä päähän (user-to-user) koko tiedostolle, joka ohittaa reitittämiä

Loppukevennys: Mitä tällä nyt sitten saadaan aikaan ?

