

3. Tiedonsiirto

Telesanasto määrittelee tietoliikenneverkon siirtoteiden ja solmujen yhdistelmäksi, joka muodostaa teleyhteyksiä kahden tai useamman käyttäjän välille tietoliikennettä varten. Tietoliikenneverkko muodostuu siis verkon solmuista ja niitä yhdistävistä siirtoteistä. Tässä osiossa käsitellään erilaisia siirtoteitä ja niiden ominaisuuksia, joten tämä on olennaisesti teknisempi kuin aikaisemmat osiot. Tästä myös seuraa se, että opeteltavana on asioita, jotka ovat yhdellä määrättyllä tavalla ilman että tarvitsee pohtia, voisiko asia olla niin tai näin.

Tämän osion keskeisimmät aiheet ovat:

1. Desibeliasteikko ja sillä tehtävät laskutoimitukset
2. Analoginen vs. digitaalinen tiedonsiirto
3. Kanavoinnin periaatteet
4. Moduloinnin periaatteet
5. Erilaisten siirtomedioiden perusominaisuuksia

Lisäksi osioon kuuluu Shannonin kaava, joka on keskeinen työkalu arvioitaessa tiedonsiirron tehokkuutta.

Lähtökohtia

Signaaliksi kutsutaan ajan mukana vaihtelevaa ilmiötä, joka sisältää informaatiota. Analoginen signaali, kuten ilmanpaineen vaihtelu ihmisen puhuessa, voi periaatteessa saada mitä arvoja hyvänsä. Tällaisen signaalin esittämiseen tarvitaan liukuva asteikko. Digitaaliseksi puolestaan kutsutaan signaalia, joka voidaan esittää portaittaisella asteikolla jollain ulottuvuudella, usein jännitetasoina. Digitaalinen signaali voi siten olla:¹⁰⁸

- 1) diskreetti¹⁰⁹ sekä ajan että voimakkuuden (intensiteetin) suhteen tai
- 2) jatkuvassa ajassa esitetty analoginen signaali, joka esittää joukkoa bittejä siten, että signaalin aaltomuodot ovat rajattuja.

Signaalit saattavat näyttää kovin erilaisilta; digitaalisiksi ne tekee se, että kummassakin tapauksessa signaali voi esittää vain ennalta määriteltyjä bittejä.

¹⁰⁸ Katso esimerkiksi http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal. Sanan digitaalinen sijasta käytetään jonkin verran myös termiä numeerinen (*numeric*). Käytännössä ero digitaalisen ja numeerisen välillä on vähäinen.

¹⁰⁹ Diskreetti tarkoittaa tässä sitä, että signaalin arvo (jossain ulottuvuudessa) voi saada vain määrättyjä arvoja.

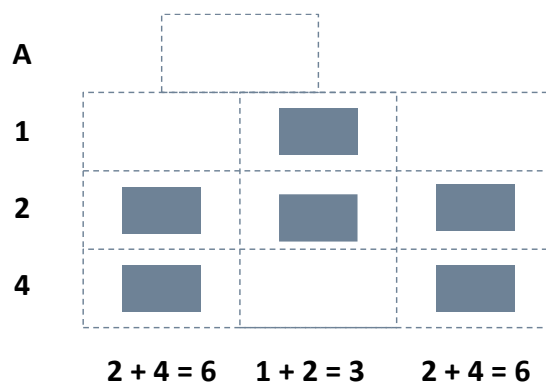
Ennen puhelinta, optinen ja sähköinen lennätin olivat luontaisesti digitaalisia, koska niissä vain määrätyt merkit olivat sallittuja riippumatta pienistä eroista signaalin muodossa. Kuvassa 1.5 esitettiin osa Chappen optisen lennättimen koodeista. Koodeja katsoessa voi kuvitella, että Chappe piti kirjaimien muotoja koodien lähtökohtana. Ilmeisesti merkit perustuivat kuitenkin viestintään käsissä pidettävien lippujen avulla.

Entä jos yläpalkki näyttäisikin olevan hieman vinossa tällä tavoin: $\top?$

Onko tuo vinolta näyttävä merkki 7 vai 8, vai ehkä 7,3? Erilaisia palkkien asentoja ja niiden pituuksiahan on suuri määrä. Toisaalta hieman eroavia asentoja tai pituuksia on vaikea erottaa, varsinkaan kiikarilla pitkän matkan takaa katsottuna. Silloin kun virheiden määrä pyritään pitämään pienenä, kannattaakin laatia mahdollisimman selkeästi erottuvia koodeja. Tässä suhteessa ruotsalaisen A. N. Edelcrantzin¹¹⁰ optinen lennätin oli parempi kuin Chappen lennätin.



Edelcrantzin lennättimen taulut oli järjestetty 3 x 3 ruudukoksi siten, että jokainen pystysarake muodosti yhden numeron. Yksi ruutu esitti yhden bitin verran informaatiota, eli yhdeksällä taululla voitiin esittää $2^9 = 512$ lukua. Ylimmässä rivissä oli yksi ylimääräinen taulu, joka merkitsi kirjainta A, joka siis käytännössä kaksinkertaisti mahdollisten lukujen määrään. 3 x 3 ruudukon jokaisen sarakkeen ylin taulu merkitsi lukua 1, keskimmäinen lukua 2 ja alin lukua 4. Näillä kolmella taululla kullekin sarakkeelle voitiin muodostaa numero, joka saatiin summaamalla näkyvissä olevien taulujen arvot keskenään. Näin kunkin sarakkeen arvoksi saatiin 0-7. Esimerkiksi luku 636 lähetettiin kuvan 3.1 mukaisesti.



Kuva 3.1. Numero 636 Edelcrantzin optisella lennättimellä koodattuna.

Joidenkin arvioiden mukaan Edelcrantzin lennätin oli noin kaksi kertaa nopeampi (siirretyn informaation määrässä aikayksikössä) kuin Chappen lennätin. Vaikka optinen lennä-

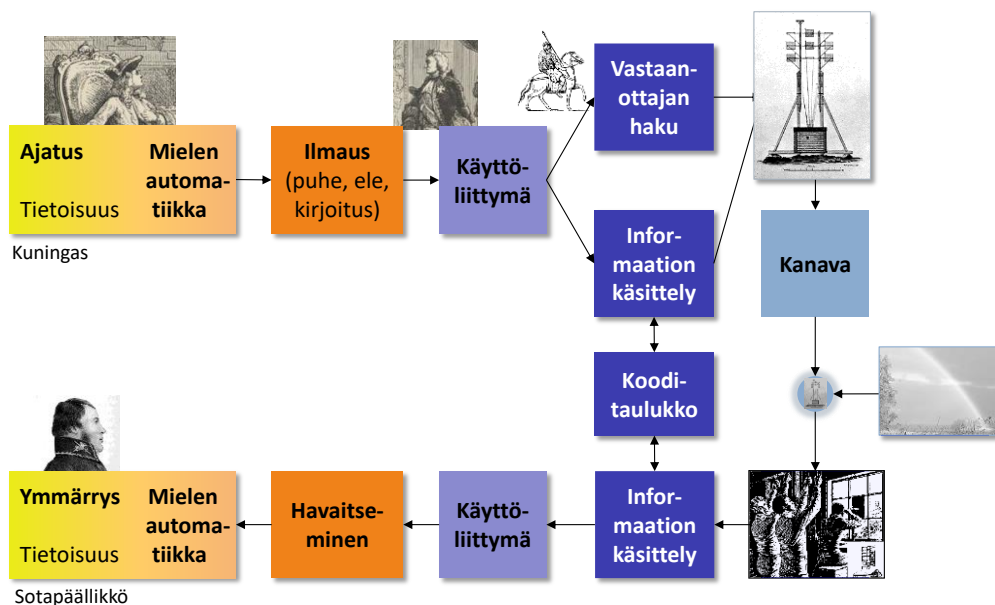
¹¹⁰ Edelcrantz syntyi Turussa vuonna 1754 mutta teki pääosan urastaan Ruotsissa.

<http://hamradio.nikhef.nl/tech/rtty/chappe/edelcrantz.html>, http://fi.wikipedia.org/wiki/Abraham_Niklas_Edelcrantz

tin oli melko pitkään käytössä Tukholman saaristossa, sen hyödyllisyys kärsi sään vaihte-
luiden aiheuttamasta epävarmuudesta. Koodauksen kannalta Edlercrantzin järjestelmää
voidaan pitää jopa modernina; jos nyt joku haluaisi tehdä optisen lennättimen, niin siinä
olisi hyvä lähtökohta. Ylintä A-taulua voisi käyttää esimerkiksi pariteettibittinä.

Otetaan vielä esimerkiksi eräs kuningas kaksi sataa vuotta sitten. Hänen alkuperäinen
ajatuksensa saattoi olla *"Jag måste vara en stark ledare."* Tästä ajatuksesta seuraa lausah-
dus adjutantille koskien armeijaa sadan kilometrin päässä (suomennettuna): *"Armeija hyö-
kätköön aamulla kello 6."* Aikaa on niin vähän, matkaa niin paljon ja tiet niin huonoja, että
ainoa tapa saada käsky sotapäällikölle asti ennen aamun koittoa on optinen lennätinlinja.
Adjutantti lähettää käskyn eteenpäin ensimmäiselle lennätinasemalle. Lennätinasemalla
sanoma otetaan vastaan, kaivetaan koodikirja esille ja toivotaan, että sää pysyy suotuisana.

Ennen kuin varsinaisen sanoman voi lähettää, täytyy määritellä sanoman vastaanottaja
(esimerkiksi, kenraali Adlercrantz) ja lähettäjä (Kuningas III). Sanoman sisältö voisi kai-
kessa lyhykäisyydessään olla: *"kuningas käsky hyökkäys huomenna kello 6"*. Tuohon voisi
vielä lisätä "kuitatkaa." Vaikka voitaisiinkin olettaa, että kokenut kenraali ymmärtää lähet-
tää vastausviestin heti sanoman saatuaan, niin kaikissa luotettavissa siirtojärjestelmissä
täytyy käyttää tarkkaan määriteltyjä yhteyskäytäntöjä eli protokollia järjestelmän kaikilla
tasoilla (tähän palataan tarkemmin 4. luvussa). Tarina on esitetty kaaviona kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. Informaation siirtoa optisen lennättimen aikaan.¹¹¹

Sanomat on hyvä pitää mahdollisimman lyhyinä. Koodikirjasta saattaa jopa löytyä sano-
man sanat valmiina, esimerkiksi näin: kuningas = 001, kenraali Adlercrantz = 132, käsky =

¹¹¹ Kuvat oikealla ylhäällä: <http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/images/history/edlercrantz.html>, oikealla keskellä K. Kilkki, oikealla alhaalla <http://www.alternatehistory.com/discussion/showthread.php?t=144200>

222, hyökkäys = 777, huomenna = 636, kello 6 = 606. Eli alkuperäinen kuningasajatus on nyt saanut numeerisen muodon 001 132 222 777 636 606. Tämä viesti voidaan välittää optista lennätinlinjaa pitkin Edelerantzin laitteella. Viestin välittämiseen tarvitaan noin kymmenen lennätinasemaa, joissa ainakin yhden henkilön pitää jatkuvasti kiikaroida sen varalle, että uusi viesti on tulossa – melkoinen tehtävä, kun viestejä kulkee vain satunnaisesti ja ilmat vaihtelevat. Lopulta viesti saavuttaa vastaanottajan suunnilleen siinä muodossa kuin se on esitetty. Kenraali toteuttaa käskyn ja niin optinen lennätin on muokannut historiaa. Tämä oli tietysti kuvitelmää, mutta se olisi hyvinkin voinut olla totta. Samoin olisi voinut käydä niin, ettei optinen lennätinlinja olisi toiminut lainkaan koko päivänä sateen takia. Ei sanomaa – ei hyökkäystä.

Informaatiotekniseltä kannalta mielenkiintoista on se, että alun perin epäselvä ajatus on ensi muutettu ymmärrettäväksi puheeksi ja sitten tiivistetty $6 \times 9 = 54$ bittiin. Nykypäivänä kuningas haluaisi puhua itse kenraalin kanssa, kertoa käskynsä ja ehkä perustelunsa-kin sanallisesti. Puheesta olisi siis seurauksena ilman paineen vaihteluita. Informaation kannalta puhe on paljon rikkaampi kuin viestitetty lyhyt sanoma. Koodatusta käskystä ei selviä, epäröikö kuningas tai missä mielentilassa hän sattui olemaan. Toisaalta puheen tapauksessa tiedonsiirtoon tarvittaisiin huomattavasti enemmän bittejä, jotta kaikki nyanssit voitaisiin välittää. Optisesta lennättimestä ei ollut sellaiseen tehtävään.

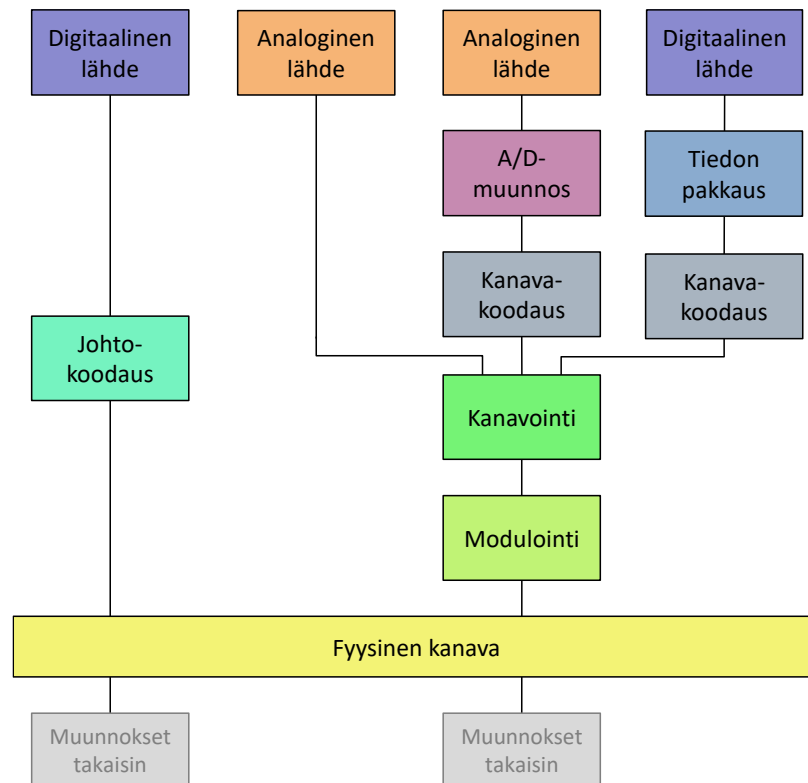
Tiedonsiirron perusperiaatteita

Kannattaako ylipäätään pohtia parin sadan vuoden takaista kuviteltua tapahtumaa sen sijaan, että keskityttäisiin nykYTEknologioihin? Silloisella tekniikalla moni asia, joka nyt piiloutuu syvälle teknologian syövereihin, oli nähtävissä ja jopa käsin kosketeltavissa. Esimerkkejä ovat muunnos analogisesta digitaalisiin, virheiden ilmeinen mahdollisuus ja niiden käsittely, kapasiteetin rajallisuus ja siitä johtuva tarve koodien optimointiin, järjestelmän ylläpidon kalleus sekä salakuuntelun (tai -katselun) mahdollisuus. Vaikka teknologia on kehittynyt huimasti, haasteet ja ratkaisujen periaatteet ovat säilyneet olennaisesti samoina.

Seuraavaksi siirrytään nykyaikaan ja oletetaan, että verkon sisällä signaalin siirto tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn avulla digitaalisessa muodossa.¹¹² Välitettävä informaatio voi alun perin olla joko analogista (puhe tyypillisimpänä esimerkkinä) tai jo valmiiksi digitaalista. Toinen jakolinja voidaan esittää sen mukaan, välitetäänkö informaatio verkossa vai ”vain yksittäisellä” johdolla. Internet ja matkaviestinverkot ovat esimerkkejä verkoista, joissa informaatiota käsitellään monessa eri vaiheessa ja joissa ratkaistavana on lukuisia

¹¹² Tärkein poikkeus digitaalisuuteen on FM-radio, joka siis edelleen perustuu analogiseen signaaliin. FM:n periaate esitetään tarkemmin hieman myöhemmin tässä luvussa.

haasteita. Fyysinen kaapeli tietokoneen ja tulostimen välillä on esimerkki johdosta. Vaikka johdon ja verkon välillä ei ole täsmällistä eroa, niin perusasioiden esittämisen kannalta erottelu on käyttökelpoinen. Joskus käytetään myös termiä virtuaalinen johto (*virtual wire* tai *virtual cable*), jolloin väitetään, että tietty yhteys kahden pisteen välillä toimii ikään kuin välissä olisi pelkkä johto, vaikka yhteys rakentuisikin monimutkaisien laitteiden avulla.



Kuva 3.3. Tietoliikennejärjestelmän rakenneosat.

Kuvassa 3.3 on esitetty keskeisimmät tiedonsiirtoon liittyvät osa-alueet, joita ovat:

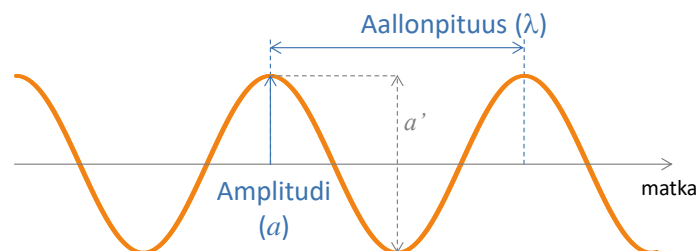
- **Analoginen lähde**, esimerkiksi puheen aiheuttamat ilmanpaineen vaihtelut.
- **Analogia-digitaalimuunnos** (A/D-muunnos, *analog-digital conversion*), jossa analogisessa muodossa oleva signaali (kuten puheen aiheuttamat paineen vaihtelut) muunnetaan digitaaliseen muotoon.
- **Johtokoodaus** (tai linjakoodaus, *line coding*): koodaus, jolla digitaalinen signaali¹¹³ esitetään ennalta määrätyillä amplitudi- ja aika-arvoilla ottaen huomioon fyysisen siirtokanavan ominaisuudet.
- **Tiedon pakkaus** (tai lähdekoodaus; *data compression, source coding*): data muunnetaan tiiviimpään muotoon. Muunnos voi olla häviöllinen tai häviötön.

¹¹³ Tässä tarkoitetaan 1-kohtaa luvun alussa esitetystä kahdesta määritelmästä digitaalisille signaaleille.

- **Kanavakoodaus** (**channel coding**), jonka tavoitteena on sovittaa (yleensä digitaalinen) informaatio kanavan ominaisuuksiin siten, että informaatio saadaan siirrettyä mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti.
- **Kanavointi** (tai multipleksointi, **multiplexing**), menetelmä jolla tehostetaan siirtomedian käyttöä yhdistämällä useita signaaleja yhteen kanavaan.
- **Modulointi** (**modulation**), jossa kantoaallon (**carrier**) yhtä tai useampaa ominaisuutta muokataan siten, että sen avulla voidaan välittää haluttu informaatio.
- **Fyysinen kanava** (**physical channel**), jonka avulla signaali siirretään paikasta toiseen. Kanava voi olla vapaa tila, sähköjohdin tai valokuitu.

Aika- ja taajuusesitystavat

Ennen kuin menemme tarkemmin tiedonsiirron eri osa-alueisiin, on välttämätöntä ymmärtää muutama tekninen perusasia. Kuvassa 3.4 on esitetty siniaalto, jossa signaalin voimakkuus vaihtelee ajan funktiona säännöllisesti. Tietoliikenteen alueella käsitellään yleensä signaaleja, jotka vaihtelevat nollassa molemmin puolin, jolloin amplitudi¹¹⁴ määritellään suurimman signaalin voimakkuuden ja nollassa erotuksena (kuvassa a). Jossain tapauksissa amplitudi voidaan myös määritellä huipusta huippuun (kuvassa a'). Epäsäännölliselle signaalille tai signaalille, joka ei vaihtelee nollassa molemmin puolin, amplitudi on vaikeampi määritellä. Amplitudin määrittelyn suhteen on siten syytä olla tarkkana.

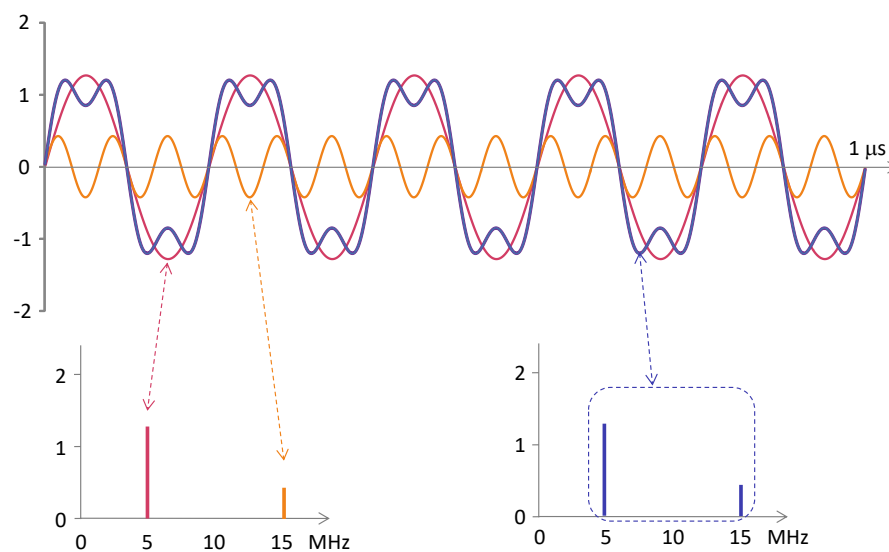


Kuva 3.4. Siniaalto, joka etenee väliaineessa (kuva siis esittää signaalin voimakkuutta eri paikoissa samalla hetkellä). Signaalin amplitudi on a ja aallonpituus on λ .

Aallonpituus (λ , **wavelength**) voidaan määritellä kahden peräkkäisen huipun välisenä etäisyytenä. Signaalin *taajuus* (f , **frequency**) riippuu signaalin etenemisnopeudesta (v) siten, että $f = v/\lambda$. Lisäksi signaalin täsmälliseksi määrittämiseksi tarvitaan tieto signaalin vaiheesta (ϕ , **phase**). Siniaallon $\sin(\omega t + \phi)$ vaihe on ϕ , jossa ω on kulmataajuus ja t on aika. Huomaa, että jos aikaa mitataan sekunneissa ja $\omega = 2\pi$, niin signaalin $\sin(\omega t)$ taajuus on 1 Hertz (Hz) ja amplitudi on 1.

¹¹⁴ Amplitudin synonyymia *värähdyslaajuus* käytetään lähinnä sanastoissa ja sanakirjoissa.

Kuvassa 3.5 sinisen signaalin *kaistanleveys* (**bandwidth**) on $15 - 5 = 10$ MHz, koska se on muodostettu kahdesta siniaallosta, joista toisen taajuus on 5 MHz ja toisen 15 MHz, kun taas puhtaan siniaallon taajuuskaista on periaatteessa nolla. Tässä yhteydessä on syytä korostaa siniaallon erityisyyttä. Kun signaali esitetään taajuusulottuvuudessa, niin silloin tarkoitetaan aina sitä, miten signaali voidaan esittää eritaajuisten siniaaltojen avulla. Voitaisiin toki ajatella, että signaali on ”muodostettu” muun muotoisista osista. Vaikka jatkuva signaali voidaan esittää myös esimerkiksi kolmioaaltojen¹¹⁵ summana periaatteessa samalla tavoin kuin siniaaltojen summana, niin tällaiselle esitystavalle ei yleensä ole mitään perusteltua syytä. Eli vielä kertauksena: kun signaali muunnetaan aika-asteikolta (kuvan 3.5 ylä-osa) taajuusasteikolle (kuvan alaosa), signaali jaetaan eri taajuuksiin siniaaltoihin.



Kuva 3.5. Aika- ja taajuusesitystavat ja signaalien yhdistäminen: sininen signaali on muodostettu kahdesta siniaallosta, joista toisen taajuus on 5 MHz ja toisen 15 MHz.

Puhdas siniaalto ei sellaisenaan sisällä muuta informaatiota kuin taajuuden, amplitudin ja vaiheen; informaation määrä ei kasva sen jälkeen, kun nämä ominaisuudet on havaittu. Informaation kuljettamiseksi tarvitaan siten monimutkaisempia ajan myötä muuttuvia signaaleja.

Termejä ja yksiköitä

Tiedonsiirtonopeutta ja tiedon ja muistin määrää mitataan monenlaisilla yksiköillä. Bitti on määritelmän mukaan pienin informaatioyksikkö, siis jonkinlainen tiedon alkeishiukka. Sen nimi on johdettu englanninkielisestä lyhenteestä bit = **binary digit**. Bitillä on nimensä mukaisesti kaksi mahdollista tilaa, joita on tapana merkitä: nolla (0) ja yksi (1). Tavu

¹¹⁵ Kolmioaallossa signaalin voimakkuus nousee ja laskee lineaarisesti kahden ääripisteen välillä.

(byte), koostuu nykyisen käytännön mukaan kahdeksasta bitistä.¹¹⁶ Tavun lyhenne on B. Tavun merkintänä ei saa käyttää lyhennettä b, koska sitä käytetään bitin lyhenteenä (lyhenteen *bit* ohella). Tiedonsiirtonopeutta mitataan yleensä bitteinä sekunnissa (bit/s). Samaa tarkoittava, mutta epästandardi lyhenne on bps (**bits per second**), jota käytetään erityisesti Pohjois-Amerikassa.

Tietotekniikassa etuliite ”kilo” tarkoittaa usein lukua $2^{10}=1024$, varsinkin käsiteltäessä tavuja. Käytäntö on aika sekava. Tiedonsiirtonopeuksissa käytetään lähes aina 10-järjestelmää eli esimerkiksi giga = 10^9 , kun taas tietokoneen muistien koot määritellään usein binäärijärjestelmässä jolloin ”gigatavu” = $2^{30} = 1\,073\,741\,824$ tavua.¹¹⁷ Näiden kanssa kannattaa olla tarkkana.

Vanhempien tiedonsiirtojärjestelmien tapauksessa käytettiin myös termiä baudinopeus (**baud rate**), jolla tarkoitetaan sitä, kuinka monta symbolia voitiin lähettää aikayksikössä. Yhdellä symbolilla voidaan kuvata useampi kuin yksi bitti. Esimerkiksi Edelcrantzin lennätimellä voidaan sanoa, että yksi baud sisältää yhden läppien kombinaation (eli 9 tai 10 bittiä, riippuen siitä käytettiinkö A-läppää vai ei).

Desibeleillä laskemisen perusteet

Desibelien muunnokset ja yhteenlaskut ovat niin keskeisiä asioita kurssin kannalta, että jokaisen tenttiin tulevan opiskelijan täytyy ne tuntea. Tässä lyhyt kertaus siitä miten desibeleillä lasketaan.

Tehosuhteen kymmenkantaisen logaritmin yksikkö on nimetty puhelimen keksijän Bellin mukaan beliksi, lyhenteenä B.¹¹⁸ Yleensä käytetään asteikkona desibelejä (*dB*), eli belin kymmenesosa. Desibeli ilmaisee siis kahden tehon suhteen kymmenkertaisen kymmenkantaisen logaritmin, eli:

$$\frac{P_1}{P_2} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) [dB] \quad (3.1)$$

Esimerkiksi jos teho P_1 on kaksi kertaa suurempi kuin teho P_2 , niin niiden välinen suhde (P_1/P_2) on 3 dB (tai tarkemmin $10 \log_{10}(2) = 3,0103$ dB). Vastaavasti jos tehojen suhde on 100:1, niin desibeleissä suhde on $10 \log_{10}(100) = 20$ dB.

¹¹⁶ Alkuperäisen määritelmän mukaan tavu on pienin tietokoneen muistiosoitteella osoitettava yksikkö, joka saattoi olla jotain muutakin kuin 8, esimerkiksi 6 tai 12. Nykyisin tavulla käytännössä aina tarkoitetaan 8 bitin kokoista yksikköä.

¹¹⁷ Tässä gigatavun sijasta tulisi käyttää lyhennettä gibi. Standardin mukaan kilo, mega, giga, tera ja peta tarkoittavat aina kymmenen potensseja (3, 6, 9, 12, 15), ei koskaan kahden potensseja (10, 20, 30, 40, 50). Oikeat kahden potenssin termit ovat kibi, mebi, gibi, tebi ja pebi. https://www1.bipm.org/utls/common/pdf/si_brochure_8.pdf, <http://en.wikipedia.org/wiki/Byte>. Tässä materiaalissa käytetään kymmenpohjaista järjestelmää, ellei muuta mainita.

¹¹⁸ Onneksi Belin lyhennettä B ei juurikaan käytetä sellaisenaan vaan vain lyhenteessä dB, koska tavun lyhenne on B.

Suhteita voidaan laskea paitsi tehoille myös sähkön tapauksessa jännitteille ja virroille. Niinpä desibeleinä jännite tai virtasuhte = $20 \log_{10} \left(\frac{U_1}{U_2} \right) [dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right) [dB]$. Kannattaa olla tarkkana sen suhteen onko alkuarvot annettu tehoina vai amplitudeina. Yksinkertaisinta on opetella kaava tehosuhteina (3.1), ja sitten tarvittaessa muuntaa virta, jännite, ilmanpaine tai vastaava tehoiksi.

Silloin kun teho (ei siis vahvistus tai vaimennus) ilmaistaan desibeliasteikolla, täytyy myös ilmoittaa mihin tehoa verrataan. Sähkötekniikassa vertailukohta on yleensä milliwatti (mW). Lyhenteenä käytetään silloin yksikköä dBm, joka siis ilmaisee tehon suhteessa milliwattiin desibeliasteikolla:

$$P [dBm] = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1mW} \right) [dBm] \quad (3.2)$$

Esimerkiksi radionlinkin tapauksessa lasku voi olla: $27 \text{ dBm} - 80 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = -50 \text{ dBm}$, jossa 27 dBm voi olla antennin säteilyteho ($0,5 \text{ W}$), 80 dB radiolinkin vaimennus ja 3 dB antennivahvistus. Vastaanottoteho on siis $-50 \text{ dBm} = 10 \text{ nW}$.

Kaavasta 3.w voidaan helposti johtaa kaava teholle, kun dBm-arvo (x) tunnetaan:

$$P = 10^{x/10 - 3} [W] \quad (3.3)$$

Esimerkiksi: $50 \text{ dBm} = 10^{50/10 - 3} = 100 \text{ W}$.

Korostettakoon, että silloin kun kyseessä ovat tehovahvistukset ja -vaimennukset, voidaan soveltaa desibelien suoraa yhteen- ja vähennyslaskua, kuten edellä esitettiin. Sen sijaan laskutoimitus $30 \text{ dBm} + 40 \text{ dBm} = 70 \text{ dBm}$ ei viittaa mihinkään reaali maailman ilmiöön—jos tällaisen laskelman esittää tentissä desibelilaskuna, niin lopputuloksena on automaattisesti 0 pistettä. Sama pätee kaavoissa, joissa esiintyy teho watteina (kuten Shannonin kaavassa (3.5) tai radiotien signaalien tehosuhteita kuvaavassa kaavassa 5.1), eli niihin ei saa koskaan sijoittaa desibelejä vaan tehoja wattiasteikoilla ilmaistuna).

Jos tehoja esitettyinä dBm-arvoina haluaa laskea yhteen, niin ne täytyy muuntaa ensin lineaariselle asteikolle ja vasta sitten laskea yhteen. Toisaalta yksinkertaisissa tapauksissa voimme päätellä lopputuloksen, esimerkiksi kun lasketaan yhteen tehot 30 dBm ja 30 dBm , havaitsemme, että teho kaksinkertaistuu, eli desibeliasteikolla teho kasvaa (likimäärin) 3 dB . Tulokseksi saadaan siis 33 dBm . Monimutkaisemmissa tapauksissa täytyy aina tehdä muunnos lineaariselle wattiasteikolle ennen yhteenlaskua. Tulos voidaan sitten tarvittaessa kääntää takaisin dBm-asteikolle.

Ja kannattaa vielä kertaalleen palata taulukkoon 1.1, jossa esitettiin esimerkkejä tehoasteikon eri osista. Esimerkiksi 200 dBm on erittäin suuri teho, eikä siihen tämän

kurssin laskuesimerkeissä päästä koskaan. Vaikka -110 dBm onkin erittäin pieni teho (10 fW), se on mahdollinen vastaus radiovastaanottimen teholle.

Esimerkki 3.1. Tehojen laskeminen yhteen desibeliasteikolla

Tiedetään että lähteiden tehot ovat 20 dBm, 25 dBm ja 28 dBm. Mikä on lähteiden yhteenlaskettu teho dBm-asteikolla, kun oletetaan, että lähteet ovat toisistaan riippumattomia?

Ratkaisu

Jotta yhteenlasku voidaan suorittaa, täytyy tehot ensin muuntaa lineaariselle asteikolle:

$$20 \text{ dBm} = 10^{20/10} \text{ mW} = 100 \text{ mW}.$$

Vastaavasti laskien saadaan: 25 dBm = 316 mW ja 28 dBm = 631 mW, joten yhteensä tehot ovat 1047 mW, joka dBm-asteikolla on:

$$10 \log_{10} \left(\frac{1047 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) \approx 30,2 \text{ dBm}.$$

Logaritmisesta asteikosta johtuen yhteenlaskettuna suurin teho desibeleissä dominoi lopputulosta: tässä tapauksessa kaksi pienempää lisäävät suurimpaan desibeliarvoon hieman yli 2 desibeliä.

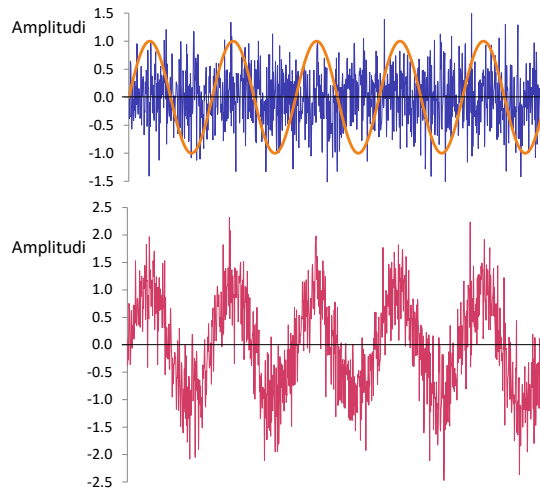
Signaalikohinasuhde (**signal-to-noise ratio**) on signaalin (**signal**, S) ja kohinan (**noise**, N) voimakkuuksien suhde. Tavallisesti signaalikohinasuhteesta käytetään lyhennettä S/N. Tavanomaisesti tämä ilmoitetaan tehosuhteina, eli jos erityisesti ei muuta ilmaista, niin kyseessä on tehojen suhde (ei siis amplitudi eli esimerkiksi jännite tai ilmanpaine). Kun signaalin teho on P_S ja kohinan teho on P_N , saadaan signaali-kohina-suhteeksi desibeliasteikoilla:

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right) [dB] \quad (3.4)$$

Kun yhteyden signaalikohinasuhteen sanotaan olevan hyvä, niin silloin S/N:n arvo on suuri eli signaali on voimakas verrattuna kohinaan.

Esimerkki 3.2. Signaalikohinasuhde

Laske signaalikohinasuhde tapauksessa, jossa signaali on sinimuotoinen amplitudin ollessa 1. Kohina muodostuu satunnaisesti (normaalijakauman mukaisesti) jakautuneista arvoista, joiden keskiarvo = 0 ja keskijakonta = 0,5. Kuva 3.6 esittää yhtä realisaatiota, jossa kohina on arvottu äärellisille ajanjaksoille eli 1/1000 koko jakson pituudesta. Jos oletetaan, että koko esitetyn jakson pituus on 1 ms, niin signaalin taajuus on 5 kHz. Mikä on kanavan signaalikohinasuhde?



Kuva 3.6. Ylempi kuva: signaali (oranssi) ja kohina (sininen). Alempi kuva: yhdistetty signaali ja kohina. Signaali-kohina-suhde on noin 3 dB.

Ratkaisu

Sinikäyrän teho on $a^2/2$ eli tässä tapauksessa $S = 0,5$ (tämä voidaan laskea trigonometrian peruskaavoilla).¹¹⁹ Kohinalle teho saadaan suoraan keskihajonnan neliönä eli kohinan teho on $0,25$. Signaali-kohina-suhteeksi saadaan siten:

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{0,5}{0,25} \right) = 3,01 \text{ dB}$$

Kuten kuvasta näkyy, signaali on vielä varsin selkeästi havaittavissa. Siitä huolimatta, jos signaalin sisältämä informaatio vastaanotetaan huonolla menetelmällä, esimerkiksi mittaamalla signaalin hetkellistä arvoa määrävälein, johtaa mittaus helposti väärään lopputulokseen.

Shannonin kaava

Informaatioteorian edelläkävijä (voidaan jopa sanoa perustaja) Claude Shannon (1916 – 2001) tutki informaation (signaalin) ja kohinan suhdetta toisen maailmansodan päättymisen jälkeen.¹²⁰ Keskeisin tutkimuksen tuloksista tunnetaan Shannonin teoreema, joka voidaan esittää matemaattisesti muodossa:

$$C = B \log_2(1 + S/N) \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \quad (3.5)$$

Tässä C on yhteyden suurin teoreettinen tiedonsiirtokyky bitteinä sekunnissa ilmaistuna, B on kaistanleveys (yksikkönä $1/\text{s}$) ja S/N on signaalikohinasuhde paljaana lukuna (ei siis desibeleinä). Kaavassa on oletuksena, että jokainen lähetettävä symboli kohtaa kohinaa

¹¹⁹ Tässä on jätetty yksiköt pois. Voidaan esimerkiksi olettaa, että amplitudi esitetään voltti-asteikolla ja vastus on 1 ohmi, jolloin tehot on esitetty watti-asteikolla. Absoluuttisilla arvoilla ei ole merkitystä, kun lasketaan tehojen suhteita.

¹²⁰ Erittäin hyvä johdanto aiheeseen on esitetty kirjassa: Shannon, C. E., & Weaver, W., (1963). *Mathematical theory of communication*. University Illinois Press.

riippumattomasti muista symboleista. Huomaa myös, että kaavassa esiintyy 2-kantainen logaritmi, ei siis desibeleissä käytetty 10-kantainen logaritmi.

Perinteisen analogisen puhelinyhteyden siirtokaista on 300 – 3400 Hz, eli kaistanleveys $B = 3100$ Hz. Voimme olettaa, että hyötysignaalin ja häiritsevän kohinan voimakkuuksien suhde on desibeleinä $S/N = 40$ dB eli signaali on 10000 kertaa kohinaa suurempi. Kun nämä lukuarvot sijoitetaan kaavaan 3.5, saadaan:

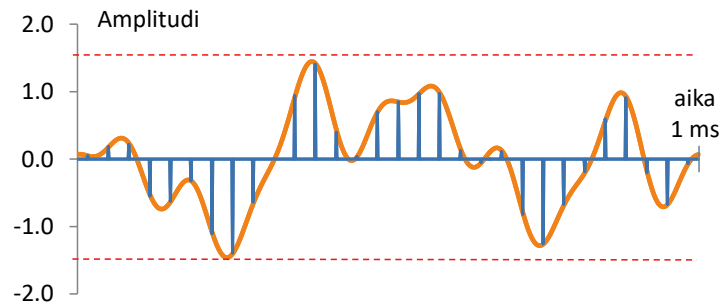
$$C = 3100 \log_2(1 + 10000) \approx 41200 \text{ bit/s.}$$

Näillä oletuksilla analogisessa puhelinverkossa voitaisiin siirtää maksimissaan 41 kbit/s. Miksi sitten voimme nykyisin siirtää dataa (siis tässä tapauksessa puhelinverkon kuparijohdolla) paljon suuremmalla nopeudella? Perinteinen puhelinverkko on nykyisin analoginen vain tilaajajohdon osalta ja käytännössä tilaajajohdon kaista (B) on huomattavasti suurempi kuin tuo 3100 Hz. Käytettävissä oleva kaista riippuu johdon ja liitosten laadusta sekä ylikuulumisesta ja voi olla useita megabittejä sekunnissa.

Analogisesta digitaaliseen

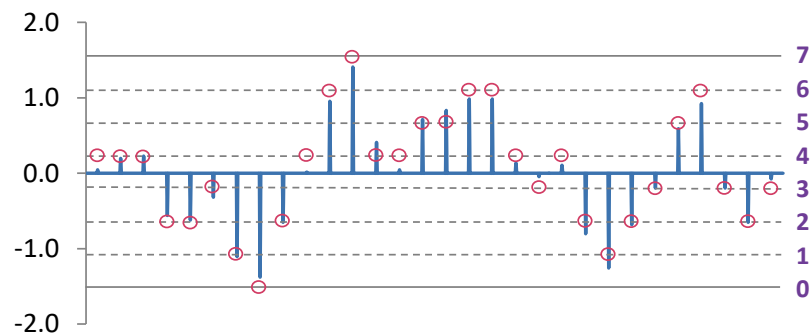
Bellin puhelimen aikaan, ja vielä seuraavan noin sadan vuoden ajan, ilmanpaineen vaihtelut välitettiin analogisesti jännitteen vaihteluina puhelinjohtoja pitkin. Vastaanottopäässä sähköinen signaali muutettiin takaisin korvin kuultaviin ilmanpaineen vaihteluihin. Lopputulos saattoi olla erittäin hyvä ja erittäin huono, riippuen siirtoyhteyksien ja päätelaitteiden laadusta. Pitkillä yhteyksillä analogiseen signaaliin kertyy monenlaisia häiriöitä, joita analogisesta signaalista on hyvin vaikea poistaa. Digitaalinen tekniikka on tässä suhteessa olennaisesti parempi. Nykyisin tiedonsiirto onkin lähes aina digitaalista.

Digitaalisen siirron peruseriaatteet on esitetty kuvissa 3.7 – 3.9. Ensin analogisesta signaalista otetaan näytteitä, yleensä vakiovälein (Δt) eli näytteenottotaajuudella ($1/\Delta t$). Tuloksena on sarja mittausarvoja, joiden arvo voi vaihdella vapaasti määrätyissä rajoissa. Tulos eli näytteiden sisältämä informaatio esitetään järjestelmän sisällä yleensä sähköisessä muodossa. Periaatteessa on mahdollista lähettää nämä näytteet sellaisenaan. Etuna puhtaaseen analogiseen signaaliin verrattuna on se, että useiden signaalien näytteitä voidaan välittää eteenpäin aikajakoisesti yhdellä siirtotiellä. Tällainen amplitudipulssimodulaatio ei kuitenkaan ole ollut yleisessä käytössä, vaan normaalisti näyte digitalisoidaan siten, että signaali voidaan esittää numeerisessa muodossa.



Kuva 3.7. Näytteenotto analogisesta signaalista taajuudella 30 kHz, kun esitetyn jakson pituus on 1 ms. Punaiset katkoviivat esittävät näytteenoton ylä- ja alarajoja. Signaali sisältää taajuuksia 1 – 10 kHz.

Kuvassa 3.8 signaalista otetut näytteet on koodattu kahdeksaan tasoon (0-7). Tasoista valitaan signaalin arvoa lähimpänä oleva. Tässä tapauksessa on yksinkertaisuuden vuoksi käytetty tasojen välillä vakiovälejä. Tasoja täytyy käytännössä olla paljon enemmän kuin kuvassa on esitetty, erityisesti kun toistetaan tai tallennetaan korkealaatuista musiikkia.¹²¹



Kuva 3.8. Näytteiden koodaus kahdeksalle tasolle (0 ... 7).

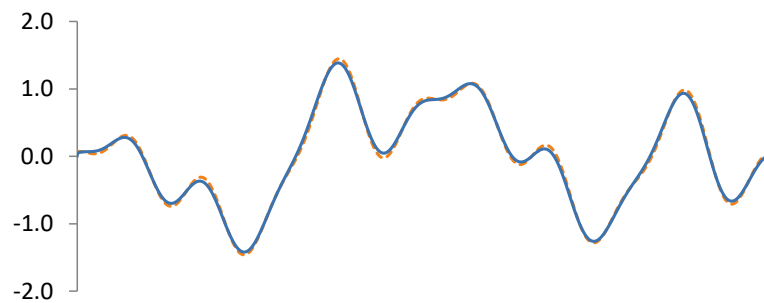
Pienillä signaalin arvoilla kvantisoinnin aiheuttama pyöristysvirhe voi kasvaa suureksi näytteen arvoon nähden. Kuulohavainnon suhteellisuuden (havaitsemme siis suhteellisia muutoksia emmekä absoluuttisia muutoksia) takia on järkevää käyttää tiheämpää asteikkoväliä pienillä äänenpaineilla kuin suurilla. Tämä epälineaarinen eli epätasavälinen kvantisointi vähentää kvantisointisäröä korvinkuultavasti. Käytännössä asteikko jaetaan kahtia nollassa molemmin puolin. Negatiivisia äänenpaineita ei luonnollisesti ole olemassa, vaan nollassa on ilman keskimääräinen paine.

Lopputuloksena on numerosarja 444223102467445566434212356323, joka siis kuvaa alkuperäistä signaalin pätkää kohtuullisen tarkasti.¹²² Vastaanottopäässä signaali palaute-

¹²¹ Puhelinverkossa käytetään yleensä 8 bittiä eli 256 tasoa ja CD-levyllä 16 bittiä eli 65536 tasoa.

¹²² Bitteinä 100100100010010011001000010100110111100100101101110110100011100010001010011101110011010011 Bittejä tarvitaan 90 esittämään 1 ms pituista signaalia. Bittinopeus on siten 90 kbit/s eli tämä koodaus on tehontonta.

taan takaisin analogiseen muotoon. Lopputulos voi olla kuvan 3.9 muotoinen. Silmämääräisesti tulos näyttää hyvältä. Korvamme on kuitenkin erittäin herkkä havaitsemaan virheitä, joten signaalin ”todellista” koettua laatua on vaikea päätellä kuvasta.

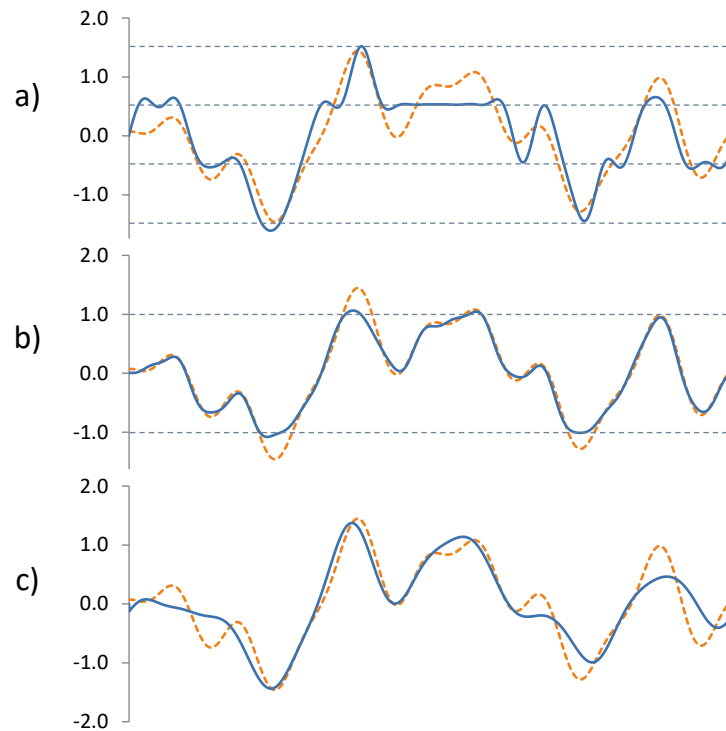


Kuva 3.9. Alkuperäinen signaali (oranssi katkoviiva) ja digitaalisen muunnoksen läpikäynyt signaali analogisessa muodossa (sininen viiva).

Digitalisoinnin epätäydellisyyksistä johtuvia virheitä on kolmea päätyyppiä: kvantisointikohina, signaalin leikkaantuminen ja näytteenottotaajuuden riittämättömyys.

1. Tasojen rajallinen määrä aiheuttaa kvantisointikohinaa eli digitaalinen signaalin arvo näytteenottohetkellä poikkeaa alkuperäisestä signaalista. Muutokset vaihtelevat satunnaisesti, joten esimerkiksi äänen tapauksessa kvantisoinnin vaikutuksen voi kuulla kohinana.
2. Kvantisointiin käytetty asteikko on rajallinen, joten on mahdollista, että asteikko ei riitä kuvaamaan kaikkia signaalien arvoja. Jyrkkä signaalin leikkaantuminen aiheuttaa ääneen epämiellyttävän särön. Oheisessa kuvassa näytteenottotaajuus ja tasojen määrä ovat riittäviä kuvaamaan alkuperäistä signaalia, sen sijaan asteikon laajuus ei ole.
3. Näytteenottotaajuus ei ole riittävän suuri, jotta kaikki signaalin (merkitsevät) muutokset saataisiin sisältymään digitalisoituun muotoon. Oheisessa kuvassa suurin signaalin komponentti on 10 kHz:n taajuinen ja näytteenottotaajuus on 15 kHz, jolloin osa signaalin vaihteluista jää havaitsematta.

Kuvassa 3.10 virheitä on korostettu käyttämällä selkeästi liian huonoa digitalisointia, käytännössä virheiden tulee olla huomattavasti pienempiä.



Kuva 3.10. Digitalisoinnin aiheuttamat kolme virhetyyppiä: a) kvantisoinnin aiheuttamat virheet,¹²³ b) asteikoin rajallisuuden aiheuttama signaalin leikkaantuminen ja c) liian pienen näytteenottotaajuuden aiheuttamat virheet.

Edellä on esitetty yksinkertaisin digitalisoinnin periaate. Monimutkaisempiakin menetelmiä on kehitetty erilaisia tarpeita varten. Näistä mainittakoon delta-modulaatio ([delta modulation](#)), jossa koodataan muutoksia peräkkäisten näytteiden välillä.

Mutta kuinka tiheään näytteitä täytyy ottaa? Ruotsalainen Harry Nyquist (1889–1976) esitti, että signaalista voidaan ottaa näytteitä siten, että näytteiden perusteella voidaan konstruoida alkuperäistä vastaava signaali. Teoreeman mukaan näytteitä pitää ottaa taajuudella, joka on vähintään kaksinkertainen alkuperäisessä signaalissa esiintyvään suurimpaan taajuuteen nähden. Jos analogisesta signaalista otetaan näytteitä liian harvakseltaan, signaali saattaa laskostua alempitaajuiseksi signaaliksi. Korkeataajuiset komponentit leikautuvat pois, eikä näytejonon perusteella voida enää rakentaa alkuperäistä signaalia.

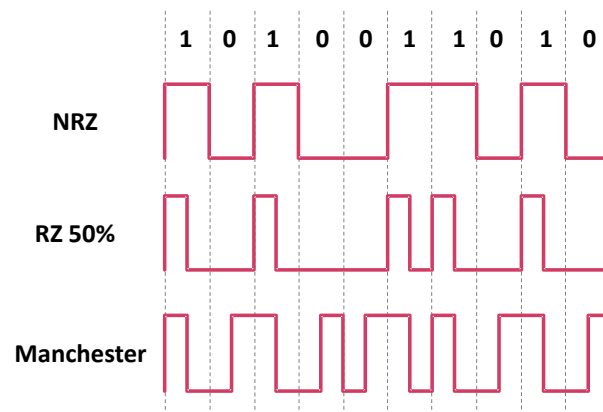
Analogisessa puhelinverkossa puhelimen kyky siirtää puhetta rajoitettiin teknisistä syistä välille 300 - 3400 Hz. Näytteenottoeteoreeman mukaisesti näytteenottotaajuuden tulee olla $2 \cdot 3400$ Hz eli 6800 Hz. Teoreemassa on kuitenkin sana ”vähintään.” Käytännössä näytteenottotaajuuden on syytä olla jonkin verran suurempi. Siksi kansainvälisesti sovittiin, että digitaalisessa puhelinverkossa näytteenottotaajuus on 8000 Hz. Jos jokainen

¹²³ Kuvassa virheiden korostamiseksi on käytetty vain neljää tasoa (ei kahdeksaa kuten kuvassa 3.8).

näyte sisältää kahdeksan bittiä, syntyy bittivirta, jonka nopeus on 64 kbit/s. Nykyisissä matkapuhelinverkoissa koodaus tehdään monimutkaisemmin, jolloin vastaavaan tai jopa parempaan äänenlaatuun päästään pienemmällä bittinopeudella.

Johtokoodaus

Johtokoodi (*line code, encoding*) määrittelee miten digitaalinen signaali siirretään johtimen yli. Johtokoodi määrää bittien sähköisen esitysmuodon. Yksinkertaisimmissa menetelmissä käytetään kahta jännitetasoa, joista toinen kuvaa ykköstä, toinen nollaa. Tällainen johtokoodi on esimerkiksi kuvan 3.11 NRZ-koodaus (*non return to zero*).



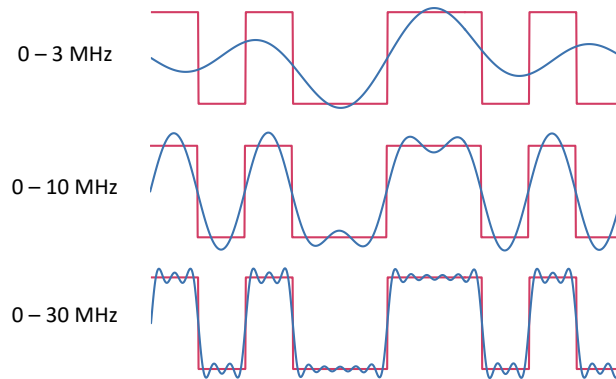
Kuva 3.11. Yksinkertaisia johtokodeja.

Jos signaalissa on pitkä, yhtenäinen jono samaa bittiä, vastaanottajan on vaikea säilyttää tahdistus ja pysyä selvillä siitä, missä eri bittien rajat kulkevat. Tämä voidaan välttää käyttämällä sellaista johtokoodia, jossa signaalin taso muuttuu joka tapauksessa, vaikka siirrettävänä olisikin rivi pelkkiä nollia tai ykkösiä.

RZ-koodauksessa (*return to zero*) kutakin bittiä kuvaava jännitetaso pidetään vain osan aikaa bitin koko kestoista. Tällä koodauksella vastaanottajan on helpompi säilyttää tahti kuin edellä mainitulla NRZ-koodauksella, mutta edelleenkin pitkä rivi nollia voi sekoittaa siirron. Manchester-koodauksessa ongelma on ratkaistu muuttamalla jännitetasoa jokaisen bitin keskellä. Ykkönen (1) ilmaistaan muutoksena positiivisesta jännitetasosta negatiiviseen ($+ \rightarrow -$) ja nolla vastaavasti muutoksena negatiivisesta positiiviseen ($- \rightarrow +$). Jatkuvien jännitemuutosten ansiosta vastaanottajan on helppo pysyä tahdissa. Manchester-koodausta käytetään esimerkiksi Ethernet-verkoissa.

Kuvan 3.11 mukainen signaali, eli kantiaalto, todellakin näyttää digitaaliselta. Käytännössä tilanne on monimutkaisempi. Kulmikas signaalin muoto nimittäin edellyttäisi äärettömän kaistanleveyttä. Johdon kaistanleveyttä rajoittaa signaalin nousuaika, joten signaali väistämättä pyöristyy enemmän tai vähemmän. Toisaalta pyöristyminen ei haittaa, jos signaalin sisältämä informaatio eli bitit voidaan havaita luotettavasti vastaanottopäässä. Tässä

suhteessa vaatimus on siis eri kuin analogisen signaalin näytteenoton tapauksessa: nyt emme ole kiinnostuneita signaalin alkuperäisestä muodosta vaan sen sisältämästä digitaalisesta informaatiosta. Kuvassa 3.12 on esitetty yksinkertaisen kanttiaallon muoto erilaisilla kaistanleveyksillä. Kun kaistanleveys on riittämätön, signaalin sisältämää informaatiota ei voida enää luotettavasti havaita vastapäässä.



Kuva 3.12. Kanttiaalto johdolla, jonka kaistanleveys on joko riittämätön (3 MHz), kohtuullinen (10 MHz) tai hyvin riittävä (30 MHz) kun bittinopeus on 10 Mbit/s.¹²⁴

Rinnakkainen ja sarjamuotoinen siirto

Tietokoneen keskusyksikön tärkeimmät osat on liitetty toisiinsa väylällä. Käytännössä väylä muodostuu suuresta joukosta yhdensuuntaisia kuparijohtimia tietokoneen emolevyllä. Johtimia on paljon, jolloin yhdellä prosessorin kellojaksolla saadaan siirretyksi yhden merkin kaikki bitit samanaikaisesti, kukin omalla johtimellaan. Tätä tiedonsiirtotapaa kutsutaan rinnakkaisiirroksi tai rinnakkaismuotoiseksi siirroksi (**parallel transfer**).

Toinen vaihtoehto on siirtää merkit bitti kerrallaan peräkkäin samalla johtimella. Ratkaisu tunnetaan nimellä sarjamuotoinen siirto (**serial transfer**). Jos yhden johtimen tiedonsiirtonopeus pidetään vakiona, sarjamuotoinen siirto on hitaampaa kuin rinnakkaismuotoinen siirto. Rinnakkaisliitettä on käytetty esimerkiksi tietokoneen ja kirjoittimen väliin lyhyisiin yhteyksiin. Tätä pidemmällä matkoilla on taloudellisinta käyttää sarjaliikennettä. Nykyisin yleisimmin oheislaitteiden liittämiseen käytetty USB (**Universal Serial Bus**) perustuu nimensä mukaisesti sarjamuotoiseen tiedonsiirtoon.

Tarvittava suuri johdinmäärä ei ole merkittävä kustannustekijä silloin kun yhdistetään samassa huoneessa olevia tietokonelaitteita toisiinsa, mutta tilanne on aivan toinen, kun yhteyden pituus on jopa satoja kilometrejä. Lisäksi tahdistus on ongelma pitkillä etäisyyksillä ja suurilla tiedonsiirtonopeuksilla. Etenemisnopeuksissa voi myös olla johdinkohtaisia

¹²⁴ Kaistanleveys ja bittinopeus eivät ole synonyymejä, vaikka bittinopeus riippuu käytössä olevasta kaistanleveydestä. Termit kannattaa pitää tiukasti erillään, vaikka englanninkielessä **bandwidth** viittaakin usein bittinopeuteen.

eroja, jolloin pitkällä matkalla on hyvin vaikea taata, että rinnakkaisissa johtimissa kulkevat signaalit tulisivat täsmälleen samaan aikaan perille.

Tahdistus

Tietoliikennejärjestelmissä data siirretään paikasta toiseen muuttamalla bitit symboleiksi analogisesti välitettäviksi aaltomuodoiksi (*waveform*). Kuten edellä esitettiin, kun aaltomuoto kulkee kanavan läpi, joka voi välittää vain rajallisen taajuuskaistan, sen muoto vääristyy. Lisäksi signaaliin yhdistyy kohinaa. Jotta vastaanotin voisi havaita oikean signaalin, täytyy sen tietää milloin signaali alkaa ja milloin se päättyy. Tätä varten lähettimen ja vastaanottimen välillä täytyy olla jonkinlainen tahdistus eli synkronointi (*synchronization*). Yksinkertaisimmillaan vastaanotin pyrkii ottamaan näytteen bitin keskeltä (vertaa kuva 3.12). Jos näyte otetaan liian aikaisin tai liian myöhään, näyte voidaan tulkita väärin. Tarvittavan tahdistuksen tarkkuus riippuu siten käytettävästä signaalin taajuudesta.

Periaatteessa voisi ajatella, että tahdistusongelma voidaan ratkaista tarkalla kellolla. Mutta jos esimerkiksi bittejä siirretään 10 Gbit/s nopeudella bitit peräkkäin, niin yhden bitin siirtämiseen jää aikaa 0,1 ns ja kellon pitäisi pystyä pitämään tätä pienempi tarkkuus jatkuvasti. Käytännössä synkronointia onkin ylläpidettävä suurilla siirtonopeuksilla lähes jatkuvasti bitti kerrallaan.

Bittitahdistuksen (*bit synchronization*) lisäksi vastaanottimen on tiedettävä, milloin merkki tai tavu alkaa ja milloin se loppuu. Merkkitahdistusta (*character synchronization*) varten merkin alkuun ja loppuun voidaan lisätä ylimääräisiä aloitus- ja lopetusbittejä. Kun siirretään pitempiä sanoma, vastaanottajan täytyy lisäksi jostain päätellä, missä kohtaa sanomaa kukin merkki sijaitsee. Tämä tapahtuu sanomatahdistuksen (*frame synchronization*) avulla. Synkronisessa tiedonsiirrossa tahdistus pyritään pitämään yllä jatkuvasti, sen sijaan asynkronisessa (*asynchronous*) siirrossa tahdistus säilytetään vain merkin ajan. Tahdistuksen uudelleen etsiminen kuluttaa aina siirtoresursseja, joten sitä käytetään yleensä vain suhteellisen pienillä siirtonopeuksilla.

Tiedon pakkaaminen

Alkuperäistä digitaalisessa muodossa esitettyä dataa kannattaa tai on jopa pakko tiedonsiirtokapasiteetin rajallisuuden vuoksi pakata pienempään tilaan. Tila tarkoittaa tässä siis datan määrää bitteinä. Englannin kielellä käytetään tässä yhteydessä useita eri termejä: *data compression*, *source coding* ja *bit-rate reduction*. Pakkaaminen voi olla joko häviötöntä (*lossless*) tai häviöllistä (*lossy*). Häviötön koodaus tarkoittaa, että pakattu data voidaan palauttaa täsmälleen alkuperäiseen muotoon. Häviöllisessä tähän ei pystytä vaan osa alkuperäisestä informaatiosta menetetään.

Häviötön pakkaaminen perustuu datan sisältämään toisteisuuteen eli redundanssiin (*redundancy*). Ensimmäisessä luvussa esimerkkinä käytetyssä Seitsemän veljeksien tekstissä on 613 773 merkkiä (mukaan lukien välilyönnit). Tekstitiedoston kooksi tulee 626 kilotavua. Sen sijaan pakattuna zip-tiedostona koko on vain 254 ktavua.¹²⁵ Esimerkiksi kirjainyhdistelmä ”tta” esiintyy tekstissä 2411 kertaa kun taas moni mahdollinen kirjainyhdistelmä ei esiinny joko lainkaan (kuten ”alr” ja ”erp”) tai vain kerran (kuten ”nöl” ja ”pyv”). Tätä tietoa, eli toisteisuutta, voidaan käyttää siten, että yleisemmin esiintyvien kirjainyhdistelmien koodaamiseen käytetään vähemmän bittejä kuin harvemmin esiintyvien yhdistelmien. Samaa periaatetta käytettiin jo ensimmäisessä luvussa esitetyissä optisissa lennätimissä sekä Morse-koodissa, jossa yleisimmät kirjaimet ovat lyhyellä koodilla ($\cdot = E$) kun taas harvinaisemmat kirjaimet esitetään pitkällä koodeilla ($--\cdot-- = Q$).

Luonnostaan digitaalisessa muodossa olevaa dataa ei ole mielekästä pakata häviöllisesti, ellei tiedetä, mikä osa informaatiosta on tärkeää ja mikä vähemmän tärkeää. Tekstissä tämä on hyvin vaikeaa, ainakaan millään automaattisella menetelmällä. Lukuarvoja esittävässä datassa voidaan ehkä jättää viimeiset desimaalit esittämättä, mutta tämäkin on kyseenalaista, ellei bittien merkitystä ja käyttöä tiedetä tarkasti.

Sen sijaan alun perin analogisen signaalin, varsinkin videokuvan, tapauksessa häviöllinen pakkaaminen on usein välttämätöntä. Videokuvan tapauksessa häviöttömällä pakkauksella päästään tyypillisesti noin kolmasosaan alkuperäisestä nopeudesta, mutta silti tarvittavat tiedonsiirtonopeudet ovat suuria verkon yli siirrettäväksi. Esimerkiksi tyypillinen HD (*High Definition*) videokuva (1080p) käyttää kuvan kokona 1920×1080 , jolloin kuva-alkioita eli pikseleitä (*pixel*) on yhteensä 2 073 600. Jos kuvia esitetään nopeudella 25 kuvaa sekunnissa ja yhden pikselin värin koodaukseen käytetään 24 bittiä, niin nopeudeksi ilman kuvan pakkaamista saadaan 1,244 Gbit/s. Pakkaamisen jälkeen tyypillinen verkossa käytetty videokuvan nopeus on kuitenkin noin 5 Mbit/s. Ero alkuperäisen ja pakatun signaalin välillä on ratkaiseva varsinkin silloin, kun kuvaa siirretään radiotien yli.

Kanavakoodaus

Parhaimmillakin yhteyksillä tiedonsiirrossa saattaa tulla virheitä. Vuosikymmenien aikana on kehitetty erilaisia virheitä havaitsevia ja niitä korjaavia koodeja, joilla pyrittiin varmistamaan tiedon perilletulo alkuperäisen kaltaisena. Virheitä voidaan korjata joko jokaisella linkillä erikseen tai päätepisteiden välillä. Tavallisimmat menetelmät ovat pariteettitarkistus, kaiuttaminen ja tarkistussumman laskeminen.

¹²⁵ Vastaavasti Charles Dickensin kirja *Great Expectations* koko alkuperäisenä tekstitiedostona on 991 kilotavua ja pakattuna 387 kilotavua. Kohtuullisesti pakatun tekstitiedoston koko on noin 40 prosenttia alkuperäisen koosta.

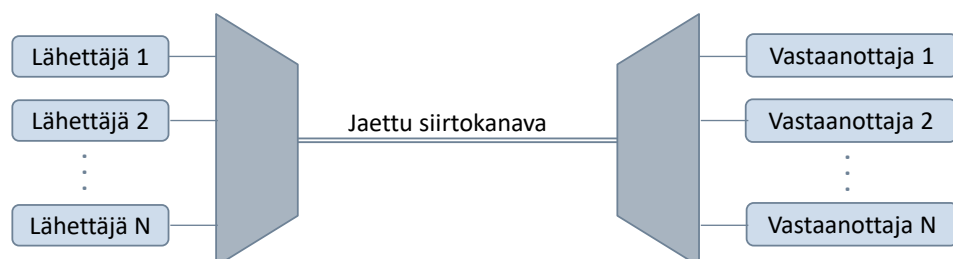
Pariteettitarkistuksia (**parity checking**) on useita erilaisia. Pariteettitarkistuksessa lähettäjä lisää jokaiseen merkkiin yhden pariteettibitin, joka täyttää määrätyt vaatimukset. Yleensä käytetään joko parillista tai paritonta pariteettia (**even parity, odd parity**). Näissä ylimääräinen pariteettibitti täydentää merkin ykkösbittien lukumäärän joko parilliseksi tai parittomaksi. Pariteettitarkistus ei ole kovin varma menetelmä virheitte havaitsemiseksi. Kahden bitin kääntyminen eli muuttuminen vastakkaisiksi samassa merkissä jää pariteettitarkistuksessa huomaamatta. Koska pariteettitarkistus tehdään jokaiselle merkille erikseen, se sopii asynkroniseen tiedonsiirtoon.

Kaiutuksessa (**echo checking**) vastaanottaja lähettää vastaanottamansa datan takaisin lähettäjälle. Lähettäjä vertaa vastaanottamaansa bittivirtaa lähettämäänsä ja tarkistaa, onnistuiko siirto. Menetelmä on varma mutta hidas. Sitä käytetään vain silloin, kun tiedonsiirtovirheitte seuraukset olisivat kohtalokkaat (esimerkiksi lennonjohdon ja lentäjän välisessä puheliikenteessä, jossa lentäjä joutuu toistamaan tornista saamansa ohjeet).

Tarkistussumma (**checksum**) on kohtuullisen varma tapa havaita siirtovirheet. Lähettäjä laskee tarkistussumman suuremmasta bittijoukosta eli lohkoista ja lisää sen lohkon loppuun. Vastaanottaja laskee tulevasta datasta samalla menetelmällä oman tarkistussummansa ja vertaa sitä lohkon mukana tulevaan. Jos summa täsmää, voidaan siirron olettaa onnistuneen. Samoja virheitä korjaavia koodeja käytetään myös palvelinkoneissa. Jonkinlainen kanavakoodaus on välttämätön aina kun siirtotie on hiemankin epäluotettava. Esimerkiksi jo Chappen optisessa lennättimessä käytettiin kanavakoodauksen periaatetta.¹²⁶

Kanavointi

Kanavointi¹²⁷ (**multiplexing**) tarkoittaa monen signaalin (esimerkiksi puheyhteyden) siirtämistä samanaikaisesti yhdellä siirtokanavalla. Kanavoinnin tavoitteena on tehostaa tiedonsiirtokapasiteetin käyttöä ja vähentää kokonaiskustannuksia. Kanavointi tehdään joko taajuus-, aika- tai koodijakoisesti.



Kuva 3.13. Kanavoinnin periaate.

¹²⁶ J. John Hearfield, *The Chappe semaphore telegraph*, <http://www.johnhearfield.com/Radar/Chappe.htm>

¹²⁷ Usein käytetään myös termejä multipleksointi ja demultipleksointi, jolla tarkoitetaan multipleksoidun signaalin jakamista takaisin alkuperäisiin signaaleihin eli kanavoinnin purkamista.

Taajuusjakoisessa kanavoinnissa (FDM, **Frequency Division Multiplexing**) siirtotien (johdon tai radioyhteyden) taajuusalue jaetaan useaan osaan eli kanavaan. Jokaisella kanavalla on oma kantoaaltonsa, jota moduloidaan siirrettävällä signaalilla. Vastaanottopäässä eri kanavat on helppo erotella toisistaan kaistanpäästösuodattimien avulla. Tällä tavoin siirtotien koko käytettävissä oleva taajuusalue saadaan tehokkaaseen käyttöön. Taajuusjakoista kanavointia on käytetty mm. analogisessa puhelinverkossa ja radio- ja televisiosignaalien siirrossa.

Aikajakoisessa kanavoinnissa (TDM, **Time-Division Multiplexing**) useista eri signaaleista otettuja näytteitä siirretään johdolla vuorotellen. Kun näytteitä otetaan siirtonopeuteen verrattuna harvakseltaan, sama fyysinen yhteys ehtii palvella useita loogisia yhteyksiä samanaikaisesti. Käytännössä aikajakoista kanavointia käytettäessä signaalit ovat digitaalisessa muodossa. Digitaaliset matkapuhelinverkot käyttävät samanaikaisesti sekä taajuus- että aikajakoista kanavointia.

Lisäksi multipleksointi voi perustua koodijakokanavointiin (CDMA, **Code Division Multiple Access**). CDMA-kanavoinnissa jokainen käyttäjä voi periaatteessa käyttää hyväkseen koko saatavilla olevaa taajuuskaistaa sekä lähetyksessä että vastaanotossa. Hedy Lamarr (ohessa) kehitti George Antheilin kanssa taajuushyppelyyn perustuvan hajaspektritekniikan, johon CDMA siis perustuu.¹²⁸ Käyttäjät erotetaan toisistaan yksilöllisellä koodilla. Lähettäjä sisällyttää vastaanottajan koodin signaaliinsa, jolloin vain koodin tunteva asema voi vastaanottaa sen. Koodijakokanavointi kehitettiin alun perin sotilassovelluksiin estämään salakuuntelua ja parantamaan häiriöiden sietoa.



Aallonpituuskanavoinnin (WDM, **Wavelength-Division Multiplexing**) perusideana on lähettää valokuidulle erivärisiä eli eri aallonpituuksisia valonsäteitä. Se on periaatteessa sama asia kuin taajuusjakoinen kanavointi mutta sovellettuna optisille taajuuksille. WDM-tekniologian kehityksen alkuvaiheessa haasteellisinta oli rakentaa tarpeeksi hyviä lähettäjiä ja vastaanottimia niin, että eriväriset valonsäteet saatiin eroteltua toisistaan. Nykyisin yhteen kuituun saadaan mahtumaan jopa satoja eritaajuisia valonsädetä ja pullonkaula on siirtynyt siirtotiestä valtaviin datamassojen käsittelyyn reitittimissä ja datakeskuksissa.

Modulointi

Ihmisen puhe mahtuu varsin kapealle taajuusalueelle. Ihmiskorva on herkimmillään taajuusalueella 2 kHz – 6 kHz. Miten radiosta, joka on viritetty taajuudelle 94,9 MHz, kui-

¹²⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Hedy_Lamarr

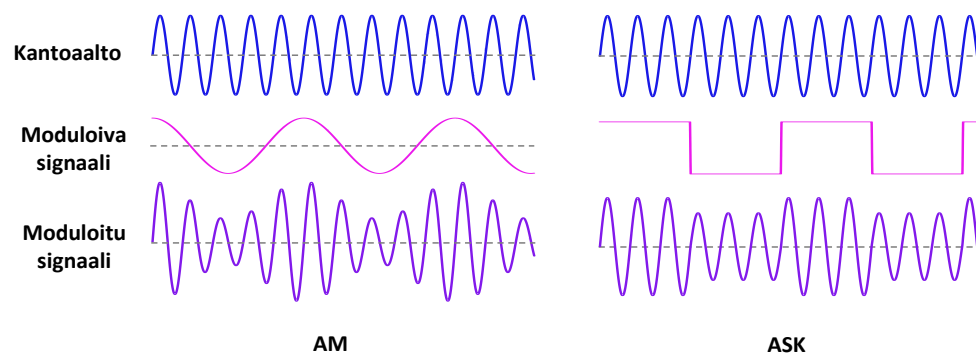
tenkin kuullaan puhetta ja musiikkia? Ilmiö selittyy modulaatiolla. Korkeataajuisen kantoaallon avulla matalataajuinen informaatio-signaali siirretään käyttökelpoisemmalle taajuusalueelle. Mikrofonin tuottamalla puhetaajuisella signaalilla moduloidaan kantoaaltoa, joka sopii siirtoon huomattavasti alkuperäistä taajuutta paremmin.

Modulointimenetelmiä on useita. Tavallisimmat analogiset modulaatiomenetelmät ovat amplitudimodulaatio (**Amplitude Modulation, AM**), taajuusmodulaatio (**Frequency Modulation, FM**) ja vaihemodulaatio (**Phase Modulation, PM**). Vastaavat digitaaliset modulaatiomenetelmät ovat ASK (**Amplitude-Shift Keying**), FSK (**Frequency-Shift Keying**) ja PSK (**Phase-Shift Keying**) modulaatiot.

Amplitudimodulaatio

Amplitudimodulaatiossa kantoaalto ja moduloiva, informaation sisältävä signaali yhdistetään siten, että moduloivan signaalin arvon kasvaessa kantoaallon amplitudi kasvaa kuten kuvassa 3.14 on havainnollistettu. Lopputulos on signaali, jonka taajuus pysyy lähellä kantoaallon taajuutta ja jonka amplitudi sisältää moduloivan signaalin informaation. AM-modulaatiota on käytetty analogisissa TV-lähetyksissä, eräissä radiopuhelintyypeissä ja yleisradiotoiminnassa LF- ja HF-alueilla (**low frequency, high frequency**). Koska monet ihmisen tai luonnon aiheuttamat häiriöt vaikuttavat erityisesti signaalin amplitudiin, AM-lähete on herkkä häiriöille. Vastaanottimen toteuttaminen on toisaalta hyvin helppoa.

Kun moduloiva signaali on digitaalinen, puhutaan ASK-modulaatiosta. ASK-modulaatiossa kantoaallon amplitudi vaihtelee kahden tai useamman eri arvon välillä. Kuvan 3.14 esimerkissä digitaalinen signaali on binaarinen (vain kaksi tasoa eli nollat ja ykköset), jolloin moduloidun signaalin amplitudilla on ainoastaan kaksi arvoa. Optisissa kuiduissa käytetään tavallisesti ASK-modulaatiota, jolloin valon voimakkuutta muutetaan lähetettävän datan mukaan.



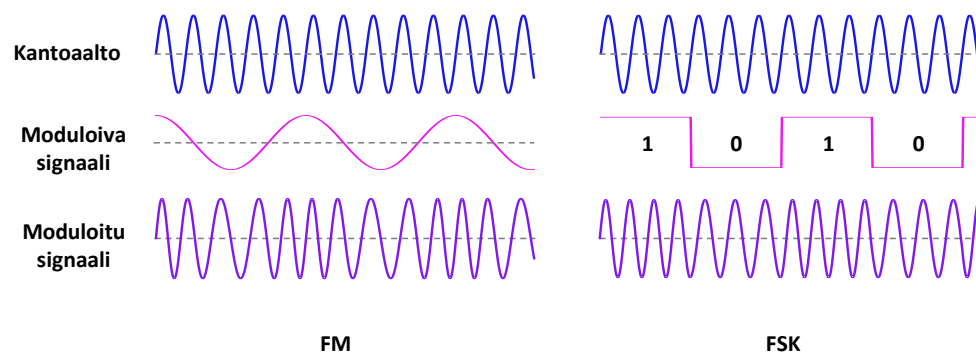
Kuva 3.14. Amplitudimodulointi analogiselle (AM) ja digitaaliselle (ASK) signaalille.

Taajuusmodulointi

Taajuusmodulaatio (FM) on laajasti käytetty menetelmä erilaisissa radioteknisissä järjestelmissä. Toisin kuin amplitudimodulaatiossa, taajuusmodulaatiossa signaalin amplitudi pidetään vakiona, kun taas sen taajuutta muutetaan moduloivan signaalin mukaan, kuten kuvassa 3.15 on esitetty. Taajuusmoduloinnin etuna verrattuna amplitudimodulaation on se, että häiriöt ja siirtoyhteyden ominaisuuksien muuttuminen vaikuttavat vähemmän vastaanotetun signaalin taajuuteen kuin sen amplitudiin. Tämän vuoksi FM-modulaatiota käytetään muun muassa ULA-lähetyksissä¹²⁹ ja monissa radiopuhelimissa. ULA-lähetyksessä, joka toimii 87,5 – 108 MHz alueella, moduloiva signaali on siis äänen voimakkuus. Kantoaallon taajuuden vaihtelu tulee pitää tietyissä rajoissa jotta eri kanavat eivät häiritsisi toisiaan, esimerkiksi ULA-lähetyksissä sallittu vaihtelu on ± 75 kHz. Samalla kuuluvuusalueella eri radioasemien kantotaajuuksissa on yleensä vähintään 0,4 MHz:n ero.¹³⁰

Vaikka FM on monessa suhteessa parempi kuin AM, AM on kuitenkin edelleen käytössä matalimmilla taajuusalueilla. Tärkein syy AM:n käyttöön on se, että FM vaatii toimiakseen suhteellisen suuren taajuuskaistan, jota taas matalilla taajuuksilla ei ole mahdollista varata yhteen käyttöön. AM-lähetyksestä saa kohtuullisesti selvää vaikka käytetty taajuuskaista olisikin kapea ja yhteyden laatu huono.¹³¹

FSK-modulaatiossa kantoaaltoa moduloi digitaalinen signaali, eli kulloisenkin lähetettävän bitin mukaan lähetetään jompaakumpaa kahdesta (tai useammasta) taajuudesta.



Kuva 3.15. FM- ja FSK-modulaatio: siirrettävä tieto liitetään kantoaallon taajuuteen (käytännössä taajuuden suhteelliset vaihtelut kantoaaltoon verrattuna ovat pienempiä kuin kuvassa).

Vaihemodulaatio

Vaihemodulaatiossa siirrettävä tieto liitetään kantoaallon vaiheeseen, matemaattisesti esitettynä seuraavasti:

¹²⁹ ULA = Ultralyhyet aallot, eli tämä on vain suomen kielessä käytetty lyhenne.

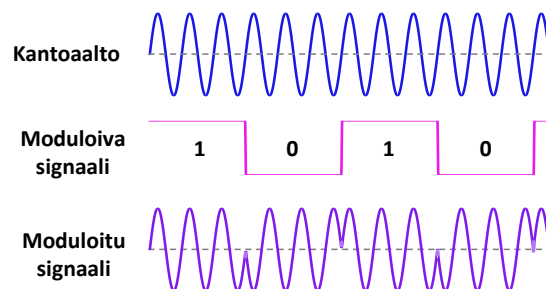
¹³⁰ <https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/radiotaajuuksienkaytto/radioasematsuomessa.html>

¹³¹ Katso esimerkiksi keskustelu tiede.fi-sivustolla, http://www.tiede.fi/keskustelu/5682/ketju/am_fm_lahete

$$y(t) = A_c \sin(w_c t + m(t) + \phi_c),$$

jossa t = aika, A_c = kanta-aallon amplitudi, w_c = kanta-aallon taajuus, ϕ_c = kanta-aallon vaihe ja $m(t)$ moduloi moduloitavan signaalin (y) vaihetta. Moduloivan signaalin positiivinen arvo siirtää siis kanta-aallon vaihetta eteenpäin ja negatiivinen taaksepäin.

Digitaalisilla signaaleilla vaihemodulaatio on helpompi hahmottaa kuin analogisessa signaalissa.¹³² Tällöin puhutaan PM-modulaation sijasta PSK-modulaatiosta. Kuvassa 3.16 on esitetty, kuinka bittisarja 0101 moduloi kanta-aaltoa. Kun bitti vaihtuu, signaalin vaihe muuttuu äkillisesti 180 astetta.



Kuva 3.16. PSK-modulaatio: digitaalinen tieto liitetään kanta-aallon vaiheeseen.

Bittinopeutta voidaan nostaa käyttämällä monitasoisia modulaatiota. Jos käytetään neljää eri vaihesiirtoa, 0-asteen vaihemuutos voi tarkoittaa bittikuviota 00, +90-asteen vaihemuutos bittikuviota 01, +180-asteen vaihemuutos bittikuviota 10 ja +270-asteen vaihemuutos bittikuviota 11. Lisäämällä vaihetasojen määrää saadaan siirrettyä enemmän bittejä samassa ajassa. Toisaalta, mitä pienempiä vaihemuutosten erot ovat, sitä herkempi tiedonsiirto on häiriöille. Kun erilaisia vaihemuutoksia on n kappaletta, käytetään lyhennettä n -PSK. Esimerkiksi 4-PSK tarkoittaa vaihemodulaatiota, jossa on 4 eri vaihetasoa.

Vaihemodulaatio on erikoistapaus yleisemmästä QAM-modulaatiosta (**Quadrature Amplitude Modulation**), jossa käytetään samanaikaisesti vaihe- ja amplitudimodulaatiota. Esimerkiksi 16-QAM koodauksessa on 16 erilaista symbolia, joten yksi symboli voi välittää 4 bittiä (koska $2^4 = 16$). QAM-koodausta käytetään nykyisin yleisesti mm. kaapeli-TV ja ADSL-järjestelmissä.

Siirtomediat

Informaatiota voi siirtää joko tarkkaan määriteltyä reittiä pitkin, käytännössä yleensä johtoa tai kuitua pitkin, tai vapaassa tilassa käyttäen vapaasti etenevää sähkömagneettista säteilyä. Erot näiden välillä eivät ole aivan täsmällisiä, sillä vaihtovirta johtimessa säteilee aina energiaa ulospäin. Riippuen johtimen tyypistä ja laadusta säteily voi olla merkittävää.

¹³² Analogisessa tiedonsiirrossa vaihemodulaatiota ei juurikaan käytetä.

Toisaalta vapaassa tilassa voidaan käyttää kapeita keiloja erityisesti silloin kun aallonpituudet ovat pieniä. Ääritapauksena voidaan ajatella tarkasti suunnattua lasersädettä. Tässä luvussa tarkastellaan vain määrättyä reittiä kulkevaa informaatiota historiallisessa järjestyksessä: avojohdot, parikaapeli, koaksiaalikaapeli ja valokuidut. Vapaan tilan käyttöä käsitellään viidennessä luvussa.

Huomaa, että vaikka sähkömagneettista signaalia voidaan periaatteessa lähettää samanaikaisesti molempiin suuntiin ilman että signaalit häiritsevät toisiaan, käytännössä on lähes aina edullisempaa varata oma johto tai johtopari kumpaankin suuntaan erikseen.

Avojohdot

Ensimmäisiin puhelinyhteyksiin käytettiin galvanoituja 2 mm tai 3 mm rautalankoja. Langat kiinnitettiin orsieristimiin, jotka sijoitettiin korkeisiin pylväisiin ja telineisiin talojen katolla (kuva 2.1). Aluksi käytettiin vain yhtä johtoa, jolloin suljetun virtapiirin aikaansäämiseksi paluujohtimena käytettiin maata. Yksijohtoisuuden ansiosta johdinmateriaalia säästy, mutta toisaalta yhteys oli hyvin altis häiriöille ja salakuuntelulle. Kaukoyhteyksillä (esimerkiksi Helsingin ja Porvoon välillä) ongelmat muodostuivat niin suuriksi, että yksijohtimisista avojohdoista oli pakko siirtyä vähemmän häiriöherkkiin avojohdinpareihin jo 1890-luvulla. Teräsjohtojen korvaaminen kuparijohdoilla paransi puhelinyhteyksien laatua, mutta samalla kasvatti olennaisesti kustannuksia.¹³³

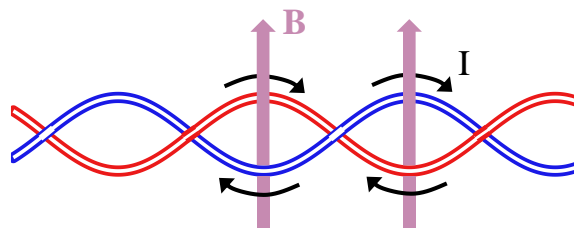
Vaikka Suomen kaukopuhelinverkko ulottuikin laajalle, signaalin vaimeneminen rajoitti puhelinyhteyksien pituutta. Signaalin vaimeneminen johtuu johdon resistanssin lisäksi kapasitanssista. Kaksi vierekkäistä johdinta muodostavat kondensaattorin, jonka kapasitanssi riippuu johtimien ominaisuuksista ja pituudesta. Pitkään linjaan muodostuu suuri kapasitanssi, jonka kautta merkittävä osa linjalle syötetystä signaalin tehosta menee hukkaan. Lisäksi johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä, joka puolestaan indusoi naapurijohtimeen virran, joka häiritsee siinä kulkevan signaalin vastaanottoa. Ylikuulumisen välttämiseksi johtimien paikkaa pylväsorsissa oli vaihdettava siten, että peräkkäisillä johdinväleillä syntyneet häiriöt kumosivat osittain toisensa. Periaate on sama kuin mitä käytetään parikaapelissa, jossa johtimet kierretään toistensa ympäri (kuva 3.17). Puhelimen nopean yleistymisen myötä alettiin miettiä ratkaisuja, joilla päästäisiin eroon suurista avojohdoryhmistä. Ensimmäisen vaiheen ajatus oli eristää johtimet ja kääriä niiden ympärille vaippa, eli tehdä useamman johtimen muodostama kaapeli. Lopuksi kaapelit pyrittiin sijoittamaan maan alle, pois sään ja kaatuvien puiden armoilta.

¹³³ Historiallisen osuuden tiedot pääosin kirjasta U.E. Moisala, K. Rahko, O. Turpeinen: Puhelin ja puhelinlaitokset Suomessa 1877-1977, s. 158-162.

Symmetrinen kaapeli eli ns. parikaapeli

Kierretty parikaapeli (*twisted pair*) on yleisin kodeissa ja työpaikoilla käytetty johtotyyppi. Kierretyssä parikaapelissa on nimensä mukaisesti kaksi toistensa ympäri kierrettyä eristettyä johdinta, joiden ympärille on muovivaippa. Johdinten kiertäminen vähentää sähkömagneettisten häiriöiden vaikutusta johdolla kulkevaan signaaliin, koska vierekkäisten silmukoitten läpi menevien magneettikenttien indusoimat virrat kumoavat toisensa (kuva 3.17). Vaikutus on sitä parempi, mitä tasakokoisempia silmukat ovat. Kierteen nousu pitää saada mahdollisimman tasaiseksi ja lisäksi johdinlankojen välisen etäisyyden tulee säilyä mahdollisimman hyvin vakiona, sillä johdinlankojen geometriset ominaisuudet vaikuttavat kaapelin impedanssiin. Koska jokaisesta impedanssinmuutoksesta heijastuu pieni osa signaalia takaisinpäin, huonolaatuinen johdin voi lopulta sotkea signaalin täysin varsinkin suurilla taajuuksilla.

Suojatussa kaapelissa johtimien ympärille on lisäksi palmikoitu kuparinen häiriösuoja. Kupariverkko toimii Faradayn häkkinä (*Faraday cage*)¹³⁴, joka vähentää johtimen ulkopuolella olevien sähkömagneettisten kenttien pääsyä sisäjohtimiin. Samalla suojaus estää kaapelia häiritsemästä ulkomaailmaa, sillä suurilla taajuuksilla (esimerkiksi 100 MHz) kaapeli toimii luontaisesti antennina eli se säteilee ympäristöönsä radioaaltoja.



Kuva 3.17. Ulkoisen magneettikentän (B) indusoimat virrat (I) kumoavat toisensa. Huomaa että yhdellä johdolla peräkkäisissä silmukoissa indusoidut virrat ovat eri suuntiin.

Suojaus voidaan toteuttaa joko suojaamalla jokainen pari erikseen tai käyttämällä koko johdinnipulle yhteistä suojausta. Tällä perusteella puhutaan STP (*Single-pair-shielded Twisted Pair*) ja FTP (*Folio shielded Twisted Pair*)-kaapeleista.¹³⁵ Suojaamaton parikaapeli tunnetaan merkinnällä UTP (*Unshielded Twisted Pair*).¹³⁶ Parikaapelit jaetaan lisäksi kategorioihin (*category*, Cat) siten, että suurempi numero (esim. Cat7) tarkoittaa parempilaatuista kaapelia kuin pienempi numero (esim. Cat5). Cat3-kaapelia käytetään lähinnä puhelinverkoissa, eikä se sovellu suurille taajuuksille ja bittinopeuksille. Cat5e:llä päästään 100 MHz:n taajuuteen ja 1 Gbit/s siirtonopeuteen suhteellisen lyhyillä

¹³⁴ Katso esimerkiksi, https://fi.wikipedia.org/wiki/Faradayn_h%C3%A4kki

¹³⁵ Tietoliikennealalla lyhenne FTP useimmiten viittaa termiin *File Transfer Protocol*, jota käsitellään luvussa 7.

¹³⁶ ISON merkinnät kaapeleille ovat hieman erilaiset: https://en.wikipedia.org/wiki/Twisted_pair#Cable_shielding

siirtoetäisyyksillä.¹³⁷ Nykyisin asennukset tehdään usein Cat6-kaapelilla, johon voidaan lisätä tarvittaessa suojaus. Cat7 on suunniteltu suurille nopeuksille 10 Gbit/s asti ja se on aina suojattu.

Puhelinverkon tilaajajohdoissa käytetään yleensä parikaapelia. Se mahdollistaa datasiirron ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) –tekniikan avulla.¹³⁸ Nimensä mukaisesti ADSL-siirtotekniikka on epäsymmetrinen, eli siirtonopeus on suurempi verkosta tilaajalle kuin tilaajalta verkkoon. Käytännössä ADSL:n maksiminopeus on noin 8 Mbit/s verkosta tilaajalle (myötäsuunta, *downstream*) ja 1 Mbit/s tilaajalta verkkoon (paluusuunta, *upstream*). Uusimmat ADSL-tekniikat (taulukko 3.1) mahdollistavat suuremmatkin nopeudet silloin kun tilaajajohto on hyvälaatuinen ja riittävän lyhyt. Jos kaapeli on huonolaatuinen tai pitkä, käytettävissä oleva nopeus saattaa jäädä selvästi pienemmäksi kuin nimellisoikeus. Yhteyden laatuun vaikuttaa lisäksi kaapelin naapurijohdinpareissa kulkevat yhteydet, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä muille ADSL-yhteyksille. ADSL on adaptiivinen systeemi, joka sopeutuu sähköisen ympäristön muutoksiin muuttamalla tiedonsiirtonopeuttaan.

Taulukko 3.1. ADSL-tekniikoiden määrittely. Tässä 'ylös' tarkoittaa suuntaa tilaajalta verkkoon ja 'alas' vastaavasti verkosta tilaajalle.

Lyhenne	Standardi	Max. nopeus alas (Mbit/s)	Max. nopeus ylös (Mbit/s)
ADSL	ANSI T1.413-1998 Issue 2	8,0	1,0
ADSL2	ITU G.992.3 (2002-2007)	12,0	1,3
ADSL2+	ITU G.992.5 Annex M (2008)	24,0	3,3

Koaksiaalikaapeli

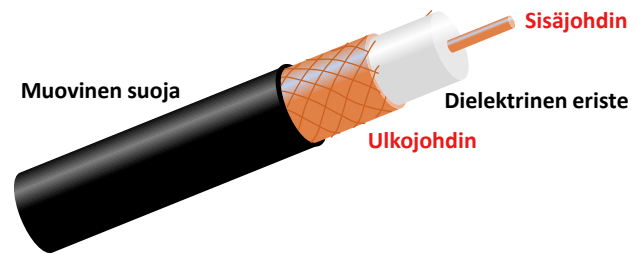
Koaksiaalikaapelia¹³⁹ on perinteisesti käytetty suurtaajuisten signaalien siirtämiseen mm. kaapelitelevisiojärjestelmissä ja television antennijohtimena. Myös Ethernet-verkon kaapelointina käytettiin aluksi koaksiaalikaapelia ja vasta myöhemmin siirryttiin pari- ja kuitukaapeleiden käyttöön. Koaksiaalikaapelissa on kaksi johdinta sisäkkäin siten että johdinten akselit ovat yhtenevät (kuva 3.18). Sisempi johdin on yleensä tavallista kuparilankaa, kun taas ulkojohdin on yleensä punottu ohuesta kuparilangasta. Ulkojohtimen ja sisäjohtimen välissä on eriste, joka on usein polyeteeniä. Uloimpana kaapelissa on muovinen suoja-kuori. Lisäksi saatetaan käyttää ohuita foliokerroksia ulkoisten häiriöiden vaimentamiseksi.

¹³⁷ Huomaa taajuuden ja bittinopeuden ero. Kaapeleiden ominaisuudet on yleensä suunniteltu korkeintaan 100 m siirtoetäisyydelle.

¹³⁸ Muitakin tekniikoita voidaan käyttää, mutta ne eivät ole yleisiä eikä niitä käsitellä tässä materiaalissa.

¹³⁹ Lisätietoja koaksiaalikaapelista esim. <https://kompo2010.wikispaces.com/Koaksiaalikaapeli>

Kuva 3.18. Koaksiaalikaapelin rakenne (”yksiputkinen”, esimerkiksi lähiverkoissa käytetty).



Lisäksi on huomattava, että korkeataajuuksinen sähkömagneettinen säteily kulkee johtimien välisessä eristeessä, ei itse johtimissa. Tämän ansiosta koaksiaalikaapeli ei juurikaan säteile ulospäin eikä se ole herkkä ulkopuolisille häiriöille. Koaksiaalikaapelin impedanssi (joka on siis eri asia kuin johtimen vaimennus) ei riipu mitenkään johtimen pituudesta vaan johtimien mittasuhteista ja eristemateriaalin ominaisuuksista. Tyypillisiä impedanssiarvoja ovat 50Ω ja 75Ω . Samoin kuin parikaapelissa impedanssimuutokset erityisesti kaapeleiden päissä aiheuttavat haitallisia heijastuksia ja häviöitä, joten kaapelin sovitukset on syytä tehdä huolella. Koaksiaalikaapelin vaimennus ei lyhyillä etäisyyksillä ole ongelma, mutta hyvin suurilla taajuuksilla koaksiaalikaapelin vaimennus kasvaa nopeasti suhteellisen suuresta kapasitanssista johtuen.

Valokuidut¹⁴⁰

Valokuidun eli optisen kuidun (optical fiber) käyttämistä tiedonsiirtoon ehdotettiin ensimmäistä kertaa vuonna 1966.¹⁴¹ Pohjoisamerikkalainen Corning Glass Works valmisti ensimmäisen käytännön tarpeisiin soveltuvan optisen kuidun vuonna 1970. Kaupalliseen käyttöön soveltuvat optiset järjestelmät saatiin kehitettyä 1976, mutta nopeus oli nykyisiin järjestelmiin verrattuna vaatimaton eli 45 Mbit/s. Kymmenen vuotta myöhemmin järjestelmien kapasiteetti oli 1,7 Gbit/s ja toistimien väli 50 km. Ensimmäinen Atlantin ylittävä optinen yhteys otettiin käyttöön vuonna 1988. Vuonna 2014 päästiin yhdellä kuidulla jo niin huimaan nopeuteen kuin 1 Pbit/s.

Valokuidut ovat immuuneja sähkömagneettisille häiriöille, eivätkä ne säteile itsestään ulospäin, joten optisen signaalin salakuuntelu on vaikeaa. Valokaapelien siirtohäviöt ovat oleellisesti pienemmät kuin parhaidenkaan kuparikaapelien. Valokaapeleilla päästään siten paljon kuparikaapeleita pidempiin toistinväleihin, jopa satoihin kilometreihin.

Valokuiduissa käytetään tyypillisesti aallonpituuksia 850 nm, 1300 nm ja 1550 nm, jotka kaikki ovat suurempia kuin näkyvän valon aallonpituudet (390 nm – 700 nm). Esimerkiksi 1550 nm aallonpituus tarkoittaa 193,4 THz taajuutta koska:

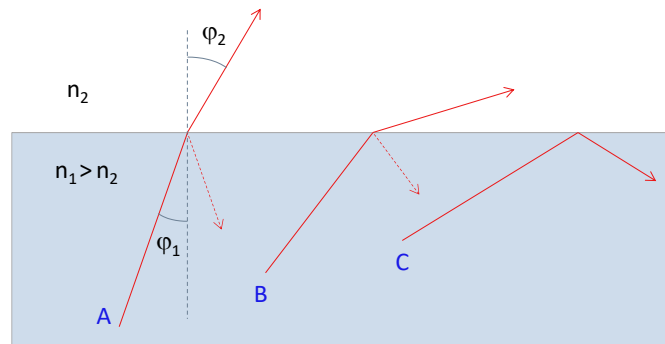
¹⁴⁰ Oranssi väri otsikossa tarkoittaa tässä ja myöhemmissä luvuissa sitä, että kyseisen kappaleen sisällöstä merkittävä osa on kirjasta Kirsi Willa, Seppo Uusitupa ja Mika Ilvesmäki: *Tietoliikenneaapinen*.

¹⁴¹ Perustiedot Wikipedia, *Fiber-optic communication*, https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication, katso myös <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/is-kecks-law-coming-to-an-end>

$$\lambda(193,4 \text{ THz}) = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{193,4 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{s}}} = 1550 \text{ nm}.$$

Koska kyseessä ei ole näkyvä valo, missään tapauksessa ei ole järkevää katsoa kuidun päähän tarkistaakseen mitä siellä mahdollisesti näkyy. Säteilytehot voivat olla niin suuria, että ne vahingoittavat silmää. Lyhyen matkan siirtoon tarkoitetuissa muovikuiduissa (POF, *plastic optical fiber*) käytetään myös näkyvää, punaista valoa, 650 nm, jota vastaavaa taajuus on 461 THz.

Valon tyhjiönopeuden suhdetta valon nopeuteen jossakin aineessa kutsutaan kyseisen aineen taitekertoimeksi (*refractive index*). Tyhjiön taitekerroin (n) on 1, veden noin 1,33 ja lasin noin 1,5. Lasin taitekerrointa voidaan kuitenkin säätää varsin laajoissa rajoissa käyttämällä sopivia lisäaineita.



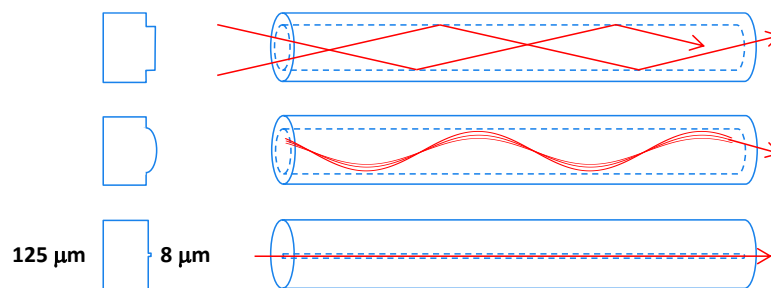
Kuva 3.19. Valon heijastuminen kahden väliaineen rajapinnassa ($n_1 = 1,5 n_2$). Tapauksissa A ja B osa signaalista läpäisee rajapinnan ja osa heijastuu takaisin, tapauksessa C tapahtuu kokonaisheijastuminen.

Kun tulevan säteen ja rajapinnan normaalin välinen kulma kasvaa, taittuva säde lähestyy rajapintaa. Kulmaa, jossa taittuva säde etenee rajapinnan suuntaisesti, kutsutaan kokonaisheijastuksen rajakulmaksi. Jos tulevan säteen ja rajapinnan normaalin välinen kulma on tätä kulmaa suurempi, valo ei pääse rajapinnan yli, vaan heijastuu rajapinnasta. Tällaista heijastusta kutsutaan kokonaisheijastukseksi. Kokonaisheijastuminen vaatii, että säteet tulevat kuituun riittävän loivassa kulmassa. Kaikkia säteitä ei saada heijastumaan samassa kulmassa, joten eri säteet kulkevat kuidussa eri matkan, jolloin ne saapuvat vastaanottiin eri aikoina. Tämän vuoksi kuituun lähetetty valopulssi leviää edetessään ja vaikeuttaa vastaanottimen toimintaa.

Askeltaitekertoiminen kuitu (*step-index fiber*) on yksinkertaisin ja vanhin kuitutyyppi (kuva 3.20). Siinä kuidun ytimen ja kuoren välinen taitekerroinraja on jyrkkä ja valonsäteet heijastuvat terävästi ytimen sisällä reunasta reunaan. Asteittaistaitekertoimisessa kuidussa (*graded index fiber*) ytimen taitekerroin pienenee asteittain kohti reunoja parabolisen kaa-

van mukaisesti. Tällaisessa rakenteessa valonsäteiden kulku muuttuu vähitellen jyrkän heijastuksen sijasta. Hyvälaatuisen asteittaiskuidun siirto-ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat kuin askeltaitekertoimisen kuidun.

Asteittaistaitekerroinkuidussakin jotkut säteet kulkevat suurempaan kuin toiset, mutta tasaisesti muuttuvan taitekertoimen ansiosta valopulssi ei leviä kovin paljon. Tämä johtuu siitä, että valon nopeus aineessa on kääntäen verrannollinen aineen taitekertoimeen, jolloin suoraan kulkevat säteet etenevät hitaammin kuin ne, jotka kiertävät ytimen ulkoreunan kautta. Molempien edellä kuvattujen kuitujen päästä tulevat valonsäteet ovat kulkeneet eripituiset matkat ja ovat eri vaiheissa. Näitä kuituja kutsutaan nimellä monimuotokuidut.



Kuva 3.20. Profilit ja valon heijastuminen eri kuitutyypeillä (ylhäältä alas): askeltaitekertoiminen, asteittaistaitekertoiminen ja yksimuotokuitu.

Jos kuidun ytimen halkaisijaa pienennetään ratkaisevasti ja samalla tehdään taitekerroinero ytimen ja kuoren välillä erittäin pieneksi (tyypillisesti noin 0,3 %), puhutaan yksimuotokuidusta (*single mode fiber*). Kuidun halkaisija on vain muutama aallonpituuden monikerta, eli noin 5 – 10 mikrometriä. Koska taitekertoimien ero on pieni, vain todella pienet heijastumiskulmat ovat mahdollisia. Voidaan ajatella, että kuituun mahtuu vain yksi muoto eli yhdellä tapaa taittuva valonsäde. Yksimuotokuitujen siirto-ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat kuin asteittaiskuiduilla.

Valokuitu peittoaa muut siirtomediat pitkällä siirtoetäisyydellään ja suurella kaistanleveydellään. Siirtoetäisyyttä rajoittaa johdon vaimennus, kaistanleveyttä puolestaan dispersio eli pulssin leveneminen sen kulkiessa johdon läpi. Vaimennusta aiheuttaa valokuitu itsessään ja valokaapelien väliset liitokset. Kuidun itsensä aiheuttama vaimennus syntyy valon absorptiosta (*absorption*) ja sironnasta (*scattering*) sekä kuidun taivutushäviöistä.

Vaikka valokuiduissa käytettävä lasi- tai kvartsimateriaali on erittäin puhdasta, kuituun jää aina pieniä määriä muita aineita. Jokainen näistä aineista aiheuttaa oman molekyylivärähtelynsä tai sen kerrannaisten kohdalle absorptiopiikin. Hyvälaatuisen yksimuotokuidun vaimennus on noin 0,2 dB/km, mikä siis tarkoittaa, että 15 km jälkeen valon energiasta on jäljellä puolet ja 150 km jälkeen yksi tuhannesosa. Monimuotokuidun vaimennus on tyypillisesti noin 3 dB/km.

Sironna tarkoittaa valon taittumista satunnaiseen suuntaan. Merkittävin sironnan laji on niin sanottu Rayleigh-sironna, joka pienenee voimakkaasti aallonpituuden kasvaessa. Rayleigh-sironnan aiheuttavat mikroskooppiset muutokset lasin tiheydessä ja sen seurauksena taitekertoimessa. Niin sanottua Mie-sirontaa aiheuttavat kuidussa olevat kuplat ja jännitykset. Jännityksiä ja pieniä murtumia syntyy, kun kuitu kierretään kelalle. Kun valokuitu taipuu liian pienelle kaarelle, kokonaisheijastuminen ei enää onnistu.