

1. JOHDANTO

1.1 Opintojakson sisältö

Mitä on tietoliikenne? Tietoliikenne ja siihen liittyvät keskeisimmät käsitteet on määritelty telesanastossa seuraavasti:

- tietoliikenne: *tiedonsiirtoon* ja *lähetykseen* perustuva viestintä, jossa käytetään hyväksi sähkömagneettisia järjestelmiä
- tiedonsiirto: *signaalien* siirto tietystä paikasta yhteen tai useampaan tiettyyn paikkaan
- lähetys: *signaalien* lähettäminen tietystä paikasta määräämättömälle vastaanottajajoukolle
- signaali: ajan mukana vaihteleva ilmiö, joka sisältää informaatiota

Tässä opintojaksossa käsitellään tietoliikenteen määritelmän mukaista aluetta jättäen termiin *lähetys* liittyvät asiat pois eli opintojaksossa ei käsitellä esimerkiksi yleisradio-toimintaa. Hyvin laajasti määritellystä tiedonsiirrosta käsitellään vain tiettyjä osaluokkia, erityisesti televerkkoja ja niihin liittyviä liikenneteoreettisia kysymyksiä. Opintojakso ja sen materiaali käsittää siten johdannon, teoreettisen osuuden sekä erilaisia televerkkoja käsittelevän osuuden.

Mikä eri osissa ja kokonaisuudessa on oleellista - muutenkin kuin tenttiä ajatellen? Teoreettisesta osuudesta oleellista on perusasioiden ymmärtäminen: satunnainen liikenneprosessi, sen mallintaminen ja mallin ratkaiseminen. Kaavojen ulkoa opetteleminen ei ole erityisen keskeistä, *jos* hallitsee mallien muodostamisen ja ratkaisemisen periaatteet. Keskeisimmät kaavat (Erlang ja M/M/1-malli) on kuitenkin varmuuden vuoksi hyvä opetella ulkoa, niillä voi nimittäin olla myöhempää käyttöä, sillä ne antavat hyvän lähtökohdan monenlaisiin suorituskäytännöihin (jos malleja osaa soveltaa oikein, sensijaan ilman perusteiden ymmärtämistä ei laskujen tulostakaan voi ymmärtää).

Verkkoratkaisuista käsitellään lähinnä ISDN:ää, ATM:ää, Ethernetiä, FDDI:tä sekä matkaviestiverkkoja (NMT ja GSM); näiden käsitteiden sisällön pitäisi selvitä kohtuullisen hyvin opintojakson aikana. Tämän lisäksi maailmassa on olemassa lukuisia erilaisia tietoliikenneverkkoja, joita ei tässä opintojaksossa käsitellä ollenkaan, eikä edellämäintuista verkoistakaan tarkastella kuin joitakin perustavimpia ominaisuuksia.

Lyhenteitä

ATM	Asynchronous Transfer Mode, asynkroninen siirtomuoto
B-ISDN	Broadband ISDN
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FIFO	First In First Out
GSM	Global System for Mobile Communication

HDTV	High Definition Television, teräväpiirtotelevisio
ISDN	Integrated Services Digital Network
LAN	Local Area Network, lähiverkko
MAN	Metropolitan Area Network, alueverkko
PCM	Pulse Code Modulation
RACE	Research & Development in Advanced Communications Technologies in Europe
STM	Synchronous Transfer Mode, synkroninen siirtomuoto
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
VCI	Virtuaalisen kanavan tunnus
VPI	Virtuaalisen väylän tunnus

1.2 Telealan merkitys

Ensimmäiseksi joitakin lukuja, jotka kuvaavat telealan yleistä merkitystä. Vuonna 1992 maailman telealan operaattoreiden ("puhelinlaitosten") kokonaistulot olivat yli 500 miljardia dollaria (G\$), ja laitevalmistajien liikevaihto yhteensä noin 120 G\$, eli yhteensä n. 2.7% maailman bruttokansantuotteesta. Varovaisen näkemyksen mukaan tietoliikenteen osuus bruttokansantuotteesta pysyy jotakuinkin ennallaan lähivuosien ajan; samalla liikenteen volyymin on arvioitu jopa kymmenkertaistuvan. Kiinteiden puhelinliittymien määrä maailmassa oli 1994 noin 630 miljoonaa ja hyvin nopeasti kasvava (70% vuodessa) matkapuhelimien määrä oli noin 55 miljoonaa. Suurimmat telealan operaattorit ja laitevalmistajat on esitetty taulukoissa 1.1 ja 1.2. Merkillepantavaa on erityisesti Japanin suhteellisen heikko asema verrattuna muuhun tietotekniikkaan: jos mukaan otetaan koko tietotekniikkasektori 10 suurimman yrityksen joukossa on 6 japanilaista. Nokia on ollut alan voimakkaimpia nousijoita noin 50% vuosittaisella kasvulla viimeisten 4 vuoden aikana. Vuoden 1995 Nokia telealan liikevaihto oli yli 26 miljardia markkaa, joten viime vuoden sijoitus lienee 9. maailmassa, sillä Fujitsun kasvuprosentit ovat olleet viime vuosina varsin pieniä.

Taulukko 1.1. Telealan suurimmat operaattorit 1994

		miljardia markkaa
1	NTT, Japani	281
2	AT&T, USA	187
3	Deutsche Telekom, Saksa	162
4	France Telecom, Ranska	100
5	BT, Britannia	90
6	Telecom Italia	78
7	GTE, USA	73
8	BellSouth, USA	72
9	Bell Atlantic, USA	60
10	MCI, USA	57

Taulukko 1.2. Telealan suurimmat laitevalmistajat 1994
(mukana vain kyseisten yhtiöiden telelaitteiden valmistus)

		miljardia markkaa/94	mrd USD 95	muutos%
1	Lucent Techn.(AT&T) USA	64	18.4	+6.2
2	Alcatel, Ranska	64	15.7	-0.8
3	Motorola, USA	64	16.2	+14.0
4	Siemens, Saksa	55	12.8	-7.2
5	Ericsson, Ruotsi	47	13.2	+16.2
6	NEC, Japani	45	13.0	+19.5
7	Northern Telecom, Kanada	37	10.1	+22.9
8	IBM, USA	28	7.8	+25.0
9	Fujitsu, Japani	22	6.6	+24.8
10	Nokia, Suomi	17	6.5	+46.8

Voimakkaasti yksinkertaistettuna tietoliikenteen vaikutus yleiseen kehitykseen voidaan esittää vertailemalla eri maiden bruttokansantuotetta ja puhelinliittymien määrää (yhden liittymän takana voi olla useitakin puhelimia). Kuvassa 1.1 on esitetty eri maiden puhelinliittymätiheys bruttokansantuotteen funktiona.

Vaikka kuvasta tehtävien johtopäätösten suhteen tulee olla hyvin varovainen, voitaneen päätellä, että televerkkojen kehitysasteella on vaikutusta yleiseen elintasoon (bruttokansantuotteella mitattuna). Tähän tulokseen ovat tulleet ainakin Itäeuroopan maat, jotka ovat hyvin voimakkaasti kehittämässä televerkkojaan. Esimerkiksi Saksan itäisen osan televerkkoon on tarkoitus investoida 55 miljardia D-markkaa vuoteen 1997 mennessä, mm. puhelinliittymien määrä on tarkoitus nostaa lähes nelinkertaiseksi. Verkko on käytännössä rakennettava kokonaan uudestaan, sillä puhelinkeskuksista suurin osa on 40 - 70 vuotta vanhoja. Tekniseltä tasoltaan tilanne on vastaava kaikissa itäblokin maissa, muualla niissä lisäongelmana on että verkon rakentamiseen tarvittavia jättimäisiä summia on vaikea saada koottua. Televerkkoja on kuitenkin pakko kehittää; esimerkiksi puolalaiset yhtiöt pitävät tutkimusten mukaan kaikkein vaikeimpana kehitystä estävänä tekijänä tietoliikenteen puutteellisuutta.

1.3. Telealan hallinto ja kilpailutilanne

Kukaan sanomalehtiä lukeva henkilö ei ole voinut välttyä huomaamasta, että teletoimen hoito Suomessa ja muualla maailmassa on melkoisessa käymistilassa: kysymys on siitä kuka ja millä ehdoilla saa hoitaa erilaisia telepalveluja. Pieni historiallinen tausta tälle kysymykselle ei liene pahitteeksi.

Telealan hallinnollista kehitystä voidaan luonnehtia seuraavasti¹ lähinnä USA:ssa, mutta kehitykseen vaikuttaneet tekijät ovat olleet periaatteessa samoja myös muualla. Aivan alkuvaiheessa keksimisensä (1876) jälkeen puhelin oli uusi palvelu, joka ei muodostanut kovin merkittävää osaa ihmisten elämässä. Tämän vuoksi ei katsottu myöskään tarpeelliseksi säädellä siihen liittyvää toimintaa, vaan puhelintoiminta sai kehittyä vapaasti varsinkin sen jälkeen kun Bellin patentin voimassaoloaika umpeutui 1894. Puhelinyhtiöitä perustettiin valtaisa määrä, mutta ongelmana oli kaukoliikenne, jossa AT&T:llä oli määräävä asema.

¹ Telephony, Sept. 1991

Ikävänä seurauksena oli tästä kehityksestä oli, että laitteet olivat toistensa kanssa yhteensopimattomia. Vähitellen yhteensopivuusvaatimus asiakkaiden keskuudessa kasvoi ja vuonna 1921 päädyttiin USA:ssa yhden yrityksen (AT&T) monopoliin. Kuitenkin jo 30-luvun alussa USA:ssa katsottiin, että puhelin on jokaiselle kansalaiselle kuuluva sosiaalisen kanssa-käymisen väline. Tämä vaatimus johti säädeltyyn monopoliin, joka jatkui 70-luvulle saakka, jolloin vähitellen menetettiin luottamus voimakkaaseen julkiseen sääntelyyn. Puhelimen rooli on samalla muuttunut; nyt sitä voitaneen luonnehtia lähinnä osaksi televiestinnän perusrakennetta, jonka päätehtävä liittyy taloudelliseen toiminnan kehittämiseen. Nämä ovat ehkä perussyyt pyrkimykseen vapauttaa teletoimi ja saada mahdollisimman suuri osa sen palveluista kilpailun alaiseksi.

USA:ssa telealan kilpailun voidaan katsoa alkavan 1970, jolloin pieni MCI yhtiö alkoi tarjota mikroaaltotekniikkaan perustuvia vuokrajohtoja yksityiseen puhelinikäyttöön. Kilpailun avautuminen eteni tämän jälkeen oikeusprosessien kautta, joiden avulla AT&T:n monopoli murrettiin. Tärkein päätös tehtiin vuonna 1984, jolloin AT&T:n kaukopuhelintoimi erotettiin omaksi yritykseksi ja paikallispuhelintoimi jaettiin seitsemään itsenäiseen, alueelliseen yhtiöön (kunkin yhtiön vuotuinen liikevaihto on vuodessa yli 10 miljardia dollaria). Vuonna 1992 kaukopuheluiden markkinaosuudet olivat: AT&T 62%, MCI 17%, Sprint 9% ja muut yhteensä 12%. On huomattava että vaikka AT&T on menettänyt jatkuvasti markkinaosuuttaan, sen saamat kokonaistulot ovat kasvaneet.

Suomessa teletoimen kehitys on tapahtunut verkkaisemmalla aikataululla: tullessa 30-luvulle Suomessa oli satoja paikallisia puhelinyhtiöitä ja myös niiden välinen liikenne oli yksityisten yritysten hallinnassa. Suomessa ei kuitenkaan päädytty yhteen monopoli-yritykseen (joka useimmissa maissa oli Posti- ja Telelaitos, PTL) vaan paikallista puhelintoimintaa jäi hoitamaan useita satoja pieniä puhelinyhtiöitä sekä PTL ja ainoastaan kaukopuhelintoiminta keskitettiin kokonaisuudessaan PTL:een. Erityisesti 50-luvulla suuri joukko pieniä puhelinyhtiöitä liittyi joko suurempiin yhtiöihin tai PTL:een, koska verkon automatisointi vaati suhteellisen suuria laiteinvestointeja. Tällä hetkellä alueellisia puhelinyhtiöitä on jäljellä yli 40, mutta yhtiöiden välinen yhteistyö on jatkuvasti tiivistymässä. Vuoden 1995 teletoiminnan markkinoiden arvioitu jakautuminen Suomessa on esitetty taulukossa 1.3.

Taulukko 1.3. Telealan markkinajakauma 1995 (arvio)

<i>Miljoonaa mk</i>	<i>Tele</i>	<i>Puhelinyhtiöt</i>	<i>Telivo</i>	<i>Yhteensä</i>
Paikallispuhelut	830	2370		3200
Kaukopuhelut	180	240	30	450
Ulkomaanpuhelut	900	230	120	1250
Matkapuhelut	1850	250		2100
Datasiirto	380	320		700
Yhteensä	4140	3410	150	7700

Paikalliset puhelinyhtiöt ovat siten edelleenkin paikallispuhelinryityksiä, joskin matkapuheluiden osuus kasvaa niidenkin liikevaihdosta merkittäväksi muutamassa vuodessa, kuten Telellä on jo käynytkin. Vielä 90-luvun alussa Telen paikallis-, kauko- ja ulkomaanpuhelut muodostivat kukin noin 1 miljardin markan liikevaihdon, matkapuhelintoiminnan ollessa selvästi pienempi. Henkilökunnan määrät olivat v. 1990 Telellä

10600 ja puhelinyhtiöillä 9600. Kilpailun avauduttua ja teknisen kehityksen ansiosta (erityisesti puhelinverkkojen digitalisointi on vaikuttanut oleellisesti) henkilökunnan määrä on supistunut voimakkaasti. Vuoden 1995 alussa Telellä oli enää noin 6200 työntekijää, ja puhelinyhtiöillä yhteensä hieman enemmän.

Kehitys on muualla maailmassa hyvin samansuuntainen: esimerkiksi vuoden 1993 aikana Ruotsin Telia vähensi henkilökuntaa 18% (41700 → 34000) ja Iso-Britannian BT 9% (171000 → 156000). Vuoden 1996 alussa AT&T ilmoitti supistavansa henkilökuntaansa useilla kymmenillä tuhansilla. Työntekijöiden määrä on lisääntynyt lähinnä uusilla matkapuhelinoperaattoreilla sekä kansainvälistä teletoimintaa harjoittavilla operaattoreilla. Henkilökunta-vähennykset koskevat lähinnä televerkkojen rakentamista, sensijaan korkeamman tason asiantuntijoista esimerkiksi matkapuhelinpuolella näyttää olevan ainakin muutaman lähivuoden ajan enemmän kysyntää kuin tarjontaa.

Teletoimintaa on vapautettu lähes kaikissa Euroopan maissa, aikataulut ovat kuitenkin erilaisia. Taulukossa 1.4 on vertailtu sääntelyn voimakkuutta eri maissa siten, että 1 on voimakkaimmin säädelty ja 5 vähiten säädelty². Taulukko kuvaa tilannetta muutama vuosi sitten; jos taulukko päivitetään nykyiseen tilanteeseen Suomen pisteiden keskiarvo on hyvin lähellä viittä (nykytilanteesta tarkemmin seuraavilla sivuilla). Taulukon esittämässä vertailussa Suomi sijoittuu siten varsin korkealle, selvästi edellä on ainoastaan Iso-Britannia, joka on ollut edelläkävijä telealan sääntelyn purkamisessa. Syy korkeaan sijoitukseen on paljolti siinä, että Suomessa on ollut valmiina kaksi kilpailevaa osapuolta (PTL ja paikalliset puhelinyhtiöt) toisin kuin lähes kaikissa muissa Euroopan maissa, joissa PTL:n kilpailijat ovat joutuneet aloittamaan lähes tyhjästä. Eli Suomessa on ollut valmiina teleoperaattoreiden ryhmä, joka on katsonut itselleen edulliseksi pyrkiä avaamaan kilpailua!.

Edellytykset todelliselle kilpailutilanteelle telepalveluissa ovat Suomessa siten erityisen hyvät—itse asiassa paremmat kuin esimerkiksi Iso-Britanniassa, jossa tärkein vanhan telemonopolin BT:n kilpailija, Mercury, on joutunut melkoisiin taloudellisiin vaikeuksiin. Uuden operaattorin ongelmana on että vaikka paikallispuhelut voivat olla tuottavia vanhalle operaattorille, niin uusi operaattori joutuu rakentamaan uuden verkon, jonka investointien takaisinmaksuaika on yleensä pitkä. Lisäksi uuden operaattorin on lähes mahdotonta tarjota yhtä kattavaa palvelua kuin vanha monopoli. Esimerkiksi Mercury on jäänyt jonkinlaiseksi väliinputoajaksi noin 9% markkinaosuudellaan vuosia kestäneiden hyvin raskaiden investointien jälkeen. BT on vahva kilpailija kaikissa telepalveluissa (kilpailun ansiosta senkin toiminta on tehostunut) ja toisaalta tuottavimmilla kapeilla sektoreilla on noussut uusia kilpailevia yrityksiä, joiden taustalla on mm. kaapeli-TV-operaattoreita, sähköyhtiöitä ja rautatiet. Parhaiten kilpailutilanne näyttää toimivan matkapuhelinverkoissa, joissa lähtökohdat ovat kohtuulliset aivan uusillekin operaattoreille.

² Communications International, Nov. 1991

Taulukko 1.4. Telealan sääntely Euroopassa 1992.

1 = voimakkaasti säädelty 5 = ei säädelty	pääte- laitteet	perus- palvelut	data- palvelut	riippu- maton valvonta	yksityisv erkkojen rajoitukset	matka- viestin ja satelliitti- yhteydet	tariffit	keski- arvo
Belgia	2	1	2	2	3	1	3	2,0
Espanja	3	1	2	4	2	2	2	2,3
Hollanti	3	1	4	4	3	2	3	2,8
Irlanti	2	1	3	3	3	1	3	2,3
Iso-Britannia	4	4	5	5	5	4	4	4,6
Italia	2	1	2	2	1	2	2	1,7
Itävalta	2	1	2	1	1	1	2	1,4
Kreikka	3	1	2	1	1	1	1	1,4
Norja	3	1	3	4	3	2	2	2,7
Portugali	3	1	2	3	2	1	2	2,0
Ranska	3	1	3	4	3	4	3	3,0
Ruotsi	3	2	4	5	4	4	5	3,8
Saksa	3	1	4	4	3	4	3	3,1
Suomi	4	3	4	4	4	3	3	3,6
Sveitsi	2	1	3	2	2	1	3	2,0
Tanska	3	2	3	4	4	2	3	3,1

Mikä on sitten käytännössä telealan tilanne Suomessa:

- Pääte-aittekauppa on ollut vapaata vuodesta 1987, kuitenkin myynnissä saa olla ja verkkoon saa liittää vain tyyppihyväksytyjä laitteita.
- Maanlaajuista datasiirtotoimintaa harjoittavat sekä Tele että paikalliset puhelin-yhtiöt (Datatie). Kilpailun alkaminen pudotti datasiirron maksut noin puoleen aikaisemmasta.
- Yleisen verkon matkapuhelinpalveluissa Telellä oli aikaisemmin monopoliasema (NMT-verkot), mutta tilanne on ratkaisevasti muuttunut parin viime vuoden aikana uuden digitaalisen matkapuhelintekniikan (GSM) myötä. Matkaviestinverkot ovat tulevaisuuden kannalta hyvin keskeisiä, koska puhelinliikenteen ja -liittymien kasvu ohjautuu matkapuhelinverkkoihin.
- Ulkomaanpuhelut olivat Telen monopoli kesään 1994 asti. Hintakilpailu ulkomaan-puheluissa on vaikeampaa kuin kotimaanverkoissa, koska kustannukset riippuvat paljolti ulkomaisten operaattoreiden kanssa tehtävistä sopimuksista.
- Kaukopuhelinliikenne oli vuosikymmeniä PTL:n eli nykyisen Telen monopoli. Vuoden 1994 alusta lukien puhelimen käyttäjä on voinut valita puhelukohtaisesti minkä operaattorin kaukoverkkoa hän käyttää, tai sitten tehdä sopimuksen, jolla kaukopuhelut reititetään kiinteästi yhden operaattorin kautta.
- Paikallispuhelinliikenteessä paikallisilla puhelinryityksillä on ollut monopoli omalla alueellaan ja Telellä omalla alueellaan (vajaa 30% paikallispuheluista on peräisin Telen verkosta, lähinnä haja-asutusalueilta). Samanaikaisesti kaukopuhelinmonopolin lakkauttamisen kanssa myös paikallispuheluiden monopoli lakkautettiin, ainakin periaatteessa, mutta kuten jo edellä todettiin, kilpailevan operaattorin tulo paikallispuheluihin on huomattavasti hankalampaa kuin kaukoverkkoon.

Kaukopuhelujen hinnat laskivat ensimmäisten kuukausien aikana kilpailun avautumisen jälkeen varsin nopeasti. Tämän jälkeen operaattorit ilmeisesti havaitsivat, että jatkuva vuorovedolla tapahtuva tariffien laskeminen ei välttämättä ole niiden etujen mukaista, ainakaan sen jälkeen kun markkinaosuudet vakiintuivat. Lisäksi on muistettava, että

kauk puhelujen hinnat laskivat välillä 1978 - 1993 reaalisesti noin 75%, samalla kun paikallispuhelujen hinnat eivät ole oleellisesti muuttuneet, joten hinnoissa ei välttämättä ole kovin suurta pudotusvaraa.

Kilpailun avautuminen vaikuttaa oleellisesti palvelujen hintarakenteeseen. Kuten jo ennakolta arvioitiin, paikallispuhelujen hinnat pikemminkin nousevat kilpailun avautumisen jälkeen. Liikenneministeriön teettämän tutkimuksen mukaan paikallispuhelut kallistuivat keskimäärin 4%. Kotitalouksien ja pienyritysten paikallispuhelukilpailu on mahdollista lähinnä suurimmissa asutuskeskuksissa, erityisesti sellaisissa paikoissa, joissa kilpailtavana on myös suurempia yrityksiä. Haja-asutusalueilla kilpailusta pitää huolen lähinnä matkapuhelinverkot. Kiinteissä verkoissa kilpailu onkin kovinta suurten liikeyritysten teleliikenteessä; LM:n tutkimuksen mukaan suuryritysten telemaksut alentuivat lähes viidenneksellä vuoden 1994 aikana ja vastaavasti pienyrityksillä noin 6 %. Kun suuret yritykset voivat kilpailuttaa teleoperaattoreita, jää paikallisverkon kustannuksista entistä suurempi osa pientilaajien maksettaviksi.

Kehitys johtanee siihen että kauk puhelun hinta—tai pikemminkin kaukoverkon osuus koko yhteyden hinnasta—voi pudota alle paikallispuhelun hinnan. Tämän jälkeen ei Suomen kokoisessa maassa ole oleellista eroa paikallis- ja kauk puheluilla vaan (kotimaan) puheluiden hinta on riippumaton etäisyydestä. Itse asiassa tähän on jo tilanne matkapuhelinverkoissa, joiden osuus puhelinliikenteestä kasvaa hyvin voimakkaasti.

Joka tapauksessa kilpailun näyttää alentavan kotitalouksienkin puhelinkuluja. Erään kansainvälisen tutkimuksen mukaan vapaan telekilpailun maissa kotitalouksien puhelinkulut laskivat vuodesta 1990 vuoteen 1994 yli 3 % kun vastaavana aikana monopoli- maissa kulut nousivat keskimäärin yli 8%.

1.4 Tietoliikenneverkkojen teknisen kehityksen piirteitä

Ennenkuin mennään varsinaisesti nykyisten ja lähivuosien televerkkojen ominaisuuksiin, seuraa hyvin suppea esitys siitä, miten televerkot tekninen kehitys on tapahtunut eräästä näkökulmasta katsottuna³.

Tiedon välittämiseen liittyvät kulut muodostuvat kahdesta päätekijästä: siirtotekniset ja välitystekniset kustannukset. Aivan alkuvaiheessa siirtojärjestelmät olivat kalliimpia, koska jokaiselle yhteydelle tarvittiin oma kuparikaapeli. Puhelujen välitys hoidettiin käsivälitteisesti ja palkkataso oli alhainen. Tällöin voitiin tuhlata välityskapasiteettia, jotta säästettäisiin siirtojärjestelmäkuluissa.

Ensimmäinen vallankumous oli ns. kantoaaltojärjestelmien kehittäminen, jolloin yhdellä johtoparilla voitiin välittää yhä suurempi määrä puheluja, samalla tietysti siirtokustannukset putosivat dramaattisesti. Myös välitystekniikka kehittyi vähitellen, mutta ei yhtä nopeasti. Tällöin välitysjärjestelmät olivat suhteellisesti kalliimpia, jolloin niissä kannatti säästää siirtojärjestelmien kustannuksella. Tämä tilanne säilyi varsin pitkään, jopa 60-luvulle saakka. Tällöin dataliikenteen lisääntyessä oli vielä kannattavaa käyttää piirikytkentäistä tekniikkaa eli varata tietty kiinteä siirtokapasiteetti vaikka dataa ei kulkenutkaan kuin ajoittain. Tällä tavoin voitiin välitystekniikka pitää yksinkertaisena, mutta toisaalta siirtojärjestelmien käyttöaste jäi alhaiseksi.

Tultaessa 1970-luvulle mikropiiriteknologian kehittyminen alensi merkittävästi välitystekniikan ja erityisesti keskusten ohjauksen kustannuksia, sensijaan siirtojärjestelmien

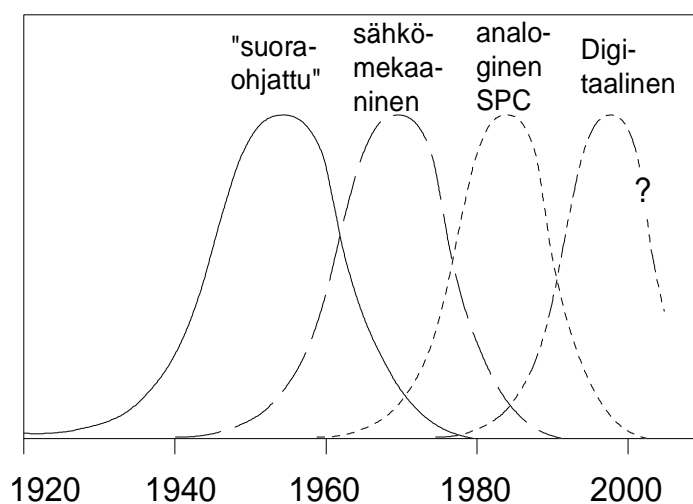
³ L. Kleinrock, Proceedings of IEEE, Feb. 1991.

kustannukset eivät oleellisesti muuttuneet. Tämä johti datasiirron puolella pakettikytkentäisten järjestelmien kehittämiseen, jolloin siirtojärjestelmiä käytetään tehokkaasti, mutta välitystekniikka on monimutkaista ja suhteellisen hidasta.

Optinen siirtotekniikka on muuttanut tilanteen jälleen kerran siirtotekniikan eduksi. Optisten järjestelmien kapasiteetti tuntuu lähes rajattomalta: yhdellä kuidulla voidaan periaatteessa välittää hyvinkin 1 Tbit/s (= 10^{12} bit/s) ja 2,4 Gbit/s on jo nyt kaupallista tekniikkaa. Viidessätoista vuodessa siirtojärjestelmien kustannukset ovat pudonneet yhteen tuhannesosaan⁴ (tämä koskee lähinnä suurikapasiteettisia järjestelmiä ja pitkiä yhteyksiä). Välitystekniikka on selvästikin muodostumassa pullonkaulaksi. Tämä on jo otettu huomioon kehitettäessä uusia järjestelmiä: uusille laajakaistaisille televerkoille on tyypillistä, että niissä välitystekniikka pyritään tekemään mahdollisimman yksinkertaiseksi, jotta olisi mahdollista kytkeä hyvin suurisiirtonopeuksisia yhteyksiä.

Entä onko odotettavissa uutta vallankumousta, joka muuttaisi kustannussuhteita. Tällä hetkellä vastaus on ei. Optinen välitystekniikka voisi olla sellainen samoin ehkä suprajohtavat kytkentäelementit; siirtotekniikka näyttää kuitenkin kulkevan edellä hyvin pitkälle tulevaisuuteen.

Vielä muutama sana välitystekniikan kehitymisestä, joka on muodostunut useiden väli-vaiheiden kautta analogisista (ja manuaalisista) keskuksista täysin digitaaliseen tekniikkaan. Kehitys voidaan kuvata eri teknologioiden toistensa kanssa päällekkäisillä kehityskäyrinä⁵ (kuva 1.2). Ensimmäinen vaihe käsivälitteisten keskusten jälkeen oli suoraan ohjautuvat keskuksat; vanhat numerolevypuhelimet katkoivat tilaajajohdossa ollutta virtapiiriä valitun numeron mukaisesti ja näiden impulssien avulla voitiin ohjata puhelun muodostusta puhelinkeskuksissa, keskus keskukselta, yksi välitinlaitteporras yhdellä numerolla. Järjestelmä oli toki toimiva, mutta samalla hyvin jäykkä numeroinnin ja verkon rakentamisen kannalta. Sähkömekaaninen tekniikka lisäsi tältä osin verkkoon joustavuutta, keskusten koko pieneni jne. Tämän sukupolven keskuksia on ollut käytössä aivan viime aikoihin asti, mutta uusien palveluiden asettamien vaatimusten ja suurehkojen huoltokustannusten vuoksi ne ovat poistumassa varsin nopeasti käytöstä.



Kuva 1.2 Välitysjärjestelmien teknologian kehitysvaiheet

Seuraava vaihe oli tietokoneohjauksen tuominen puhelinkeskuksiin ilman että varsinainen siirto- ja välitystekniikka muuttuivat juuri ollenkaan. Tälle tekniikalle asetetut odo-

⁴ P. White, IEEE Comm. Magazine, Jan. 1993.

⁵ R. Fike, Telephony, Oct. 1994.

tukset olivat aikanaan hyvin suuret; ohjelmallisestihan voidaan ohjata mitä tahansa halutulla tavalla, ainakin teoriassa. Käytäntö osoittautui kuitenkin paljon hankalammaksi; puhelinkeskuksen ohjaaminen keskitetysti yhdellä tietokoneella on todellisuudessa hyvin vaikea ongelma eikä 70-luvun tietokone- ja ohjelmistotekniikka tahtonut riittää luotettavien järjestelmien luomiseen. Tämä teknologiavaihe jäikin varsin lyhyeksi, sillä kehitys kulki kohti täysin digitaalista tekniikkaa, jossa sekä siirto-, välitys- että ohjaustekniikkaa ovat digitaalista. Samalla useimmat valmistajat ovat siirtyneet pitkälti hajautettuun ohjaukseen, jossa jo jokaisella tilaajaliitännäkortilla on oma prosessori. Tämän teknologian uranuurtajia on ollut Nokia edeltäjinään; digitaaliset keskuksat painoivat puhelinkeskusten kustannukset murto-osaan aikaisempiin tekniikoihin verrattuna. Tällä hetkellä ehdottomasti suurin puhelinkeskusten kehityspanos koskee ohjelmistoja, joiden avulla hallitaan sekä yksittäisen puhelun ohjaus että erityisesti televerkon toiminta kokonaisuudessaan. Sensijaan varsinaiset valmistuskustannukset yhtä tilaajaliittymää kohti eivät ole kovin korkeat.

Kehitykselle on ollut luonteenomaista teknologiamuutosten nopeutuminen: jokainen uusi tekniikka on tullut, kypsynyt ja poistunut käytöstä nopeammin kuin edeltäjänsä. ISDN (johon palataan tämän kurssin yhteydessä myöhemmin) on jossain muodossa seuraava vaihe, vaikka se kohdistuukin enemmän tilaajajohtoon ja sen käyttöön sekä puhelujen ohjaukseen kuin varsinaiseen välitystekniikkaan. ATM vaikuttaa enemmän välitystekniikkaan ensisijassa muuhun kuin puhelinliikenteeseen.

Tulevaa kehitystä kuvaavia tekijöitä ovatkin mm. palvelujen kirjon laajentuminen puhelimesta ja teleksistä mitä erilaisimpiin palveluihin. Vaikka erilaisia palveluja on pyritty integroimaan samaan verkkoon, näyttää kehitys - ainakin tällä hetkellä - vievän yhä lukuisampiin televerkkoihin: puhelinverkko, ISDN, B-ISDN (ATM), lähiverkot (Ethernet, Token ring, Token bus, FDDI), dataverkot (X.25, Frame Relay), matkaviestinverkot (NMT, GSM, CT2, DECT), kaapelitelevisioverkot jne. Teleoperaattorin suurin haaste on saada eri verkkojen yhteistoiminta niin sujuvaksi, että asiakkaille tarjottavat palvelut saadaan riippumattomiksi varsinaisesta verkkotekniikasta.

1.5 Tietoliikenneverkkojen perusominaisuuksia

Tiedonsiirtoverkkoja voidaan tarkastella hyvin monista näkökulmista:

- minkälaista informaatiota verkossa siirretään
- mitkä ovat asiakkaat
- millainen on verkon rakenne
- minkälaisia siirtonopeuksia käytetään tilaajaliitännässä ja runkoverkossa
- mikä on verkon alueellinen kattavuus (koko)
- onko verkkoratkaisussa oleellista päätelaitteet, liitännät, siirtotekniikka, välitystekniikka jne.
- minkälaisia päätelaitteita käytetään
- mikä on tiedon esitysmuoto
- käytetäänkö yhteydellistä vai yhteydetöntä siirtotapaa
- miten verkon siirtokapasiteetti jaetaan,
- mikä on verkon läpäisykyky eli kuinka tehokkaasti siirtokapasiteettia voidaan hyödyntää
- millaisen palvelun laadun verkko voi taata (esto, virhesuhteet, viiveet, tietoturvallisuus),

- mitkä ovat verkon perusvahvuudet ja heikkoudet verrattuna muihin ratkaisuihin
 - mikä teknologian kypsyysaste (käytössä enemmän tai vähemmän vasta tulossa)
 - mitkä ovat veloituserusteet
 - miten verkosta voidaan liittyä muihin verkkoihin
 - minkälaista numerointia käytetään, miten reititys hoidetaan
- jne.

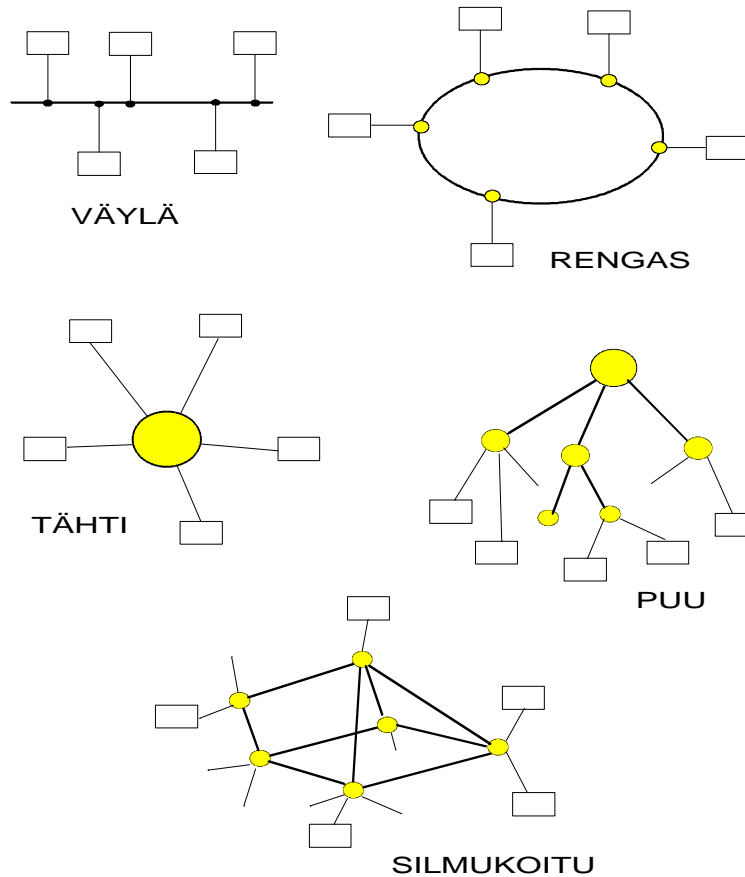
Kaikki nämä asiat eivät varmastikaan selviä jokaisen verkkoratkaisun osalta tämän opin-tojakson aikana vaan tarkasteltavaksi on otettu vain joitakin keskeisimpiä kohtia.

Nykyiset televerkot voidaan luokitella käyttötarkoituksen mukaan joko puhe-, data- tai kuvansiirtoverkoiksi (*datasiirto* on tiedon siirtoa, jossa päätelaitteina käytetään tietokoneita tai niiden oheislaitteita). Rajat ovat kuitenkin hämärtyneissä, esimerkiksi puhelinverkkoa käytetään varsin laajasti datasiirtoon ja ISDN-verkko on nimensä (Integrated Services Digital Network) mukaisesti tarkoitettu erilaisten signaalien siirtämiseen.

Verkkoja luokitellaan, erityisesti käyttötarve-ennusteita tehtäessä, asiakastyypin mukaan (kotitilaajat, pienyritykset, suuryritykset) tai liikenteen mukaan (kotitilaajaliikenne, yritysten sisäinen tiedonsiirto ja yritysten välinen tiedonsiirto). Verkolle asetettavat vaatimukset ovat erilaisia: kotitilaajaliittymien tulee olla mahdollisimman halpoja, sen sijaan yritysten kannalta tärkeitä suureita ovat mm. verkon suorituskyky ja luotettavuus ja tiedon salattavuus, tämä näkyy myös eri verkkojen ominaisuuksissa.

Verkon rakenteeseen liittyviä tekijöitä ovat verkon muoto ja koko. Tyypillisiä verkon rakenteita ovat väylä, rengas, tähti, puu ja silmukoitu verkko, kuva 1.3. Verkon solmupisteen (keskus, liitäntäyksikkö ym.) koko kuvaa solmupisteen monimutkaisuutta ja sille asetettavia vaatimuksia.

Vaikka rakenne kuulostaa varsin yksinkertaiselta ja selkeältä asialta, tietoliikenne-verkkojen kohdalla asiaa hämärtaa se, että verkon fyysinen rakenne (eli miten johdot kulkevat) ei läheskään aina vastaa toiminnallista eli loogista rakennetta. Tyypillinen esimerkki on lähiverkot, jotka usein johdotetaan tähtimäisesti yhteen pisteeseen, vaikka verkko on loogisen toiminnan kannalta väylä tai rengas. Myös puhelinverkosta voidaan löytää erilaisia rakenteita riippuen tarkastelutasosta: numeroinnin kannalta verkko on yleensä puumainen, mutta fyysinen rakenne esimerkiksi kaukopuhelinverkossa on hyvin pitkälle silmukoitu mm. luotettavuuden lisäämiseksi.



Kuva 1.3. Verkkorakenteita.

Tähän saakka televerkoissa käytetty tiedon esitystapa on määräytynyt verkossa siirrettävän informaation mukaan: puhetta on siirretty joko analogisesti tai muutettuna digitaaliseksi signaaliksi, dataa lähinnä pakettimuotoisesti ja TV-kuvaa edelleenkin lähes yksinomaan analogisessa muodossa. Kaikille näille ratkaisuille on ollut hyvät perustelut - mutta toisaalta voidaan esittää perusteluja myös tavoitteelle, että kaiken informaation esitysmuoto tulisi olla sama riippumatta informaation sisällöstä. Eli mitä tapahtuu kun nämä kaikki - puhe, data, liikkuva ja kiinteä kuva - yhdistetään samaan verkkoon kuten laajakaistaisen ISDN:n tapauksessa? Vastaukselta näyttää solumuotoinen esitystapa, jota selostetaan tarkemmin ATM:n yhteydessä.

Tiedonsiirto voi olla joko yhteydellistä ja yhteydetöntä. Ensimmäisessä tapauksessa ennen varsinaista siirtotapahtumaa muodostetaan yhteys verkon läpi ja varataan yhteyden tarvitsema kapasiteetti verkon eri osissa; tyypillinen esimerkki on puhelun muodostuminen puhelinverkossa. Ensimmäisen sukupolven automaattikeskuksissa puhelun reititys oli periaatteessa varsin yksinkertaista: kullakin puhelinnumeron yksittäisellä numerolla ohjattiin suoraan jotakin verkon laitetta kunnes oltiin ns. B-tilaajalla saakka. Nykyisessä puhelinverkossa liittymän numero ja fyysinen sijainti voidaan erottaa täysin toisistaan: tilaajan valitsema numero kertoo ainoastaan mistä löytyy tieto halutun päätelaitteen sijainnista. Muodostunut yhteys on kuitenkin periaatteessa samanlainen kuin ennenkin eli tietyt verkon resurssit ovat varattuina tietylle puhelulle koko yhteyden ajan.

Yhteydettömän siirron tapauksessa reittiä ei määritellä kiinteästi ennalta, vaan jokainen datapaketti sisältää reitityksessä tarvittavat osoitetiedot. Kahden päätelaitteen välillä kulkevat paketit voivat siten kulkea eri reittejä, jolloin niiden kulku-ajat voivat olla erilaisia, ja jopa pakettien järjestys saattaa vaihtua matkalla (useimmiten

pakettimuotoisessakin siirrossa reitti pysyy koko yhteyden ajan samana). Yhteydetön siirtotapa soveltuu siten lähinnä datasiirtoon.

Taulukkoon 1.5 on pyritty kokoamaan joidenkin tietoliikenneverkkojen tärkeimpiä ominaisuuksia edellä esitetyn jaottelun pohjalta.

Taulukko 1.5. Tietoliikenneverkkojen joitakin perusominaisuuksia

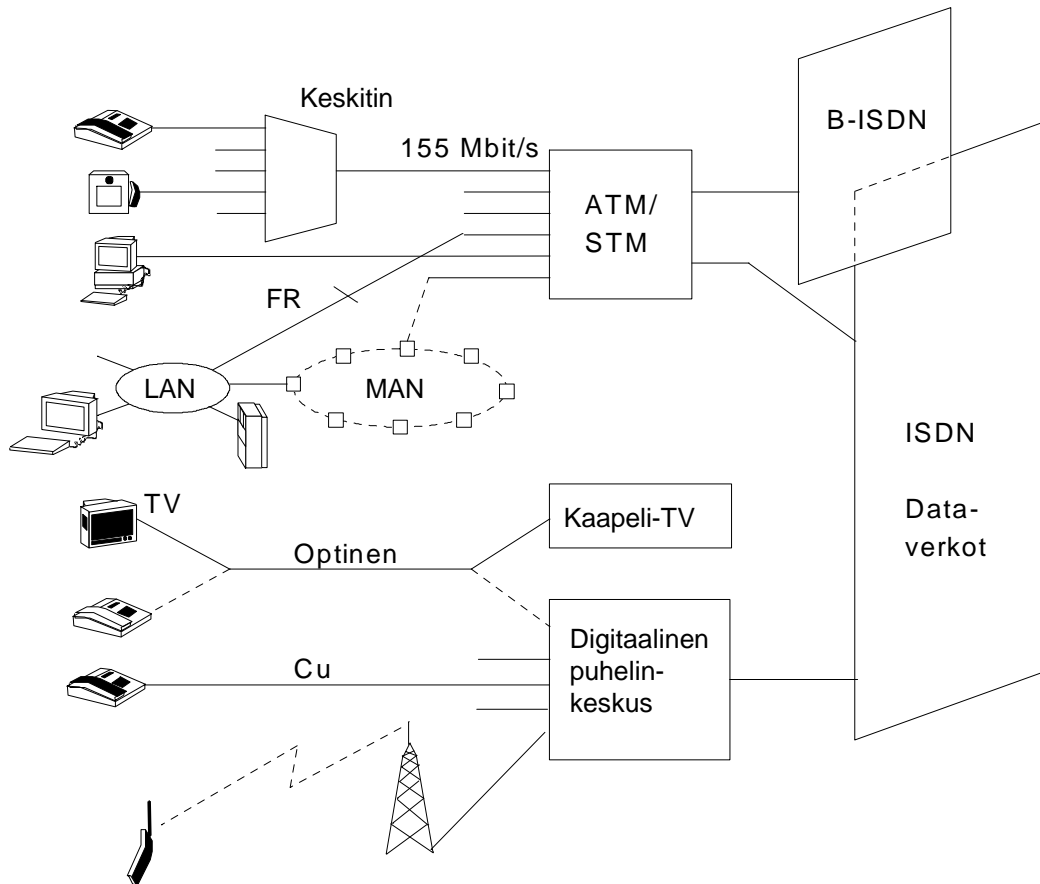
	palvelu- tyyppi P = puhe D = data K = kuva	käyttäjä- tyyppi y-v: yritysten välinen y-s: yritysten sisäinen K: kotitilaajat	kattavuus M = maailmanlaaj. P=paikall. K=kaupunki	rakenne looginen (fyysinen) P = puu T = tähti S = silmuk. V = väylä R = rengas	oleellinen kohta (fyysisesti) L = liitântä V = välityst. S = siirtot.	tiedon esi- tysmuoto tilaajaliit. A = analog. D = dig. aikaväli S = solu K = kehys	yhtey- dellinen (y-nen) / yhtey- detön (y-tön)	nopeudet tilaajaliit./ runko- verkko bit/s
Puhelinverkko	P, (D)	K, y-v	M	P, S		A	y-nen	64k /
Puhelinvaihte	P, (D)	y-s	P, K	T, S		A (D)	y-nen	64k /
ISDN	P, D	K, y-v	M	P, S	L, V,	D	y-nen	2*64k /
B-ISDN (ATM)	D, K, P	y-v, y-s, K	M	S	V, S, L	S	y-nen (y-tön)	/ 155M, 622M
Ethernet	D (K)	y-s	P	V (V/T)	S, L	K	y-tön	10M
Token ring	D (K)	y-s	P	R (T)	S, L	K	y-tön	4M, 16M
Token bus	D	y-s	P	V	S, L	K	y-tön	
FDDI	D	y-s (y-v)	K	R	S, L	K	y-tön	100M
DQDB	D (P)	y-s (y-v)	K	V (V/R)	S, L	S	y-tön (y-nen)	150M
X.25	D	y-v, y-s	M		L, S	K	y-nen	< 64k
Frame Relay	D	y-v, y-s	M		L	K	y-nen	2M (34M)
NMT	P	y-v, y-s, (K)	Pohj. +		L	A	y-nen	
GSM	P (D)	y-v, y-s, (K)	Eur. ++		L	D	y-nen	13k
CT2	P	K, y-s, y-s	P, K		L		y-nen	

1.6 Kehitysnäkymiä

Vaikka mitä suurimmalla varmuudella kehityssennusteet eivät sellaisenaan toteudu, ennusteesta saattaa olla hyötyä kokonaiskuvan luomisessa. Kuvassa 1.4 on esitetty eräs näkemys televerkkojen rakenteesta 90-luvun lopulla, joka sisältää lähinnä tässä opintojaksossa tarkasteltavat verkot, kuva ei siis kata läheskään kaikkia erilaisia televerkkoja.

Verkkotasolla kapeakaistaiset palvelut (puhelinverkko, ISDN ja dataverkot) ovat hallitsevia ja erilaisten matkaviestimien osuus tilaajaliitännöistä tulee olemaan erittäin merkittävä. Laajakaistaisen ISDN:n kattavuus on rajoitettu ja se käyttää pääosin samoja siirto-järjestelmiä kuin kapeakaistainen ISDN. Suurin osa keskuksista on kapeakaistaiseen ISDN:ään tarkoitettuja, mutta osassa keskuksista tarjotaan myös laajakaistaisia ATM-välitystekniikkaa.

Kotitilaajat liitetään ISDN-keskuksiin ja vain poikkeustapauksissa tarvitaan laajakaistaisia palveluja, jolloin liitântä voi tapahtua ATM-keskukseen. TV-kuvan jakelu kotitilaajille perustuu, yleisradiolähetysten lisäksi, pääosin erillisiin kaapeli-TV-verkkoihin. Kaapeli-TV ja kytkentäiset palvelut saattavat kuitenkin käyttää yhteisiä optisia tilaajajoh-toja.



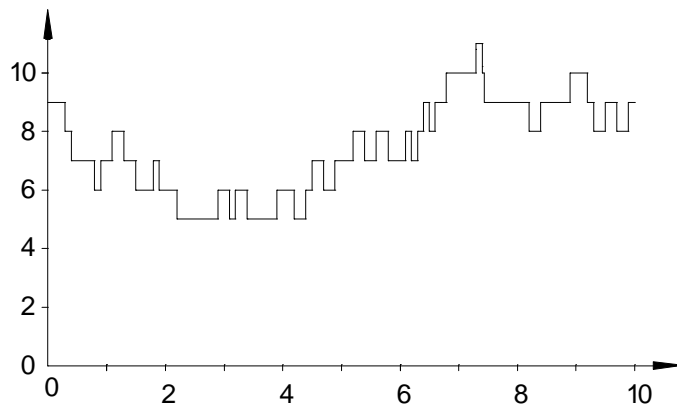
Kuva 1.4. Televerkon rakenne 90-luvun lopulla.

Liiketilaajat liitetään ATM-keskukseen pääosin lähiverkkojen (LAN) kautta, mutta myös keskitintyyppiset ratkaisut ovat mahdollisia; lähiverkko voi olla tyypiltään Ethernet (tai jokin sen kehittyneempi versio), Token ring tai FDDI tai se voi perustua myös ATM-tekniikkaan. Osa lähiverkoista saatetaan yhdistää alueverkkoihin (MAN), mutta pääosin liitanta tapahtuu joko suoraan B-ISDN-verkkoon tai kehysvälitysrajapinnan (Frame Relay) kautta. Lähiverkkoihin yhdistetään kuten nykyisinkin tietokoneita, joiden liikenne on tyypillisesti hyvin purskeista, mutta joilla ei ole erityisen tiukkoja viivevaatimuksia. Sensijaan videokuvan siirrosta (kuvapuhelin, videoneuvottelu) merkittävä osa tapahtuu suoraan ATM-muotoisena keskitinportaan kautta.

2. LIIKENNETEORIAN PERUSTEISTA

2.1 Johdanto

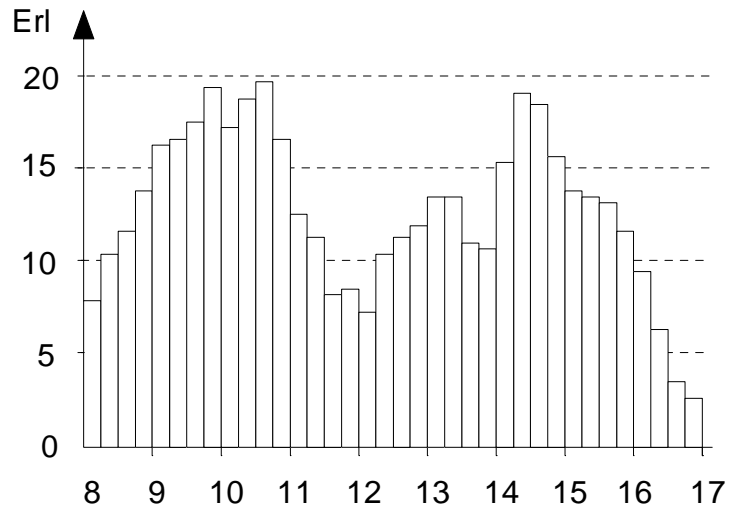
Teleliikenneteorian alue voidaan rajata seuraavasti: se käsittelee telejärjestelmien liikenteellisiä kysymyksiä. Toisin sanoen miten telejärjestelmän toiminta riippuu liikenteestä. Liikennettä voidaan tarkastella erilaisissa aika-asteikoissa: voidaan joko yrittää saada esille liikenteen pienimmätkin vaihtelut (kuva 2.1) tai ainoastaan yleiset kehityspiirteet (kuvat 2.2 ja 2.3).



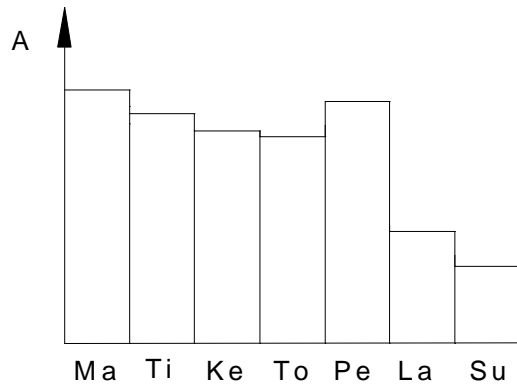
Kuva 2.1. Simuloidun liikenteen vaihtelua lyhyellä tarkastelujaksolla (esimerkki voisi kuvata kahden puhelinkeskuksen välisellä väylällä käynnissä olevien puheluiden määrää kymmenen minuutin aikana).

Kuvassa 2.1 esitetyllä tavalla voidaan tarkastella liikenteen pienimpiä yksityiskohtia. Kun kyseessä on todellinen liikenne, ei yleensä olla kiinnostuneita yksittäisten minuuttien tai tuntien eikä edes yksittäisten päivien liikenteistä vaan liikenteen tyypillisestä käyttäytymisestä pidempänä aikajaksona. Tyypillisyyksistä päästään selville mittaamalla tai laskemalla keskiarvoja.

Suosituksen mukainen liikennemittaus suoritetaan kymmenenä peräkkäisenä työpäivänä. Tällöin siis oletetaan, että liikenne käyttäytyy jokaisena päivänä likimain samalla tavalla, jolloin sitä voidaan tarkastella keskiarvojen avulla. Kuvassa 2.2 on esitetty puhelinvaihteessa kymmenenä peräkkäisenä työpäivänä mitattu liikenne 15 minuutin keskiarvoina. Kuvassa 2.3 on vastaavasti esitetty liikenteen keskimääräinen riippuvuus viikonpäivästä.

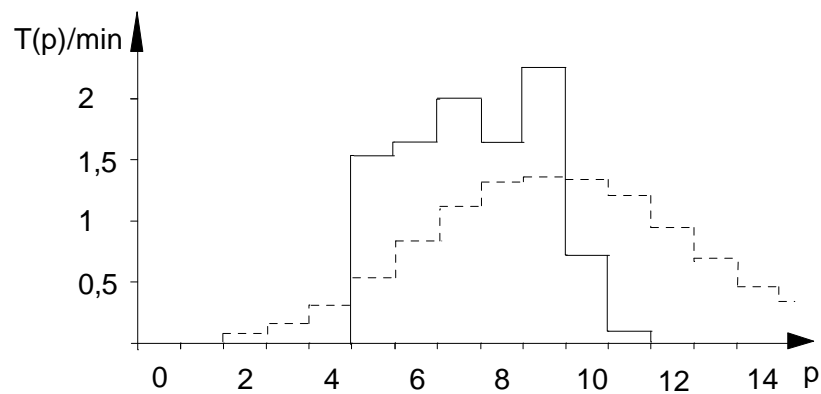


Kuva 2.2. Liikenteen riippuvuus vuorokaudenajasta.

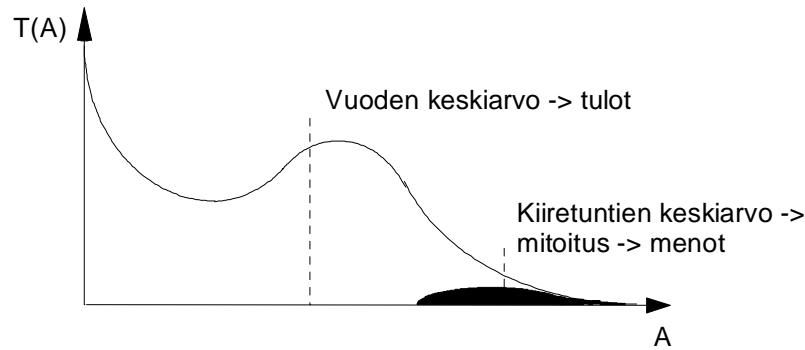


Kuva 2.3. Liikenteen riippuvuus viikonpäivästä.

Liikennettä voidaan tarkastella myös toisella tavalla: lasketaan eri tilojen kestoajoja. Kuvassa 2.4 on esitetty kuvan 2.1 liikenteen tilojen kestoajat, jossa katkoviivalla teoreettinen jakauma, joka tunnetaan koska kyseessä on teoreettinen tarkastelu. Kuvassa 2.5 vuoden ajalta mitatun liikenteen tilojen jakautuminen.



Kuva 2.4. Kuvassa 2.1 esitetyn liikenteen tilojen jakauma.



Kuva 2.5. Liikenteen jakauma vuoden ajalta.

Koska liikenne voi vaihdella suuresti vuoden aikana, joudutaan tarkastelemaan erilaisia liikenneprosesseja, joiden käyttäytyminen on enemmän tai vähemmän samankaltaista. Siten kuvan 2.5 tapauksessa on kysymys erilaisten liikenneprosessien keskiarvoista.

2.2 Tavoitteet

Liikenneteorian perustavoitteena on jonkun järjestelmän palvelun tason määrittäminen. Estojärjestelmässä palvelun tasoa kuvaa kutsun estymisen todennäköisyys eli **esto**. Estoa voidaan tarkastella useasta näkökulmasta. Ensiksikin voidaan kysyä: millä todennäköisyydellä satunnaisesti valitulla ajan hetkellä järjestelmän kaikki palvelupaikat ovat varattuja, jolloin tulevat kutsut estyvät? Tästä todennäköisyydestä käytetään nimitystä **aikaesto**. Joissakin tapauksissa tuleva kutsu voi estyä, vaikka palvelupaikkoja olisi vapaanakin, näitä tapauksia ei kuitenkaan tässä yhteydessä käsitellä.

Järjestelmän tilat eivät asiakkaan kannalta oleellisia - asiakkaan kannalta on oleellista pääseekö hän palveltavaksi vai ei. Tätä epäonnistumisen todennäköisyyttä kuvataan **kutsuestolla**. Kutsuesto lasketaan kaikkien kutsujen keskiarvona; eri asiakkaiden käyttäytyminen voi kuitenkin olla erilaista, jolloin myös eri asiakkaiden kokemat estot ovat erilaisia.

Palvelun tarjoajan kannalta on tärkeää kuinka suuri osa tarjotusta liikenteestä menetetään, koska esimerkiksi veloitus määräytyy välitetyn liikenteen perusteella. Menetetyn liikenteen osuutta kuvataan **liikenne-estolla**. Matemaattisissa malleissa liikenne-esto voidaan laskea helposti, sen sijaan todellisesta liikenteestä sitä on hyvin vaikea mitata.

Käytännön tietona mainittakoon, että mitattaessa kaukopuhelinliikenteen onnistuvuutta keväällä 1991 saatiin seuraavat tulokset:

- 1,4 % : esto kaukoverkossa
- 3,5 % : esto paikallisverkossa
- 5,5 % : A-tilaajan tekemät virheet
- 13,9 % : B-tilaaja varattu
- 17,6 % : B-tilaaja ei vastaa
- 57,9 % : B-tilaaja vastaa

Lukija voi mm. miettiä merkitseekö edellä esitetyt luvut sitä, että keskimäärin 13,9 % puhelinliittymistä on varattuna ?!

2.3 Matemaattisia määritelmiä

Seuraavaksi esitetään joitakin todennäköisyyslaskennan perusasioita, jotka ovat välttämättömiä liikenteen kuvaamisen kannalta. Tarkastellaan diskreettiä satunnaismuuttujaa x , joka voi saada arvoja $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$. Muuttuja x voi tarkoittaa esimerkiksi käynnissä olevien puhelujen määrää jollakin väylällä. Jokaisella muuttujan arvolla on todennäköisyys $\Pr\{x=x_i\}$ eli esimerkin tapauksessa todennäköisyys, että käynnissä on täsmälleen x_i puhelua. Nämä todennäköisyydet muodostavat jakauman, jolle voidaan laskea tunnuslukuja, joista yleisimmin käytettyjä ovat odotusarvo (E) ja varianssi (V):

$$E\{x\} = \sum_i x_i \Pr\{x = x_i\} \quad (2.1)$$

$$V\{x\} = E\{x^2\} - E^2\{x\} \quad (2.2)$$

Voidaan varsin helposti osoittaa, että toisistaan riippumattomien satunnaismuuttujien tapauksessa sekä keskiarvot että varianssit voidaan laskea yhteen. Mitä tämä merkitsee käytännössä. Oletetaan, että puhelinkeskukseen tulee liikennettä kahdelta väylältä siten, että tulevien liikenteiden keskiarvot ovat A_1 ja A_2 ja varianssit V_1 ja V_2 . Jos nämä liikennevirrat ohjautuvat kokonaisuudessaan kolmannelle väylälle (jolle ei tule muuta liikennettä), niin kyseisen väylän liikenteen keskiarvot ja varianssi ovat $A_3 = A_1 + A_2$ ja $V_3 = V_1 + V_2$. Mutta tämä pätee vain sillä edellytyksellä että liikennevirrat ovat toisistaan (tilastollisesti) riippumattomia.

Liikenneteoriassa varianssin ohella käytetään usein tunnuslukuna huippukerrointa:

$$z = \frac{V\{x\}}{E\{x\}} \quad (2.3)$$

Otetaan esimerkiksi kuvan 2.1 simuloitu liikenne ja siitä laskettu jakauma (kuva 2.2). Tilojen ($i = 5 \dots 11$) kestoajat ($T[i]$) on esitetty taulukossa 2.1. Jakauman keskiarvo ja varianssi saadaan summien $iT[i]$ ja $i^2T[i]$ avulla:

$$E = 86,3/10,0 = 8,63$$

$$V = 769,9/10,0 - 8,63^2 = 2,51$$

Taulukko 2.1. Keskiarvon ja varianssin laskeminen

i	T[i]	i*T[i]	i ² *T[i]
5	0,1	0,5	2,5
6	0,7	4,2	25,2
7	2,2	15,4	107,8
8	1,7	13,6	108,8
9	2,0	18,0	162,0
10	1,7	17,0	170,0
11	1,6	17,6	193,6
Σ	10,0	86,3	769,9

2.4 Liikenteen kuvaaminen

Teleliikenteen kuvaamisen lähtökohtana ovat liikennettä koskevat mittaustulokset. Pelkien mittaustulosten perusteella ei kuitenkaan voida laskea juuri mitään. Sensijaan voidaan muodostaa malli, joka kuvaa mahdollisimman hyvin mitattua liikennettä, tai yleisemmin, mallilla pyritään kuvaamaan todellisen liikenteen ominaisuuksia. Mallia voidaan sitten käyttää liikennettä koskevissa laskelmissa, mutta tulee muistaa, että laskelmien lopputulokset pätevät tarkkaan ottaen vain niillä oletuksilla, joita mallia rakennettaessa on tehty—todellinen liikenne voi olla jotain aivan muuta.

2.4.1 Yhden asiakkaan tarkastelu

Yhden asiakkaan (esim. puhelinliittymään liittyvää) käyttäytymistä voidaan kuvata erilaisten tapahtumien todennäköisyyksillä. Jos puhelin on vapaa, alkaa uusi puhelu seuraavan sekunnin aikana jollain todennäköisyydellä tai vastaavasti jos puhelu on käynnissä, se päättyy seuraavan sekunnin aikana jollain todennäköisyydellä. Yksinkertaisimmillaan voidaan olettaa, että nämä todennäköisyydet ovat ajasta ja muista tekijöistä riippumattomia vakioita.

Eli *tässä opintojaksossa* oletetaan, että järjestelmän tila voidaan aina kuvata yhdellä tai muutamalla parametrilla siten, että järjestelmän menneisyys ei vaikuta tulevaisuuteen kun sen nykytila tunnetaan. Kutsutaan tätä vaikkapa **muistamattomuus**-ominaisuudeksi. Puhelun tapauksessa esimerkiksi oletetaan, että puhujat eivät “muista” kuinka kauan puhelu on kestänyt, vaan puhelun päättymisen todennäköisyys pysyy koko ajan vakiona. Tästä vakiosta voidaan käyttää nimitystä :

μ = palveluintensiteetti

Palveluintensiteetti siksi, että sillä voidaan kuvata minkä tahansa palvelun nopeutta: esimerkiksi mitä nopeammin valintamyymälän kassa palvelee, sitä suurempi palveluintensiteetti on ja sitä todennäköisemmin palvelu päättyy seuraavan aikayksikön aikana.

Puhelun tapauksessa toinen tarvittava suure on todennäköisyys, että uusi puhelu käynnistyy (kun puhelin on vapaa). Myös tämä oletetaan vakioksi, eli puhelimen käyttäjälle tulee mieleen minä hetkenä hyvänsä samalla todennäköisyydellä, että soitanpa puhelun. Tästä vakiosta käytetään nimitystä:

ν = vapaan lähteen kutsuintensiteetti

eli toisin ilmaistuna: νdt on todennäköisyys, että vapaa liikennelähde (esim. puhelin) pyrkii aloittamaan uuden kutsun aikavälissä aikavälissä $(t, t+dt)$, jossa dt on erittäin lyhyt aika. Vastaavasti palveluintensiteetti on ilmaisee todennäköisyyden, että käynnissä oleva puhelu päättyy vastaavassa aikavälissä todennäköisyydellä μdt . Voidaan myös sanoa, että μ on intensiteetti, jolla asiakkaita poistuu yhdestä palvelupaikasta, eli jos palvelupaikka täytetään heti kun edellinen asiakas on poistunut, poistuu asiakkaita keskimäärin μT kappaletta aikana T .

Asiakkaan käyttäytymistä voidaan kuvata myös aikoina, jonka asiakas keskimäärin viettää eri paikoissa. Erityisesti asiakkaan palvelupaikassa viettämää aikaa, **palveluaikaa**, merkitään lyhenteellä h (palveluaika voi olla esimerkiksi puhelun pituus).

2.4.2 Liikenne virtana

Yleensä teleliikennettä tarkastellaan kokonaisuutena, jolloin ollaan kiinnostuneita siitä kuinka paljon asiakkaita siirtyy paikasta toiseen tai kuinka monta puhelua alkaa ja päättyy. Näitä liikennevirtoja kuvataan tässä esityksessä merkinnöillä:

$$\mathbf{y} = \text{palvelupaikkaan tulevien asiakkaiden määrä} \\ \text{aikayksikössä eli kutsuintensiteetti (kpl / aikayksikkö)}$$

$$\mathbf{u} = \text{palvelupaikasta lähtevien asiakkaiden määrä} \\ \text{aikayksikössä}$$

Puhelinliikenteessä tarkastelun perustana on puhelujen muodostuminen: miten paljon tulee uusia kutsuja ja miten paljon puheluita päättyy. Kansainvälisen standardointijärjestön mukaan **tarjottu liikenne** on se liikenne, joka saadaan, kun mitään häiritseviä tekijöitä ei ole.

Erityisesti on huomattava, että jos asiakkaita ei keräänny mihinkään kohtaan järjestelmää, tulee pitkällä aikavälillä jokaiseen paikkaan tulla yhtä paljon asiakkaita kuin siitä poistuu (tässä voidaan havaita selvä analogia sähkötekniikkaan).

2.4.3 Järjestelmän tilat

Liikennevirtojen kuvaaminen ei riitä, jos halutaan laskea esimerkiksi puhelun estymisen todennäköisyys, vaan tällöin on tarkasteltava järjestelmän tiloja. Järjestelmä voi olla esimerkiksi puhelinvaihteen keskusjohdot (tai pikemminkin varattuna ole kanavien määrä siirtojärjestelmässä), jolloin tiloja ovat "ei yhtään johtoa varattuna", "yksi johto varattuna", "kaksi johtoa varattuna" jne., sillä yleensä ei olla kiinnostuneita siitä mikä yksittäinen johto tai kanava on varattu (vertaa kuva 2.1).

Eri tilojen todennäköisyyksien määrittäminen voi tapahtua mittaamalla (mallin tai todellisen) liikenteen tiloja jollakin aikajaksolla (T) ja laskemalla kunkin tilan (x) keskimääräinen esiintymistiheys:

$$f\{x, T\} = \frac{T\{x\}}{T} \quad (2.4)$$

jossa $T\{x\}$ on aika, jonka järjestelmä on tilassa x aikana $(0, T)$. Tilan x todennäköisyys voidaan määrittellä raja-arvona:

$$\Pr\{x = x_i\} = \lim_{T \rightarrow \infty} f\{x_i, T\} \quad (2.5)$$

Tämä on eräs tapa sitoa todennäköisyydet reaali maailmaan, mutta todennäköisyyden määrittämiseen on muitakin tapoja. Esitetyn määritelmän perusongelma on se, että liikenneprosessi ei todellisuudessa säily muuttumattomana pitkiä aikoja. Tässä opintojaksossa näin kuitenkin yleensä oletetaan, eli tarkastellaan vain liikenneprosesseja, joiden ominaisuudet eivät riipu ajankohdasta.

Tila x voi merkitä esimerkiksi sitä, että järjestelmässä on x asiakasta palveltavana tai että jonossa on x asiakasta. Jos järjestelmä on mutkikkaampi, tilan määritelmä on vastaavasti monimutkaisempi. Erilaisten tilojen määrä voi olla hyvinkin suuri, tavoitteena on kuitenkin kuvata liikenne kohtuullisen pienellä määrällä suureita. Tällaisia suureita ovat aikaisemmin esitetyt jakauman tunnusluvut: odotusarvo, varianssi ja huippukerroin.

Jos satunnaismuuttuja on "varattuina olevien kanavien määrä" tai "järjestelmässä olevien asiakkaiden määrä" (p), saadaan **liikenteen odotusarvo** eli lyhyesti sanottuna liikenne:

$$A = E\{p\} \quad (2.6)$$

Liikenteen yksikkö on **Erlang** (Erl) tanskalaisen liikenneteoreetikon mukaan. Erlang-arvo kuvaa siten keskimäärin varattuina olevien kanavien (tai muiden muun järjestelmän osien) määrää. Vastaavasti liikenteen varianssi (kts. varianssin määritelmä kohdassa 2.3):

$$V = V\{p\} \quad (2.7)$$

Liikenteen varianssi (tai huippukerroin z) kuvaa liikenteen vaihteluiden voimakkuutta.

2.4.4 Kuvausten yhdistäminen

Entä miten nämä eri kuvaustavat liittyvät toisiinsa. Tarkastellaan hyvin pitkää ajanjaksoa T . Määritelmän mukaan järjestelmään tulee tänä aikana yT asiakasta, joista kukin on järjestelmässä keskimäärin ajan h . Toisaalta asiakkaat viettävät järjestelmässä yhteensä ajan AT . Jos järjestelmään ei kerääny asiakkaita (näin voidaan olettaa kun palveluaika, h , on äärellinen) saadaan:

$$yTh = AT,$$

josta saadaan yksinkertainen kaava, ns. **Littlen lause**:

$$A = y h \quad (2.8)$$

Tämä lause voidaan esittää sanallisesti muodossa: järjestelmässä (tai sen osassa) keskimäärin olevien asiakkaiden määrä on yhtä kuin sinne tulevien asiakkaiden määrä aikayksikössä kertaa keskimääräinen asiakkaan järjestelmässä viettämä aika.

Littlen lausetta sovellettaessa on muistettava, että y ja h tulee laskea samoista asiakkaista tai kutsuista. Eli esimerkiksi tilanteessa, jossa osa kutsuista estyy, on tämä otettava huomioon joko kutsuintensiteetissä (lasketaan vain välitetyt kutsut) tai keskimääräisessä palveluajassa (estyneiden kutsujen palveluaika on nolla).

Vastaavantyyppinen tarkastelu palveluintensiteetille on seuraava. Määritelmän mukaisesti yhden asiakkaan palvelu päättyy aikavälissä $(t, t+dt)$ todennäköisyydellä μdt . Koska asiakkaita on keskimäärin A kappaletta, yhdessä aikavälissä päättyy keskimäärin $A \mu dt$ palvelua (esimerkiksi jonotusjärjestelmien tapauksessa tässä vaiheessa täytyy olla varovainen, koska vain palveltavana olevan asiakkaan palvelu voi päättyä, sensijaan jonottavan ei, eli A tulee laskea palveltavista asiakkaista). Tällöin pitkänä aikavälinä T päättyy yhteensä $TA \mu$ palvelua, jonka tulee olla yhtä suuri kuin järjestelmään tulevien asiakkaiden määrä (yT) eli:

$$TA \mu = yT \quad (2.9)$$

$$\Rightarrow A = y/\mu \quad (2.10)$$

$$h = 1/\mu \quad (2.11)$$

2.4.5 Palvelun tason kuvaaminen

Palataan vielä käytännön ongelmiin ja tavoitteisiin. Palvelujärjestelmä voi olla vaikkapa puhelinvaihteen keskusjohdot ja liikenne puhelinliikennettä tai vastaavasti ravintola ja sen asiakkaat. Kutsuvirroista pyritään siis laskemaan mm. eri tilojen todennäköisyydet ja niiden avulla palvelun taso. Aikaisemmin esitetyt estojen määritelmät olivat hieman hataralla pohjalla, koska käsitteitä ei oltu määritelty. Nyt estot voidaan määritellä seuraavasti:

Aikaesto on todennäköisyys, että järjestelmän kaikki palvelupaikat ovat varattuja:

$$B_t = \Pr\{p=S\} \quad (2.12)$$

Kutsuesto on estyneiden kutsujen suhde järjestelmään tuleviin kutsuihin:

$$B_c = y_{estynyt}/y_{tulevat} \quad (2.13)$$

Liikenne-esto on tarjotun liikenteen ja välitetyn liikenteen erotuksen suhde tarjottuun liikenteeseen:

$$B_a = (A_{tarjottu} - A_{välitetty})/A_{tarjottu} \quad (2.14)$$

Nämä määritelmät koskevat suoranaisesti liikenteen malleja, kuitenkin aikaeston ja kutsueston määritelmät soveltuvat hyvin myös mitattaessa todellista liikennettä.

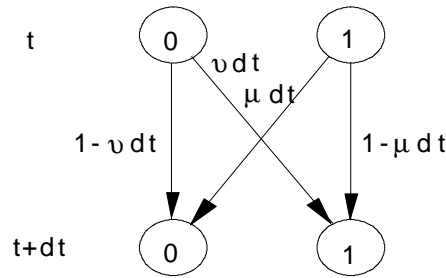
2.5 Mallintaminen

Tarkastellaan yksinkertaisinta mahdollista mallia (malli 1): yksi asiakas siirtyy edestakaisin paikkojen a ja b välillä. Paikassa a hetkellä t oleva asiakas siirtyy paikkaan b todennäköisyydellä νdt erittäin lyhyessä aikavälissä dt ja toiseen suuntaan todennäköisyydellä μdt . Järjestelmä voi siten olla kahdessa eri tilassa: merkitään näitä tiloja 0 (asiakas paikassa a) ja 1 (asiakas paikassa b). Tavoitteena on ensin laskea tilojen todennäköisyydet $\Pr\{x=0\}$ ja $\Pr\{x=1\}$ (tästä eteenpäin käytetään yleensä lyhyempää merkintätapaa $\Pr\{0\}$).

Tarkastellaan kahta ajanhetkeä t ja $t+dt$. Olkoon järjestelmä tilassa 0 ajan hetkenä t todennäköisyydellä $\Pr\{0,t\}$ ja tilassa 1 todennäköisyydellä $\Pr\{1,t\}$. Edellä annettujen tietojen perusteella järjestelmä siirtyy tilasta 0 tilaan 1 aikavälissä dt todennäköisyydellä νdt ja vastaavasti toiseen suuntaan todennäköisyydellä μdt (kuva 2.6). Näin ollen saadaan yhtälöryhmä:

$$\Pr\{0,t+dt\} = \Pr\{0,t\} (1-\nu dt) + \Pr\{1,t\} \mu dt \quad (2.15)$$

$$\Pr\{1,t+dt\} = \Pr\{1,t\} (1-\mu dt) + \Pr\{0,t\} \nu dt$$



Kuva 2.6. Tilojen muutokset aikavälissä \$(t, t+dt)\$.

Yhtälöryhmä 2.15 voidaan ratkaista varsin helposti. Monimutkaisemmissa tapauksissa voidaan käyttää apuna esimerkiksi Laplace- ja \$z\$-muunnoksia (nämä tulevat esille myöhemmissä matematiikan opintojaksoissa).

Tässä tapauksessa kuitenkin oletetaan, että tilojen todennäköisyydet ovat riippumattomia ajasta eli oletetaan että liikenne on **tasapainotilassa**. Liikenteen jakaumien tulee olla siten yhtenevät kaikkina ajan hetkinä eli myös hetkinä \$t\$ ja \$t+dt\$:

$$\Pr\{0,t\} = \Pr\{0,t+dt\}$$

$$\Pr\{1,t\} = \Pr\{1,t+dt\}$$

Sijoittamalla nämä aikaisempiin kaavoihin ja jättämällä aikatekijä \$t\$ pois saadaan:

$$\Pr\{0\} = \Pr\{0\} (1 - v dt) + \Pr\{1\} \mu dt$$

$$\Pr\{1\} = \Pr\{1\} (1 - \mu dt) + \Pr\{0\} v dt$$

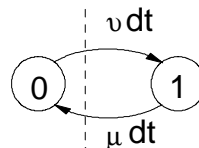
Kummastakin yhtälöstä saadaan sama tulos:

$$\Pr\{0\} v = \Pr\{1\} \mu$$

Toinen yhtälö saadaan sillä perusteella, että todennäköisyyksien summan tulee olla 1:

$$\Pr\{0\} + \Pr\{1\} = 1$$

Vastaava graafinen esitys on kuvassa 2.7. Kuvaan on merkitty kahden tilan väliin poikki-viiva. Koska jakaumien oletetaan olevan identtisiä, tulee myös näiden kahden puoliskon todennäköisyyksien olla yhtä suuria ajanhetkinä \$t\$ ja \$t+dt\$.



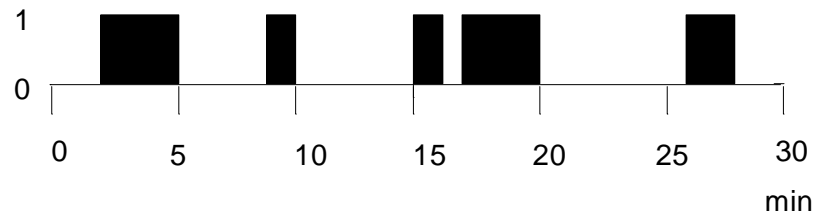
Kuva 2.7. Tasapainotilan kaavio mallin 1 liikenteellä.

Tilojen todennäköisyydet tasapainotilassa ovat siten:

$$\Pr\{0\} = \mu / (v + \mu)$$

$$\Pr\{1\} = v / (v + \mu)$$

(2.16)



Kuva 2.8. Mallin 1 liikennettä.

Kuvassa 2.8 on esitetty mallin mukaisen järjestelmän tilat 30 minuutin ajan. Yhteensä asiakas on saapunut 5 kertaa ja vastaavasti poistunut 5 kertaa, joten keskimäärin asiakkaita siirtyy palveltavaksi (y) ja palvelusta pois (u) aikayksikössä:

$$y = u = 1/6 \text{ min}$$

Lisäksi havaitaan, että asiakas on viettänyt järjestelmässä 5 käynnillään yhteensä 10 minuuttia, joten keskimääräinen palveluaika on:

$$h = 10/5 = 2 \text{ min}$$

Entä miten v ja μ saataisiin kuvasta esille? Asiakas on viettänyt vapaana (0-tilassa) yhteensä 20 min ja saapunut 5 kertaa, joten:

$$v = 5/20 = 1/4$$

Vastaavasti: $\mu = 5/10 = 1/2 = 1/h$

Voidaan havaita, että kaava 2.11 pitää näillä arvoilla paikkansa (ehtona on, että tarkastelun alussa ja lopussa ollaan samassa tilassa).

2.6 Satunnainen liikenne, Erlangin kaava

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan liikenneteorian peruskaavoja: mihin ne perustuvat, millä edellytyksillä kaavat pätevät.

Tarkastellaan ensin liikenteen mallia, jossa tunnetaan kutsuintensiteetti (y) sekä yhden palvelupaikan palveluintensiteetti (μ), jolloin keskimääräinen puhelun pituus on siis $h = 1/\mu$. Tarjottu liikenne saadaan soveltamalla Littlen lausetta:

$$A = yh \tag{2.17}$$

Lisäksi oletetaan, että tulevat kutsut eivät riipu toisistaan eikä menneisyys vaikuta liikenteen käyttäytymiseen; tähän sisältyy oletus että puhelun pituus on eksponentiaalisesti jakautunut (joskaan puhelun pituuden jakaumalla ei tässä tapauksessa ole vaikutusta lopputulokseen). Tavoitteena on ensin laskea eri tilojen todennäköisyydet. Tarkastellaan kahta ajanhetkeä t ja $t+dt$. Koska liikenteen oletettiin olevan riippumaton ajasta, tulee liikenteen jakautumien olla yhtenevät eli:

$$\Pr\{p,t\} = \Pr\{p,t+dt\} ; p = 0,1,2,\dots \tag{2.18}$$

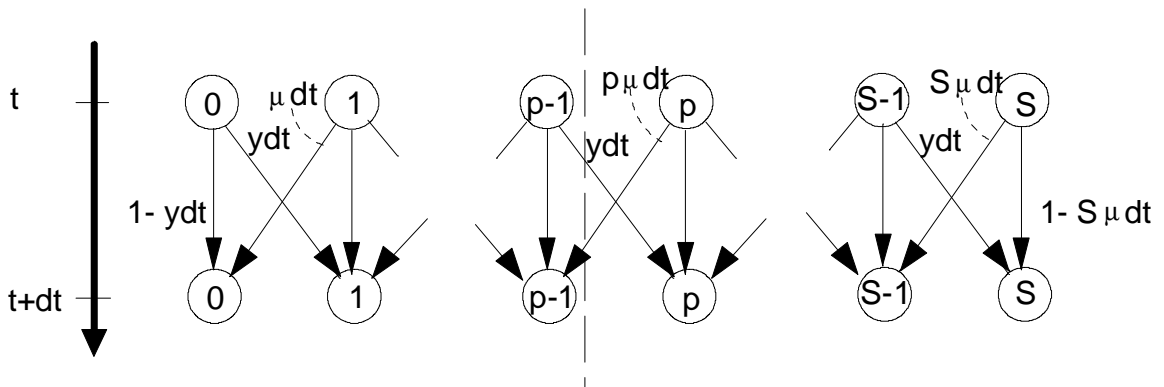
Oletetaan, että järjestelmä on tilassa p ajanhetkenä t . Aikaväli dt olkoon niin lyhyt, että siirtymisien voidaan olettaa tapahtuvan vain peräkkäisten tilojen välillä (yhdessä aikavälissä sattuu vain yksi tapahtuma). Tällöin saadaan seuraavat todennäköisyydet aikavälillä dt :

- siirrytään tilaan $p+1$ todennäköisyydellä: $y dt$

- siirrytään tilaan $p-1$ todennäköisyydellä: $(p\mu) dt$
- ei siirtymisiä todennäköisyydellä: $1-(y+p\mu) dt$

HUOM: tässä tapauksessa todennäköisyydet voidaan laskea suoraan yhteen, koska dt oletetaan erittäin pieneksi.

Vastaava graafinen esitys on kuvassa 2.9. Kuvaan on merkitty kahden tilan väliin poikki-
viiva. Koska jakaumien oletetaan olevan identtisiä, tulee myös näiden kahden puoliskon
todennäköisyyksien olla yhtä suuria ajanhetkinä t ja $t+dt$. Tätä voi yrittää ymmärtää
esimerkiksi siten että siirtymisiä tilasta "korkeintaan neljä puhelua käynnissä" tilaan
"vähintään viisi puhelua käynnissä" tulee yhtä paljon kuin siirtymisiä toiseen suuntaa (ero
voi olla korkeintaan yksi siirtyminen).



Kuva 2.9. Tilojen muutokset aikavälissä $(t, t+dt)$.

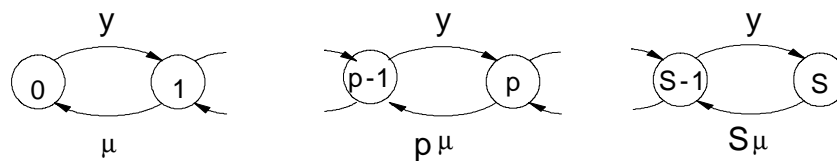
Vastakkaisiin suuntiin tapahtuvien siirtymisien tulee siten olla keskimäärin yhtä suuria:

$$y dt \Pr\{p-1\} = p \mu dt \Pr\{p\} \tag{2.19}$$

eli

$$y \Pr\{p-1\} = p \mu \Pr\{p\} \tag{2.20}$$

joka voidaan esittää kuvan 2.10 mukaisella tavalla. Mikäli tarkastellaan vain tasapaino-
tilaa, voidaan jälkimmäinen kuva piirtää ilman kuvan 2.9 välivaihetta.



Kuva 2.10. Tasapainotilan kaavio satunnaisella liikenteellä.

Kuvan perusteella saadaan rekursiivinen yhtälö:

$$\Pr\{p\} = A \Pr\{p-1\} / p ; p = 1, 2, \dots \tag{2.21}$$

Näiden avulla voidaan ratkaista tilojen todennäköisyydet, kun lisäksi tiedetään, että
todennäköisyyksien summan tulee olla yksi:

$$\sum_i \Pr\{p = i\} = 1 \tag{2.22}$$

Tarjotun liikenteen jakaumaksi saadaan, kun palvelupaikkojen määrä on ääretön:

$$\Pr_o\{p = i\} = \frac{e^{-A} A^i}{i!} \quad (2.23)$$

Kyseessä on **Poisson-jakauma** ja vastaavasti edellä esitetyt ehdot täyttävää liikennettä kutsutaan Poisson-liikenteeksi. Poisson-jakaumalla on se erityisominaisuus, että sen keskiarvo ja varianssi ovat yhtä suuria eli $E\{p\} = A = V$, jolloin huippukerroin $z = 1$ (tähän perustuu myös huippukertoimen käyttö liikenteen ominaisuuksien kuvaamisessa).

Kun palvelupaikkoja on äärellinen määrä (S), rekursiokaavalla 2.21 saadaan välitetyn liikenteen jakauma. Todennäköisyys, että kaikki palvelupaikat ovat varattuja ($p=S$), on samalla määritelmän mukaisesti aikaesto:

$$B_t = \frac{A^S / S!}{\sum_{i=0}^S A^i / i!} \quad (2.24)$$

Tästä kaavasta käytetään nimitystä **Erlangin estokaava**, jota merkitään $B_E\{A, S\}$. Osoitetaan vielä esimerkinomaisesti, että Poisson-liikenteellä aika- ja kutsuesto ovat yhtä suuria. Kutsuesto saadaan määritelmän mukaisesti estyvien ja tulevien kutsujen suhteena. Kutsuja tulee aikayksikössä keskimäärin:

$$\sum_{i=0}^S y[i] \Pr\{p = i\} \quad \text{kappaletta}$$

vastaavasti aikayksikössä estyy keskimäärin

$$y[S] \Pr\{p=S\}$$

kutsua, joten

$$B_c = \frac{y[S] \Pr\{p = S\}}{\sum_{i=0}^S y[i] \Pr\{p = i\}} \quad (2.25)$$

jossa $y[i]$ on kutsuintensiteetti, kun järjestelmässä on i asiakasta. Koska Poisson-liikenteen tapauksessa kutsut saapuvat satunnaisesti, ei kutsuintensiteetti $y[i]$ riipu asiakkaiden määrästä, joten:

$$B_c = \frac{y \Pr\{p = S\}}{y} = B_t \quad (2.26)$$

Otetaan yksi käytännön esimerkki, joka pyrkii havainnollistamaan joitakin Erlangin kaavan ominaisuuksia. Tarkastellaan bussilinjaa, johon tulee matkustajia satunnaisista paikoista (eli mitään varsinaisia pysäkkejä ei ole) ja samoin kukin matkustaja haluaa bussista pois satunnaisella hetkellä riippumatta siitä kuinka kauan hän on jo matkustanut. Tällöin sekä välimatka kahden peräkkäisen uuden matkustajan välillä että yhden matkustajan matka ovat eksponentiaalisesti jakautuneita. Tulkoon uusia matkustajia keskimäärin 1 km välein ja keskimääräinen matka olkoon 30 km. Oletetaan ensin, että linja-autoon otetaan uusi matkustaja ainoastaan, jos hänelle löytyy vapaa istumapaikka, joita tarkasteltavassa linja-autossa on 40 kappaletta. Lasketaan näistä todennäköisyys, että tuleva matkustaja ei pääse kyytiin. Vielä täytyy olettaa, että linja-auton matka on niin pitkä, että matkustajien määrä saavuttaa tasapainotilan.

Tähän tehtävään ei tarvita muuta kuin Erlangin kaava (2.24), joka kannattaa ohjelmoida esimerkiksi rekursiivisessa muodossa:

$$B_E \{A, S + 1\} = \frac{1}{S + 1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{A \cdot B_E \{A, S\}}{S + 1}}$$

Alkuun päästään sillä nolllalla johdolla esto on 1.

Esimerkin tapauksessa tarjottu liikenne on selvästikin $A = 30$ ja kapasiteetti $S = 40$, jolloin estoksi saadaan 1,44 %. Oleellista tässä tapauksessa on se, että seisomapaikkoja ei ole. Oletetaan seuraavaksi, että seisomapaikkoja on riittävästi, ja matkustaja otetaan aina kyytiin. Tällöin on tietysti kiinnostavaa tietää millä todennäköisyydellä matkustaja joutuu seisomaan tullessaan autoon. Tätä todennäköisyyttä ei saada Erlangin kaavalla, mutta Poisson-jakauma on silti käyttökelpoinen, sillä matkustajien määrä autossa noudattaa kyseistä jakaumaa. Kysytty todennäköisyys saadaan siten kaavalla:

$$\Pr\{joutuu_seisomaan_tullessaan_autoon\} = e^{-A} \sum_{i=S}^{\infty} A^i / i!$$

Todennäköisyydeksi saadaan 4,62 %, joka on siis huomattavasti suurempi kuin Erlangin kaavalla saatava esto.

Poisson-jakaumasta voidaan laskea myös seisovien matkustajien keskiarvo:

$$E\{seisovia_asiakkaita\} = e^{-A} \sum_{i=S+1}^{\infty} (i - S) A^i / i!$$

Ja tulokseksi saadaan 0,0952 matkustajaa eli 0,317% matkustajista.

Voidaan vielä kysyä kuinka pitkään sellainen matkustaja, joka ei heti saa vapaata istumapaikkaa, joutuu seisomaan (paikkoja vapautuu vain jos joku poistuu linja-autosta). Tähän kysymykseen voidaan soveltaa Littlen lausetta. Seisomapaikoille tulee keskimäärin 0,0462 matkustajaa kilometriä kohti ($=y$) ja seisovia matkustajia on keskimäärin 0,0952 ($=A$), joten Littlen lauseen mukaan kilometrimäärä (h) on $0,0952/0,0462 = 2,06$ km.

2.7 Rajoitettu määrä liikennelähteitä, Engsetin kaavat

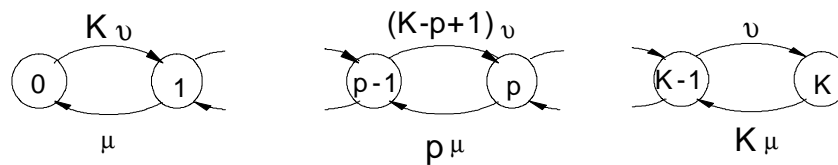
Edellä esitetystä Poisson-liikenteen tapauksessa oletettiin asiakkaiden (liikennelähteiden) määrän olevan ääretön, vaikka käytännössä näin ei tietenkään ole. Tarkastellaan seuraavaksi mikä vaikutus tällä on tilatodennäköisyyksiin ja estokaavoihin.

Oletetaan, että liikennettä tarjoaa useita identtisiä liikennelähteitä. Liikenteen ominaisuudet määritellään kolmella parametrilla: vapaan lähteen kutsuintensiteetti (ν), palveluintensiteetti (μ) ja liikennelähteiden määrä (K). Yleensä kuitenkin tunnetaan tarjottu liikenne (A) ja K , joista saadaan yhden liikennelähteen **ominaisliikenne**:

$$a = A/K \tag{2.27}$$

Ominaisliikenne a on sama kuin kaavassa 2.16 tilan 1 todennäköisyys $\Pr\{1\}$. Kyseisen kaavan avulla voidaan ν laskea, kun a ja μ tunnetaan.

Koska liikennelähteet oletetaan identtisiksi, voidaan palvelujärjestelmän tila määritellä varattuna olevien palvelupaikkojen määrällä (p) ja koska kutsut saapuvat ja palvelut päättyvät toisistaan riippumattomasti, tapahtuvat tilojen siirrot ainoastaan viereisten tilojen välillä. Tasapainotilan kaavio on esitetty kuvassa 2.11.



Kuva 2.11. Tasapainotilan kaavio.

Tilatodennäköisyydet voidaan ratkaista tasapainotilan avulla rekursiivisesti:

$$(K-p+1) \nu \Pr\{p-1\} = p \Pr\{p\} / h \tag{2.28}$$

=>

$$\Pr\{p\} = \frac{A - a(p-1)}{p(1-a)} \Pr\{p-1\} \tag{2.29}$$

Näistä yhtälöistä (ja merkitsemällä todennäköisyyksien summa ykköseksi) saadaan tarjotun liikenteen tilatodennäköisyyksien jakauma, **binomijakauma**:

$$\Pr_o[p] = \binom{K}{p} a^p (1-a)^{K-p} \tag{2.30}$$

Tämä kaava voidaan johtaa lähtien siitä tiedosta, että kysymyksessä on K kappaletta riippumattomia satunnaismuuttujia, jotka saavat arvon 1 (liikennelähde palveltavana) todennäköisyydellä a .

Binomijakauman avulla voitaisiin laskea liikenteen keskiarvo ja varianssi. Voidaan käyttää myös hyväksi sitä tietoa, että liikennelähteet ovat toisistaan riippumattomia. Eri liikennelähteiden liikenteiden keskiarvot ja varianssit voidaan tällöin laskea yhteen:

$$A_o = K a \tag{2.31}$$

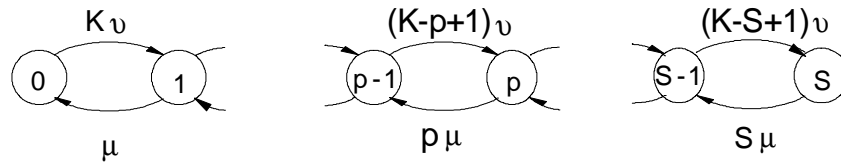
$$V_o = K a (1-a) \tag{2.32}$$

Tarjotun liikenteen huippukerroin (variانسsin suhde keskiarvoon) on siten

$$z_o = 1-a \tag{2.33}$$

Eli binomijakaumalla varianssi on aina alle yhden, kun taas Poisson-jakaumalla varianssi ja keskiarvo ovat yhtä suuria. Liikenteen vaihtelu on siten sitä vähäisempää mitä suurempi on liikennelähteiden ominaisliikenne (myös esto on tällöin pienempi).

Tarkastellaan seuraavaksi välitetyn liikenteen ominaisuuksia. Laskelmissa käytetään hyväksi edellä johdettuja tarjotun liikenteen tilatodennäköisyyksiä, $\Pr_o\{p\}$, sekä parametrejä A_o ja z_o . Kuvassa 2.12 on esitetty välitetyn liikenteen tasapainotilan kaavio.



Kuva 2.12. Välitetyn liikenteen tasapainotila.

Verrattaessa kuvien 2.11 ja 2.12 tasapainotilojen kaavioita voidaan havaita, että tilojen väliset siirrot ovat yhtä suuret eli myös tilatodennäköisyyksien suhteet pysyvät samoina, joten välitetyn liikenteen tilatodennäköisyydet voidaan esittää seuraavasti:

$$\Pr_c\{p\} = \frac{\Pr_o\{p\}}{\sum_{i=0}^S \Pr_o\{p=i\}} \quad p \leq S \quad (2.34)$$

Tilatodennäköisyydet voidaan laskea myös suoraan käyttäen kaavaa 2.28. Aikaesto on määritelmän mukaisesti tilan S todennäköisyys:

$$B_t = \Pr_c\{S\}$$

Kutsuesto on estyneiden ja saapuneiden kutsujen suhde:

$$B_c = \frac{y_{in}[S] \Pr\{p=S\}}{\sum_{i=0}^S y_{in}[i] \Pr\{p=i\}} \quad (2.35)$$

jossa $y_{in}[i]$ on tulointensiteetti, kun varattuna on i johtoa:

$$y_{in}[i] = (K-i)\nu$$

Sijoittamalla näihin aikaisemmin lasketut tilatodennäköisyydet saadaan **Engsetin aika- ja kutsuestojen kaavat**:

$$B_i = \frac{\binom{K}{S} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^S}{\sum_{i=0}^S \binom{K}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i} \quad (2.36)$$

$$B_c = \frac{\binom{K-1}{S} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^S}{\sum_{i=0}^S \binom{K-1}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i} \quad (2.37)$$

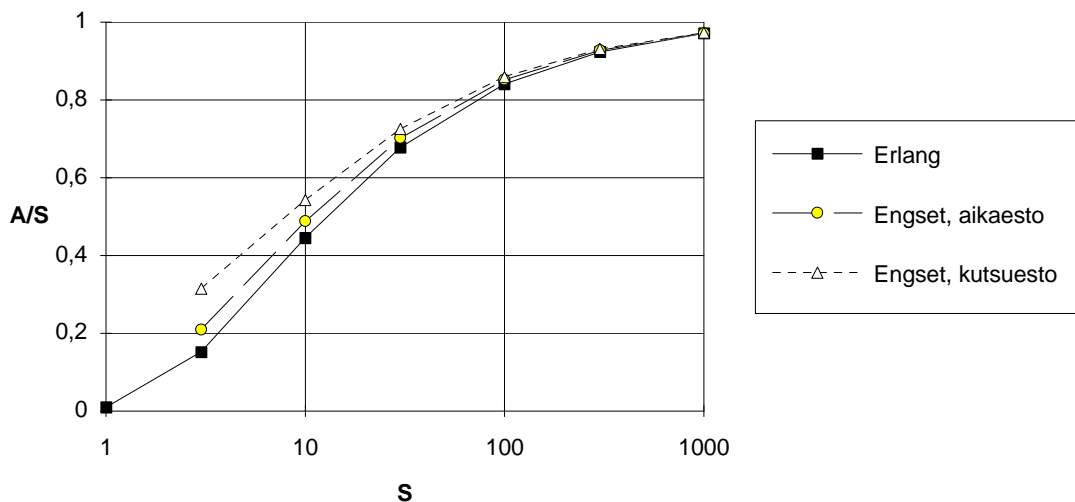
Näistä kaavoista voidaan havaita, että kutsuesto on sama kuin $(K-1)$:n liikennelähteen liikenteen aiheuttama aikaesto:

$$B_c\{\nu, \mu, K, S\} = B_i\{\nu, \mu, K-1, S\} \quad (2.38)$$

Engsetin kutsuesto on siten aina pienempi kuin aikaesto (todellisella liikenteellä kutsuesto on useinkin suurempi kuin aikaesto johtuen estyneiden kutsujen uusiutumisesta).

Kuvassa 2.13 on vertailtu Erlangin ja Engsetin kaavojen perusteella saatavaa sallittua keskimääräistä kuormitusta, kun esto on 1%. Engsetin kaavoilla on lähinnä merkitystä, kun sekä liikennelähteiden että johtojen määrä on pieni; useimmiten voidaan kuitenkin soveltaa Erlangin kaavaa.

Kuvasta voidaan myös nähdä, että yksi 100 kanavainen järjestelmä voi välittää noin kaksi kertaa enemmän liikennettä kuin 10 kappaletta erillisiä 10 kanavan järjestelmiä. Lukija miettiköön mistä tämä hyvinkin yleispätevä ja tärkeäkin ilmiö johtuu. On kuitenkin huomattava, että jos kuormitus on 90%, liikenteen kasvu 10 prosentilla vaikuttaa hyvin voimakkaasti estoon, sensijaan jos kuormitus on 40%, vastaavalla liikenteen lisäyksellä ei ole läheskään yhtä suurta vaikutusta.



Kuva 2.13. Sallittu kuormitus johtojen määrän funktiona, esto 1%, Engsetin kaavoilla ominaisliikenne $a = 0,2$.

3. JONOTEORIAN PERUSTEET

Eräs telejärjestelmien suorituskykyyn voimakkaasti vaikuttava tekijä on jonotus. Nykyisissä tietokoneohjatuissa järjestelmissä jonotusjärjestelmien mitoitus on oleellinen kysymys. Tässä yhteydessä jonotusta käsitellään hyvin suppeasti, lähinnä tavoitteena on peruslaskentamenetelmien ja keskeisimpien kaavojen esitteleminen.

3.1 Peruskaavat

Käytetään seuraavia merkintöjä ja määritelmiä:

B_w = **odotusesto** eli todennäköisyys, että asiakas ei pääse välittömästi palveltavaksi

B_t = **aikaesto** eli todennäköisyys järjestelmän kaikki palvelu- ja odotuspaikat ovat varattuja

B_c = **kutsuesto** eli kokonaan estyvien asiakkaiden osuus tulevista asiakkaista

w = odottavien asiakkaiden määrä

s = palveltavana olevien asiakkaiden määrä

p = asiakkaiden määrä yhteensä = $s + w$

S = palvelupaikkojen määrä

N = odotuspaikkojen määrä

Tarkastellaan ensin jonotusjärjestelmän parametrejä yleisessä muodossa olettamatta mitään erityistä liikenteen mallia. Oletetaan tunnetuiksi tilatodennäköisyydet:

$$\Pr\{p=i\}, i = 0, 1, \dots, S+N-1, S+N$$

sekä keskimääräinen järjestelmään tulevien asiakkaiden tulointensiteetti, y . Pyritään laskemaan keskimääräinen odotusaika. Sovelletaan jonoon Littlen lausetta, jonka perusteella keskimääräinen odotusaika on:

$$h_w = E\{w\}/y \quad (3.1)$$

jossa $E\{w\}$ on keskimääräinen odottavien asiakkaiden määrä:

$$E\{w\} = \sum_{i=S}^{S+N} (i - S) \Pr\{p = i\} \quad (3.2)$$

Vastaavasti keskimääräinen järjestelmässä olevien asiakkaiden määrä ja keskimääräinen järjestelmässä oloaika (jonotusaika):

$$E\{p\} = \sum_{i=0}^{S+N} i \Pr\{p = i\} \quad (3.3)$$

$$h_p = E\{p\}/y \quad (3.4)$$

Lisäksi saadaan keskimääräinen palveltavana olevien asiakkaiden määrä (eli välitetty liikenne) ja keskimääräinen palveluaika:

$$E\{s\} = \sum_{i=0}^S i \Pr\{p=i\} + S \sum_{i=S+1}^{S+N} \Pr\{p=i\} \quad (3.5)$$

$$h_s = E\{s\}/y_{in} \quad (3.6)$$

Voidaan havaita heti seuraavat riippuvuudet:

$$E\{p\} = E\{s\} + E\{w\} \quad (3.7)$$

$$h_p = h_s + h_w \quad (3.8)$$

Näitä kaavoja voidaan soveltaa käytännössä aina, kun järjestelmä on tasapainotilassa; ongelmana on tilatodennäköisyyksien ratkaiseminen.

3.2 M/M/1, M/M/S ja M/M/S/N-järjestelmät

Tarkastellaan hieman lähemmin jonotusjärjestelmiä M/M/1, M/M/S ja M/M/S/N, joissa merkinnät tarkoittavat:

M/M/S/N : kutsut saapuvat Poisson-prosessin mukaisesti

M/M/S/N : palveluajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita

M/M/S/N : palvelupaikkojen määrä on S

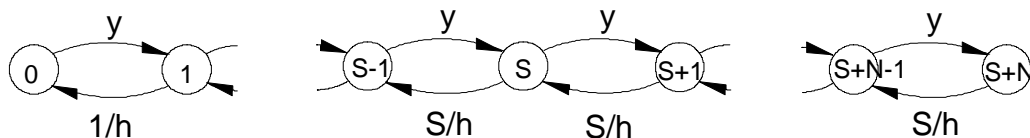
M/M/S/N : odotuspaikkojen määrä on N (jos merkintää ei ole, odotuspaikkoja on ääretön määrä)

Merkinnän M lisäksi yleisimpiä merkintöjä ovat:

D : deterministinen prosessi eli saapumisaikavälit tai palveluajat ovat vakio-pituisia

G : yleinen aikajakauma

M/M/S/N-järjestelmän tasapainotilan kaavio on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. M/M/S/N-järjestelmän tasapainotilan kaavio.

Tilatodennäköisyydet saadaan kuvan mukaisesti kaavalla:

$$\Pr\{p\} = \begin{cases} y h \Pr\{p-1\} / p & ; p = 1, 2, \dots, S \\ y h \Pr\{p-1\} / S & ; p = S+1, S+2, \dots, N \end{cases} \quad (3.9)$$

jossa y on tulointensiteetti (esimerkiksi asiakkaita tunnissa) ja h keskimääräinen palvelu-aika (samassa aikayksikössä kuin y). Näistä saadaan tilatodennäköisyydet ($A = y \cdot h$, jonoteoriassa A:n sijasta käytetään yleensä merkintää $\rho = y \cdot h / S$):

$$\Pr\{p\} = \begin{cases} (A^p / p!) \Pr\{0\} & ; p = 1, 2, \dots, S \\ (A/S)^{p-S} \Pr\{S\} & ; p = S+1, S+2, \dots, N \end{cases} \quad (3.10)$$

jossa $\Pr\{0\}$ voidaan ratkaista merkitsemällä tilatodennäköisyyksien summa ykköseksi.

Odotusesto määriteltiin todennäköisyytenä, että tuleva asiakas ei saa heti palvelua. Poisson-liikenteelle eli mikäli asiakkaat saapuvat satunnaisesti saadaan:

$$B_w = \sum_{i=S}^{S+N} \Pr\{p = i\} \quad (3.11)$$

M/M/S-järjestelmälle voidaan johtaa vielä helposti keskimääräinen odottavien asiakkaiden määrä ja siten myös keskimääräinen odotusaika:

$$E\{w\} = AB_w/(S-A) \quad (3.12)$$

$$h_w = hB_w/(S-A) \quad (3.13)$$

Erityisesti M/M/1 järjestelmälle saadaan:

$$B_w = A \quad (3.14)$$

$$E\{s\} = A \quad (3.15)$$

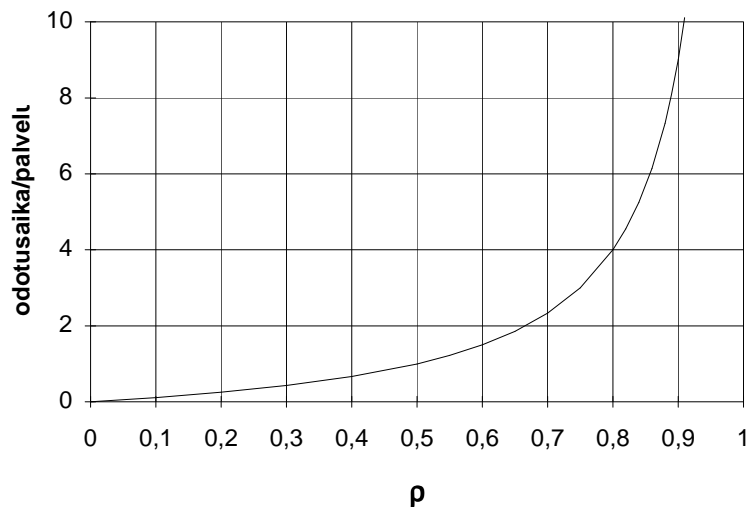
$$E\{w\} = A^2/(1-A) \quad (3.16)$$

$$E\{p\} = A/(1-A) \quad (3.17)$$

$$h_w = hA/(1-A) \quad (3.18)$$

$$h_p = h_w + h \quad (3.19)$$

$$P\{p\} = (1-A)A^p \quad (3.20)$$



Kuva 3.2. Keskimääräinen odotusaika kuormituksen funktiona M/M/1-järjestelmällä.

Vertaamalla liikenneteoreettisia laskelmia (esim. Erlangin kaavan johto) ja edellä esitettyjä laskelmia, voidaan havaita selviä yhtäläisyyksiä. Itse asiassa Erlangin mallia on M/M/S/0 -järjestelmä jonoteorian kannalta. Mallien yhtäläisyys on niin suuri, että M/M/S ja M/M/S/N järjestelmien estot voidaan lausua vastaavan Erlangin kaavan avulla, $B_E\{A,S\}$. M/M/S -järjestelmän odotusestolle saadaan kaava:

$$B_w\{A, S, N = \infty\} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{B_E\{A, S\}} - 1\right)\left(1 - \frac{A}{S}\right)} \quad (3.21)$$

3.3. Esimerkkejä

Otetaan esimerkiksi tapaus, jossa palvelupaikkaan (vaikkapa valintamyymälässä) tulee keskimäärin yksi asiakas minuutissa, palveluaika on eksponentiaalisesti jakautunut ja jonon pituutta ei rajoiteta. Oletetaan aluksi, että asiakkaan palvelu kestää keskimäärin yhden minuutin, joten yksi palvelupaikka ei riitä, koska jonon keskipituus kasvaisi kohti äärettömyyttä. Tilanteen parantamiseksi on kolme vaihtoehtoa:

- Lyhennetään palveluaikaa 30 sekuntiin.
- Lisätään toinen palvelupiste siten, että palvelupaikoilla on yhteinen jono.
- Jaetaan asiakkaat satunnaisesti kahteen palvelupaikkaan, joilla on kummallakin oma jononsa (eli asiakas ei valitse jonoansa, vaan valinta tapahtuu satunnaisesti, eikä asiakas myöskään vaihda jonoansa, vaikka toinen palvelupaikka olisi vapaa).

Kohdat a ja c ovat selvästi $M/M/1$ -järjestelmiä, jolloin odotusaika voidaan laskea kaavalla 3.18. a -kohdassa $h = 0,5$ ja $y = 1$ ja c -kohdassa kummallakin palvelupaikalla $h = 1$ ja $y = 0,5$, joten kummassakin tapauksessa kuormitus on sama $0,5$. Keskimääräinen odotusaika on kuitenkin c -kohdassa kaksinkertainen.

Kohta b muodostaa $M/M/S$ -järjestelmän, jolloin yleensä selvin tapa odotusajan laskemiseksi on ratkaista tilatodennäköisyydet kaavalla 3.9, ja näiden avulla laskea odotusaika (kaava 3.2). Esimerkin tapauksessa keskimääräiseksi odotusajaksi saadaan 20 s, joka ehkä hieman yllättäenkin on lyhyempi kuin a -kohdan tapauksessa. Kuitenkin, jos otetaan huomioon myös asiakkaan palveluaika, on a -kohta asiakkaan kannalta edullisempi. Tulokset on koottu taulukkoon 3.1. Lukija voi miettiä, miksi toisaalta b -kohdassa odotusaika on lyhyempi kuin a -kohdassa ja toisaalta kuitenkin kokonaisaika on pitempi b -kohdassa (eli mitä tapahtuu esimerkiksi, jos $0,5$ minuutin palvelija palveleekin rinnakkain kahta asiakasta).

Taulukko 3.1. Odotus- ja palveluajat esimerkin tapauksessa.

	Keskimääräinen odotusaika	keskimääräinen palveluaika	kokonaisaika
$M/M/1, h = 0,5 \text{ min}$	30 s	30 s	60 s
$M/M/2, h = 1 \text{ min}$	20 s	60 s	80 s
$2*M/M/1, h = 1 \text{ min}$	60 s	60 s	120 s

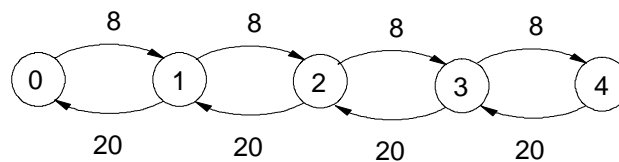
Toiseksi esimerkiksi parina aikaisempaa vuotena useampaan kertaan tenttitehtävänä ollut ongelma:

Pankkiautomaatilla käy keskimäärin 8 asiakasta tunnissa. Asiointi kestää keskimäärin 3 minuuttia (eksponentiaalisesti jakautunut aika). Asiakas jää odottamaan, jos automaatilla on yhteensä korkeintaan kolme asiakasta, muutoin asiakas siirtyy viereisen pankin tiskille.

- Kuinka monta asiakasta tunnissa siirtyy pankkiin?
- Kuinka monta asiakasta on keskimäärin odottamassa pääsyä automaatille?
- Kuinka pitkään asiakas joutuu keskimäärin odottamaan ennenkuin pääsee automaatille, kun asiakkaan tullessa täsmälleen yksi henkilö on automaatilla ja yksi odottamassa?

Vaikka kyseessä on ilmeisen jonoteoreettinen ongelma, ei sen ratkaisemiseen tarvita varsinaisesti kaavoja (toisin kuin varsin monet tenttiin osallistuneet ovat olettaneet) vaan lähinnä mallintamisen ymmärtämistä ja joidenkin laskentamenetelmien hallitsemista. Ratkaisu on seuraavan tyyppinen:

Ensiksi täytyy selvittää mitkä ovat järjestelmän mahdolliset tilat. Automaatilla voi asiakkaan tullessa olla nolasta neljään asiakasta: jos automaatilla on kolme asiakasta, tuleva asiakas jää neljänneksi, jonka jälkeen tulevat asiakkaat siirtyvät pankkiin, kunnes yksi asiakas poistuu (melkein puolet tehtävään vastanneista erehtyy jo tässä vaiheessa, eli kannattaa olla tarkkana). Asiakkaita tulee 8 tunnissa, jolloin kutsuintensiteetti $y = 8$, kun aikayksikkönä on tunti. Käytettävällä aikayksiköllä ei sinänsä ole väliä, kunhan käyttää koko ajan samaa yksikköä (aikayksiköiden kanssa sekoaa ehkä noin neljäsosa vastaajista). Keskimääräinen palveluaika on 3 min eli palveluintensiteetti on 20. Oletuksena on että asiakkaat tulevat toisistaan riippumatta eli yksi kerrallaan, jolloin järjestelmän tilassa tapahtuu siirtymisiä vain peräkkäisten tilojen välillä. Näin saadaan alla olevan kuvan mukainen järjestelmä:



Kuva 3.3. Jonotusjärjestelmän tilat ja niiden väliset siirtymätodennäköisyydet

On huomattava, että esimerkiksi järjestelmän tila 2 tarkoittaa tässä tilannetta, jossa yksi asiakas on automaatilla ja yksi odottamassa (muunkinlaiset merkintätavat ovat mahdollisia, kunhan on johdonmukainen). Yläpuolella oleva 8 tarkoittaa että tunnissa tulee keskimäärin 8 asiakasta (tämä on useimmissa vastauksissa oikein) ja alapuolella oleva 20 tarkoittaa, että jos järjestelmässä on vähintään yksi asiakas, asiakkaita poistuu keskimäärin 20 kappaletta tunnissa (tähän asti oikein vastanneista ehkä noin kolmanneksen mielestä poistuvien asiakkaiden määrä aikayksikössä riippuu jonon pituudesta, joka tässä tehtävässä on väärä oletus).

Tämän jälkeen lasketaan tilojen todennäköisyydet esimerkiksi siten, että otetaan lähtökohdaksi tilan 0 todennäköisyys, jolloin muiden tilojen todennäköisyydet voidaan ratkaista rekursiivisesti kaavoista $8 \Pr[0] = 20 \Pr[1]$, $8 \Pr[1] = 20 \Pr[2]$ jne. Kun vielä tiedetään, että järjestelmä on täsmälleen yhdessä tilassa, voidaan todennäköisyydet laskea suhteellisen helposti (jos kuva on osattu johtaa oikein, useimmat osaavat kyllä suorittaa laskelmatkin oikein).

Tämän jälkeen kohtien *a* ja *b* ratkaisut ovat melko yksinkertaisia. Kohdan *a* vastaus on tilan $\Pr[4]$ todennäköisyys (0,0155) kertaa tulevien asiakkaiden määrä tunnissa (20) = 0,31. Kohdassa *b* vastaus saadaan yhteenlaskulla $1 \Pr[2] + 2 \Pr[3] + 3 \Pr[4] = 0,22$ (tässäkin kohdassa on varsin helppo erehtyä ottamalla mukaan myös automaattia käyttävä asiakas). Kohdan *c* laskemiseen ei edellä esitettyjä laskelmia tarvita ollenkaan, ainoa mitä tarvitsee tietää on eksponentiaalijakauman niin sanottu muistamattomuus-ominaisuus, joka tässä tapauksessa merkitsee sitä, että asiakkaan jäljellä oleva keskimääräinen palveluaika on aina vakio. Eli tässä tapauksessa automaatilla olevan asiakkaan jäljellä oleva aika on keskimäärin 3 min ja ensimmäisenä jonossa olevan käyttämä aika myös 3 min eli yhteensä 6 min.

4. VELOITUS

4.1 Veloitus ja kustannusvastaavuus

Palvelujen kustannukset pyritään kattamaan asiakkailta saatavilla maksuilla, esimerkiksi puhelinlaitokset rahoittavat toimintansa keräämällä asiakkailta erilaisia maksuja. Veloituksen perusvaatimus on oikeudenmukaisuus, joka voidaan tulkita kustannusvastaavuudeksi eli palvelun käyttäjä maksaa aiheuttamansa kustannukset. Kustannuksia aiheuttavat järjestelmään liittyminen, yhteyden muodostaminen ja yhteyden varaama siirtokapasiteetti. Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat palvelun laatu ja ajankohta.

Kaikesta huolimatta voimakkaimmin maksujen suuruuteen vaikuttavat tekijät eivät ole teknisiä vaan pikemminkin poliittisia. Esimerkkinä mainittakoon eräs tutkimus, jonka mukaan ISDN-yhteyden hinta on Saksassa 10-kertainen verrattuna Englannin vastaavaan, vaikka verkoissa käytettävä tekniikka on periaatteessa täysin sama, sensijaan kilpailutilanne on eri.

Lisäksi veloitukseen vaikuttaa mm. tarve ohjata asiakkaiden käyttäytymistä. Esimerkiksi puhelujen hinnat ovat iltaisin ja viikonloppuisin halvempia kuin työpäivän aikana. Toisaalta voidaan kysyä: ovatko puhelujen aiheuttamat kustannukset siten erilaisia eri aikoina?

Yksittäisen puhelun aiheuttamia kustannuksia on lähes mahdotonta yksiselitteisesti määrittää. Eräs lähtökohta on se, että puhelinverkko mitoitetaan (eli määritetään kuinka suuria keskuksia tarvitaan ja kuinka monta johtoa eri väleillä tulee olla) kiiretunnin kuormituksen perusteella. Usein kiireisin ajankohta on työpäivän aikana joko aamu- tai iltapäivällä. Koska suuri osa kustannuksista on keskuksiin ja siirtoverkkoon kohdistuvia investointeja, voidaan väittää, että puhelu aiheuttaa kiiretunnin aikana suuremmat kustannukset kuin hiljaisemman liikenteen aikana. Toisaalta voidaan ajatella, että puhelinlaitoksen kannattaa pyrkiä ohjaamaan puheluita sellaisiin aikoihin, jolloin liikennettä on vähemmän, koska liikenteen lisääntyminen illalla ei lisää kustannuksia juuri ollenkaan.

Eli kuormitusta pyritään tasoittamaan. Tämä on kuitenkin vain osatotuus, sillä nykyisin kiiretunti on monin paikoin illalla esimerkiksi yhdeksän aikoihin. Pitäisikö puheluiden olla tällöin päivisin halvempia ja illalla kalliimpia? Oman vastauksensa tähän antaa alkanut kilpailutilanne kaukopuheluissa.

Entä jos veloitus ei ole johdonmukaista? Otetaan yksi käytännön esimerkki, amerikkalainen firma nimeltä IDT. Sen liikeidea on perustuu sinänsä yksinkertaiseen tosiasiaan: USA:sta muihin maihin otetut puhelut ovat yleensä huomattavasti halvempia kuin toiseen suuntaan otetut puhelut. Palvelu toimii siten, että USA:n ulkopuolinen asiakas soittaa IDT:n keskukseseen New Yorkissa. Tämän jälkeen asiakas sulkee puhelimensa ja IDT:n keskus soittaa asiakkaan numeroon, jolloin asiakas voi muodostunutta yhteyttä käyttäen soittaa mihin tahansa numeroon USA:ssa, siten että veloitus perustuu USA:n tariffeihin. IDT ottaa välistä oman osuutensa, mutta myös asiakkaalle jää tyypillisesti 30% hintaetu. (Mainittakoon että vuoden 93 alussa oli halvempaa soittaa Suomesta USA:han kuin USA:sta Suomeen).

4.2 Veloitusperiaatteet

Asiakkaiden veloittaminen voi perustua seuraava tyyppisiin maksuihin:

1. Liittymismaksu
2. Kuukausi/vuosimaksu
3. Kutsukohtainen maksu eli kertaveloitus
4. Maksu yhteysajasta eli aikaveloitus
5. Maksu siirretyn liikennemäärän mukaan

Kustannusvastaavuuden perusteella näiden maksujen tulisi vastata telelaitokselle syntyviä kustannuksia:

- * Liittymismaksulla pyritään kattamaan lähinnä tilaajaverkon rakentamisesta ja tilaajan liittämisestä aiheutuvat kustannukset. Tämän tyyppinen maksu peritään yleensä kaikkien palvelujen käyttäjiltä.
- * Kuukausimaksulla katetaan tilaajakohtaisten johtojen ja laitteiden ylläpito. Kuukausimaksulla voidaan osittain korvata liittymismaksu, mutta sitä ei läheskään aina käytetä (ellei kyseessä ole vuokraliittymä).
- * Kertaveloituksella pyritään kattamaan ne kustannukset, jotka aiheutuvat yhteyden (esim. puhelun) muodostamisesta. Esimerkiksi puhelinkeskuksessa tarvittava välityskapasiteetti riippuu kiiretunnin aikana tulevista puhelujen määrästä.
- * Aikaveloituksella katetaan ne kustannukset, jotka aiheutuvat käynnissä olevien yhteyksien määrästä; puhelinverkon siirtoverkossa tarvittavien johtojen määrä (ja osittain myös puhelinkeskusten koko) määräytyy liikennemäärien mukaan. Aikaveloitus onkin puhelinverkossa hyvin keskeinen veloitus tapa.

Jos puhelujen pituudet eivät vaihtele kovin paljon, voidaan aikaveloitus korvata kertaveloituksella. Nykyisissä keskuksissa eri veloitus tapoja voidaan yhdistellä varsin vapaasti, jolloin tähän ei ole yleensä tarvetta. On syytä muistaa että käytettäessä kertaveloitusta kannattaa asiakkaan pitää esimerkiksi modeemiyhteys päällä jatkuvasti. Jos käytettävät siirtonopeudet vaihtelevat ja erityisesti jos käytetään pakettimuotoista tiedonsiirtoa, aikaveloitus korvataan yleensä liikennemäärään (siirrettyihin bitteihin tai paketteihin) perustuvalla veloituksella.

4.3 Veloituksen toteutus

Analogisessa puhelinverkossa veloitus tapahtuu lähettämällä A-tilaajan puhelunlaskijaan veloitus sykäyksiä. Uusissa digitaalisissa keskuksissa veloitus tietojen talletus tapahtuu tietokoneen muistissa, jolloin veloitus voidaan eritellä hyvinkin tarkasti. Tarkastellaan seuraavaksi veloitusta perinteisen tekniikan termein.

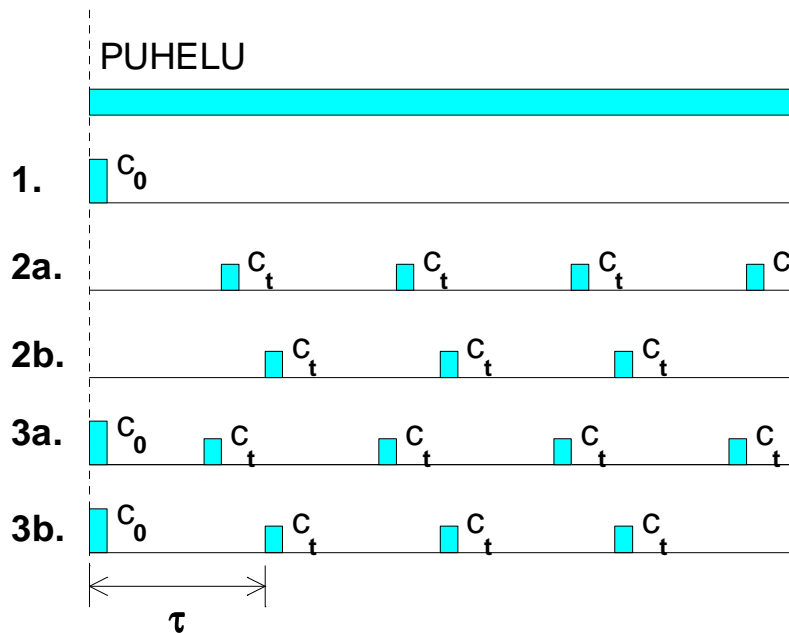
Puhelukohtainen veloitus tapahtuu yleensä lähettämällä puhelun alussa yksi sykäys. Jos puhelun aikana ei tule muita sykäyksiä, on kyseessä kertaveloitus (periaate 1 kuvassa 4.1).

Aikaveloituksessa lähetetään puhelun aikana määrävälein sykäyksissä (merkitään sykäysten välistä aikaa τ :lla). Ensimmäinen sykäys voi tulla joko riippumatta puhelun

alkamisesta (2a) tai τ :n kuluttua puhelun alkamisesta (2b). Ensimmäisestä veloitusperiaatteesta käytetään nimitystä tilastollinen aikaveloitus tai Karlsson-veloitus. Ensimmäiseen sykäykseen kuluva aika jakautuu tällöin satunnaisesti aikavälille $(0, \tau)$.

Perusmaksullinen aikaveloitus saadaan, kun yhdistetään kertaveloitus ja aikaveloitus eli puhelun alussa tulee sykäys ja tämän jälkeen puhelun aikana määräväleihin (3a tai 3b riippuen ensimmäisen aikasykäyksen ajankohdasta).

Veloitus voi myös olla kokonaan riippumaton käydyistä puhelujen määrästä (flat-rate veloitus).



Kuva 4.1 Veloitusperiaatteet

4.4 Matemaattinen tarkastelu

Olkoon kokonaiskustannukset tietyssä ajanjaksona K , joista osuus $p \cdot K$ on puhelukohtaisia käsittelykustannuksia ja loput $(1-p)K$ puhelun kestoista johtuvia kustannuksia. Veloitettavien puhelujen määrä olkoon N (estyneistä puheluista ei suoriteta veloitusta) ja puhelujen keskipituus h . Eri veloitusperiaatteilla saadaan seuraavat yhtälöt, kun c_0 on perussykäyksen hinta ja c_t on aikasykäyksen hinta:

1. Kertaveloitus

$$K = N \cdot c_0$$

2a ja 2b. Aikaveloitus:

$$K = N \cdot n \cdot c_t$$

3a ja 3b. Perusmaksullinen aikaveloitus:

$$K = N \cdot c_0 + N \cdot n \cdot c_t$$

jossa n ilmaisee, kuinka monta sykäystä puhelun aikana keskimäärin tulee.

Teknisistä syistä johtuen c_0 ja c_t ovat yleensä yhtä suuria, jotta ei jouduttaisi lähettämään erilaisia sykäyksiä. Eräs mahdollisuus on lähettää useita perussykäyksiä.

Tilastollisessa aikaveloituksessa (2a ja 3a) n saadaan kaavalla:

$$n_a = h/\tau$$

Kun ensimmäinen aikasykäys tulee τ :n kuluttua (2b ja 3b) n voidaan laskea, kun tunnetaan puheluajan kertymäfunktio $F(t)$:

$$n_b = \sum_{i=1}^{\infty} 1 - F(i\tau)$$

Jos puheluajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita, saadaan:

$$n_b = 1/(e^{\tau/h} - 1)$$

Veloitusperiaatteilla 3a ja 3b voidaan kustannukset jakaa siten, että perussykäys kattaa käsittelykustannukset ja aikasykäykset kattavat muut kustannukset, jolloin saadaan:

$$c_0 = p * K/N$$

$$c_t = (1-p) * K/(n * N)$$

Kummallakaan veloituseriaateella ei päästä täysin ideaaliseen veloitukseen (jos ideaalisena pidetään sitä, että veloitus tapahtuisi täsmälleen puhelujen pituuksien perusteella). Kun sykäyksiä lähetetään puhelun alkuhetkestä lähtien on veloitusfunktion portaittainen. Mikäli sykäysväli on pitkä (ja sykäyksen hinta suhteellisen suuri), tällainen veloitustapa voi vaikuttaa puhelujen pituuksiin. Tilastollinen aikaveloitus puolestaan aiheuttaa tilastollisen virheen veloitukseen. Virheen suuruus jää kuitenkin varsin pieneksi kun sykäyksen hinta on pieni (virhe puhelua kohti voi olla korkeintaan yhden sykäyksen hinta).

Koska yhden sykäyksen hinta on vakio, puhelun hintojen vaihtelut (esim. lähipuhelu / kaukopuhelu / ulkomaanpuhelu) hoidetaan muuttamalla sykäysväliä. Sykäysten minimihinta määräytyy siten kalleimpien puhelujen perusteella (n. 15 mk/min), koska sykäysväli on (ollut) tietty tekninen, sekunnin luokkaa oleva alaraja.

5. ISDN

5.1 ISDN:n perusominaisuudet

Isdn-lyhenne tulee sanoista *Integrated Services Digital Network*. Sillä tarkoitetaan monipalveluverkkoa, joka kehittyy digitaalisesta puhelinverkosta täydentämällä sitä kansainvälisten suositusten mukaisilla isdn-ominaisuuksilla. Näitä ominaisuuksia ovat käyttäjän kannalta:

- isdn:ssä tarjottavat tele- ja verkkopalvelut ja niihin liittyvät lisäpalvelut ja
- verkon ja käyttäjän väliset liitännät,

ja verkon rakentajan ja ylläpitäjän kannalta:

- verkossa käytettävät merkinantojärjestelmät mukaanlukien tilaajajohdon merkinanto,
- yhteyden muodostusperiaatteet ja liikenteen ohjaus verkossa sekä
- yhdysliikenne isdn:n ja muiden verkkojen välillä.

Digitaalisen puhelinverkon täydentäminen edellämainituilla isdn-ominaisuuksilla luo puitteet joustavalle uusien palveluiden käyttöönotolle tulevaisuudessa. Kyseessä on nimensä mukaisesti palveluintegraatio eli erityyppisten informaatioiden siirtäminen ja välittäminen yhtenäisesti yhdessä verkossa. Televerkon rakentamista ja ylläpitoa voidaan näin rationalisoida ja ainakin pitkällä tähtäimellä voidaan saavuttaa kustannussäästöjä. Integroinnista saatava hyöty kohdistuu suoranaisesti telelaitoksiin mutta toivon mukaan se tuo myös verkon käyttäjille edullisempia ja monipuolisempia palveluita.

Toinen, läheisemmin verkon käyttäjälle näkyvä isdn:n tunnusmerkki on yhtenäinen tilaajaliitäntä, johon voidaan liittää erilaisia päätelaitteita ja jonka kautta asiakas saa verkon tarjoamat palvelut.

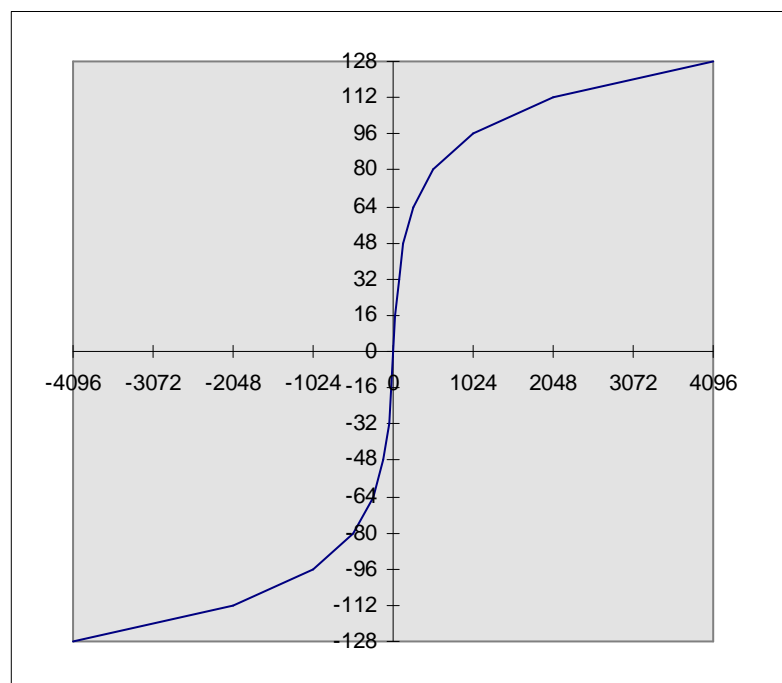
Isdn perustuu digitaaliseen puhelinverkkoon, joten lienee tarpeen lyhyesti kertoa mikä on digitaalinen puhelinverkko. Digitaalinen puhelinverkossa käytetään pulssikoodimodulaatiota (PCM), joka perustuu analogisesta signaalista otettuihin näytteisiin. Jokainen näyte kvantisoidaan ja muutetaan koodaamalla digitaaliseksi signaaliksi. Vastaanottopäässä digitaalisesta signaalista voidaan muodostaa signaali, joka muistuttaa huomattavasti alkuperäistä signaalia; signaalien ero riippuu sekä näytteenottotaajuudesta, kvantisointitasojen määrästä ja koodaustavasta.

PCM-kvantisoinnissa näytteet luokitellaan signaalin voimakkuuden (amplitudin) mukaan kvantisointitasoihin. Jokaista kvantisointitasoa edustaa tietty koodisana, jonka avulla näyte esitetään numeromuodossa. Siirtojärjestelmissä koodisanat siirretään aikalomitettuina. Kvantisointivälien arvot määritellään koodauslailla, joka jakaa matalatasoiset signaalien arvot tiheämmin kuin voimakkaat signaalien arvot. Koska dekodatun signaalin amplituditasot eivät tarkasti vastaa alkuperäistä signaalia, aiheuttaa koodaus kohinaa, joka kutsutaan kvantisointikohinaksi.

Euroopassa noudatettavan PCM-järjestelmän tärkeimmät ominaisuudet ovat:

- näytteenottotaajuus = 8000 näytettä/s ja välitettävä taajuuskaista on 300 - 3400 Hz.

- näytteen koodaus tapahtuu 8 bitillä, jolloin kvantisointitasoja on 256 kpl ja yhden kanavan nopeus on 64 kbit/s
- kompressio noudattaa kuvan 5.1 mukaista ns. A-lakia
- siirtojärjestelmien perusnopeus 2048 kbit/s, johon mahtuu 30 varsinaista informaatiokanavaa sekä 2 kanavaa lähinnä merkinantoon ja verkon hallintaan
- ylemmän tason järjestelmien nopeuksia ovat mm. 8 Mbit/s, 34 Mbit/s ja 139 Mbit/s ja 565 Mbit/s.
- jos signaalin taso on sopiva PCM-järjestelmällä voidaan päästä noin 36 dB signaalikohinasuhteeseen, jos yhteydellä on ainoastaan yksi koodaus/dekoodaus.



Kuva 5.1. A-lain mukainen PCM-koodaus, vaaka-akselilla suhteellinen jännitetaso ja pystyakselilla kvantisointitason arvo.

5.2 ISDN-kehitys

Suomen kaukoverkko on digitaalinen, joten edellytykset isdn:n käyttöönotolle ovat Suomessa tältä osin hyvät. isdn:n tekninen kehittäminen käsittää ainakin seuraavat vaiheet:

- Ennen varsinaista isdn:ää verkossa on tarjottu tilaajalle asti ulottuvia 64 kbit/s valintaisia yhteyksiä. Tässä ns. **Diginet**-palvelussa tarjotaan puheen lisäksi suhteellisen nopea siirtokanava nykyisten liitännöiden mukaisille laitteille. Diginettiä on käytetty lähinnä datasiirtoon.
- Isdn:n alkuvaiheella tarkoitetaan tilannetta, jossa keskusten välillä ei ole varsinaista isdn-merkinantoa vaan verkossa käytetään digitaalisen verkon merkinantoa. Tällöin ei voida toteuttaa kaikkia isdn:lle määriteltyjä ominaisuuksia; perusominaisuudet ovat kuitenkin käytettävissä.

- Varsinainen isdn-kausi käynnistyy silloin, kun isdn-merkinanto otetaan käyttöön, jolloin kaikkia verkon ominaisuuksia voidaan hyödyntää. Kehitys jatkuu tämän jälkeenkin, kehitettäviä ominaisuuksia ovat mm. pakettivälitteiset ja laajakaistaiset palvelut.

Teleoperaattoreiden kannalta isdn on ollut tähän asti paha pettymys. Erityisesti 80-luvun puolivälissä odotukset olivat korkealla: isdn:n yleistymisen odotettiin tapahtuvan muutamassa vuodessa, asiakkaat (ja osittain laitevalmistajat) olivat toista mieltä. Merkittävää kysyntää ei ole syntynyt oikeastaan ennen kuin viimeisen vuoden aikana. Syitä kehityksen hitauteen on monia. Melkoisen yksimielisiä ollaan siitä, että isdn:n kehitys on tapahtunut liian erillisenä, "teknisenä" kehitystyönä, palvelujen tarkastelu on ollut puutteellista. Seurauksena on ollut, että isdn:n tarjoamat palvelut ei ole saaneet tähän mennessä merkittävää suosiota. Toinen oleellinen tekijä on päätelaitteiden kalleus, mm. isdn-puhelin on maksanut tähän asti useita tuhansia markkoja, ilman että sillä saatavat (puhelin)-palvelut eroaisivat mitenkään merkittävästi normaalista puhelimesta.

Itse asiassa isdn:n markkinoiden avautumista on odotettu niin kauan, että koko tuote on välillä ehditty jo melkein haudata. Viimeisen vuoden aikana on kuitenkin alkanut näyttää siltä, että markkinat todella käynnistyvät, mm. erään lehtihaastattelun perusteella HPY pitää isdn:ää yhtiön tärkeimpänä uutuustuotteena. Isdn menee ensisijaisesti pienten yritysten puhelinjärjestelmien perustaksi ja toiseksi internet-yhteyksien käyttäjille modeemien korvaajaksi. Oleellista on, että näissä tapauksissa käyttäjät pystyvät todella hyödyntämään isdn:n ominaisuuksia. Samalla päätelaitteiden, kuten isdn-kortit mikroiiniin, hinnat ovat markkinoiden kasvun myötä saavuttaneet kohtuullisen tason.

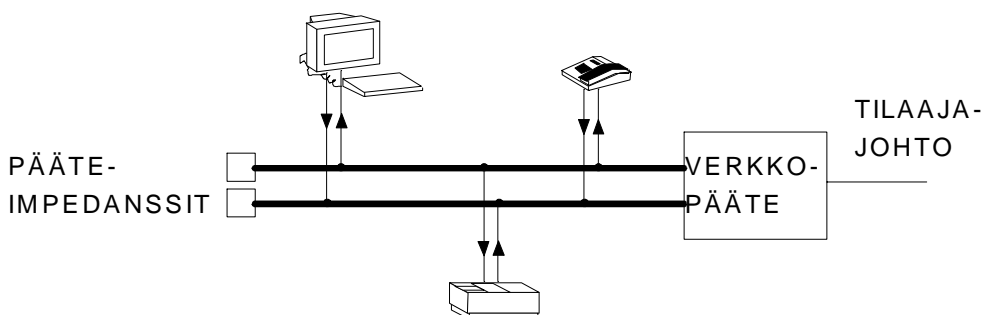
5.3 Tilaajan liittäminen ISDN-verkkoon

Tilaajan ja verkon välinen liitântä eli käyttäjäliitântä on ollut isdn:n tärkein määrittelykohde. Liitântä on pyritty tekemään riittävän joustavaksi uusien palveluita ajatellen mutta toisaalta niin yksinkertaiseksi, että toteutuksesta tulisi edullinen. Käyttäjäliitännän pääperiaatteita ovat:

- Merkinantokanava on erillään informaatiokanavasta, jolloin sitä voidaan käyttää myös yhteyden aikana ja hyödyntää informaation siirrossa. Aikaisemmin ja vielä osittain nytkin tilaajamerkinanto tapahtui katkomalla tilaajapiirin virtaa - uudempi tekniikka soveltaa äänitaajuisia signaaleja, joita voidaan käyttää rajoitetusti myös puhelun aikana.
- Perusinformaatiokanavan (B-kanava) nopeus on digitaalisessa puhelinverkossa käytettävä 64 kbit/s (tilaajajohdolla signaali kulkee nykyisin analogisena vaikka puhelinverkko muuten onkin hyvin pitkälle digitaalinen). B-kanavia on kaksi kappaletta, joita voidaan käyttää toisistaan täysin erillään esimerkiksi toista puheensirtoon ja toista kuvan siirtoon muuhun paikkaan. B-kanavaan voidaan kanavoida useampia informaatiolähteitä, mutta verkko kytkee ne aina vain yhteen osoitteeseen.
- Lisäksi käyttäjäliitântään kuuluu lähinnä merkinantoa varten D-kanava, jonka nopeus perusliittymässä on 16 kbit/s. D-kanavaa voidaan käyttää myös pakettikytkentäisen datan siirtoon.
- Perusliittymän kanavat (2B + D) voidaan siirtää nykyisten tilaajakaapeliin avulla yhdellä johdinparilla useita kilometrejä.

- Tilajaliitännä voidaan toteuttaa väylämäisellä ratkaisulla, jolloin samaan perusliitännään on kytkettävissä useita päätteitä, jotka varaavat informaatiokanavaa kilpavarausperiaattella.
- Varsinkin isdn:n alkuvaiheessa on tarvetta käyttää nykyisiä päätelaitteita. Näitä varten on määritelty sovitin.
- Perusjärjestelmäliittymä, joka on tarkoitettu lähinnä puhelinvaihteiden liittämiseen, sisältää 30 B-kanavaa ja yhden 64 kbit/s merkinantokanavan.

Isdn:n perusliittymään voi liittyä yksi tai useampia päätelaitteita. Monipäätteinen perusliittymä on joko lyhyt yhteisväylä, laajennettu yhteisväylä tai tähtimäinen rakenne. Kuvassa 5.2 on esimerkki isdn-perusliittymän väylätyyppisestä toteutuksesta.



Kuva 5.2. Isdn:n väylämuotoinen perusliittymä.

5.4 ISDN:n palvelut

Isdn:ssä tarjottavat palvelut jaetaan verkko- ja telepalveluihin, joihin kumpaankin voi liittyä lisäpalveluja (kts. telesanasto). Verkkopalvelu käsittää informaation siirron tilaajalta toiselle sekä tähän sisältyvät toiminnot kuten yhteydenmuodostus. Sensijaan päätelaitteista ja niiden yhteensopivuudesta käyttäjän on huolehdittava itse. Ensimmäisiä verkkopalveluita ovat:

- piirikytkentäinen 64 kbit/s
 - rajoittamaton
 - puhe
 - 3,1 kHz
 - vuorottainen puhe/rajoittamaton

Mainitut käyttötarkoitukset (rajoittamaton, puhe jne.) johtuvat siitä, että varsinkin pitkällä kansainvälisillä yhteyksillä voi esiintyä signaalia prosessoivia laitteita kuten kaikusalpoja ja digitaalisia vaimentimia sekä analogisia yhteysvälejä. Jos yhteyttä käytetään esimerkiksi datasiirtoon, verkon tulee taata informaatiobittien siirtyminen oikein (rajoittamaton käyttöalue). Sensijaan puheella ei ole oleellista bittien siirtyminen oikein vaan tilaajalle välittyvä analoginen signaali, jolloin digitaalisella yhteydellä voidaan sallia myös analogisia yhteysvälejä.

Telepalvelu pitää sisällään myös päätelaitteen, jolloin voidaan taata yhteensopivuus koko tietoliikennepalvelulle. Varsinaiset asiakassovellukset rakentuvat verkko- ja telepalveluiden päälle eikä niitä käsitellä isdn-suosituksissa.

5.5 Mitä ISDN tarjoaa asiakkaalle

Isdn:n pitkän ajan tavoitteena on kattaa kaikki nykyiset verkot (sekä piiri- että pakettikytkentäiset) sekä tarjota uusia käyttömahdollisuuksia. Alkuvaiheessa isdn-liittymät ja päätelaitteet ovat kuitenkin tavallista puhelinliittymää kalliimpia eikä palveluvalikoimaan ole kovin suuri. Isdn tarjoaa tavalliselle asiakkaalle myös etuja:

- Integroitu tilaajaliittymä, eli asiakas ei tarvitse eri palveluita varten omaa liittymää
- digitaalisen puhelinyhteyden laatu on parempi kuin analogisessa verkossa
- telekopioinnissa siirtoajat ja laatu paranevat
- datasiirrossa voidaan käyttää suurempia nopeuksia kuin modeemiyhteyksillä puhelinverkossa
- 64 kbit/s riittää kohtuullisen hyvään kuvapuhelimen kuvan laatuun
- koska samasta liittymästä voidaan tarjota erilaisia palveluja, voidaan yhteen päätelaitteeseen (esim. mikrotietokoneeseen) integroida useiden eri palveluiden vaatimia ominaisuuksia
- kehittyneen merkinannon ansiosta voidaan isdn-verkkoon rakentaa yrityksille ns. virtuaaliverkkoja eli yleisen verkon keskus- ja siirtojärjestelmien avulla rakennetaan yrityksen omaan käyttöön erillinen verkko.

Kaikki nämä ominaisuudet korostuvat, kun isdn:stä kehitetään laajakaistainen isdn eli B-isdn (kts. 6. luku, ATM). Monipalveluverkon myötä nykyisistä päätelaitteista ei tarvitse luopua, vaan ne voidaan liittää isdn-verkkoon pääte- ja verkkosovittimien avulla. Tämä on myös isdn:n leviämisen edellytys. Toisaalta uusien päätelaitteiden, kuten isdn-puhelimien avulla voidaan kehittyvän verkon tuomia uusia mahdollisuuksia hyödyntää tehokkaasti.

Isdn-päätelaitteista keskeisiä ovat digitaalinen puhelin, ryhmän 4 telekopiolaitteet, kuvapuhelin, tietokoneet ja monitoimipäätteet. Ainakin alkuvaiheessa digitaaliset puhelimet käyttävät koodauksessa standardin mukaista PCM:ää. Kun yhteys on kokonaisuudessaan digitaalinen, yhteyden laatu (vaimennus ja häiriöt) on selvästi parempi kuin analogisessa verkossa. Lisäksi isdn-verkon myötä yhteyden kytkentä nopeutuu ja käyttäjälle voidaan tarjota lisätoimintoja kuten koputus ja puhelun siirto. Suunnitteilla on myös kehittyneiden koodausmenetelmien käyttäminen. Esimerkiksi ADPCM-koodauksella, jossa näytteenottotaajuus on 16 kHz, voidaan välittää 7 kHz puhekaista 64 kbit/s kanavassa. Toinen mahdollisuus on pakata nykyinen kaista pienempään bittinopeuteen kuten on tehty esimerkiksi GSM-verkon radioyhteydellä.

Digitaalisen 64 kbit/s yhteyden avulla (ryhmä 4 telekopiolaitteet) voidaan parantaa selvästi telekopioinnin laatua verrattuna nykyisiin ryhmä 3 laitteisiin. Hyvälaatuiseen jälkeen (300 ppi) päästään tällöin noin 10 sekunnin siirtoajalla A4-arkkia kohti. Erityisesti Japanissa (huom. japanilainen kirjoitusjärjestelmä) ollaan kehittämässä uusia telekopiolaitteita.

Kapeakaistainen isdn-verkko parantaa selvästi kuvapuhelimen käyttömahdollisuuksia, koska toista B-kanavaa voidaan käyttää puheensirtoon ja toista kuvansirtoon. Kuva ja ääni voidaan koodata samaankin kanavaan kuten esimerkiksi suomalaisen Vistacomin tuotteessa. Kuvapuhelimien hintojen tulee kuitenkin laskea voimakkaasti, ennenkuin ne yleistyvät tavallisilla käyttäjillä.

Eräs varteenotettava mahdollisuus on käyttää mikrotietokonetta kuvapuhelimen päätte-
nä. Tietokoneen avulla isdn-verkon joustavia yhteyksiä voidaan hyödyntää laajemminkin:
sama palvelu voi käyttää samanaikaisesti puhe-, data- ja kuvayhteyksiä. Luultavammin
kuvapuhelimien ja erityisesti monimuotopalvelujen (multimedia) esilletulo tapahtuu
laajakaistaisen monipalveluverkon kautta (kts 6. luku, ATM). Kapeakaistainen isdn luo
kuitenkin hyvät mahdollisuudet uudentyyppisten palvelujen alkuvaiheen kehitykselle.

6. ATM

6.1 Laajakaistaverkkojen tarve

Laajakaistaisella monipalveluverkolla pyritään luomaan erittäin yleiskäyttöinen televerkko, jota muutaman liitännätyyppin kautta voidaan käyttää monipuolisten palveluiden tarjoamiseen monenlaiselle asiakkaille. Tuettavat palvelut ulottuvat hitaasta kaukokäytöstä ja puhepalveluista nopeaan datasiirtoon ja videokuvaan saakka. Muodollisesti B-isdn:ää kehitetään kapeakaista-isdn:n laajenuksena, joskin tekniikka ja suorituskyky tulevat olemaan täysin eri luokkaa.

Perinteisten puhelinpalveluiden hintajoustavuus vaikuttaa teollisuusmaissa varsin vähäiseltä eli hintojen alentaminen ei juurikaan lisää liikennettä. Mikäli teleoperaattori pyrkii kasvattamaan tulojaan tarvitaan televerkkoon uusia palveluita, kuten monimuoto- palveluita (multimedia) tai video-on-demand (eli elokuvien katselu televerkkoa käyttäen). Tällaiset palvelut vaativat paljon enemmän siirtokapasiteettia kuin puhelinpalvelut: esimerkiksi VHS-laatuiseen videokuvan siirtoon tarvitaan n. 1,5 Mbit/s eli yli 20 puhelin- kanavaa. Toisaalta yhteyden aiheuttama kustannus ei saa olla korkea, koska videoita voi vuokrata 20 markalla. Ja entä jos videokuvan siirto maksaa 5 mk/tunti, niin miten operaattori perustelee nykyiset puhelintariffinsa? Lisäksi palvelun toteuttaminen vaatii uusia päätelaitteita, ja yrityksissä merkittäviä kustannuksia aiheuttava henkilöstön koulutus ja verkon ylläpito. Eli kysymys kuuluu: tarvitaanko laajakaistaverkkoa, ja jos niin mihin?

Laajakaistaverkon tilaajat voidaan jakaa tietoliikennetarpeidensa perusteella kahteen selvästi toisistaan poikkeavaan ryhmään: liiketilaajiin ja yksityistilaajiin. Liiketilaajat ovat erityisesti kiinnostuneita seuraavista palveluista:

- nopea datasiirto keskustietokoneiden ja lähiverkkojen välillä,
- videoneuvottelu ja
- korkealaatuinen kuvapuhelin.

Useimpia näistä palveluista pystytään ainakin jossain muodossa tarjoamaan jo nyt, eivätkä ne välttämättä tarvitse yli 2 Mbit/s siirtonopeuksia. Kun liiketilaajat ovat kiinnostuneita erityisesti vuorovaikutteisista palveluista, haluavat yksityistilaajat lähinnä jakelu- palveluita, korkeatasoista kuvaa ja ääntä, tavallista puhelinpalvelua unohtamatta. Internet-palveluiden kehittyminen voi vaikuttaa myös oleellisesti laajakaistaisten verkkojen tarpeeseen. Taulukossa 6.1 on arvioitu B-isdn-kehitystä palveluiden kannalta.

Taulukko 6.1. B-isdn:n kehitysvaiheet palveluiden kannalta

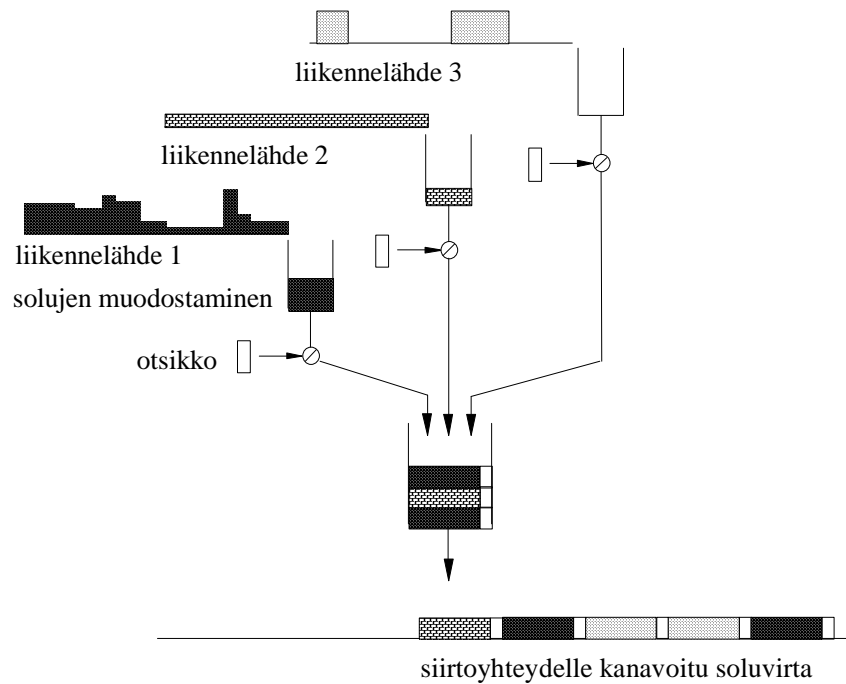
	I	II	III
Palveluiden painotus / lisäys	Dataverkko- palvelut	Vuorovaikutteinen video	Jakelu ja puhelin
Esimerkki palvelusta	Lähiverkkojen yhdistäminen	Kuvapuhelin, videoneuvottelu	TV ja puhelin
Soveltaja	Yritys	Yritys (koti)	Koti
Verkon koko	Kohtuullisen suuri	Suuri	Hyvin suuri
Tavoitekustannukset	Kohtuullisen alhai- set	Alhaiset	Hyvin alhaiset
Tekniset esteet	Teknisten vaati- musten täyttä- minen	Edullisuus / tekninen toteutus	Riittävän halpa toteutus

6.2. Asynkroninen toimintamuoto

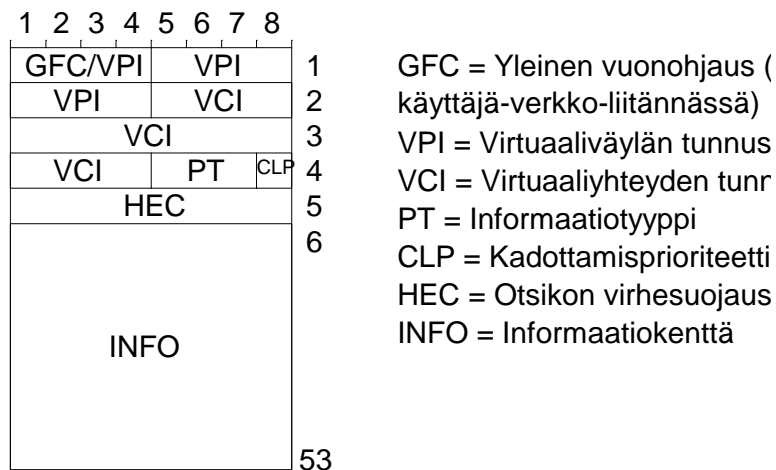
Perusominaisuudet

Edellä mainitut palvelut ovat pääosin jo nykyisin käytössä. Sen paremmin käyttäjät kuin palvelujen tarjoajatkaan eivät osaa ennustaa tulevaisuudessa tarjottavia ja haluttavia palveluita. Tämän vuoksi laajakaistaverkon kehittämisessä on lähdetty siitä, että verkon tulee olla riittävän joustava mukautuakseen muuttuviin tarpeisiin. Tämä tarve katsotaan voitavan täyttää parhaiten asynkronisella toimintamuodolla (Asynchronous Transfer Mode, ATM).

ATM:ssä on pyritty yhdistämään piiri- ja pakettikytkennän parhaimmat puolet: piirikytkennän yksinkertaisuus ja pakettikytkennän joustavuus. ATM:ssä päätelaitteen tuottama informaatiovirta jaetaan vakiomittaisiin paketteihin, joita kutsutaan soluiksi (kuva 6.1). Solu koostuu käyttäjän informaatiokentästä ja otsikosta (kuva 6.2).



Kuva 6.1 Atm:n toimintaperiaate.



Kuva 6.2. ATM-solun rakenne.

ATM-verkon toiminnan pääperiaatteena on se, että kaikkia soluja käsitellään samanarvoisesti verkon sisällä; tosin tästä periaatteesta on jouduttu jossain määrin tinkimään, koska eri palveluiden asettamat vaatimukset ovat hyvin erilaisia. Solun kooksi on sovittu 5 tavun otsikko ja 48 tavun informaatiokenttä. Otsikon perustehtävä on määrittellä solun virtuaalikanava (VCI) tai virtuaaliväylä (VPI). Virtuaalikanavan tunnus liittyy yhteen yhteyteen ja se on yhteysvälikohtainen, eli se ei ole vastaanottopään fyysinen osoite. Virtuaaliväylän avulla voidaan ryhmä virtuaalikanavia kytkeä yhtenäisesti ATM-keskuksen läpi.

PT-kentän 3 bittiä on varattu hyötykuorman tyyppin ilmaisemiseen. Näiden bittien avulla voidaan mm. ilmoittaa, sisältääkö solun informaatiokenttä käyttäjälle vai verkolle tarkoitettua tietoa. CLP-bitin avulla voidaan solut jakaa kahteen prioriteettitasoon, joita tarvitaan silloin kun solmu ei pysty välittämään kaikkia soluja eteenpäin eikä puskuroimaan niitä. Tällaisessa tilanteessa on hyödyllistä tietää mitkä solut ovat tärkeitä ja mitkä vähemmän tärkeitä. Otsikko sisältää lisäksi yhden tavun kokoisen HEC-kentän,

jolla voidaan tarkastaa otsikkokentän oikeellisuus ja korjata yhden bitin virheet, sensijaan informaatiokenttää ei tarkasteta. HEC-kenttää käytetään myös solun alkukohdan löytämiseen.

Yhteyttä muodostettaessa pyritään löytämään sellainen reitti verkon läpi, että virtuaalisen kanavan tuottama liikenne mahtuu jokaiselle käytettävälle yhteysvälille, vieläpä niin että vaadittu palvelun taso voidaan taata sekä kaikille olemassa oleville yhteyksille että uudelle yhteydelle. Jos virtuaalikanava voidaan muodostaa, se määritellään keskusten muisteissa siten, että virtuaalikanavalla on tietty numero jokaisella yhteysvälillä. Eli kun solu saapuu verkon solmupisteeseen, keskus tarkistaa virtuaalikanavan numeron. Jos numero löytyy, haetaan muistista tieto mihin solu reititetään (eli valitaan oikea väylä keskuksesta ulospäin), lisäksi muutetaan virtuaalikanavan numero vastaamaan seuraavaa yhteysväliä. Yhden yhteyden kaikki solut reititetään täsmälleen samoja väyliä pitkin. Tällä tavoin voidaan taata, että solut saapuvat perille samassa järjestyksessä kuin ne on lähetetty.

ATM-verkon suorituskyky on pyritty maksimoimaan jättämällä pois varsinaisen informaatiovirran virheentarkastus ja vuonohjaus. Tällöin otsikon käsittely ja datan käsittely eli ohjaus ja kytkentä voidaan erottaa toisistaan. Ohjaustoiminnot kohdistuvat vain tulevien solujen otsikoihin, jolloin nopeusvaatimukset ovat lievemmat kuin kokonaisten solujen käsittelyssä.

Edut

ATM:n keskeisiä ominaisuuksia ovat:

- joustavuus eli ei tarvita ennalta määrättyä siirtonopeutta palveluja suunniteltaessa ja yhteyttä muodostettaessa. Lisäksi siirtonopeus voi vaihdella yhteyden aikana niissä rajoissa mitkä yhteyttä muodostettaessa on sovittu.
- laajakaistaisuus eli voidaan käyttää yli 100 Mbit/s siirtonopeutta tilaajaliitäntään asti.
- integrointi eli mahdollisuus toteuttaa saman liitännän ja samojen verkkoelementtien kautta yhtä aikaa hyvin erilaisia yhteyksiä eri paikkoihin.
- maantieteellinen kattavuus, sillä atm soveltuu sekä lähiverkkoihin että koko maapallon kattavien verkkojen rakentamiseen.

ATM-verkkoa voi käyttää hyvinkin erilaiset palvelut hitaasta datasiirrosta laajakaistaisen videokuvan siirtoon ilman, että siirtonopeuksia tarvitsee ennalta kiinteästi määritellä. Lisäksi on mahdollista välittää jakelupalveluita kuten TV-ohjelmia. Jokaiselle uudelle palvelulle ei siten tarvitse määritellä tiettyä siirtonopeutta, rakentaa uusia päätelaitteita ja pahimmassa tapauksessa rakentaa kokonaan uutta verkkoa.

ATM:n periaate antaa mahdollisuuden käyttää verkkoa tehokkaasti hyödyksi. Kuormitushyöty voidaan jakaa neljään osaan:

- tietty yhteys varaa vain tarvitsemansa kapasiteetin,
- suuremmat liikennevirrat mahdollistavat suuremman kuormituksen,
- liikennevirtojen ryöppyjä voidaan tasoittaa ja
- eri palvelujen kuormitushuiput osuvat eri ajankohtiin.

Päätelaite voi tuottaa soluja resurssiensa ja tarpeensa mukaisesti vaihtelevalla nopeudella ja kukin palvelu voi siten käyttää täsmälleen tarvitsemansa siirtonopeuden. Tällöin ei synny sitä synkroniselle siirtomuodolle tyypillistä ongelmaa, että käytössä olevasta siirtokapasiteetista jää osa käyttämättä, koska verkko ei tarjoa juuri sopivaa siirtonopeutta.

Yhdistämällä suuri joukko (toisistaan riippumattomia) liikennevirtoja yhteen voidaan taata sama palvelun taso suuremmalla kuormituksella (ilmiö on sama kuin Erlangin kaavan tapauksessa, kuva 2.13). Saatava hyöty riippuu oleellisesti liikenteen ominaisuuksista, eikä sen hyödyntäminen käytännössä ole aina mahdollista. Erilaisten palvelujen integroinnista saatava hyöty on merkittävä, mikäli eri palvelujen liikennehuiput osuvat eri aikoihin. Esimerkiksi jos datasiirto tapahtuu pääosin päivisin ja TV-kuvan siirto iltaisin, saadaan palvelujen integroinnista merkittävä kustannushyöty.

Heikkoudet

ATM:n ongelmat johtuvat lähinnä siitä, että sen avulla pyritään välittämään hyvin erityyppisiä palveluja, joiden ominaisuudet ja joiden asettamat vaatimukset poikkeavat huomattavasti toisistaan: puheen välittäminen ATM-verkossa edellyttää lyhyttä viivettä, kuvansiirto suurta siirtonopeutta ja datasiirto pientä virhesuhdetta. Tällöin joudutaan väistämättä tekemään kompromisseja.

Vaikka ATM-verkossa voidaan välittää nopeita, synkronisia signaaleja, ATM-verkko ei tuo tällaisella liikenteellä mitään varsinaista etua piirikytkentäiseen verkkoon verrattuna. Itse asiassa paketointi aiheuttaa synkroniselle liikenteelle merkittäviä ongelmia:

- paketoinnista johtuva viive,
- viiveen vaihtelu eri solujen välillä,
- puskureiden ylivuodosta johtuva solujen menettäminen ja
- otsikot varaavat osan siirtokapasiteetista.

Erityisen ongelmalliseksi tilanteen tekee se, että ATM-liikenteen ominaisuuksia ei tunneta, jolloin ei voida tarkasti ennustaa kuinka suuria viiveitä ja puskureiden ylivuotoja verkossa saattaa syntyä.

Solujen kytkentä ja puskurointi vaativat erittäin nopeita reaaliaikaisia toimenpiteitä, jotka saattavat muodostaa pullonkaulan. On arvioitu, että nykyteknologialla piirikytkentäisesti voidaan kytkeä suurempia siirtonopeuksia kuin ATM-tekniikalla ja ero säilyy jatkossakin. Eli jos tarvitaan vain yhtä palvelua kuten puhelinta, ei joustavuudesta ja suuresta siirtonopeudesta ole hyötyä. Veloitus saattaa aiheuttaa myös merkittäviä vaikeuksia.

ATM-tarjonta ja toteuttaminen

ATM-tekniikka on tällä hetkellä (1996) käyttöönottovaiheessa, ainakin kehittyneimmissä maissa, joita ovat USA ja Suomi. Sekä Tele että paikalliset puhelinyritykset ovat tarjonneet jo vuodesta 1995 lähtien atm-palveluita n. 10 paikkakunnalla; hinnoissa ja palvelun kattavuudessa ei ole oleellisia eroja. Esimerkkinä mainittakoon, että 1995 Tele käynnisti atm-tekniikkaan perustuvan tietoliikennepalvelun pääkaupunkiseudulle. Uusi palvelu kattaa noin 80 prosenttia suur-Helsingin yrityksistä. Kymmenen atm-solmun varaan rakentuvan verkon peruspalveluun sisältyy 155 megabittia sekunnissa siirtävät yhteyden kolmen kilometrin säteellä yrityksen toimipaikasta ja siitä eteenpäin 24 Mbps:n yhteydet 10 kilometrin säteellä ja 10 Mbps:n yhteydet 15 kilometrin säteellä. Lisäksi asiakas saa yhteyden tiedonsiirtopalveluun ja atm-liikennekelpoisen liityntälaitteen omiin

tiloihinsa. Yhden toimipisteen liittäminen kaupunkiverkkoon maksaa 250000 markkaa vuodessa.

ATM-välitystekniikkaa on sovellettu ensimmäiseksi ATM-ristikytentälaitteissa, joissa kytketään puolikiinteitä virtuaalisia väyliä. Väylöityksen muutokset voivat tällöin tapahtua verkonvalvonnan avulla. Seuraavassa vaiheessa kytketään virtuaalisia kanavia, jolloin kyseessä varsinainen ATM-keskus. Tähän vaiheeseen päästään viimeistään ensi vuoden aikana. Verkon signaloinnille asetetaan tällöin huomattavasti suuremmat vaatimukset kuin ristikytentälaitteiden tapauksessa. Seuraavassa tarkastellaan lähinnä ATM-keskuksia.

B-isdn-verkon keskuksen rakentaminen on erittäin vaativa tehtävä, ja siihen on mahdollisuuksia vain merkittävillä laitevalmistajilla. Keskukselle asetettavia vaatimuksia ovat mm.:

- Bittinopeus on alkuvaiheessa vähintään 155 Mbit/s ja melko pian myös 622 Mbit/s.
- Hyvin suuret johtojen määrät oltava mahdollisia, alkuvaiheessa satoja ja verkon laajetessa tuhansia eli keskuksen laajennettavuuden tulee olla hyvä.
- Palvelun tason tulee olla riittävä myös suurella kuormituksella ja ylikuormitustilanteiden todennäköisyys tulee olla erittäin pieni.
- Jakeluliikenteen mahdollisuus tulee ottaa huomioon.
- Käytettävyys- ja luotettavuusvaatimukset ovat erittäin korkeat.

6.3 ATM-verkon liikenne

Tilastollinen kanavoituminen on eräs näkökohta, jota käytetään perustelemaan ATM:n edullisuutta piirikytentäisiin verkkoihin verrattuna. Kun yhdistetään suuri joukko liikennevirtoja, ei yhdistetty liikennevirta tarvitse yhtä paljon kapasiteettia kuin liikennevirrat erikseen; sama ilmiö pätee myös piirikytentäisissä verkoissa, mutta B-isdn:ssä integrointi on laajempaa, jolloin saatava hyötykin on, toivon mukaan, suurempi.

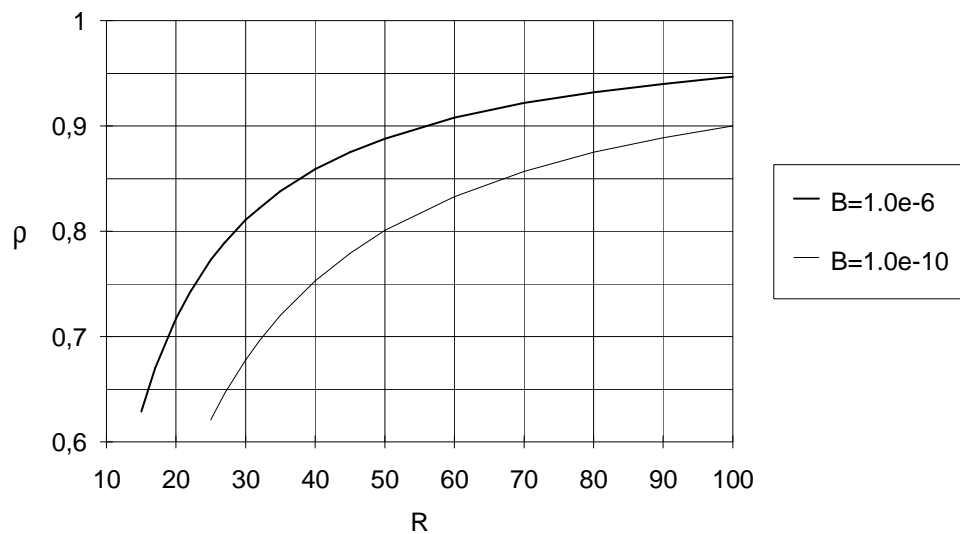
Hyvin keskeinen kysymys on siten miten erilaiset palvelut ja liikennelähteet vaativat verkolta välitys-, siirto- ja puskurointikapasiteettia. Seuraava tarkastelu perustuu mahdollisimman pelkistettyyn tilanteeseen: toisella puolella on erityyppiset ATM-soluja tuottavat liikennelähteet, toisella puolella yksi ATM-väylä ja näiden välissä kanavointilaitte, jonka oleellinen osa on FIFO-periaatteella toimiva puskuri.

Liikenteen mallit

Erityyppisillä liikennelähteillä (puhelin, video, lähiverkko jne.) on erilaisia ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan rakentaa erilaisia liikennemalleja. Yksinkertaisimmillaan voidaan olettaa, että kaikki solut saapuvat satunnaisina hetkinä toisistaan ja aikaisemmista tapahtumista riippumatta (eli kyseessä on sama muistamattomuusominaisuus, jota käytettiin liikenneteoreettisessa osuudessa). Tämä oletus pätee varsin hyvin, mikäli käytettävän ATM-väylän nopeus on huomattavasti suurempi kuin yhden liikennelähteen (virtuaalisen kanavan) tarvitsema siirtonopeus. Esimerkiksi puhelinliikenteellä tarvittava nopeus on 64 kbit/s ja jos siirtokapasiteetti on 150 Mbit/s, on solujen muodostama liikenne tässä suhteessa varsin satunnaista. Tällöin liikenteen kuvaamiseen tarvitaan ainoastaan yksi parametri:

$\rho =$ kuormitus eli yhdessä aikavälissä kanavointilaitteen puskuriin tulevien solujen määrän odotusarvo

Kanavointilaitteen puskuriin tulee tällöin yhdessä aikavälissä soluja Poisson-jakauman mukaisesti ja jokaisessa aikavälissä lähtee täsmälleen yksi solu eteenpäin ellei puskuri ole tyhjä. Kuvasta 6.3 nähdään sallittu kuormitus satunnaisella liikenteellä puskurikapasiteetin ja solujen estymistodennäköisyyden funktiona. Havaitaan, että kuormitus voidaan nostaa noin 0,9:ään, kun puskurin koko (R) on 100. Suuremmalla puskurilla kuormitusta voidaan nostaa, mutta samalla kasvaa puskuroinnista johtuva viive. Yleensä 100:n solun kokoista puskuria pidetään kytkentäkentän tai kanavointilaitteen toteutuksen kannalta realistisena, jos liikenne ei ole kovin voimakkaasti vaihtelevaa.



Kuva 6.3. Sallittu kuormitus satunnaisella liikenteellä puskurikapasiteetin funktiona, $B =$ solujen menetystodennäköisyys, $R =$ puskurin koko soluina.

Monilla ATM-verkon palveluilla liikenne ei kuitenkaan ole tasaista vaan se muodostuu ryöpyistä ja niiden välisistä tauoista tai hiljaisemmista jaksoista. Tyypillinen ryöpykäs liikenne on muuttuvanopeuksinen videokuva, joka koodataan siten, että ainoastaan kuvan muutokset siirretään, jolloin tarvittava siirtokaista saattaa vaihdella huomattavasti. Tällainen liikenne asettaa laajakaistaverkolle ja erityisesti sen puskuroinnille erilaisia vaatimuksia kuin tasainen liikennevirta.

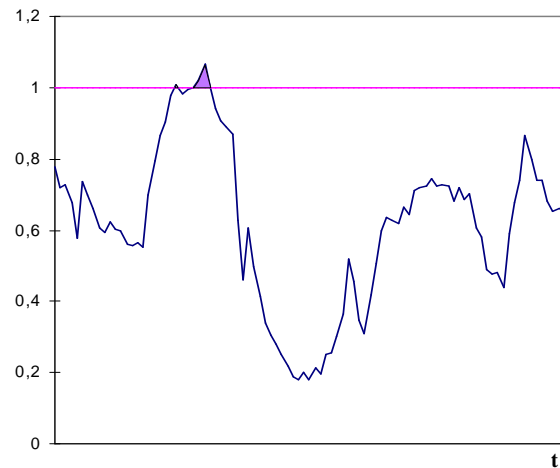
Otetaan yksinkertaisin mahdollinen malli, jossa yhteys on osan ajasta päällä (α), jolloin se tarvitsee tietyn osuuden väylän kapasiteetista (ρ_1). Kun liikennelähteitä on N kappaletta, väylän keskimääräinen kuormitus on:

$$\rho = N\alpha\rho_1$$

Kanavointilaitetta mitoitettaessa halutaan tietää kuinka suuri liikennekuormitus (ρ) sallitaan, kun puskurin täyttymisestä johtuva solujen menettämisen todennäköisyys (B) on annettu.

Jos ryöpykstä liikennettä välitetään piirikytkentäisessä verkossa, on jokaiselle yhteydelle varattava kapasiteettia vähintään huippunopeuden, sensijaan ATM-verkossa liikennelähteitä voidaan, tapauksesta riippuen, hyväksyä huomattavastikin tätä enemmän. Tämä perustuu siihen, että todennäköisyys, että kaikilla liikennelähteillä sattuisi samanaikaisesti ryöppy, on hyvin pieni, jos liikennelähteitä on riittävän paljon. Koska ATM-verkossa käytettävä puskurointikapasiteetti ei yleensä riitä pitkien ryöppyjen

puskurointiin, menetetään osa liikenteestä, silloin kun kuormitus nousee yli väylän siirtokyvyn.



Kuva 6.4. Solujen menetys atm-verkossa, kun puskurit ovat pieniä; linkin kapasiteetin (=1) ylittävät solut menetetään

Kun liikennelähteen nopeus on riittävän suuri, solujen menetytodennäköisyys määräytyy pääasiassa sen mukaan, kuinka todennäköistä on, että yhtäaikaiset ryöpyt nostavat hetkellisen kuormituksen yli väylän kapasiteetin. Tämä todennäköisyys voidaan laskea kohtuullisen helposti, kun tunnetaan liikennelähteiden kuormituksen jakauma (tähän ei tarvita jonoteoreettisia laskelmia, jotka ovat yleensä sangen vaikeita). Tarkastelemasamme tapauksessa saadaan todennäköisyys, että päällä on yhtäaikaa K ryöppyä, binomijakauman avulla:

$$P[K] = \binom{N}{K} \alpha^K (1 - \alpha)^{N-K}$$

Estyvien solujen määrä aikayksikössä on tällöin:

$$B[K] = \begin{cases} \rho_1 K - 1 & K > 1/\rho_1 \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases}$$

Soluja menetetään siten aikayksikössä:

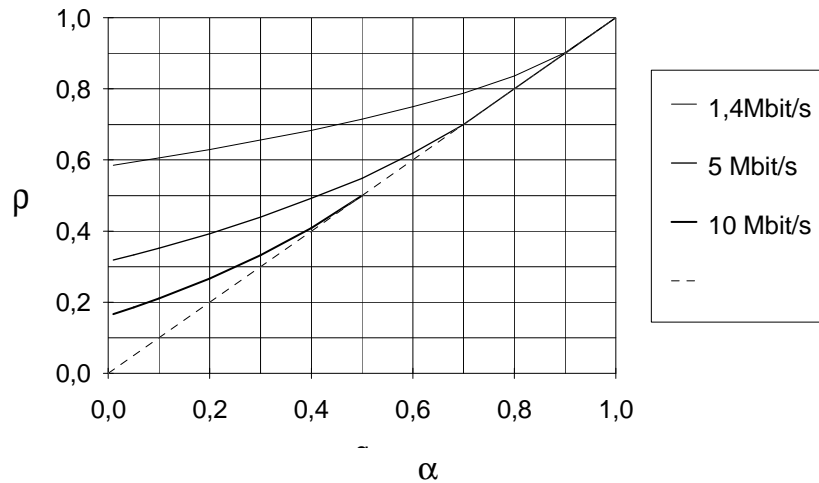
$$\rho_{loss} = \sum_{\rho_1 K > 1} P[K] B[K]$$

Vastaavasti puskuriiin tulee soluja aikayksikössä ρ kappaletta, joten menetettyjen solujen osuus (P_{loss}) on:

$$P_{loss} = \frac{\sum_{\rho_1 K > 1} P[K] B[K]}{\rho}$$

Kuvassa 6.4 on tarkasteltu parametrin α vaikutusta sallittuun kuormitukseen, kun liikennelähteen nopeus ryöpyyn aikana on 1.4, 5 ja 10 Mbit/s ja väylän tarjoama kapasiteetti 140 Mbit/s (vastaavat ρ_1 :n arvot ovat 1/100, 1/28 ja 1/14). Kuvassa katkoviivalla esitetty suora kuvaa tilannetta, jossa väylän kapasiteettia varataan huippunopeuden mukaan, jolloin kuormituksen vaihteluita ei voida hyödyntää.

Kun ryöppy on päällä puolet ajasta, saatava "tilastollinen hyöty" on noin 40 % nopeudella 1,4 Mbit/s, sensijaan 5 Mbit/s nopeudella saatava hyöty on varsin vähäinen ja kun nopeus on 10 Mbit/s, tilastollista kanavoitumista ei voida hyödyntää ollenkaan. Pienillä α :n arvoilla tilastollinen hyöty on suurempi, vaikka samalla keskimääräinen kuormitustaso laskee. 10 Mbit/s nopeudella merkittävää tilastollista hyötyä saadaan vain, jos ryöppy on päällä alle 20% ajasta.



Kuva 6.4. Sallittu kuormitus ryöpyn päälläolotodennäköisyyden funktiona, kun nopeus ryöpyn aikana on 1.4, 5 ja 10 Mbit/s.

7. LÄHIVERKOISTA

7.1 Ethernet (IEEE 802.3)

Kehitys

Lähiverkkojen historian voidaan katsoa alkavan Hawaijilla 70-luvun alkupuolella radioyhteyksiin perustuneessa Aloha-verkossa. Aloha-verkossa lähetys tapahtui keskusasemalta alaspäin solmuille yhdellä taajuudella ja ylöspäin suunnatulla liikenteellä oli oma taajuuskaistansa, jonka ohjauksessa kokeiltiin erilaisia menetelmiä. Eräs näistä oli CSMA (Carrier Sense Multiple Access). CSMA-periaatteen kannalta Aloha on merkittävä, koska se osoittautui toimivaksi ja käytännön laitteisiin soveltuvaksi ratkaisuksi.

Seuraava vaihe oli CSMA-periaatteen soveltaminen koaksiaalikaapeli verkkoon. Ensimmäisen prototyypin rakensi Xerox vuonna 1975. Koeverkossa käytettiin 3 Mbit/s siirtonopeutta ja uutena ominaisuutena käytettiin törmäysten havaitsemista (CD, Collision Detection). Koeverkon avulla tehtiin runsaasti lähiverkon suorituskykyä koskeneita mittauksia, joilla voitiin osoittaa CSMA/CD-periaatteen rajat ja ennenkaikkea sen mahdollisuudet yksinkertaisena ja toteutettavana menettelynä. Vuonna 1980 julkistivat Digital, Intel ja Xerox DIX-määrittelyksen, josta tuli ensimmäinen kattava lähiverkkostandardi, Ethernet. Se sisältää kaapelin rakenteen, signaloinnin ja siirtotien ohjauksen.

Perusominaisuudet

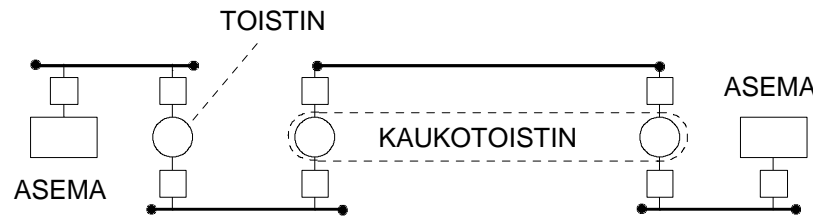
Ethernetin keskeinen ominaisuus on yksinkertaisuus. Kehystyyppinä on ainoastaan yksi, lisäksi protokollaan kuuluu ajastin ja apumuuttujia. Näistä koottava protokolla on varsin yksinkertainen mutta kuitenkin tehokas. Yksinkertaisuuden ansiosta protokolla pystyttiin integroimaan nopeasti mikropiirille (1982).

Ethernetin ohjausperiaate takaa kaikille asemille tasa-arvoisen aseman. Jos liikenne on kevyttä, kukin asema saa lähetyksensä nopeasti ja jos liikenne on raskasta kukin asema saa lähetyksensä keskimäärin saman, mahdollisesti varsin pitkän, ajan kuluttua. Ylikuormitustilanteessa, jotkut (satunnaisesti valikoituvat) asemat saavat lähetyksensä läpi ja muut epäonnistuvat.

DIX-määrittely sisältää ainoastaan yhteydettömän palvelun, yhteyspohjaiset palvelut voidaan toteuttaa ylemmillä protokollatasoilla. Prioriteettien käyttö Ethernetissä on vaikeaa (joskaan ei mahdotonta), koska verkon hallintamenettely on luonteeltaan satunnainen. Millekään sanomalla ei voida siten taata 100 % varmuutta lähetyksen onnistumisesta.

IEEE 802.3 standardi määrittelee fyysisen kerroksen ominaisuuksiksi: siirtonopeus 10 Mbit/s, manchester II koodaus, 50 Ω koaksiaalikaapeli, pituus korkeintaan 2,5 km ja asemia korkeintaan 1024. Fyysinen kerros huolehtii signaloinnista ja ajoituksesta. Kuvassa 7.1 on esitetty verkon perusrakenne. Kuhunkin segmenttiin (toistimien välinen

osuus) mahtuu 100 liityntärasiaa. Liityntärasiat liitetään kaapelin päästä lukien 2,5 m (tai sen kerrannaisten) välein. Segmentin pituus voi olla korkeintaan 500 m. Kaapelointi voidaan ulottaa 2,5 km saakka toistimien avulla. Asemien välillä saa olla korkeintaan kaksi toistinta; yksi kaukotoistinpari vastaa yhtä toistinta.



Kuva 7.1. Ethernetin rakenne.

Toimintaperiaate

Ethernetin kilpailuväylän hallinta perustuu kahteen toimintaan: törmäysten havaitseminen (Collision Detection) ja uudelleenlähetys. Törmäysten havaitseminen perustuu riittävän pitkään minimikehykseen ja rajoitettuun verkon pituuteen. Jos kehys olisi liian lyhyt, lähettäjä ehtisi lopettamaan lähettämisen ennen törmäystä. Lähettäjä olisi tällöin tyytyväinen, vaikka kehys törmäyksen takia menisikin pilalle. Kun kehys on riittävän pitkä ja verkko rajoitettu, havaitaan törmäys varmasti kehyksen aikana.

Tarkastellaan tilannetta, jossa asema A on verkon toisessa ääripäässä ja asema B verkon toisessa ääripäässä ja verkossa voi olla välillä toistimia. Ensimmäisessä vaiheessa asemalle A ilmestyy lähetettävä sanoma. Asema A kuulostelee väylää (Carrier Sense) ja saa välittömästi lähetysoikeuden, koska se ei havaitse muuta liikennettä.

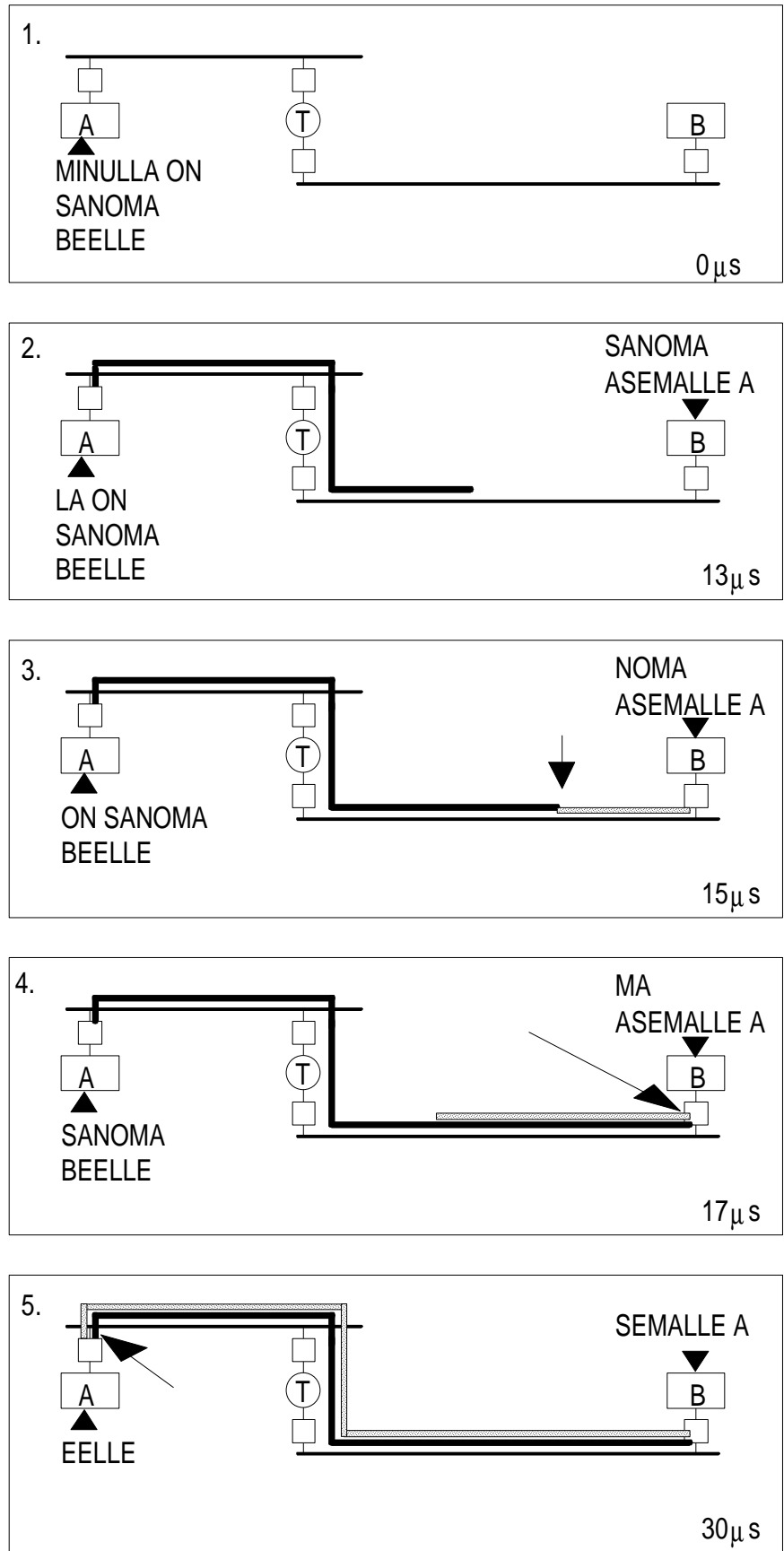
Vaiheessa 2 asema on lähettänyt 13 μ s, mutta sanoma alku ei ole vielä ehtinyt asemalle B. Samalla asemalle B on ilmestynyt lähetettävä sanoma. Asema B kuulostelee väylää kohdaltaan ja koska juuri sillä hetkellä ei kuulu mitään se aloittaa lähetyksen.

Vaiheessa 3, jolloin aikaa on kulunut 15 μ s, lähetykset törmäyvät toisiinsa, mutta tässä vaiheessa törmäystä ei vielä havaita, joten kumpikin asema jatkaa lähettämistä.

Vaiheessa 4 (17 μ s) asema B havaitsee signaalin vialliseksi ja lähettää lyhyen havaitusta törmäyksestä ilmoittavan sanoman (4-tavuinen satunnaisluku), jotta myös muut asemat havaitsevat varmudella törmäyksen. Tämän jälkeen asema jää odottamaan uusintaa.

Vaiheessa 5 aseman B lähettämä sanoma ehtii asemalle A. Aikaa on kulunut esimerkin tapauksessa 30 μ s (pahimmassa tapauksessa viive voi olla 45 μ s). Asemalla A on kuitenkin tällöin vielä lähetyksen menossa, koska kehyksen minimipituus on 51,2 μ s. Asema A havaitsee törmäyksen ja lähettää törmäyksen varmistavan sanoman. Tämän jälkeen myös asema A jää miettimään uusintayritystä.

Törmäysten jälkeen pitää harkita uudelleenlähetys hetki tapahtuneiden törmäysten perusteella. Jos kaikki yrittäisivät välittömästi (tai kaikkien asemien odotusaika olisi sama), seuraisi välttämättä uusi törmäys, joten asemien täytyy odottaa vaihteleva aika ennen uutta yritystä.



Kuva 7.2 Ethernetin toimintaperiaate.

Ethernetissä uudelleenlähetystä yritetään uudelleen, kun on kulunut aika:

$$t_w = \text{vakioviive} + 51,2 \mu\text{s} * \text{random}[0 .. 2^{\min(\text{yrityskerta}, 10)} - 1]$$

Eli jos asema on yrittänyt 3 kertaa epäonnistuen joka kerralla, se arpoo satunnaisluvun väliltä [0 .. 7], kertoo näin saadun luvun 51,2 μ s:lla ja lisää vakioviiveen. Tämän ajan jälkeen asema yrittää uudelleen, ja jos jälleen tulee törmäys, lisätään yrityslaskuria yhdellä. Jos yrityslaskuri saavuttaa arvon 16, päätellään verkon olevan tukossa.

Jos lähetys onnistuu, yrityslaskuri nollataan. Koska yrityslaskuri nollataan onnistuneen yrityksen jälkeen, on onnistunut asema paremmassa tilanteessa kuin muut asemat. Asemien väliset erot tasoittuvat kuitenkin varsin nopeasti.

Kuvattua järjestelmää on ehdotettu parannettavaksi monin tavoin. Ethernetin periaate on kuitenkin osoittautunut niin toimivaksi, että muutoksien ei ole katsottu olevan aiheellisia niin pitkään, kun siirtokapasiteetti (10 Mbit/s) ja verkon koko (2,5 km) on riittänyt. Sensijaan jos siirtonopeutta halutaan kasvattaa esimerkiksi nopeuteen 100 Mbit/s tulee vastaavasti verkon kokoa pienentää kymmenenteen osaan (tällaisia verkkoja on tulossa markkinoille lähiaikoina).

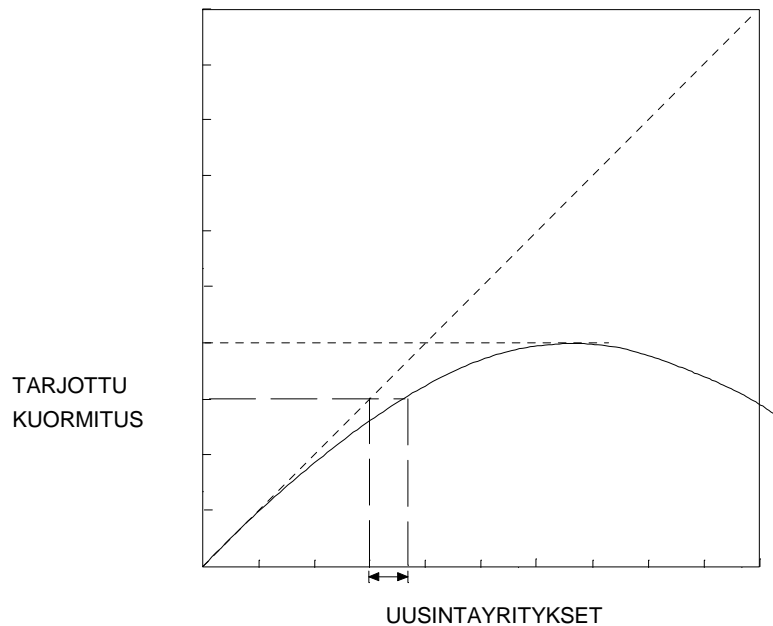
Kilpavarausmenettelyn tehokkuus

Kilpavarausmenettelystä seuraa myös se, että verkon läpäisevällä liikenteellä (välitetyllä liikenteellä) on tietty maksimiarvo, joka Ethernetin tapauksessa on noin 0,4 kertaa siirtonopeus eli noin 4 Mbit/s, jos lähetystä yrittää useita asemia yhtä aikaa. Kuvassa 7.3 on läpimenevien kehysten määrä tarjottujen kehysten määrän funktiona. Jos haluttu kuormitus on tietyn rajan alapuolella, uusintayritysten avulla yhteensä tarjottavien kehysten määrä pyrkii nousemaan niin korkealle, että läpi menevien kehysten määrä nousee halutuksi eli kaikki kehukset saadaan menemään läpi ennemmin tai myöhemmin.

Sensijaan jos tarjottu kuormitus nousee rajan yli, alkaa läpimenevän liikenteen osuus laskea uusintayritysten kasvamisen myötä. Uusintayritysten määrä kasvaa siten jatkuvasti ja verkko menee lopulta täysin tukkoon. Tämän vuoksi yrityslaskurilla täytyy olla jokin maksimiarvo, jonka jälkeen asema luopuu yrittämästä.

Käytännössä Ethernetin tapauksessa keskimääräinen kuormitus voi olla noin 2,5 Mbit/s, jotta viiveet pysyisivät kohtuullisina ja ylikuormitustilanteen todennäköisyys riittävän pienenä. Suurempi kuormitus on mahdollinen, jos tiedonsiirto tapahtuu kahden aseman välillä ja kaikki muut asemat ovat hiljaa.

Ethernetin kapasiteetti riittää hyvin, jos pääasiallinen kuormitus muodostuu esimerkiksi mikrotietokoneiden käytöstä päätteenä tai mikron ja levypalvelimen välisestä liikenteestä eikä verkossa siirretä jatkuvasti suuria tiedostoja. Sensijaan jos tiedonsiirto sisältää paljon tarkkoja grafiikkaa tai hyvin suuria tiedostoja, verkko saattaa ajoittain mennä tukkoon.



Kuva 7.3 Ethernetin kuormitusfunktio.

7.2 FDDI

FDDI:n perusominaisuudet

FDDI (Fiber Distributed Data Interface) on USA:ssa kehitetty valtuudenvälitysrenkaaseen (Token-ring) pohjautuva verkkoratkaisu. Alunperin tavoitteena oli saada suurten ATK-järjestelmien nopeille oheislaitteille liitännästandardi. FDDI:n käyttötarkoitus laajeni kuitenkin huomattavasti laajemman alueen verkoksi (FDDI:tä on kutsuttu myös alueverkoksi, tässä esityksessä se luokitellaan kehittyneeksi lähiverkoksi).

FDDI perustuu nimensä mukaisesti optiseen siirtoyhteyteen, joskin FDDI:tä ollaan soveltamassa myös parikaapeliyhteyksille (CDDI), jolloin siirtoetäisyydet jäävät huomattavasti valokaapelia lyhyemmiksi. Väylällä käytettävä nopeus on 100 Mbit/s ja kytkentäpisteitä voi olla enimmillään 1000. Solmupisteiden väli saa olla enintään 2 km ja renkaan kokonaispituus 200 km. Mainitut arvot ovat suunnitteluarvoja, jolle verkon virhetilanteista toipumista valvovat laskurit ja yhteyskäytäntö on optimoitu.

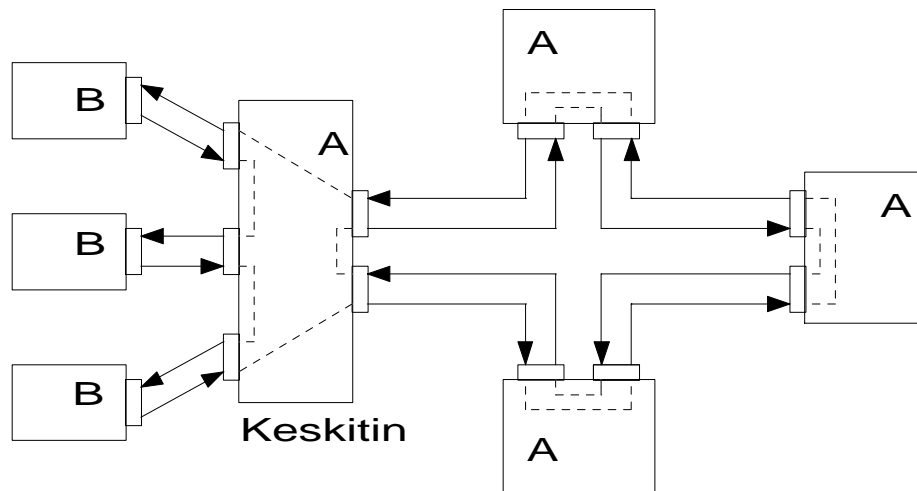
FDDI-verkon rakenne

FDDI:n liittymät kytketään sarjaan renkaan kanssa. Lähinnä varmistussyistä käytetään kahta rinnakkaista kaapelia, jolloin toisen kaapelin rikkouduttua voidaan rengas muodostaa uudelleen varakaapelin avulla. Varalla olevassa kaapelissa ei tavallisesti ole liikennettä, mutta varayhteyden käyttö on mahdollista, jolloin kapasiteetti voidaan nostaa nopeuteen 200 Mbit/s. Standardissa määritellään kaksi asematyyppiä:

- A-luokan asemissa on kaksi fyysistä liitännää renkaaseen
- B-luokan asemilla on yksi fyysinen liitäntä ja ne ovat yhteydessä kaksoisrenkaaseen keskittimien avulla.

Kuvassa 7.4 on esitetty FDDI-verkko, joka muodostuu A ja B -luokan asemista. Keskitin on erikoistapaus A luokan asemasta. Sillä on kaksi liitännää kaksoisrenkaaseen ja yksi lii-

täntä toisiorenkaaseen B luokan asemaa varten. Työasemat ja mikrotietokoneet ovat tavallisesti B luokan asemia, koska niitä voidaan siirtää paikasta toiseen. Keskitin vähentää uudelleensijoitusten vaikutusta verkkoon. Levypalvelijat ja muut kriittiset asemat ovat yleensä A luokan asemia eli ne liitetään päärenkaaseen.



Kuva 7.4. FDDI:n rakenne (sisempi rengas on varalla).

Siirtotie ja koodaus

Standardissa on määritelty siirtotieksi asteittaistaitekerroininen monimuotokuitu. Tavoitteena on ollut mahdollisimman edullinen ratkaisu, jolloin ominaisuuksiltaan parempaa yksimuotokuitua ei ole katsottu tarpeelliseksi, koska tällöin tarvittaisiin kaltevia lähetin-, vastaanotin- ja liitinkomponentteja.

FDDI:ssä käytetään johtokoodia 4B5B, jossa kukin neljän siirrettävän informaatiobitin ryhmä koodataan viidellä bitillä. Fyysisellä tasolla käytetään siten 125 Mbit/s nopeutta. Aseman ajastusinformaatio saadaan vastaanotetusta bittivirrasta. Kohinan ja viivevääristymien vuoksi signaalissa esiintyy värinää, jonka suuruus rajoittaa asemien lukumäärää renkaassa.

Siirtotien ohjaus

Liikennöinti FDDI:ssä perustuu renkaassa kiertävään valtuuteen. Aseman on pysäytettävä valtuuspaketti ennenkuin se saa lähettää sanomansa, jonka koko suurimmillaan voi olla 4500 tavua (paketin koko voi siis vaihdella tarpeen mukaan). Havaittuaan valtuuspaketin asema ottaa tämän vastaan ja alkaa lähettää omaa informaatiota sisältävää pakettiaan. Asema jatkaa lähetystään, kunnes sillä ei ole enää lähetettävää tai kunnes valtuuden sallittu pitoaika päättyy.

Muut asemat renkaassa kopioivat datapakettit. Asemat voivat muuttaa paketin tilatietoja havaitessaan virheitä, tunnistaessaan oman osoitteensa vastaanottajan osoitteena tai kopioidessaan paketin itselleen. Näin lähettäjä saa tietoonsa miten lähetysyritys on onnistunut.

Paketin lähettäjä on velvollinen poistamaan paketti sen saavuttua kierroksen tehtyään takaisin. Kun lähetys on päättynyt, lähettäjä asema uuden valtuuspaketin renkaaseen.

Tämä voi tapahtua ennenkuin lähetettävän paketin alkukohta palaa takaisin, mikäli renkaaseen mahtuu suurempi bittimäärä kuin mitä on lähetettävässä paketissa.

FDDI:n siirtotien ohjausprotokolla tukee kolmentyyppistä liikennettä:

- synkroninen liikenne, jolla on määrätty kapasiteettivaatimukset,
- kahdeksaan prioriteettitasoon jaettua asynkronista liikennettä ja
- vuoropuhelutyyppistä asynkronista liikennettä, jossa kaksi asemaa voi varata asynkroniselle liikenteelle tarkoitetun kapasiteetin keskinäiseen tiedonsiirtoon.

Perustana eri liikennetyypeille on protokolla, joka perustuu lähetyksvaltuuden tavoiteaikaan. Tavoiteaika (TTRT) määräytyy verkkoa alustettaessa tapahtuvan ns. tarjouskierroksen aikana, jolloin kukin asema ilmoittaa tavoiteaikansa. Se asema, joka edellyttää nopeimman vasteen, voittaa tarjouskilpailun eli TTRT määräytyy pienimmän tavoiteajan mukaan.

Jokainen asema mittaa aikaa siitä, kun valtuuspaketti viimeksi lähti asemalta. Kun valtuuspaketti seuraavan kerran vastaanotetaan, asema saa ottaa sen haltuunsa lähettääkseen kaiken synkronisen liikenteensä ja lähettääkseen asynkronista liikennettä, jos valtuuspaketti saapuu ennen tavoiteaikaa. Valtuuspaketin tavoiteajan ja saapumisajan välistä aikaa kutsutaan hallussapitoajaksi (THT). Asemalla on käytettävissä THT:n verran aikaa siirtääkseen kaiken asynkronisen liikenteensä. Eli havaitaan, että synkronisella liikenteellä on etusija ja asynkroninen liikenne on mahdollista vain, jos $THT > 0$. Verkon kuormituksen ollessa suuri verkossa siirretään pääasiassa synkronista liikennettä.

8. MATKAPUHELINJÄRJESTELMISTÄ

8.1 Yleistä

Tämä luku sisältää perustietoja joistakin matkapuhelinjärjestelmistä menemättä teknisiin yksityiskohtiin. Matkaviestimien perusajatuksena on päästä eroon päätelaitteen sidonnaisuudesta johonkin fyysiseen paikkaan. Tämä tapahtuu radioyhteyden avulla eli päätelaitteena on radiopuhelin tavallisen puhelimen sijasta. Lisäksi verkossa tarvitaan tukiasemia, joihin puhelimet ovat yhteydessä. Tukiasemista eteenpäin puhelujen välittäminen tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin kiinteässä verkossa niin kauan kun puhelin ei siirry tukiaseman alueelta toiselle.

Radioliikenteellä on joitakin perusongelmia, joiden vuoksi matkapuhelinjärjestelmät ovat voineet yleistyä vasta viime vuosina. Ensimmäkin radiopuhelimessa tarvittava tekniikka on huomattavasti vaativampaa kuin mitä normaalissa puhelimessa ainakin, jos puhelinta halutaan käyttää julkisen verkon osana. Mikropiiriteknologian kehittyminen on tässä suhteessa ollut hyvin oleellinen tekijä: ensimmäiset nmt-verkon puhelimet 80-luvun alkupuolella soveltuivat lähinnä autopuhelimiksi painavuutensa ja suuren tehontarpeensa vuoksi, kun taas uusimmat käsipuhelimet painavat akkuineen parisataa grammaa. Samoin nykyisiä matkapuhelinverkon keskuksia olisi ollut lähes mahdotonta toteuttaa esimerkiksi 70-luvulla käytössä olleella tekniikalla.

Toinen perusongelma on yhtäaikaisten radioyhteyksien määrä, joka riippuu käytettävissä olevasta taajuuskaistasta. Koska suurin osa radiotaajuuksista on varattu muuhun käyttöön jää matkapuhelimille vain suhteellisen kapeita taajuusalueita. Verkon kapasiteetti tietyn tukiaseman alueella on siten rajattu ja lisäksi vierekkäiset tukiasemat eivät voi käyttää täsmälleen samoja taajuuksia ylikuulumisongelmien takia. Jos kapasiteettia halutaan lisää, jää kaksi mahdollisuutta:

- varata uusi taajuuskaista käyttäen yleensä suurempaa taajuutta, koska suuremmilla taajuuksilla on enemmän tilaa
- tai pienentää solukokoa, jolloin verkon kapasiteetti kasvaa pinta-alayksikköä kohti.

Toisaalta myös taajuusalue vaikuttaa solukokoon, sillä suurilla taajuuksilla peittoalue jää varsin pieneksi (vertaa AM- ja ULA-radioiden kattavuus). Eli jos halutaan verkolle hyvä kattavuus käytetään mahdollisimman alhaista taajuusaluetta (esim. 450 MHz) kun taas suuremmilla taajuuksilla (1,8 GHz) verkon kapasiteetti on suurempi, mutta toisaalta täysin kattavaa verkkoa on hyvin vaikea rakentaa. Lisäksi kun käytettävä taajuus on korkea, kuuluvuus rakennusten sisällä on huomattavasti heikompi kuin ulkona. Tämä vaikeuttaa verkon suunnittelua erityisesti kaupunkialueilla.

Kolmas ongelma on pysyä selvillä päätelaitteen sijainnista. Aikaisemmin tämä tehtävä hoidettiin käyttämällä käsivälitteisiä keskuksia kuten ARP-verkossa, joka on ollut toiminnassa Suomessa vuodesta 71 alkaen. Automaattisissa matkapuhelinjärjestelmissä ongelma on ratkaistu siten, että jokaisella puhelimella on ns. kotikeskus, johon välitetään tieto siitä, minkä tukiaseman alueella puhelin on. Puhelua muodostettaessa puhelu kulkee kotikeskuksen kautta, josta yhteys jatkuu oikealle tuki-asemalle. Lisäksi jotta verkon

käyttö olisi tehokasta on puhelun voitava jatkaa, vaikka puhelin siirtyisikin tukiasemalta toiselle. Tästä ominaisuudesta käytetään nimitystä sijainnin seuranta (roaming).

8.2 NMT ja GSM-verkkojen perusominaisuudet

NMT (Nordic Mobile Telephone) -järjestelmä on pohjoismaiden yhdessä kehittämä ja ylläpitämä. Ennen gsm-verkkoa se oli maailman laajin yhtenäinen matkapuhelinjärjestelmä. Suomessa nmt-järjestelmä käynnistyi 450 MHz taajuusalueella vuonna 82. NMT 900:n rakentaminen aloitettiin 80-luvun puolivälissä kun kävi ilmeiseksi, että NMT 450:n suosio on käymässä niin suureksi, että kaikkia halukkaita ei saada mahtumaan verkkoon.

Gsm-lyhenne tulee alunperin sanoista Groupe Speciale Mobile, joka on ollut eurooppalaisen standardointijärjestön ETSIn alatyöryhmä, nykyisin gsm liitetään markkinoinnin kannalta paremmin sopivaan nimitykseen "Global System for Mobile communications". Gsm:n kehitystyön tavoitteena on ollut päästä vähintään Euroopan kattavan matkapuhelinverkkoon siirryttäessä digitaalitekniikan kauteen - analogiset matkapuhelinverkon ovat olleet lähes joka maassa erilaisia, jolloin yhtä päätelaitetta on voinut käyttää vain yhdessä maassa.

Gsm:n taajuusalueena käytetään 900 MHz aluetta. Oleellimmat eroavaisuudet nmt-verkkoon verrattuna ovat:

- Puhelimen ja tukiaseman välillä yhteys on digitaalinen, jolloin yhteys voidaan salata tehokkaasti ja dataliikenne on helpommin hoidettavissa.
- gsm:ssä tilaajan identifiointi perustuu älykorttiin (sim) eikä varsinaiseen puhelinlaitteeseen. Sim-kortti sisältää tilaajan kaikki oleelliset tiedot. Kortin avulla tilaaja voi soittaa gsm-puheluita mistä tahansa gsm-puhelimesta.

Kaikista ulkomailla gsm-puhelimeen vastaanotetuista puheluista pääosan eli ulkomaan-yhteyden hinnan maksaa vastaanottaja. Laskutustapa on siten oleellisesti erilainen kuin perinteisessä puhelinverkossa, jossa soittava maksaa normaalisti koko puhelun hinnan. Syynä gsm-verkon käytäntöön on periaate, että soittajan pitää aina tietää, mitä hän puhelustaan maksaa. Koska gsm:n tapauksessa puhelun hinta riippuu puhelimen sijaintimaasta, soittaja maksaa vain perusmaksun.

8.3 Verkkojen kattavuus

Alunperin yleiseurooppalaisena tavoitteena oli saada gsm palvelu toimintaan heinäkuussa 1991. Lähinnä matkapuhelimien tuotannon vaikeuksien takia useimmat operaattorit aloittivat toimintansa vasta vuoden 1992 aikana ja vaikka jotkin operaattorit, ensimmäisten joukossa Tele ja Radiolinja, käynnistivätkin verkkonsa lähes suunnitellusti, ei merkittävää gsm-liikennettä ole ollut ennenkuin vuoden 92 loppupuolella. Gsm-verkkoja on toiminnassa lisäksi lähi-idän, Afrikan ja Aasian maissa sekä Australiassa ja Uudessa Seelannissa. Nmt-900 -verkko toimii pohjoismaiden lisäksi Hollannissa, Sveitsissä ja Virossa.

Gsm-verkon rakentaminen on käynnistyi nopeimmin Saksassa. Tähän on ainakin kaksi syytä: ensiksikin analoginen matkapuhelinverkko on Saksassa ollut kapasiteetiltaan hyvin rajoitettu ja toiseksi gsm on käytännössä ensimmäinen telepalvelu, jossa on todellinen kilpailutilanne. Espanjan gsm-verkot käynnistyvät vuoden 1995 lopulla - viivästyminen johtui siitä, että paikalliselle monopolille (Telefonica) ei haluttu antaa lupaa avata verkkoa

ennen kuin kilpaileva operaattori saa verkon rakennettua, ja kilpailevan operaattorin valinta osoittautui hyvin hankalaksi.

Taulukko 8.1. Matkapuhelimia Suomessa

		1.1.1995	1.1.1996*
Tele	NMT450	186 000	200 000
	NMT900	352 000	440 000
	GSM	60 000	250 000
Radiolinja	GSM	50 000	130 000
Yhteensä	nmt+gsm	648 000	1020 000

* arvio perustuen eri lähteisiin

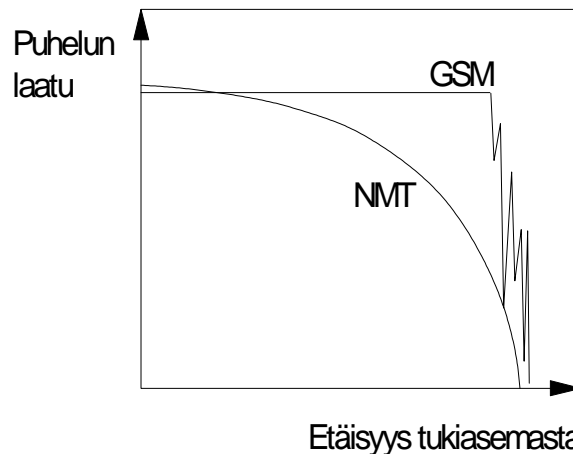
Erityisesti gsm-puhelimien määrä on kasvanut erittäin nopeasti: vuoden 1993 alussa niitä oli vain pari tuhatta, vuotta myöhemmin noin kymmenkertainen määrä, vuoden 1995 alussa noin 110 000 ja nyt (keväällä 1996) niiden määrä lähestyy puolta miljoonaa. Telen toimitusjohtajan arvion mukaan Suomessa on muutaman vuoden kuluttua matkapuhelimia 3 miljoonaa eli saman verran kuin nyt on kiinteän verkon puhelinliittymiä.

Vastaava kehitys on tapahtumassa myös maailmanlaajuisesti, joskin pohjoismaat ovat tässä suhteessa edelläkävijöitä. Jos viime vuosien keskimääräiset kasvuluvut (+5% vuodessa kiinteille puhelinliittymille ja +69% matkapuhelimille) jatkuvat samanlaisina tulevina vuosina niin jo vuonna 1999 matkapuhelimien määrä maailmassa ohittaa kiinteiden puhelinliittymien määrän ja vuonna 2003 matkapuhelimia olisi keskimäärin yksi jokaisella maapallon asukkaalla. Viimemainittu ennuste ei varmaankaan tule toteutumaan, mutta ilmeistä on, että jo noin viiden vuoden kuluttua matkapuhelin on yhtä yleinen kuin vaikkapa televisio. Samalla matkapuhelimen perusversion hinta tippuu muutamaan sataan markkaan.

8.4 Äänen laatu

Mitään tieteellisiä vertailuja nmt:n ja gsm:n puhelujen äänen laadun suhteen ei tiettävästi ole tehty. Järjestelmillä on kuitenkin yksi periaatteellinen ero, joka pätee yleisemminkin analogia ja digitaalitekniikan välillä. Kun nmt-puhelin on lähellä tukiasemaa, jolloin radiosignaalin voimakkuus on suuri, puheen laatu vastaa hyvinkin normaalia häiriötöntä puhelua. Kun etäisyys tukiasemaan kasvaa (tai välille tulee signaalin kulkua häiritseviä esteitä), puhelun laatu heikkenee vähitellen, kunnes yhteys lopulta katkeaa, jos verkko ei löydä puhelun kannalta parempaa tukiasemaa. Tällaisesta ominaisuudesta on ainakin se hyöty että nmt-puhelun katkeaminen on useimmiten ennakoitavissa.

Sensijaan gsm-verkossa käytettävän digitaalinen koodaustekniikan ansiosta tulevan radiosignaalin voimakkuus ei vaikuta yhteyden äänen laatuun ennen kuin hyvin heikolla signaalin voimakkuudella (tällöin äänen laadun vaihtelut voivat olla hyvin nopeita ja voimakkaita, kuva 8.1). Parhaimmillaan nmt-puhelun on jonkin verran parempi kuin gsm:llä, koska gsm:ssä käytetään varsin tehokasta koodausta (13 kbit/s verrattuna puhelinverkon 64 kbit/s), joka vaikuttaa jonkin verran äänen laatuun, erään maininnan mukaan gsm-puhelussa on "metallinen hohde".



Kuva 8.1. Nmt ja gsm-verkkojen puhelun laadun riippuvuus etäisyydestä.

8.5 Turvallisuus

Erilaiset turvallisuuskysymykset ovat hyvin oleellisia matkapuhelinten yhteydessä. Näitä ovat mm. mahdollisuus salakuunnella puhelua, puhelinten väärinkäyttö ja sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamat terveysriskit.

Terveysriskistä on varmuudella vaikea sanoa muuta kuin, että se ei ole kovin suuri, mutta toisaalta sen mahdollisuutta ei voida täysin sulkea pois. Erityisen ongelmallisia ovat käsipuhelimet, koska niissä puhelimen antenni on hankalassa paikassa eli aivan pään vieressä - sensijaan autopuhelimet eivät mitenkään oleellisesti lisää ihmisten saamaa sähkömagneettista säteilyä. Käsipuhelimeissa antennitehot ovat korkeintaan muutamia watteja, joka ei sinänsä riitä juurikaan lämmittämään ellei vaikutus kohdistu paikallisesti hyvin pienelle alueelle. Kysymyksen tiimoilta ollaan tekemässä varsin laajoja tutkimuksia niin Suomessa kuin ulkomaillakin.

Matkapuhelin on sinänsä varsin helppo varastaa, mutta sen väärinkäyttäminen on jo huomattavasti vaikeampaa. Varastetun puhelimen liittymän voi nimittäin sulkea, mikä käytännössä antaa varsin hyvän suojan. Jos varastettua puhelinta halutaan tämän jälkeen hyödyntää, tarvitaan hyvin päteviä ammattilaisia ja tarkoitusta varten suunniteltuja ohjelmointilaitteita. Keväällä 93 paljastui tällaista toimintaa harjoittanut rikollisjoukkio, jossa oli osallisena puhelimia valmistavan Ericssonin ja Ruotsin telen työntekijöitä. Tämän jälkeen vastaavaa toiminta on ilmennyt erityisesti eräissä muissa naapurimaissa.

Suomen NMT 900 verkon suoja on tietävästi varsin hyvä (ja parempi NMT 450:ssä), sillä kaikkiin puhelimiin on ohjelmoitu turvakoodi, jonka keskus tarkistaa jokaisen puhelun yhteydessä. Tämän lisäksi verkossa otetaan asteittain käyttöön uusi SIS (subscriber identity security) -koodi, joka on kehitetty Hollannissa nimenomaan estämään puhelinten rikollinen käyttö. Viime aikoina on paljastunut väärinkäytöksiä, jotka osoittavat erityisesti NMT450-järjestelmässä on heikkouksia, jotka mahdollistavat puhelunlaskun ohjaamisen väärän liittymän laskuun.

Gsm-puhelimen käyttäjä on suojattu verkkoliittymän väärinkäyttöä vastaan. Yksi puhelinsoitto estää hävinnan sim-kortin väärinkäytön. Sensijaan itse gsm-puhelin on ollut turvaton varkautta vastaan. Luvaton haltija voi periaatteessa hankkia oman sim-kortin ja käyttää puhelinta sillä. Gsm-verkossa on kuitenkin laiterekisteri-ominaisuus eli jokaiseen gsm-puhelimessa on 15 numeroa pitkä tunnus, IMEI-koodi. Koodi tarkistetaan puhelua muodostettaessa, joten varastetun puhelimen käyttö voidaan estää. Itse asiassa puhelimen paikka voidaan haluttaessa selvittää varsin tarkkaan, jopa niin hyvin, että gsm-puhelinta voitaisiin käyttää varsin tarkkana paikannuslaitteena.

Puhelujen salakuuntelu on matkapuhelimien perusongelma. Nmt-puhelun kuuntelu ei ole sinänsä vaikeata ja kuunteluun soveltuvia laitteita on saatavilla (vaikka kuuntelu sinänsä ei ole rangaistavaa, kuuntelusta saatavien tietojen käyttö on). Kuuntelijan kannalta ongelma on se, että juuri tiettyä nmt-puhelua on varsin vaikea kuunnella varsinkin alueilla, joissa on runsaasti puheluja käynnissä - sensijaan jos jonkin tukiaseman alueella on vain yksi tai muutama puhelu käynnissä tilanne voi olla toinen. Tässä suhteessa gsm-tekniikka on oleellisesti parempi, sillä gsm:n radioyhteydellä käytetään hyvin tehokasta salausten menetelmää, jota ei kotikonstein pysty murtamaan. Valitettavasti jotkin operaattorit eivät käytä verkoissaan salausta (tämä on tilanne tietyvästi mm. Ranskassa), lähinnä ilmeisesti, jotta puhelinten käyttö rikolliseen toimintaan vaikeutuisi. Jotkin operaattorit käyttävät myös heikomman tason salausta, johtuen lisenssirajoituksista.

Vaikka turvallisuusasioista on esitetty erilaisia tulkintoja, niin oma näkemykseni on, että gsm-puhelinten pahimmat turvallisuusongelmat liittyvät pikemminkin siihen, että matkapuhelimia käytetään julkisissa tiloissa, jolloin puhelun kuuntelu ei vaadi mitään laitteita. Toisaalta tukiaseman jälkeen gsm-puhelu kulkee kiinteässä verkossa kuten normaali puhelu, jolloin sen salakuuntelu on täsmälleen yhtä helppoa tai vaikeaa kuin minkä tahansa muunkin puhelun.

8.6 Muita järjestelmiä

PCN (Personal Communication Network) on Englannin aloitteesta lähtöisin oleva matkaviestinjärjestelmä, jonka tavoitteena on täyttää aukko johdottomien puhelinjärjestelmien ja täyden liikkuvuuden tarjoavien solupohjaisten verkkojen välillä. Pcn-termin merkitys ei ole vielä täysin vakiintunut, mutta nykyisin sillä ymmärretään lähinnä 1,8 GHz alueella toimivaa soluverkkoa (DCS1800), jonka määrittelyn lähtökohtana on gsm. Keskeisimmät eroavaisuudet gsm:ään verrattuna ovat:

- suuremman taajuuden vuoksi verkossa käytetään pienempää solukokoa, jolloin toisaalta verkon liikennekapasiteetti (esimerkiksi neliökilometriä kohti) on suurempi. Kapasiteettiä lisää myös DCS1800-verkolle varattu n. 3 kertaa gsm-verkon kaistaa suurempi kaistanleveys.
- DCS1800-verkko on tarkoitettu pienikokoisille käsipuhelimille, joissa käytetään alhaisia lähetystehoja (1 W ja 0,25 W)
- DCS1800:ssa on määritelty mahdollisuus siirtyä myös maan sisällä toisen operaattorin verkkoon paikoissa, joissa oma verkko ei ole täysin kattava.

Ero gsm ja pcn-verkkojen välillä ei ole kovin selkeä, sillä myös gsm-verkkoa voidaan käyttää 1,8GHz:n alueella. DCS1800 verkkoja on käytössä mm. Saksassa ja rakentamispäätöksiä on useissa muissakin maissa. Suomessa sekä Tele että Radiolinja rakentavat omat verkkonsa 1800 MHz:n alueelle ja lisäksi Telivo on hakemassa toimilupaa.

CT2 / DECT

Ensimmäisiä johdottomia puhelinjärjestelmiä on CT1 (Cordless Telephony-1), jota käytetään kotona ja työpaikoilla yksisoluisina normaalin puhelinliittymään liitetyn tukiaseman avulla. Maailmanlaajuisesti näitä on käytössä n. 20 miljoonaa.

Seuraavan sukupolven CT2 ratkaisussa käytetään digitaalista puheensirtoa 900 MHz alueella, jolloin etuna ovat parempi puheen laatu ja parantunut tietoturva. Lähetysteho on tyypillisesti muutamia kymmeniä milliwatteja, jolla päästään 100 - 200 metrin etäisyyksiin tukiasemasta. CT2-puhelinta voidaan käyttää sekä kotona johdottomana puhelimena että lähteisiin puheluihin sellaisissa paikoissa, joissa on julkinen CT2-tukiasema. Ensimmä-

mäiset järjestelmät kykenivät vain lähtevien puhelujen välitykseen, mutta nykyään on saatavissa myös järjestelmiä, joissa puhelujen vastaanotto on mahdollista. Oman tukiaseman avulla esimerkiksi kotikäytössä kaksisuuntaisuus on toki aina mahdollista. CT2:n perusideana on tuoda varsinaisten matkapuhelimien edut tavallisille kotitilaajille, jolloin päätelaitteen tulee olla hyvin edullinen. Tulevien puhelujen välitys on kuitenkin ollut merkittävä rajoitus järjestelmän yleistymiselle.

DECT (Digital European Cordless Telecommunications) on CT2-tyyppinen järjestelmä, joka on tarkoitettu lähinnä toimistokäyttöön joko langattomana puhelinvaihteena tai langattomana lähiverkkona. DECT:lle varatut taajuudet ovat 1900 MHz:n alueella ja lähetystehoksi on määritelty 259 mW, jolloin päästään n. 250 m etäisyyteen tukiasemasta.

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Opintojakson sisältö	1
1.2 Telealan merkitys	2
1.3. Telealan hallinto ja kilpailutilanne.....	3
1.4 Tietoliikenneverkkojen teknisen kehityksen piirteitä	8
1.5 Tietoliikenneverkkojen perusominaisuuksia.....	10
1.6 Kehitysnäkymiä.....	13
2. LIIKENNETEORIAN PERUSTEISTA.....	15
2.1 Johdanto	15
2.2 Tavoitteet.....	17
2.3 Matemaattisia määritelmiä	18
2.4 Liikenteen kuvaaminen	19
2.5 Mallintaminen	22
2.6 Satunnainen liikenne, Erlangin kaava	24
2.7 Rajoitettu määrä liikennelähteitä, Engsetin kaavat	27
3. JONOTEORIAN PERUSTEET.....	31
3.1 Peruskaavat	31
3.2 M/M/1, M/M/S ja M/M/S/N-järjestelmät	32
3.3. Esimerkkejä.....	34
4. VELOITUS.....	36
4.1 Veloitus ja kustannusvastaavuus.....	36
4.2 Veloitusperiaatteet.....	37
4.3 Veloituksen toteutus.....	37
4.4 Matemaattinen tarkastelu	38
5. ISDN.....	40
5.1 ISDN:n perusominaisuudet	40
5.2 ISDN-kehitys.....	41
5.3 Tilaajan liittäminen ISDN-verkkoon.....	42
5.4 ISDN:n palvelut	43
5.5 Mitä ISDN tarjoaa asiakkaalle	44
6. ATM.....	46
6.1 Laajakaistaverkkojen tarve.....	46
6.2. Asynkroninen toimintamuoto	47
6.3 ATM-verkon liikenne.....	51
7. LÄHIVERKOISTA	55
7.1 Ethernet (IEEE 802.3)	55
7.2 FDDI	59

8. MATKAPUHELINJÄRJESTELMISTÄ	62
8.1 Yleistä	62
8.2 NMT ja GSM-verkkojen perusominaisuudet	63
8.3 Verkkojen kattavuus	63
8.4 Äänen laatu	64
8.5 Turvallisuus	65
8.6 Muita järjestelmiä	66