

Sami Mailasalo

Mobiili datansiirto

Evoluutio GSM-verkosta LTE-verkkoon

Tekijä(t) Otsikko	Sami Mailasalo Mobiili datansiirto
Sivumäärä Aika	69 sivua + 1 liitettä 25.01.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietoliikenne
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikennetekniikka
Ohjaaja(t)	lehtori Seppo Lehtimäki
<p>Insinööriyön tavoitteena oli perehtyä mobiili datansiirtoon ja suorittaa 2G- ja 3G-mittauksia Ascomin TEMS Investigation-ohjelmalla eri mittauspisteissä sekä paikallaan ollessa että liikkuvassa kohteessa. Saatuja mittaustuloksia vertailtiin sitten keskenään.</p> <p>Ensimmäiseksi tutustuttiin GSM-järjestelmän arkkitehtuuriin ja sen datasiirrosta vastaaviin GPRS- ja EDGE-tekniikoihin. Tämän jälkeen perehdyttiin UMTS-verkon arkkitehtuuriin sekä tutkittiin HSPA-tekniikan kehittymistä olemassa olevasta tekniikasta Release 11:stä mukana tuomiin uusiin ominaisuuksiin. Viimeisenä tutustuttiin LTE-verkon toimintaan ja siihen, kuinka OFDMA ja SC-FDMA toteutetaan LTE-verkossa.</p> <p>Mittaukset suoritettiin käyttämällä Sony Ericssonin W995-matkapuhelinta ja saaduista tuloksista esitettiin ruutukaappauksia ja niitä jokaista arvioidaan tässä työssä. Mittauspisteinä oli Helsingin keskustan ja esikaupunkialueen lisäksi liikkuvassa kohteessa suoritettut mittaukset sekä ylimääräisenä Helsingin edustalla merellä suoritettu mittausta. Paikallaan olevissa mittauksissa ladattiin testitiedosto sekä mitattiin latausnopeus. Liikkuvassa kohteessa yhteys pidettiin auki internetradiolla avulla.</p> <p>Mittauksista selvisi, että keskustassa voi EDGE-tekniikalla päästä lähes yhtä hyvin nopeuksiin kuin HSPA-tekniikalla, mutta taajamassa HSPA vie selkeästi voiton. Selvisi myös se, että vaikka pidemmällä merellä GPRS-yhteys toimii parhaiten, niin paikoittain myös HSPA-yhteys toimii joissakin kohdin varsin hyvin. Liikkuvassa kohteessa HSPA oli parempi vaihtoehto, mutta yhteys katkeili jokaisen solunvaihdon yhteydessä.</p>	
Avainsanat	EDGE, HSPA, LTE

Author(s) Title	Sami Mailasalo Mobile data transfer
Number of Pages Date	69 pages + 1 appendices 25 January 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	IT
Specialisation option	Telecommunication
Instructor(s)	Seppo Lehtimäki, Senior Lecturer
<p>The objective of this thesis was to study mobile data transfer and perform 2G and 3G measurements using Ascom TEMS Investigation software at different locations while either stationary or mobile. Data from the measurements was then compared with each other.</p> <p>The aim was to explore the GSM system architecture and the corresponding data transfer technologies GPRS and EDGE. The study also explores the UMTS network architecture and investigates the development of HSPA from existing technology to newly-added new features from Release 11. Finally, it explores the LTE network and how the OFDMA and the SC-FDMA are implemented in the LTE network.</p> <p>The measurements were made using a Sony Ericsson W995 mobile phone and the results were presented with screenshots which are evaluated in this work. The measurements were conducted in the center of Helsinki and in the suburbs. Some mobile measurements were made, as well and an additional measurement was made at sea in front of Helsinki. In stationary measurements a test file was downloaded and the download speed was measured. In the mobile measurements the connection was kept open with the internet radio.</p> <p>The measurements revealed that in the center of Helsinki the speed with EDGE is almost as good as with HSPA but in the suburbs HSPA is a clear winner. It was also found that while GPRS seems to work best further away at the sea there are places where an HSPA connection works very well. While mobile, HSPA was a better option but the connection kept cutting off whenever a handover was made.</p>	
Keywords	EDGE, HSPA, LTE

Sisälllys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Langattoman tiedonsiirron historia	2
2.1	Mobiili radiopuhelin	3
2.2	Ensimmäinen sukupolvi	4
2.3	Toinen sukupolvi	5
2.4	Kolmas sukupolvi	7
2.5	Neljäs sukupolvi	9
3	GSM-verkko	10
3.1	GSM-verkkoarkkitehtuuri	11
3.2	GSM-radorajapinta	13
3.3	GPRS	16
3.3.1	GPRS-radorajapinta	17
3.3.2	Kanavan varaus	19
3.4	EDGE	21
4	UMTS ja HSPA	24
4.1	UMTS	24
4.1.1	UTRAN-verkkoarkkitehtuuri	25
4.1.2	UMTS-kanavat	27
4.1.3	UMTS-protokollapino	30
4.2	HSPA	32
4.2.1	HSDPA	33
4.2.2	HSUPA	35
4.2.3	HSPA Evolution	36
4.2.4	HSPA Multicarrier	38
4.2.5	Dual band HSDPA	41
5	LTE ja LTE Advanced	42
5.1	E-UTRAN	43
5.2	LTE-kanavat ja protokollapino	47

6	Mittalaitteistot ja mittausten analysointi	52
6.1	Mittausmenetelmät ja laitteet	52
6.2	Mittaustulokset	54
7	Yhteenveto	65
	Lähteet	67
	Liitteet	
	Liite 1. HSPA+ ja MC-HSDPA nopeudet	

Lyhenteet

8PKS	<i>8 Phase Shift Keying</i> . Modulaatiotekniikka.
BSC	<i>Base Station Controller</i> . Tukiasemaohjain GSM-verkossa.
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> . Tukiasema GSM-verkossa.
BSS	<i>Base Station Subsystem</i> . Tukiasema-alijärjestelmä GSM-verkossa.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> . Koodijakokanavointi.
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i> . Ilmakanavan laadun ilmaisin.
CS	<i>Coding scheme</i> . GPRS-tekniikassa käytetty koodaus.
CSD	<i>Circuit Switched Data</i> . Piirikytkenäinen data, jota GSM käytti tiedonsiirtoon.
DC-HSDPA	<i>Dual Cell – HSDPA</i> . Kahdella kantoaallolla toimiva HSDPA.
DC-HSUPA	<i>Dual Cell – HSUPA</i> . Kahdella kantoaallolla toimiva HSUPA.
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> . LTE-verkon radorajapinta.
EDGE	<i>Enhanced Data rate for GSM Evolution</i> . Pakettikytkentäinen tiedonsiirto.
eNodeB	<i>Enhanced NodeB</i> . Tukiasema LTE-verkossa.
ETSI	<i>European Telecommunications Standard Institute</i> . Euroopan telealan standardisoimisjärjestö.
FDD	<i>Frequency-Division Duplex</i> . Taajuusjakoinen dupleksointi.
FDM	<i>Frequency-Division Multiplexing</i> . Taajuuskanavointi.
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i> . Nopea Fourier-muunnos.
FM	<i>Frequency Modulation</i> . Taajuusmodulaatio.
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i> . Yhdyskäytäväsolmu.
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i> . Modulaatiotekniikka, joka yhdistää taajuus- ja vaihemodulaation.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> . Pakettikytkentäinen data.
H-ARQ	<i>Hybrid – Automatic Repeat Request</i> . Virheenkorjausmenetelmä.
HSCSD	<i>High Speed Circuit-Switched Data</i> . GSM-verkon laajennus, joka nopeuttaa tiedonsiirtoa.
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i> . UMTS-verkon tiedonsiirtoa lataussuuntaan nopeuttava laajennus.
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i> . HSDPA- ja HSUPA-tekniikoiden yhteisnimitys.
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i> . UMTS-verkon tiedonsiirtoa lähetyssuuntaan nopeuttava laajennus.

IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transformation</i> . Käänteinen nopea Fourier-muunnos.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> . Neljännen sukupolven matkapuhelinteknologia, jonka seuraava kehitysaskel on LTE Advanced.
MAC	<i>Medium Access Control</i> . Siirtoyhteyskerros UTRAN-protokollapinossa.
MC-HSDPA	<i>Multicarrier – HSDPA</i> . Usealla kanta-aallolla toimiva HSDPA.
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i> . EDGE-tekniikassa käytetty koodaus.
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> . Multiantennitekniikka.
MME	<i>Mobility Management Entity</i> . Ohjaustaso LTE-verkossa.
MS	<i>Mobile Station</i> . GSM-verkon päätelaite.
MSC	<i>Mobile Switching Centre</i> . Puhelinkekus GSM-verkossa.
Node B	Tukiasema UMTS-verkossa.
NSS	<i>Network Switching Subsystem</i> . Kytkeäälijärjestelmä GSM-verkossa.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> . Ortogonaalinen taajuusjakokanavointi.
OSS	<i>Operation Sub-System</i> . Hallintajärjestelmä GSM-verkossa.
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i> . LTE-verkon pakettiverkon yhdyskäytävä.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> . Modulaatiotekniikka, joka yhdistää vaihe-eron ja amplitudin keskenään.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> . Modulaatiotekniikka, joka käyttää neljää vaihetta ilmaisemaan tilaa.
RLC	<i>Radio Link Control</i> . Radioyhteyden ohjauskerros UTRAN-protokollapinossa.
RNC	<i>Radio Network Controller</i> . Tukiasemaohjain UMTS-verkossa.
RNS	<i>Radio Network Subsystem</i> . Tukiasema-alijärjestelmä UMTS-verkossa.
RRC	<i>Radio Resource Control</i> . Radioresurssien ohjain.
S-GW	<i>Serving Gateway</i> . LTE-verkon yhdyskäytävä.
SAE	<i>System Architecture Evolution</i> . LTE:n runkoverkko.
SF	<i>Spreading Factor</i> . Hajautuskerroin UMTS-tekniikassa, jolla käyttäjät erotetaan toisistaan.
SC-FDMA	<i>Single Carrier - FDMA</i> . Yksikantanaaalltoinen taajuusjakokanavointi.
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i> . Operointisolmu.
TDD	<i>Time-Division Duplex</i> . Aikajakoinen dupleksointi.
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> . Aikajakokanavointi.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> . Aikajakokanavointi.
TTI	<i>Transmission Time Interval</i> . Lähetysaikaväli.

UE	<i>User Equipment.</i> UMTS-verkon päätelaite.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System.</i> Kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia.
UTRAN	<i>UMTS Radio Access Network.</i> UMTS-verkon radorajapinta.
WCDMA	<i>Wideband CDMA.</i> Laajakaistainen koodinjakokanavointi.
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access.</i> Laajakaistatekniikka.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutustutaan mobiilin tiedonsiirron evoluution ensimmäisestä tiedonsiirtomenetelmästä viimeisimpään. Työn tarkoituksena on suorittaa 2G- ja 3G-mittauksia datansiirtotekniikan osalta ja arvioida tuloksia käytettävyyden kannalta.

Toisessa luvussa perehdytään lyhyesti langattoman datansiirron historiaan kronologisessa järjestyksessä alkaen ensimmäisistä sähköisistä datansiirtomenetelmistä ensimmäisestä sukupolvesta aina neljanteen sukupolveen asti. Jokaisesta sukupolvesta esitellään lyhyesti yleisimpiä matkapuhelintekniikoita, joita on maailmalla ollut käytössä.

Kolmannessa luvussa käsitellään GSM:n verkkoarkkitehtuuri ja radorajapinnat. Tämän jälkeen katsotaan, minkälaisia muutoksia GPRS ja EDGE tuovat GSM-verkkoon lisättäessä siihen datansiirtomahdollisuus. GPRS-tekniikan osalta käydään läpi radorajapinnan muutokset sekä kanavan varaus.

Neljännessä luvussa tutustutaan UMTS-verkon arkkitehtuuriin, kanaviin sekä protokollapinoon ja käydään läpi HSPA-tiedonsiirtotekniikan lisäykset verkkoon. Tämän lisäksi tutkitaan HSPA+-tekniikan tuomat parannukset ja DC-HSPA-tekniikan toiminta sekä pieni katsaus dual band HSPA -tekniikkaan.

Viides luku käsittelee LTE-verkon toimintaa arkkitehtuurin ja protokollapinon kautta sekä katsotaan miten lähetyssuunnan OFDMA- ja SC-FDMA-modulaatio toteutetaan. Kuudennessa luvussa esitellään mittausmenetelmät ja välineistö, joilla mittaukset suoritettiin sekä itse mittaustulokset.

2 Langattoman tiedonsiirron historia

Tässä luvussa käydään lyhyesti mobiiliverkkojen historiaa alkaen radiopuhelimista aina nykyiseen neljännen sukupolven verkkoon. Tekniikoita ei esitellä tässä tarkemmin, vaan ne esitetään seuraavassa luvussa, jossa keskitytään Suomessa käytettyihin dataliikennetekniikoihin.

Langaton viestintä ei ole uutta, sillä sitä on käytetty aina esihistoriallisista ajoista asti, ja yksi hyvä esimerkki on intiaanien savumerkit tai peilejä käyttäen annetut valomerkit. Sähköisen viestittämisen juuret ovat 1800-luvun alkupuolella.

Michael Faraday keksi vuonna 1821 laitteen, joka muunsi sähkövirran liikkeeksi ja vuonna 1831 sähkömagneettisen induktion. Merkittävin sähköopillinen saavutus oli, kun Faraday esitteli vuonna 1845 sähköiset ja magneettiset voimat kenttinä sekä osoitti, että induoitunut sähkömotorinen voima on suoraan verrannollinen johtimen liikenoiteen magneettikentässä.

Faraday ei itse pystynyt kuvaamaan keksintöjään matemaattisesti, vaan sen teki hänen kollegansa James Clerk Maxwell. Nämä tunnetaan nykyään Maxwellin yhtälöinä. Vuonna 1865 Maxwell julkaisi teorian siitä, että valo on eräs sähkömagneettisen aaltoliikkeen muoto.

Vuonna 1886 Heinrich Hertz pystyi ensimmäisenä fyysikkona luomaan Maxwellin aaltoja ja myös havaitsemaan näitä. Hän toteutti kokeen johtamalla nopeasti vaihtuvaa jännitettä antenniin. Kokeen ansiosta tiedepiireissä alettiin kehittää ilmiötä kuvaavaa mallia.

Ensimmäisen langattoman viestin lähettämisen kunnian sai Guglielmo Marconi, kun hän lähetti viestin muutaman kilometrin päässä olleelle vastaanottimelle vuonna 1895. Vuotta myöhemmin hän esitteli laitteistonsa Englannissa, jossa hänelle myönnettiin ensimmäinen sähköistä lennätintä koskeva patentti. Vuonna 1899 hän pystytti langattoman lennätinyhteyden Englannin ja Ranskan välille. Muita Marconin keksintöjä olivat laivaliikenteelle tarkoitettu radiomajakka sekä vuonna 1935 esitelty toimiva tutka.

/1./

2.1 Mobiili radiopuhelin

Ennen nykyisiä ensimmäisen sukupolven matkapuhelintekniikoita oli käytössä mobiili radiopuhelinjärjestelmiä, joita on takautuvasti kutsuttu esimatkapuhelin tai joskus 0G (Zeroth Generation) -järjestelmiksi, koska tukiasemat eivät osanneet siirtää puhelua toiselle tukiasemalle automaattisesti ja puhelu katkesi siirryttäessä tukiasemalta toiselle. Nämä järjestelmät voidaan erottaa aikaisemmista suljetuista radiopuhelinjärjestelmistä, kuten poliisiradiosta tai taksien ilmoitusjärjestelmistä sillä, että ne olivat saatavilla kaupallisessa palvelussa ja olivat osa PSTN (Public Switched Telephone Network) -verkkoa omine puhelinnumeroineen.

Yleensä nämä matkapuhelimet olivat asennettuina autoihin tai rekkoihin niin, että lähetin/vastaanotin oli asennettu ajoneuvon runkoon ja valitsin, näyttö sekä luuri asetettuna kuljettajan viereen. /2./

Käytettyihin teknolgiin kuului esimerkiksi Suomessa vuonna 1971 käyttöön otettu Posti- ja telehallituksen operoima Autoradiopuhelin (ARP), joka oli Suomen ensimmäinen kaupallisesti toiminut julkinen matkapuhelinverkko ja joka toimi aina vuoteen 2000 asti NMT:n (Nordisk Mobiltelefon) rinnalla. Se oli erittäin suosittu, sillä se oli pitkään ainoa koko maan kattava matkapuhelinverkko. ARP toimi 150 MHz:n taajuusalueella käyttäen FM-modulaatiota (Frequency Modulation) 25 kHz:n kanavajaolla. Aluksi se oli käsivälitteinen, mutta 30-vuotisen olemassaolon loppuaikoina sen toimintoja automatisoitiin. Päätelaitteen lähetysteho vaihteli yhdestä wattiin aina viiteentoista wattiin, ja tukiasemat lähettivät 50 W:n teholla ja yhden solun koko oli keskimäärin 30 km. /3; 7./

Ruotsin ensimmäinen matkapuhelinjärjestelmä oli MTA (Mobiletelefonisystem A), joka toimi 160 MHz:n taajuudella Tukholmassa ja Göteborgissa vuodesta 1956 vuoteen 1967. Tämän jälkeen otettiin käyttöön toinen verkko vuonna 1962, transistoritekniikkaan perustuva MTB (Mobiletelefonisystem B), ja se toimi 76-82,5 MHz:n taajuusalueella ja kattoi myös Malmön. 450 MHz:n taajuudella toimiva MTD (Mobiletelefonisystem D) esiteltiin vuonna 1971 ja oli käytössä aina vuoteen 1987 asti, kunnes NMT-verkko korvasi sen. Vuodesta 1976 lähtien se oli käytössä myös Tanskassa ja Norjassa, jonka ansiosta verkkovierailu oli mahdollista Skandinaviassa. /4./

Ensimmäinen matkapuhelinverkko Norjassa oli vuonna 1966 avattu OLT (Offentlig Landmobil Telefoni), jonka NMT syrjäytti lopullisesti vuonna 1990. OLT oli samanlainen kuin Ruotsin MTD-verkko tai Suomen ARP-verkko ja se toimi 160 MHz:n taajuusalueella käyttäen FM-modulaatiota. /5./

Muita matkapuhelinverkkoja olivat esimerkiksi Yhdysvalloissa vuonna 1946 käyttöön otettu MTS (Mobile Telephone System) ja sen vuonna 1964 korvannut IMTS (Improved MTS), Japanissa käytetty AMTS (Advanced Mobile Telephone System) sekä Euroopan ensimmäinen automaattinen matkapuhelinverkko Altai, joka otettiin kokonaan käyttöön Neuvostoliitossa vuonna 1965. /2./

2.2 Ensimmäinen sukupolvi

Ensimmäisen sukupolven (1G, First Generation) matkapuhelinverkot erosivat edellisen sukupolven verkoista siten, että käyttäjän puheluyhteys säilyi siirryttäessä tukiasemalta toiselle automaattisesti. Vaikka 1G-verkot käyttivätkin digitaalisia signaaleita yhdistämään radiotornit sekä matkapuhelimien kuuntelemiseen ja muuhun puhelinjärjestelmään, niin itse puhelun ääni oli analogista moduloituna korkeammille taajuuksille, tyypillisesti 150 MHz:iin tai korkeammalle. Nopeudet vaihtelivat 28k- ja 56k-modeemien välillä eli todelliset latausnopeudet olivat 2,9 KB/s ja 5,6 KB/s välillä. /6./

Pohjoismaissa otettiin käyttöön NMT-verkko (Nordic Mobile Telephone) vuosina 1981 – 1982 ja myöhemmin myös Baltian maissa sekä Itä-Euroopassa ja Venäjällä, mutta ensimmäinen kaupallinen palvelu avattiin Saudi-Arabiassa vain kuukautta ennen Ruotsia. Ensimmäinen NMT-verkko käytti 450 MHz:n taajuutta FM-modulaatiolla, mutta käyttäjäkunnan kasvaessa jouduttiin ottamaan käyttöön toinenkin taajuus. Vuonna 1987 avattiinkin NMT-900 verkko, joka toimi 900 MHz:n taajuudella. Yhden solun koko saattoi olla 2 km:stä 30 km:iin palvelen täten niin tiheästi asuttua kaupunkia kuin myös maaseutua tarjoten hyvän kuuluvuuden kaikille. NMT:n analogisuuden takia se tuhlassi radiokaistaa paljon, sillä jokaiselle puhelulle piti varata oma taajuusalue. Myöskään puheluiden salausta ei ollut mahdollista. Suomessa viimeinen NMT-verkko lopetettiin vuoden 2002 lopussa, Ruotsissa vuoden 2007 lopussa ja Venäjällä vuoden 2008 alussa. /1; 8./

Amerikassa otettiin virallisesti käyttöön Bell Labsin kehittämä analoginen matkapuhelinjärjestelmä Advanced Mobile Phone System (AMPS) vuonna 1978 ja myöhemmin Israelissa sekä Australiassa. Se oli ensimmäisen sukupolven taajuusjakoa käyttävä solumenetelmä, joka vaati kuitenkin huomattavan kaistanleveyden suurelle määrälle käyttäjiä. AMPS-keskukset pystyivät kuitenkin jakamaan kanavia signaalin vahvuuden mukaan ja siten käyttämään samaa taajuusaluetta uudelleen muualla sen häiritsemättä muita. Analogisuudesta johtuen verkko oli altis kohinalle sekä staattiselle sähkölle, eikä pitänyt sisällään suojausta salakuuntelua varten. Verkko toimi 800 MHz:n taajuudella ja NMT:n tavoin oli FM-moduloitu. Se toimi ensisijaisena analogisena verkkona Pohjois-Amerikassa 1980-luvulta 2000-luvulle, kun Yhdysvallat luopuivat siitä vuoden 2008 alussa. /9./

TACS (Total Access Communication System) ja Extended TACS oli joissakin Euroopan maissa, kuten Britanniassa ja Irlannissa vuodesta 1983 alkaen käytetty puhelinjärjestelmä, joka perustui muunneltuun AMPS-järjestelmään. Sitä käytettiin myös Hong Kongissa sekä Japanissa nimellä JTAC (Japanese Total Access Communication). ETACS erosi TACS-järjestelmästä vain sillä, että siinä oli enemmän kanavia käytössään. Molemmat verkot ajettiin alas vuonna 2001 Britanniassa, mutta on edelleen käytössä joissain maissa. /10./

2.3 Toinen sukupolvi

Erona edellisen sukupolven verkkoihin, toisen sukupolven (2G, Second Generation) verkoissa puhelut siirrettään kokonaan digitaalisina eikä pelkästään laitteiden välinen signalointi. Myös puheluiden salausta on mahdollista. Muita etuja edelliseen verrattuna on, että kaistaa voidaan käyttää tehokkaammin hyväksi multipleksoimalla ja erilaisilla koodekeilla pakkaamalla useampi puhelu samaan kaistanleveyteen sekä mahdollisuus datan lähetykseen tekstiviesteistä (SMS) aloittaen. Puhelimet oli suunniteltu lähetystehoiltaan pienemmiksi, mikä mahdollistaa solujen pitämisen pienempinä ja täten halvempina. /11./

Euroopan posti ja telehallinto CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications) perustivat vuonna 1982 ryhmän, Groupe Spécial Mobilen (GSM), jonka tarkoituksena oli laatia yleiseurooppalainen suositus 900 MHz:n aluetta

käyttävästä puhelinjärjestelmästä. Työn kehitys siirtyi myöhemmin ETSI:n (European Telecommunications Standard Institute) alaisuuteen, joka julkaisi valmiit suositukset GSM-verkosta (Global System for Mobile) vuonna 1990. Suomessa GSM-verkko käyttää 900 MHz:n taajuuden lisäksi 1800 MHz:n taajuutta, mutta joissain maissa on myös käytössä 1900 MHz:n sekä 850 MHz:n alueet ja harvinaisissa tapauksissa, jopa 400 MHz:n ja 450 MHz:n alueet. Kanavat jaetaan TDMA-menetelmällä (Time Division Multiple Access) omiin aikaväleihin käytetystä taajuudesta riippumatta GMSK-modulaatiolla (Gaussian Minimum Shift Keying). Solukoot vaihtelevat sisätiloihin asennetuista, muutamia kymmeniä metrejä käsittävästä pikosolusta, aina 35 km:n suuruisiin alueisiin. Ensimmäinen GSM-puhelu tehtiin Suomessa 1. heinäkuuta 1991 ja ensimmäinen tekstiviesti vuonna 1992. /12; 13./

Interim Standard 95 (IS-95) tai cdmaOne oli ensimmäinen CDMA-pohjainen (Code Division Multiple Access) standardi digitaaliselle puhelinjärjestelmälle. Toisin kuin TDMA-pohjaisissa verkoissa, CDMA mahdollistaa käyttäjän käyttäen koko taajuusaluetta samaan aikaan muiden kanssa, koska jokainen kanava erotetaan toisistaan yksilöllisen koodin avulla. Se kilpaili samaan aikaan D-AMPS-järjestelmän (Digital AMPS) kanssa, joka käytti ensimmäisen sukupolven AMPS-järjestelmän käyttämiä kanavia ja pystyi siirtymään samalla alueella digitaalisten ja analogisten järjestelmien välillä sujuvasti. D-AMPS lisäsi kapasiteettia käyttämällä FM-modulaation sijasta TDMA-koodausta, jolloin samalla taajuudella pystyi puhumaan useampi käyttäjä samanaikaisesti jakamalla käyttäjille oma aikaväli. Myöhemmissä päivityksessä D-AMPS-järjestelmiin lisättiin mahdollisuus tekstiviesteihin, piirikytkentäinen tiedonsiirto ja parempi kompressointi. Järjestelmä lakkautettiin Yhdysvalloissa samaan aikaan AMPS-järjestelmän kanssa, kun siellä siirryttiin GSM- ja CDMA-tekniikkaan. /14; 15./

Ensimmäinen todellinen TDMA-pohjaisille järjestelmille suunniteltu tiedonsiirtomuoto oli piirikytkentäinen data, CSD (Circuit Switched Data), joka käytti yhtä aikaväliä jatkuvaan tiedon siirtoon, riippumatta siitä siirrettiinkö mitään. Tiedonsiirtonopeus oli 9,6 kbit/s yhdellä aikavälillä. /16./

CSD-tekniikkaa laajennettiin päivityksellä, joka mahdollisti suuremman tiedonsiirtonopeuden. HSCSD (High Speed Circuit-Switched Data) mahdollisti neljän aikavälin käyttämistä tiedonsiirtoon yhdistämällä ne samalle siirtokanavalle. Toinen asia, mikä vaikutti nopeuteen, on mahdollisuus virheenkorjauksen tason valintaan

perustuen radioyhteyden laatuun. Parhaimmissa olosuhteissa yhden aikavälin nopeudeksi saadaan 14,4 kbit/s ja neljällä aikavälillä saavutetaan 57,6 kbit/s nopeus. Koska HSCSD edellyttää kaikki käyttämänsä aikavälit yhdelle käyttäjälle, aikavälejä ei aina riitä täyden tiedonsiirtokapasiteetin muodostamiseen tai ylläpitämiseen, jos äänipuhelut on priorisoitu dataliikenteen edelle. /12; 17./

Tiedonsiirtopalvelujen lisääntyessä tarvittiin paremmin kapasiteettia käyttäviä tekniikoita. Piirikytkentäiset tiedonsiirtomenetelmät pitivät yhteyttä yllä koko istunnon ajan varaten kapasiteettia turhaan, joten korvaavaksi menetelmäksi kehitettiin pakettikytkentäinen GPRS (General Packet Radio Service), joka käytti kaistaa vain tarvittaessa. HSCSD-tekniikan tavoin se yhdistää useamman aikavälin, jolloin yhdelle aikavälille saadaan 21,4 kbit/s ja kahdeksalle aikavälille 172,2 kbit/s, joka on suurin teoreettinen nopeus. /1./

Seuraava nopeampi verkkoratkaisu oli EDGE (Enhanced Data rate for GSM Evolution), joka ei vaatinut muutoksia GSM-verkon infrastruktuuriin ja siten siihen investoiminen ei vaatinut suuria rahamääriä. Nopeus saatiin aikaiseksi muuttamalla modulaatiota 8PSK-modulaatioksi (8 Phase Shift Keying). Tällä päästään neljää aikaväliä käyttäen nopeuteen 236,8 kbit/s. EDGE-tekniikkaa on kehitelty vielä lisää eteenpäin ja nykyiset verkot käyttävät 16QAM-modulaatiota (Quadrature Amplitude Modulation) ja vuoden 2010 Release 7:n myötä saavutetaan jopa 1,3 Mbit/s latausnopeus käyttämällä 32QAM-modulaatiota, mutta se ei ole vielä yhdessäkään verkossa käytössä. /12; 18; 19./

2.4 Kolmas sukupolvi

Kolmannen sukupolven (3G, Third Generation) kehitys aloitettiin ITU:n (International Telecommunications Union) toimesta jo 1990-luvulla, tarkoituksena laatia suositukset maailmanlaajuisesta puhelinjärjestelmästä. Suositukset on eritelty IMT-2000 (International Mobile Telecommunications - 2000) -projektissa, joista olennaisimmat ovat äänen laadun parantaminen lankaverkon tasolle, sillä GSM-verkoissa näin ei ole, sekä taaksepäin yhteensopivuus vanhojen verkkojen kanssa sekä paketti- ja piirikytkentäisen liikenteen tuki. Nopeuksista on mainittu 2 Mbit/s nopeus paikallaan

oleville kiinteille laitteille, 384 kbit/s liikkuville jalankulkijoille sekä liikkuvasta ajoneuvon ajoneuvosta saatava vähintään 144 kbit/s nopeus. /7./

Euroopassa yleisin käytössä oleva 3G-verkko on WCDMA -tekniikkaa (Wideband CDMA) käyttävä UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Sen teoreettinen nopeus on 2 Mbit/s, mutta käytännössä se on kuitenkin 384 kbit/s. UMTS käyttää kahta erilaista tekniikkaa, joista ensimmäinen on taajuuskanavoitu FDD (Frequency-Division Duplex), joka käyttää eri taajuuksia lähetys- ja lataussuuntaan ja mahdollistaa noin 250 puhekanavan käytön samanaikaisesti. Toinen on aikajakokanavoitu TDD (Time-Division Duplex), joka käyttää samaa taajuutta molempiin suuntiin, mutta sallii vain 120 samanaikaista puhekanavaa käyttäen kuitenkin vain puolet kaistanleveydestä. Alun perin vuonna 1997 sovittiin UMTS-taajuuksiksi 1900 MHz:n ja 2100 MHz:n alueet jakaen ne TDD- ja FDD-tekniikoiden kesken. Suomessa otettiin käyttöön vuosien 2007 ja 2009 välisenä aikana 900 MHz:n taajuus ja Pohjois-Amerikassa on otettu käyttöön myös 850 MHz:n ja 1700 MHz:n taajuusalueita. /1; 20./

Ensimmäinen 3G-verkko oli vuonna 2001 testi käyttöön avattu japanilainen FOMA (Freedom of Mobile Multimedia Access) 2100 MHz:n taajuudella. FOMA ei ollut UMTS-määritysten kanssa yhteensopiva sen aloittaessa, vaan vasta vuonna 2004 tehdyt muutokset verkossa, kuten verkkovierailun salliminen ulkomaalaisille, tekivät siitä yhteensopivan määritteiden kanssa. Vuodesta 2005 lähtien FOMA on toiminut 800 MHz:n taajuudella ja vuonna 2006 myös 1700 MHz:n taajuudella. /21; 22./

CDMA2000 on vuoden 1999 lopussa IMT-2000-suositusten mukaan hyväksytty kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko, joka on paranneltu versio toisen sukupolven cdmaOne verkosta. Uudet päivitykset toivat mukanaan nopeamman verkon ja paremman virheenkorjauksen säilyttäen kuitenkin yhteensopivuuden vanhemman verkon kanssa ja siten pitäen päivityksen kustannukset kohtuullisina. Verkko tunnetaan myös nimellä CDMA2000 1X ja vuonna 2002 erilleen kehitetty CDMA2000 1X EV-DO (Evolution Data Optimised), joka lisää verkon tiedonsiirto nopeutta entisestään, mutta ei siirrä puhetta lainkaan muuten kuin käyttämällä VoIP-tekniikkaa (Voice over IP) tai siirtymällä takaisin 1X-verkkoon. /23./

3GPP (3rd Generation Partnership Project) julkaisi Release 5:n myötä latausnopeutta parantavan HSDPA-tekniikan (High Speed Downlink Packet Access), jonka ansiosta

teoreettinen latausnopeus nousi 14 Mbit/s. Tämä oli mahdollista lisäämällä QPSK-modulaation rinnalle 16QAM-modulaation ja pienentämällä viivettä. Lähetysnopeutta nostettiin puolestaan vuonna 2007 julkaistun Release 6:ssa esiteltyyn HSUPA-tekniikan (High Speed Uplink Packet Access) myötä 5,8 Mbit/s. Yhteisnimitys näille molemmille on HSPA (High Speed Packet Access), jonka päivitetty versio HSPA+ (tai Evolved HSPA) Release 7:n myötä tukee MIMO-antennijärjestelmiä (Multiple Input / Multiple Output) ja lähetykseen vaihdettiin 64QAM-modulaatio, jolloin latausnopeus nousi 42 Mbit/s ja lähetysnopeus 11 Mbit/s. Uusimmat päivitykset HSPA-evoluutiossa on Release 8:n myötä tullut DC-HSDPA (Dual-Carrier tai Dual-Cell HSDPA) ja Release 9:n MC-HSUPA, jotka lisäävät taajuuksien käytön tehokkuutta ja kuormantasausta kantoaalloille käyttämällä kahta tai useampaa kantoaaltoa samaan aikaan. Release 9 mahdollistaa myös MC-HSPA-tekniikan ja MIMO-antennitekniikan käytön samanaikaisesti nostaten nopeutta edelleen. /24./

2.5 Neljäs sukupolvi

Toisin kuin aikaisemmissa sukupolvissa neljännen sukupolven (4G, Forth Generation) mobiiliverkot toimivat täysin IP-pohjaisesti, joten piirikytkenän tukea ei ole. ITU:n IMT-Advanced määritykset 4G:si vaativat IP-pakettikytkentäisen verkon lisäksi 1 Gbit/s nopeuden kiinteille tai hitaasti liikkuville yhteyksille sekä 100 Mbit/s nopeasti liikkuville, kuten junat ja autot. Verkon pitää myös pystyä jakamaan ja käyttämään verkon resursseja dynaamisesti, jotta yhteen soluun saataisiin mahtumaan enemmän käyttäjiä samanaikaisesti. Operaattorit ja ITU eivät ole olleet yksimielisiä siitä, mitkä verkkoteknologiat ovat 4G-yhteensopivia ja mitkä eivät, sillä määrittelyistä huolimatta jotkin operaattorit ovat mainostaneet yhteyksiään 4G:nä. /25./

Ensimmäinen tällainen oli LTE (Long Term Evolution), jonka ensimmäiset versiot eivät täyttäneet IMT:n vaatimuksia, latausnopeuden ollessa vain 300 Mbit/s ja lähetysnopeuden 75 Mbit/s. Japanilainen NTT DoCoMo esitti jo vuonna 2004 LTE:n kehitystä, ja virallisesti se aloitettiin seuraavan vuonna. Standardi valmistui vuoden 2008 lopussa ja ensimmäiset julkiset verkot avattiin joulukuussa 2009, kun TeliaSonera avasi verkot Osllossa ja Tukholmassa. Standardin ensimmäinen versio on esitelty 3GPP:n Release 8:ssa ja pienin muutoksin Release 9:ssä. Vasta Release 10 vuoden 2011 alkupuolella on hyväksytty 4G teknologiaksi ja tunnetaan nimellä LTE Advanced,

kun latausnopeus saavuttaa 1 Gbit/s. Vaikka LTE oli tarkoitus kehittää maailmanlaajui-
maailmanlaajuiseksi standardiksi, niin eri maiden käyttämät taajuudet eivät tätä
kuitenkaan puoltaneet. Pohjois-Amerikassa LTE käyttää nykyään 700 MHz:n ja 800
MHz:n taajuuksia ja tulevaisuudessa myös 1700 MHz ja 1900 MHz; Euroopassa on
käytössä 800, 1800 ja 2600 MHz:n taajuudet; Aasiassa 1800 ja 2600 MHz. Joten jos
laite ei tue useampaa eri taajuutta, ei yhdestä maasta hankitulla LTE-päätteellä voi
käyttää verkkoa muualla. /26; 27./

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) on IEEE 802.16 -standardi
perheeseen kuuluva langaton verkkotekniikka. Sen kehitys aloitettiin vuonna 2001 ja oli
tarkoitettu kiinteitä yhteyksiä varten, joten se on verrattavissa ennemminkin WLAN:iin
kuin 2G- tai 3G-verkkoihin. Verkkoja on rakennettu enimmäkseen harvaanasuilla
alueille tarjoten langattoman internetyhteyden sinne, minne kiinteän kaapeliverkon
vetäminen ei olisi taloudellisesti kannattavaa. Alkuperäinen WiMAX toimii 10–66 GHz:n
taajuuksilla, mutta IEEE 802.16a:n myötä myös 2-11 GHz:n taajuudet ovat käytössä.
Se ei myöskään tukenut tukiasemalta toiselle siirtoa ennen Mobile WiMAX- eli IEEE
802.16e -versiota, joka mahdollistaa liikkuvat päätelaitteet ja määrittelee 2-6 GHz:n
taajuuden niille. Kattavuuden lisäämiseksi se tukee dynaamista modulaatiota sallien
BPSK-, QPSK- sekä 16- ja 64QAM-modulaatiot. Suurimmillaan etäisyys tukiasemaan voi
olla 40–50 km ja nopeus 17 Mbit/s suurimmalla etäisyydellä ja 75 Mbit/s ollessa
lähempänä. Mobile WiMAX:in ollessa hyväksytty IMT-2000-verkoksi, se ei kuitenkaan
ole vielä IMT-Advanced määritelmien mukainen nopeuksien suhteen. Vasta WiMAX-
Advanced eli IEEE 802.16m tulee olemaan määritelmien mukainen 4G-verkko ja sen
odotetaan valmistuvan vuoden 2012 aikana. /12; 28./

3 GSM-verkko

Kuten edellisessä luvussa kerrottiin, GSM-verkon kehitys aloitettiin jo vuonna 1982. Sen
uudistukset edelliseen NMT-verkkoon verrattuna eivät olleet pelkästään verkon
digitalisoiminen, vaan se toi mukanaan myös puheen salauksen, joka ehkäisi
salakuuntelua. Jo alusta alkaen datan lähetys on ollut mahdollista, mikä on toinen
uudistus vanhempiin verkkoihin verrattuna. Ensimmäiset datalähetykset olivat SMS-
viestejä (Short Message Service) eli tekstiviestejä sekä MMS-viestejä (Multimedia
Messaging Service) eli multimediamviestejä. Aluksi dataliikenne oli vain 1-2 % koko

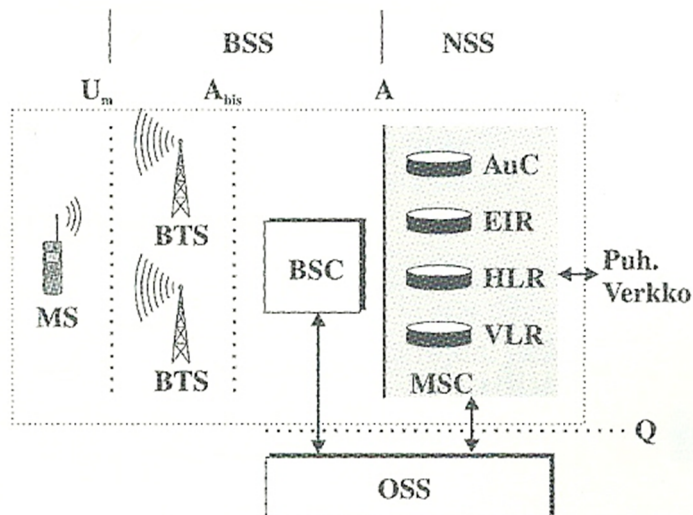
liikenteestä muun ollessa puhetta, mutta dataliikenteen kasvaessa myös tiedonsiirtono-tiedonsiirtonopeuksia oli kasvatettava sovellusten kehittyessä enemmän kaistaa vaativiksi.

Siirtonopeuden kasvua ennakoitiin GSM-verkon kehityksessä, jolloin seuraavassa vaiheessa esiteltiin HSCSD-tekniikka, joka ottaa TDMA-kehyksestä useamman aikavälin ja yhdistää ne samalle siirtokanavalle. Sen käyttöön ottaminen ei vaadi muuta kuin ohjelmistomuutosten tekemisen liikkuviin asemiin ja verkon laitteisiin. Datansiirto oli kuitenkin vielä piirikytkentäistä, joka aiheutti sen, että yhteyttä ylläpidettiin koko istunnon ajan kuluttaen kaistaa turhaan. /12./

Internet-yhteyksille tyypillisille purskeisille datasiirroille perustuva tekniikka oli GPRS, joka kuitenkin vaati sitä tukevan laitteen. Datasiirtoa vaativien tilaajien lukumäärän kasvaessa edelleen, myös nopeuksien piti kasvaa ja seuraava edistysaskel oli EDGE. Sen määritelmät löytyvät IMT-2000-asiakirjasta, ja sen vuoksi se voidaan määritellä "3G-palveluksi", mutta sen ollessa kuitenkin huomattavasti hitaampi nykyisiä 3G-palveluja. EDGE-tekniikkaa kehitetään kuitenkin edelleen ja siinä missä GPRS-tekniikkaa kuvataan yleensä 2,5G-tekniikaksi, niin EDGE:ä nimitetään 2,75G-tekniikaksi. /11; 12./

3.1 GSM-verkkoarkkitehtuuri

GSM-verkko koostuu neljästä osasta siten, että tilaajaa kuvataan puhelimella tai päätelaitteella MS (Mobile Station). Päätelaite ottaa yhteyttä tukiasemaan BTS (Base Transceiver Station), joka puolestaan toimii tukiasema-alijärjestelmässä BSS (Base Station Subsystem). Tukiasemaohjaimet BSC (Base Station Controller) ohjaavat kukin yhtä BSS-alijärjestelmää ja ovat liitettyinä kytkentäalijärjestelmään NSS (Network Switching Subsystem). Verkon operaattorit valvovat puolestaan koko GSM-järjestelmän toimintaa hallintajärjestelmän OSS (Operation Sub-System) avulla. Näiden järjestelmien välissä on erilaisia rajapintoja. Päätelaitteen (MS) ja tukiaseman (BTS) välistä rajapintaa kutsutaan nimellä U_m , kun taas tukiaseman (BTS) ja tukiasemaohjaimen (BSC) välinen rajapinta on A_{bis} . Tukiasemaohjaimen (BSC) ja kytkentäalijärjestelmän (NSS) välillä on A-rajapinta. Kuvassa 1 on esitettyä GSM-verkon arkkitehtuuri.



Kuva 1: GSM-verkon arkkitehtuuri. /1/

BSS pitää sisällään sekä tukiaseman että tukiasemaohjaimen ja sen tehtäviin kuuluu ryhmittää radioliikenteen laitteet omaksi kokonaisuudekseen ja olla suoraan yhteydessä liikkuviin asemiin.

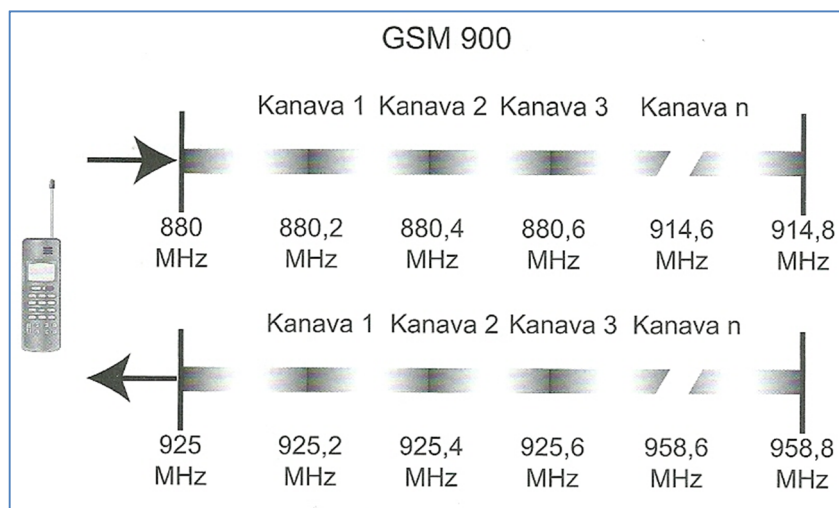
Verkon päätehtävät, eli liikenteen kytkeminen GSM-verkon sisällä sekä sen kytkeminen kiinteään verkkoon, on sijoitettu kytkentäalijärjestelmään. Sen tärkein osa on matkapuhelinkeskus MSC (Mobile Switching Centre), johon kuuluu myös SMS-välityspalvelut ja seuraavat rekisterit:

- Kotirekisteriin HLR (Home Location Register) tallennetaan tilaajaliittymän perustiedot sekä paikannustiedot siitä, minkä MSC:n alueen sisällä päätelaite kulloinkin on ja sen vaihtuessa toiselle alueelle, HLR päivittää molempien järjestelmien tiedot siitä. Soitettaessa tilaajalle olinpaikan tiedot haetaan ensimmäisenä kotioperaattorin HLR-rekisteristä, josta tieto vastaanottajan sijainnista saadaan.
- Vierailijarekisteri VLR (Visitor Location Register) tallentaa tiedot sen vastuualueella liikkuvista aktiivisista päätelaitteista ja päätelaitteen siirtyessä toisen VLR:n alueelle, kopioidaan liittymän tiedot siihen HLR-rekisteristä. HLR pitää tietoa yllä siitä, minkä VLR-rekisterin alueella päätelaite milloinkin on.

- AuC (Authentication Center) tallentaa GSM-verkon suojaukseen ja tietoturvallisuuteen liittyviä tietoja, kuten käyttäjän todentaminen. Päätelaitteen päälle kytkemisen ja soiton yhteydessä käyttäjä todennetaan aina, kuin myös jos liittymään tehdään muutoksia tai parametreja muutetaan.
- EIR (Equipment Identity Register) pitää sisällään kolme eritasoista luetteloa päätelaitteista, jotka tunnistetaan IMEI-numeron (International Mobile Equipment Identity) perusteella. Kaikki IMEI-numerot ovat lueteltuna valkoisessa listassa, kun taas harmaaseen listaan luetellaan tarkkailun alaisena olevat laitteet ja käyttökiellossa olevat laitteet mustaan listaan.

3.2 GSM-radorajapinta

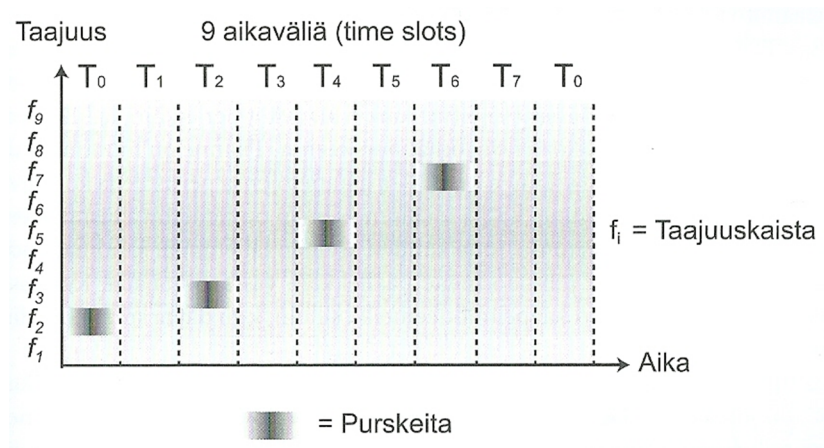
Jokainen GSM-verkon taajuus on jaettu 200 kHz:n kanaviin, jotka sitten on jaettu verkko-operaattorien kesken antaen jokaiselle oman taajuusalueen, jolla operaattorin verkko toimii. Lähetyksille ja vastaanotoille on omat taajuuskanavat kuvan 2 mukaisesti 900 MHz:n alueella. Mitä korkeammalla taajuusalueella ollaan, sitä enemmän kanavapaikkoja saadaan, mutta peittoalue on pienempi.



Kuva 2: GSM-kanavia. /12/

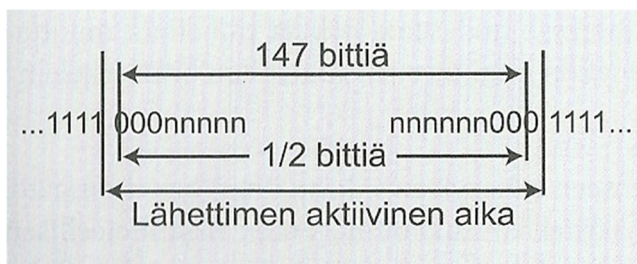
Tiedonsiirto tapahtuu yhdistämällä taajuuskanavointi FDM (Frequency-Division Multiplexing) ja aikajakokanavointi TDM (Time Division Multiplexing) siten, että tiedonsiirto toteutetaan TDM-menetelmällä, jotka ovat käytettyjen taajuusalueiden sisällä, kuten kuvasta 3 näkee. Kahdeksasta TDM-aikavälisestä, jotka on numeroitu 0-

7:ään, muodostuu TDMA-kehys, ja peräkkäisten kehysten aikavälit muodostavat kanavan T_i .



Kuva 3: FDM-tekniikka. /12/

Puhe tai data ei mahdu kokonaan yhdelle aikavälille, joten se jaetaan useammalle, ja kanavan kokonaisnopeus määräytyy kanavalla kuuluvien aikavälien sisältämien yhteisten bittien sekunnissa määrään. Yhden aikavälin kesto on vain 576,9 μ s ja siihen mahtuu 156,25 bittijaksoa, mutta käyttökelpoista dataa siinä on enintään 147 bittiä. Tätä aikavälin sisällä olevaa sanomaa kutsutaan purskeeksi. Kuvassa 4 on esitettyä purskeen rakenne.



Kuva 4: GSM-purskeen rakenne. /12/

Purskeet, jotka siirtyvät aikaväleissä T_i , T_{i+8} ja T_{i+16} , kuuluvat samaan kanavaan ja toisen kanavan muodostavat aikavälit T_j , T_{j+8} ja T_{j+16} . Radiotien laadun keskiarvostamiseksi on TDM yhdistetty taajuushyppelyyn, jonka ansiosta hetkellä T_i voi olla yhdeksän samanaikaista kanavaa eri taajuuksilla, kuten kuvassa 3 on esitetty. Kuvasta laskemalla saadaan tukiaseman kanavamääräksi 72 kertomalla taajuudet ja aikavälit yhteen.

Päätelaite tuntee hyppysekvenssin ja oman kanavan sijainnin suhteessa TDMA-kehysten alkuun T_0 ja pystyy siten lukemaan tulevan datan. Lataussuuntaan tämä menetelmä on helpompi kuin lähetyssuuntaan, sillä tukiasema sijoittaa kaikki aikavälit peräkkäin, josta päätelaitteet sitten poimivat omat purskeensa. Lähetyksessä päätelaitteen on koottava tukiasemalle lähetettävä sanoma aikatietojensa perusteella ja tiedettävä, milloin se voi lähettää sanomansa, jotta vastaanottajalla ei mene sanomat päällekkäin johtuen kahden eri päätelaitteen erilaisista etenemisviiveistä.

Tukiasemalle saapuvat sanomat on tultava peräkkäin TDMA-kehysten aikaväleissä, joten päätelaitteen on otettava huomioon etenemisviiveet lähetyksessä. Jotta sanoma saapuisi sille tarkoitettuun aikaväliin, on päätelaitteen lähetettävä purskeensa riittävän ajoissa. Tätä kutsutaan ajoitusennakoksi TA (Timing Advance).

Ajoitusennakko lasketaan päätelaitteen lähettämän hajasaantipurskeen avulla. Tukiasema näkee vastaanotetusta tiedosta, kuinka paljon purske on aikavälin sisällä liikkunut. Tietojen perusteella tukiasema ilmoittaa ajoitusennakon päätelaitteelle, joka käyttää sitä lähetyksessä. Etäisyydestä riippuen ajoitusennakossa on vaihtelua niin, että se on 0, kun ollaan tukiaseman vieressä ja 63 kauimpana asemasta eli noin 35 km etäisyydellä.

Purskeita on viidenlaisia, ja ne määräytyvät käytön mukaan.

- Normaalipurske NB (Normal Burst) kuljettaa salakirjoitettua dataa kahdessa 57 bitin kentässä, joilla ilmoitetaan, kuvaako bittijoukko dataa vai merkinantoa ja kenttien välissä on joko kättely- tai opetuskenttä, jolla saadaan paikannettu kehys aikavälissä.
- Taajuuden korjauspurskeen FB (Frequency correction Burst) avulla päätelaite lukitsee tahdistuksensa tukiasemaan. Se sisältää 0-biteillä täytetyn 142 bittiä pitkän kentän, joka tuottaa nimellistaajuuden yläpuolelle moduloimattoman siniaallon.
- Synkronointipurske SB (Synchronization Burst) sisältää salakirjoitettuna menossa olevan TDMA-kehysten numeron (FN, Frame Number) sekä

tukiaseman tunnusteen BSIC (Base Station Identity Code). Lisäksi purskeesta löytyy opetus- ja kättelybitit.

- Täytepurske DB (Dummy Burst) on nimensä mukaisesti täytetty, sillä se sisältää kiinteän 142 bittisen kuvion ja tukiasema lähettää sitä vain niissä TDMA-kehysten aikaväleissä, joissa ei ole muuta liikennettä.
- Hajasaantipursketta AB (Access Burst) käytetään silloin, kun päätelaite ottaa yhteyden tukiasemaan. Siinä on 68,5 bittiä pitkä suoja-aika toisin kuin muissa purskeissa. Tämä johtuu siitä, että sillä varmistetaan päätelaitteen lähettämän viestin mahtuminen aikaväliin silloin, kun päätelaite ei ole tietoinen välimatkasta tukiasemaan.

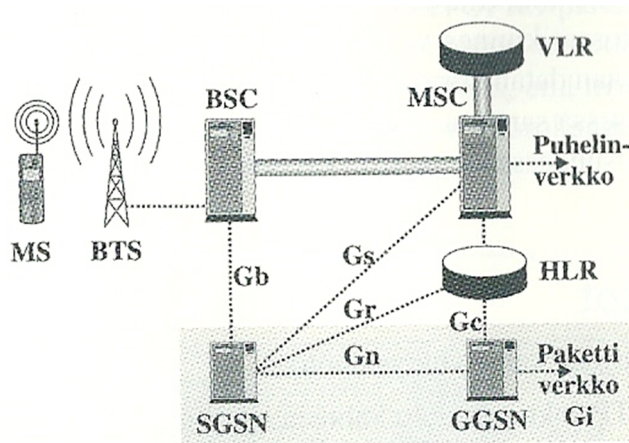
Lukuun ottamatta SMS- ja MMS-viestejä, data lähetetään normaalipurskeiden mukana poiketen puheesta ainoastaan kanavakoodauksessa, joka määrää käytettävän datan määrän yhdessä purskeessa. Käytettäviä nopeuksia GSM-verkossa on kahdenlaisia:

- 9,6 kbit/s, joka saadaan tuomalla 240 bittiä dataa koodattavaksi ja lisäämällä 4 häntäbittiä. Data siirretään $\frac{1}{2}$ -konvoluutiokoodaukseen, josta saadaan 488 bittiä, poistetaan 32 bittiä lävistyksen avulla ja lopuksi kevennetään koodausta lisää levittäen loput bitit 22 purskeelle.
- 14,4 kbit/s nopeus saadaan aikaiseksi samalla menetelmällä kuin toinenkin nopeus. Nyt dataa tuodaan kuitenkin 290 bittiä ja konvoluution jälkeen käytössä on 588 bittiä, josta poistetaan lävistyksellä 132 bittiä. Jäljelle jää 456 bittiä levitettäväksi 22 purskeelle. /12./

3.3 GPRS

Kuten jo mainittiin, GPRS vaati muutoksia verkkoon toimiakseen. Kuten kuvasta 5 näkee, GPRS-verkossa on kaksi uutta laitetta. SGSN (Serving GPRS Support Node) seuraa solun tai alueen tarkkuudella GPRS-laitteita ja reitittää niiden liikenteen. Se myös hoitaa salauksen radiotiellä ja GPRS-verkon sisällä ja valvoo päätelaitteiden kirjautumista verkkoon. Laite liikennöi G_b -rajapintaa käyttäen PCU:n (Packet Control

Unit) kanssa Frame Relay -tekniikalla siirtäen dataa sekä merkinantoja. SGSN kerää myös laskutustietoja GPRS-verkon käytöstä. G_n-rajapintaa käytetään tietojen siirtoon ulkopuolisten verkkojen yhdyskäytävälle GGSN (Gateway GPRS Support Node), joka yhdistää GSM/GPRS-verkot Internetiin. /1./



Kuva 5: GPRS:n tuomat muutokset GSM-verkkoon. /1/

3.3.1 GPRS-radorajapinta

GPRS-sanomat kulkevat verkon U_m-rajapinnan ylitse käyttäen eri koodaustapaa kuin GSM-sanomat. Koodausmenetelmiä on neljää erilaista, joita käytetään sen mukaan, miten kaukana päätelaite on tukiasemasta. Nopeimman nopeuden antavaa koodausta käytetään lähietäisyyksille, sillä se sisältää vähiten virheenkorjausta. Etäisyyden kasvaessa ja häiriöiden lisääntyessä siirrytään enemmän virheenkorjausta sisältäviin koodauksiin. Seuraavassa taulukossa on esiteltyä GPRS-koodaukset:

Taulukko 1: GPRS-koodaus. /12/

Koodaus	Suhde	USF-bitit	Koodatt USF-bitit	Data-bitit	BCS-bitit	Häntä-bitit	Koodattu data	Lävistys	Datan nopeus kbit/s
CS-1	1/2	3	3	181	40	4	456	0	9,05
CS-2	≈2/3	3	6	268	16	4	588	132	13,40
CS-3	≈3/4	3	6	312	16	4	676	220	15,60
CS-4	1	3	12	428	16	-	456	-	21,40

Kunakin koodin jakso koostuu USF-bitistä (Uplink State Flag) sanoman tarkisteesta ja CS-4-koodausta lukuun ottamatta häntäbiteistä, joita käytetään konvoluutiokooderin tyhjentämisestä sekä tietenkin itse datasanomasta. USF-bitit mahdollistavat kahdeksalla eri vaihtoehdolla sen, että useamman päätelaitteen data saadaan lomitettua yhdelle loogiselle kanavalle. Seuraavaksi käydään läpi eri koodauksia.

CS-1-koodauksen kuljettama bittimäärä on 39,7 % kanavan teoreettisesta maksimikapasiteetista ja on siten koodauksista raskain.

- Kolme USF-bittiä ja lohkon pituus 184-bittiä, joka saadaan yhdistämällä siirrettävä data yhteen lohkoon ($d_{183}, d_{182}, \dots, d_0$).
- 184-bitin bittijoukko jaetaan jakopolynomilla $g(D) = (D^{23} + 1)(D^{17} + D^3 + 1)$, ja 40-bitin jakojäännös (Fire Code) muodostaa sanoman tarkisteen BCS (Block Check Sequence), joka lisättään 184-bitin bittijoukon perään.
- Täten saatuun 224-bitin bittijoukkoon ($d_{223}, d_{222}, \dots, d_0$) lisätään 4-bitin häntäbitit ja viedään $\frac{1}{2}$ -konvoluutiokoodauksen läpi.
- Lopputuloksen 456-bittinen suojattu sanoma levitetään kahdeksalla 57-bitin loholla yhdistettynä neljälle purskeelle, jottei sanomien välistä limitystä pääsisi tapahtumaan.

CS-2 koodaus on edellistä kevyempi ja kuljettaa 58,7 % teoreettisesta maksimista.

- USF-bitit konvertoidaan kuudeksi bitiksi.
- Koodatut USF-bitit yhdistetään siirrettävän 286-bittisen datan kanssa 274-bittiseksi yhdeksi lohkoksi ($d_{273}, d_{272}, \dots, d_0$).
- 274-bitin bittijoukko jaetaan jakopolynomilla $g(D) = (D^{16} + D^{12} + D^5 + 1)$, ja 16-bitin jakojäännös muodostaa sanoman tarkisteen, joka lisättään 274-bittisen bittijoukon perään.

- Täten saatuun 290-bitin bittijoukkoon ($d_{279}, d_{278}, \dots, d_0$) lisätään 4 bitin häntäbitit ja viedään $\frac{1}{2}$ -konvoluutiokoodauksen läpi.
- Konvoluutiokoodauksen jälkeen 588-bittisestä joukosta poistetaan 132 bittiä lävistämällä siten, että siitä poistetaan bitit $b(3+4j)$ kaikilla $j = 3, 4, \dots, 146$ arvoilla, lukuun ottamatta j :n arvoja 9, 21, 33, 45, 57, 69, 81, 93, 105, 117, 129, ja 141.
- Lopputuloksen 456-bitin sanoma levitetään samalla tavalla kuin CS-1.

CS-3-koodauksen kuljettama bittimäärä on 68,4 % teoreettisesta maksimista, ja koodaus suoritetaan samalla menetelmällä kuin CS-2, mutta lävistyksen tuodusta 676 bitistä poistetaan 220 bittiä. Poistettavat bitit ovat $b(3+6j)$ ja $b(5+6j)$ kaikilla $j = 2, 3, \dots, 111$ arvoilla.

CS-4-koodauksen kuljettama bittimäärä on 93,8 % teoreettisesta maksimista ja sanoma sisältää vain databitit, USF-bitit ja BCS-tarkisteen.

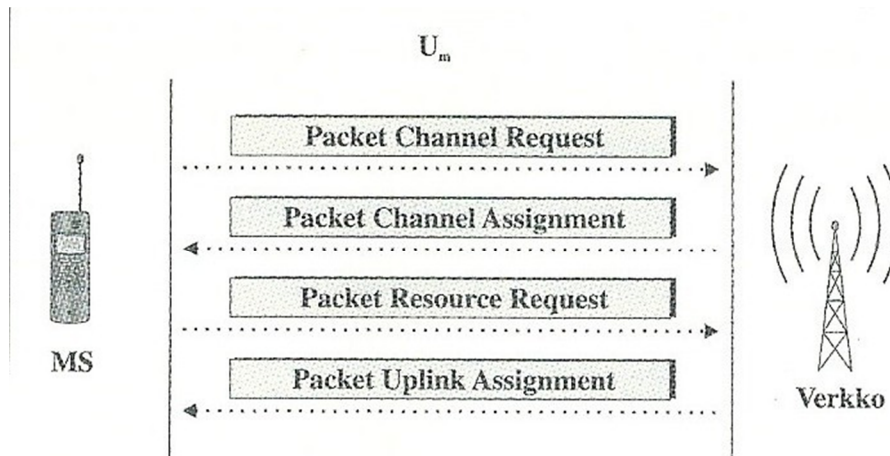
- Kolme USF-bittiä muutetaan 12-bittiseksi.
- Koodatut USF-bitit lisätään hyötykuormaan, ja saatu 440-bittinen bittijoukko jaetaan jakopolynomilla $D^{16}+D^{12}+D^5+1$.
- Saatu 16-bittinen tarkiste lisätään 440-bitin perään, jolloin 456-bittinen sanoma levitetään kahdeksalle 57-bitin lohkolle CS-1-koodauksen tavalla.

3.3.2 Kanavan varaus

Ennen kuin sanomaa voidaan lähettää, on järjestelmästä varattava kanava sitä varten. Kanava on varattava aina ennen uuden sanoman lähettämistä ja siinä voi kestää useampia satoja millisekunteja, joten aivan vähäpätöinen asia ei ole. Varaus voi tehdä päätelaite tai verkko.

Lähetysuuntaan tehtävä varaus voidaan tehdä yksi- tai kaksivaiheisena. Varaus alkaa, kun päätelaite lähettää resurssinvarauspyynnön verkolle pakettiverkon

hajasaantikanavalla PRACH (Packet Random Access Channel), jolloin verkko lähettää vahvistavan kuittaussanoman. Kaksivaiheisessa varauksessa päätelaite tai verkko lähettää resurssien varauspyynnön omalla kanavallaan ja sen jälkeen tehdään dataliikenteelle kanavanvaraus. Kuvassa 6 on esitettyinä lähetyssuunnan kanavanvaraus.



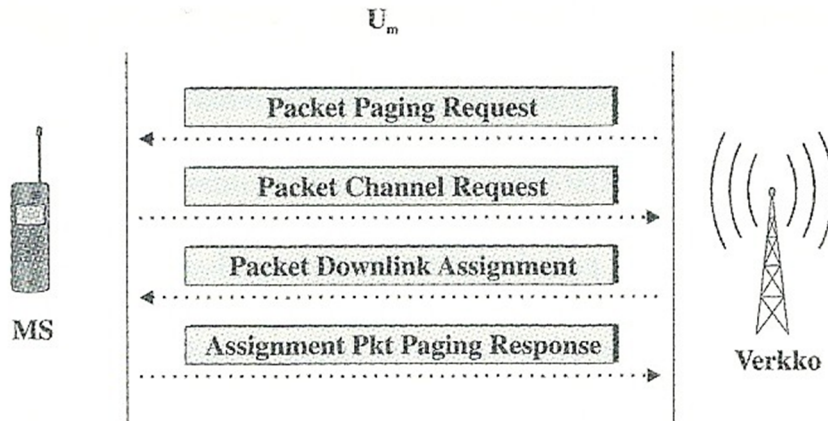
Kuva 6: Kanavanvaraus lähetyssuuntaan. /1/

Koska lähetyssuunnan kanavanvaraukset tehdään jaetulla PRACH-kanavalla, ovat yhteentörmäykset mahdollisia. Sellaisen sattuessa ei vahvistusta tule päätelaitteelle, joten päätelaite arpoo satunnaisluvun R joukosta $\{0, 1, \dots, 15\}$, jolla määritellään uusi lähetyisaika. Pyyntö uusitaan seuraavan sallitun TDMA-kehäyksen kohdalla, jos yhteyden prioriteettiä i vastaava sitkeystaso $P(i)$ (Persistence level) on suurempi tai yhtä suuri kuin satunnaisluku R . Prioriteetti on määritelty palveluprofiileissa ja sitkeystasot on ilmoitettu solukohtaisesti PBCCH-kanavalla.

Datakanavaa pidetään auki koko prosessin ajan ja virheenkorjauksen ollessa käytössä datakanavan varauksia pidennetään niin kauan, kunnes sanoma on tullut kokonaan virheettömästi. Varaus lopetetaan, kun poll-bitillä varustettu kuittaus saapuu eli silloin kun final-bitti on ykkönen.

Lataussuuntaan tapahtuva kanavanvaraus alkaa, kun verkko lähettää avauspyynnön valmiustilassa olevalle päätelaitteelle, joka vastaa siihen kanavanvarauspyynnöllä ja saa sitten verkolta kuittauksen varatuista radioresursseista. Lopuksi päätelaite kuittaa vielä ilmoituksen resursseista. Lataus alkaa liikennekanavalla kun varaus on onnistunut ja

päätelaite kuittaa sanomat. Kun viimeiseen poll-bitillä varustettuun sanomaan saadaan kuittaus final-bitillä, päättyy myös datan siirtäminen. Kuvassa 7 on esitetty lataussuunnan kanavanvaraus.



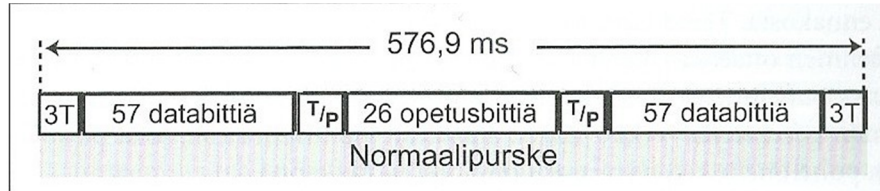
Kuva 7: Kanavanvaraus lataussuuntaan. /1/

GPRS-verkon on huolehdittava päätelaitteen datan siirron ajoitusennakosta johtuen päätelaitteiden eri etäisyyksistä tukiasemiin nähden. Päätelaitteen ottaessa yhteyttä PRACH-kanavalla, verkko saa tietoonsa päätelaitteen etäisyyden noin kilometrin tarkkuudella ja laskee tämän perusteella ajoitusennakon. Laskelma lähetetään takaisin päätelaitteelle kanavanvarausilmoituksen mukana. Toinen tapa tehdä sama on, että päätelaite lähettää pusrkeen verkkoon, jonka avulla sitten lasketaan ajoitusennakko. /12./

3.4 EDGE

GPRS-verkon tavoin tavallinen GSM-päätelaite ei toimi EDGE-verkossa, vaan vaatii sitä tukevan laitteen. Muutoin minkäänlaisia rakenteellisia muutoksia ei verkkoon tarvita, vaan radiotien modulaation muuttaminen riittää siten, että aikavälissä voidaan siirtää kolminkertainen bittimäärä. Siinä missä GSM käyttää GMSK-modulaatiota on EDGE-tekniikassa käytössä 8PSK-modulaatiota. GMSK-modulaatiossa siirretään yksi bitti symbolia kohden, kun taas 8PSK siirtää kolme bittiä symbolissa, koska symboli voi olla yhdessä kahdeksasta mahdollisesta tilasta. /1; 12./

GSM- ja EDGE-liikenteen purske on ulkonäöllisesti pysynyt samanlaisena, jotta niitä voisi kuljettaa samassa radiotiessä ja että se pysyisi muuttumattomana. Kuvassa 7 on normaali GSM-purske ja verrataan EDGE-tekniikan vaikutuksia siihen.



Kuva 8: GSM-verkon normaalipurske. /12/

Kuten kuvasta on luettavissa, sisältää normaalipurske 3 + 3 häntäbittiä, 57 + 57 databittiä, 1 + 1 tyyppibittiä, 26 opetusbittiä ja 8,25 bitin mittaisen suoja-ajan. Kun yksi symboli vastaa vain yhtä bittiä, saadaan purskeessa kuljetettua 114 databittiä, mutta EDGE:n tapauksessa yhdellä symbolilla esitetään kolmea bittiä, jolloin saadaan 342 databittiä aikaväliä kohden eli teoreettinen maksiminopeus on 68,4 kbit/s.

Normaalipurskeen tavoin muidenkin pursketyyppien kohdalla ajalliset rajoitukset pysyvät ennallaan, mutta datan määrä kolminkertaistuu. EDGE ei kuitenkaan tarjoa yhtä laajaa alueellista katetta kuin GPRS, sillä etäisyyden kasvaessa 8PSK vaatisi parempaa yhteyden laatua, mitä käytännössä ei ole.

EDGE mukautuu olosuhteisiin radiotiellä valiten nopeuden korjattavuuden tai läpimenon mukaan. Hyvissä olosuhteissa koodausta voidaan keventää lävistyksellä ja huonoissa lisätään redundanssia konvoluutikoodauksella. Jos radiotiellä on tilapäisiä häiriöitä, ei yhteys katkea vaan mukautuvan nopeuden säädön ansiosta siirtonopeus pienenee sopivammalle tasolle. /12./

GPRS-tekniikan tavoin myös EDGE on jaettu koodausten mukaan, joilla lisätään tai vähennetään virheenkorjausta sekä koodaussuhdetta yhteyden mukaan. MCS-koodeja (Modulation and Coding Scheme) on yhdeksän erilaista ja ne jaetaan vielä kolmeen ryhmään tai perheeseen A, B tai C, kuten taulukosta 2 näkee. Perheeseen jaottelun etuna on se, että virheellinen lähetys voidaan lähettää toisella koodauksella, kunhan se on samasta perheestä, toisin kuin GPRS-koodauksessa. Eli jos GPRS-sanoma on virheellinen ja koodattu CS-3-koodauksella, uudelleenlähetyksen on tapahduttava samalla koodauksella. Jos taas MCS-7-koodattu EDGE-sanoma on virheellinen, voidaan

uudelleenlähetyks hoitaa kahdella MCS-5-koodatulla purskeella tai neljällä MCS-2-koodatulla purskeella. /33./

Taulukko 2: EDGE-koodaus. /33/

Koodaus	Koodaus-suhde	Modulaatio	Datanopeus kbit/s	Perhe
MCS-1	0,53	GMSK	8,8	C
MCS-2	0,66	GMSK	11,2	B
MCS-3	0,8	GMSK	14,8	A
MCS-4	1	GMSK	17,6	C
MCS-5	0,37	8PSK	22,4	B
MCS-6	0,49	8PSK	29,6	A
MCS-7	0,76	8PSK	44,8	B
MCS-8	0,92	8PSK	54,4	A
MCS-9	1	8PSK	59,2	A

EDGE Evolution tekee huomattavia parannuksia latenssin ja viiveen suhteen muuttamalla lähetyksaikaväliä TTI (Transmission Time Interval) ja parantamalla protokollaa. Nykyään yhdessä aikavälissä lähetetään neljä pursketta TTI:n ollessa 20 ms, mutta lähettämällä neljä pursketta kahdessa rinnakkaisessa aikavälissä kahdella kantaosalla tai kahdessa yhdistetyssä aikavälissä yhdessä kantaosalla, saadaan TTI pienennettyä 10 ms.

Kaksoiskantaosalta puolestaan tuplaa käytetyn kaistanleveyden 200 kHz:stä 400kHz:iin ja yhdistämällä neljän aikavälin sijasta viisi yhdelle kantaosalle saadaan siirtonopeudeksi noin 600 kbit/s. Käyttämällä kaksoiskantaosalta ja valitsemalla modulaatioksi 16QAM-modulaatio tai 32QAM-modulaatio saadaan yhden aikavälin teoreettiseksi maksimiksi 98,4 kbit/s eli latausnopeudeksi saadaan noin 1 Mbit/s. Suurempi symbolinopeus mahdollistaa nopeamman bittinopeuden lähetyssuuntaan, koska kaksoiskantaosallot on standardoitu ainoastaan lataussuuntaan.

Yhteyden laatua saadaan parannettua käyttämällä kahta antennia. Sen avulla EDGE Evolution toimii laajemmalla alueella kuin alkuperäinen EDGE, koska heikompia signaaleja pystytään vastaanottamaan virheettää. Signaalitehoa saadaan pienennettyä 3 dB:n verran eli noin 50 %. Sillä saavutetaan joko suurempi solukoko tai pienempi lähetysteho. /18./

4 UMTS ja HSPA

Vaikka 3G:n piti olla alun perin kansainvälisesti kaikkialla yhteensopiva standardi, ei se sitä nykyisellään täysin ole. Tämä toki oli yksi sen perusteista, kun uutta puhelinjärjestelmää alettiin kehittää ITU:n toimesta 1990-luvulla. Projektin nimeksi annettiin Future Public Land Mobile Telephony System (FPLMTS), mutta koska nimi ei ollut markkinointimielessä kovin hyvä, nimettiin se pian uudelleen. Nykyään se tunnetaan nimellä IMT-2000.

Japani päätyi käyttämään WCDMA-tekniikkaa vuonna 1997 omassa projektissaan, mistä ETSI sitten päätti ottaa sen UMTS-radiotien ratkaisuksi seuraavana vuonna. Muitakin projekteja maailmalla oli, ja Yhdysvallat valitsivat CDMA-tekniikkaa käyttävän CDMA-2000:n omaksi verkokseen. UMTS jaetaan kolme eri tekniikkaa käyttäväksi verkoksi, joista yksi on Yhdysvalloissa ja Aasiassa käytössä oleva CDMA-2000 ja toinen WCDMA-tekniikkaa käyttävä UMTS. WCDMA voidaan vielä jakaa kahteen, FDD- ja TDD-tekniikkaan perustuviksi. Siitä tulee siis kolme eri tekniikkaa käyttävää UMTS-verkkoa. Täten maailmanlaajuinen yhtenäinen puhelinjärjestelmä ei toteutunut kolmannen sukupolven verkossa.

3GPP perustettiin vuonna 1999 kehittämään UMTS-verkon radorajapintaa UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network). Tässä työssä keskitytään TDD- ja FDD-tekniikkaa käyttävään UMTS-verkkoon. /1./

4.1 UMTS

GSM-verkon tavoin FDD-tekniikalla toteutettu UMTS jakaa erikseen lataus- ja lähetysuunnalle oman taajuusalueen. Näistä taajuuksista on siten operaattoreille myyty omat käytettävät taajuusalueet. UMTS-radiotaajuudet on jaettu FDD- ja TDD-tekniikoiden

kesken jo vuonna 1997, kun ERC (European Radio communications Committee) hyväksyi seuraavat alueet:

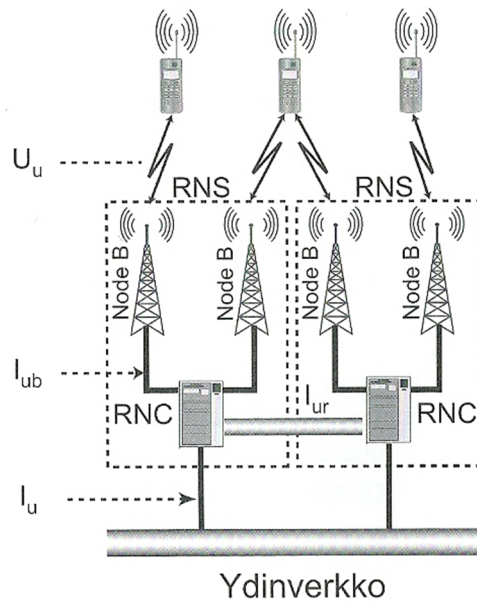
- 1900–1920 MHz TDD-tekniikka
- 1920–1980 MHz FDD-tekniikka lähetyssuuntaan
- 2010–2020 MHz lisenssivapaat TDD-tekniikat
- 2020–2025 MHz TDD-tekniikka
- 2110–2170 MHz FDD-tekniikka lataussuuntaan.

4.1.1 UTRAN-verkkoarkkitehtuuri

UTRAN on UMTS-verkon radorajapinta, ja se vastaa osittain GSM-verkon radorajapintaa, mutta laitteet ovat erilaisia ja niillä on siten omat nimityksensä. Päätelaitetta nimitetään UMTS-järjestelmässä nimellä UE (User Equipment), eikä se ota kantaa laitteen ominaisuuksiin tai käyttötapoihin. Se voi olla puhelin tai nettitikku. Sen pitää ainoastaan pystyä liittymään UMTS-verkkoon.

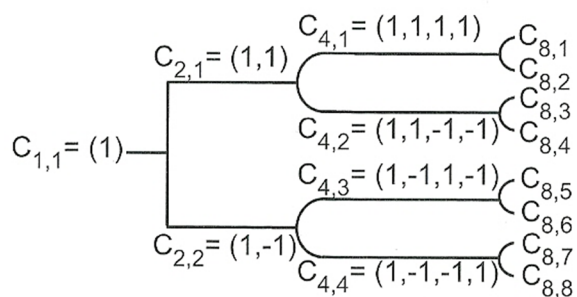
Päätelaitte voi olla yhteydessä joissain tilanteissa kahteen tukiasemaan samanaikaisesti. Tukiaseman eli Node B:n ja päätelaitteen välinen ilmarajapinta on nimeltään U_u . Tukiasemat ovat kytkettyinä tukiasemaohjaimeen RNC (Radio Network Controller) rajapinnan I_{ub} kautta. Ydinverkko on puolestaan kytkeytynyt tukiasema-alijärjestelmään RNS (Radio Network Subsystem) rajapinnan I_u kautta, kuten kuvasta 9 nähdään.

Ilmarajapinta U_m käyttää WCDMA-tekniikkaa ja sen etuina toisen sukupolven tekniikkaan on suurempi teoreettinen nopeus, joustavampi datansiirtokapasiteetti ja parempi taajuuksien uudelleenkäyttö, sillä saman operaattorin solussa kaikki käyttävät samaa taajuutta. Sanomat eivät mene sekaisin keskenään samasta taajuudesta huolimatta, sillä jokainen käyttää omaa kanavakoodia erottaakseen omat sanomansa. Kanavakoodit saadaan koodipuusta, kuten esimerkiksi kuvan 10 mukaisesta puusta. Koodit ovat ortogonaalisia, eivätkä interferoi keskenään sikäli, kun kaikki koodeilla levitettyt lähteet on keskenään synkronoitu.



Kuva 9: UTRAN-arkkitehtuuri. /12/

Koodien käytössä on kuitenkin pieniä rajoitteita. Jos esimerkiksi otetaan kuvassa 10 näkyvä koodi solmukohtasta $C_{4,2}$, ei sen alapuolella olevia oksia voida käyttää. Pelkkien lähetteen levitykseen käytettyjen lastusekvenssien avulla ei pysty erottamaan toisistaan toisia osapuolia, koska viereiset tukiasemat käyttävät samaa taajuutta ja siten lastusekvenssien kanssa syntyy päällekkäisyyksiä. Tämän estämiseksi tukiasema sekoittaa levityskoodin lataussuuntaan tukiasemakohtaisella näennäissatunnaisella bittisekvenssillä, jotta eri tukiasemat saadaan erottumaan toisistaan. Lähetys suunnassa tehdään sama, mutta sekoituksen tekee päätelaite.



Kuva 10: Kanavakoodit. /12/

Poiketen GSM-verkon solun vaihdosta, taajuutta ei muuteta vaihdettaessa toisen solun alueelle, koska kaikki käyttävät samaa taajuutta, vaan siirtyminen hoidetaan muuttamalla reititystä. Solun vaihtoja on kaksi erilaista tapaa.

Ensimmäinen, niin sanottu pehmeä solunvaihto, tehdään kahden eri tukiaseman kohdalla. Jos päätelaite on kahden tukiaseman kuuluvuuden leikkauspisteessä, kuulevat molemmat asemat puhelimen lähettämän tiedon. Päätelaite voisi siis liikennöidä toisen kanssa sellaisella lähetysteholla mikä aiheuttaisi *near/far*-ongelman toiselle. Ongelma ratkaistaan sillä, että päätelaite seuraa molempien tukiasemien tehon säätöjä, kunnes se poistuu leikkauskohdasta.

Toinen solunvaihto on saman tukiaseman kahden lähetyskeilan leikkauspisteessä ja sitä kutsutaan nimellä pehmeämpi solunvaihto. Tehon säätö ei tuota ongelmia tässä, mutta jotta päätelaite erottaisi tukiaseman keilat toisistaan, pitää tukiaseman lähettää data päätelaitteelle kahdella eri lastusekvenssillä. Kun päätelaite saa molempien sektorien lähetykset eri kanavilla, voi se päätellä, kumpaan keilan alaisuuteen se on siirtymässä.

4.1.2 UMTS-kanavat

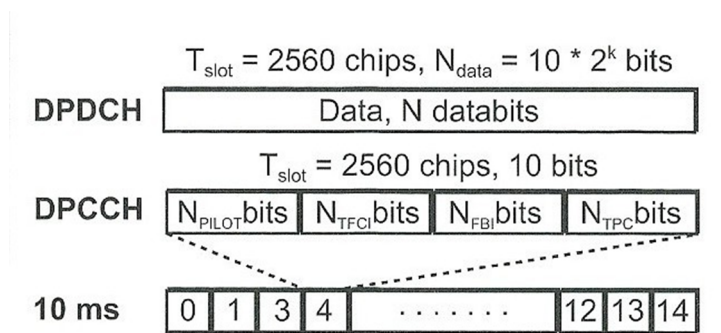
Kanavat UMTS-verkossa voidaan jakaa kolmeen hierarkiaryhmään sen perusteella, mitä niillä kuvataan. Alimpana hierarkiassa on fyysiset kanavat ja niillä kuvataan datan välitystä radiotiellä. Keskimmaisella MAC-tasolla (Medium Access Control) on kuljetuskanavat ja niillä kuvataan, miten data siirretään ja missä muodossa. Ylimpänä ovat loogiset kanavat, jotka kuvaavat siirrettävää dataa ja kanavat päätetään verkon RLC-kerrokselle (Radio Link Control).

Ylempien kerrosten ja päätelaitteiden välinen datansiirto ja merkinanto suoritetaan kuljetuskanavilla, ja ne voivat olla joko yleisiä kanavia tai omistettuja kanavia. DCH (Dedicated Channel) on ainoa omistettu kanava UTRAN-rajapinnalla ja sen tehtäviin kuuluu datan sekä merkinantojen välitys verkon ja käyttäjän välillä. Lähetettävä data tulee DHC-kanavalle ylemmistä kerroksista, ja se myös välittää niille saamansa datan.

Fyysisellä tasolla kuvattaessa DHC voi liikkua lataus- ja lähetysuuntaan joko DPDCH-kanavalla (Dedicated Physical Data Channel) dataa kuljettaessa tai DPCCH-kanavalla (Dedicated Physical Control Channel) merkinantoa kuljettaessa. Se kumpaan kanavaan siirrettävä data kuuluu, annetaan TFI-kentässä (Transport Format Indicator).

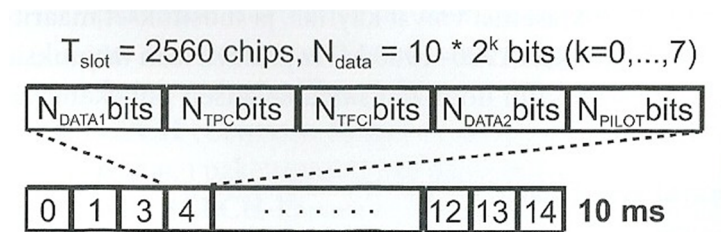
Lähetysuuntaan siirrettäessä DPDCH ja DPCCH kulkevat rinnakkain, mutta lataus- ja lähetysuuntaan DPCH (Dedicated Physical Channel) lomittaa ne samalla fyysisellä kanavalla. Ku-

vassa 11 on esitettyinä lähetyssuunnan datan ja merkinannon kehyshierarkia. Parametri k kuvaa DPDCH-kanavan aikavälissä olevien bittien lukumäärää, joka riippuu hajautuskertoimesta SF (Spreading Factor). Hajautuskertoimen ollessa 256 on sanomassa 10 bittiä ja sen ollessa 16 on sanomassa 160 bittiä. Aikavälin kesto on $625 \mu\text{s}$ eli se vastaa 1 tehonsäätöväliä. Ylempien kerroksien tarve määrää minkälainen muoto aikavälille tarvitaan.



Kuva 11: DCH lähetyssuuntaan. /12/

Ainoa lataussuuntaan oleva omistettu kanava on DPCH, joka lomittaa aikajako-kanavoinnilla sekä dataa että merkinantotietoa. Lataussuunnan DPCH-kanavan kehysrakenne on esitettyinä kuvassa 12.



Kuva 12: DCH lataussuuntaan. /12/

Muita kuljetuskanavia ja niihin liittyviä fyysisiä kanavia ovat:

- BCH (Broadcast Control Channel) on lataussuuntaan toimiva kanava, joka välittää verkkoa ja solua koskevia tietoja päätelaitteelle. Fyysisellä tasolla se liikkuu P-CCPCH-kanavalla (Primary Common Control Physical Channel) 30 kbit/s nopeudella sekä hajautuskoodilla 256 ja kaikki solun päätelaitteet seuraavat tätä kanavaa. Jotta BCH-kanava kuuluisi kaikille solussa oleville laitteille, se käyttää muita suurempaa lähetystehoa ja kiinteää pientä nopeutta.

- FACH (Forward Access Channel) vastaa merkinantojen välittämisestä solussa oleville laitteille. Kanavia voi olla useampikin samassa solussa, mutta ensisijainen kanava lähettää pienellä nopeudella, jotta kaikki solussa olevat laitteet osaisivat vastaanottaa sen lähettämät viestit. FACH-kanava toimii lataussuuntaan ja siirtyy fyysisen tason S-CCPCH-kanavalla (Secondary Common Control Physical Channel), joka vaihtaa nopeuttaan tarpeen mukaan, mutta käyttää kiinteää hajautusavainta.
- PCH (Paging Channel) on lataussuuntaan toimiva kanava, joka käyttää samaa fyysistä lähetyskanavaa FACH-kanavan kanssa. PCH-kanavan tehtävä on ilmoittaa saapuvasta puhelusta päätelaitteelle.
- RACH (Random Access Channel) toimii lähetysuuntaan tehtävänä muodostaa yhteys päätelaitteen ja verkon välille. Toiminta perustuu kilpavaraukseen, missä laite lähettää ensin 16 symbolin mittaisen sanoman käyttäen levitykseen 256 lastun hajautuskoodia. Tukiasema kuittaa sanomaan AICH-kanavalla (Acquisition Indication Channel), jolloin päätelaite lähettää sanoman, jonka pituus voi olla 10 tai 20 ms ja hajautuskoodi voi vaihdella 32 ja 256 lastun välillä. RACH siirtyy fyysisen kerroksen PRACH-kanavalla (Physical Random Access Channel).
- CPCH (Common Packet Channel) on lähetysuuntaan toimiva kanava, joka kuljettaa pakettimuotoista dataa päätelaitteelta verkkoon siirtäen datan fyysisen kerroksen PCPCH-kanavalla (Physical Common Packet Channel).
- DSCH (Downlink Shared Channel) siirtää pakettimuotoista dataa lataussuunnassa verkosta käyttäjälle ennalta varatulla aikavälillä. Hajautuskoodia vaihtamalla saadaan siirtonopeuksia vaihdeltua, sillä kanavaa voi käyttää useampi käyttäjä jaetusti. Tehonsäätöä varten käytetään päätelaitteelle tulevaa DPCCH-kanavaa. DSCH käyttää fyysisellä tasolla PDSCH-kanavaa (Physical Downlink Shared Channel).
- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) on vain TDD-tekniikkaa käyttävän UMTS-verkon lähetysuuntaan toimiva kanava, joka mahdollistaa yhteisen

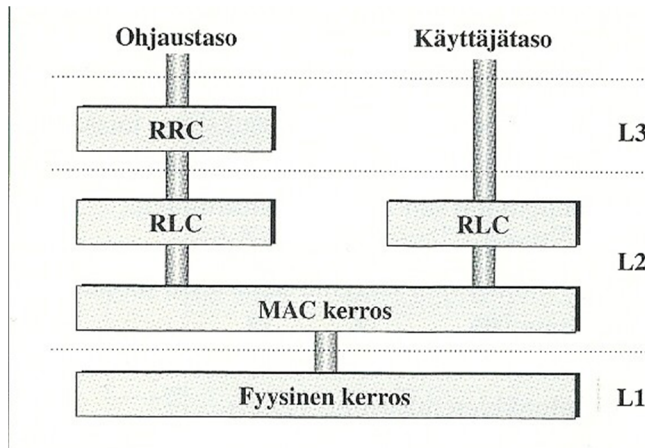
USCH-kanavan (Uplink Shared Channel) käytön pakettivälitteisessä liikenteessä. /1./

Fyysisellä tasolla merkinantoja käytetään seuraavilla kanavilla:

- CPICH (Common Pilot Channel) antaa mittausarvoja, joiden avulla päätelaite päättää solun vaihdosta.
- SCH (Synchronisation Channel) lähettää päätelaitteille 256 lastun mittaisen vakiokoodin synkronointiin P-CCPCH -kanavan jokaisen aikavälin alussa.
- AICH kuittaa hajasaantikanavalla tukiasemalta vastaanottamansa lähetteen.
- S-CCPCH kuljettaa FACH- ja DHC-kanavien dataa.
- PICH (Paging Indicator Channel) toimii yhdessä PCH-kanavan kanssa kuljettaen yhteyden muodostuspyyntöjä lataussuuntaan käyttäen kiinteää 30 kbit/s nopeutta. Päätelaitteet seuraavat määrävälein tämän kanavan liikennettä.
- CSICH (CPCH Status Indication Channel) toimittaa päätelaitteille tietoja CPCH-kanavan tilasta lataussuunnassa.
- CD/CA-ICH (Collision Detection/Channel Assignment Indication Channel) on lataussuunnassa toimiva kanava, joka ilmoittaa päätelaitteille, onko kanavanvaraus aktiivinen vai ei.

4.1.3 UMTS-protokollapino

UMTS-verkon protokollapino noudattaa OSI-kerrosarkkitehtuuria ja alimpana tasona on L1 eli fyysinen taso, L2 eli siirtoyhteystaso sekä ylimpänä L3 eli verkkotaso. Pinoon voidaan kytkeytyä kahta kautta, joko käyttäjätason kautta tasoon L2 tai hallintatason kautta tasoon L3, kuten kuvasta 13 nähdään.



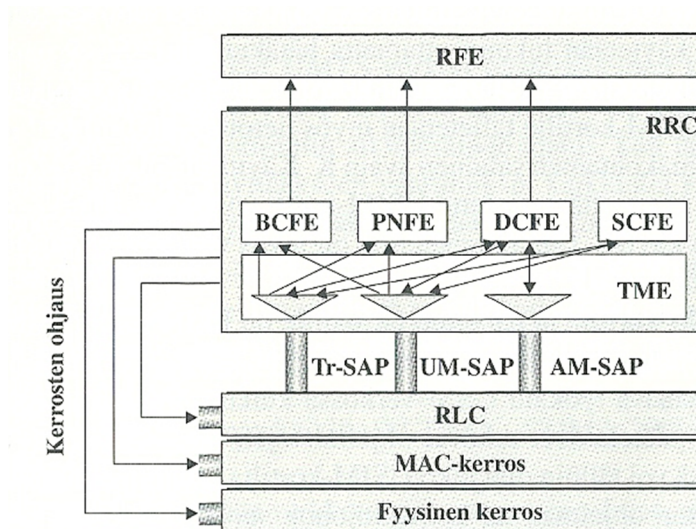
Kuva 13: UMTS-protokollapino. /1/

RRC-taso (Radio Resource Control) sijaitsee verkkotasolla tarjoten ohjaustoimintoja fyysisen tason ja MAC-tason välille. RRC koostuu seuraavanlaisista toimintayksiköistä:

- RFE (Routing Function Entity) tarjoaa reitityspalveluita ylempien tasojen sanomille päätelaitteiden ja UTRAN-rajapinnan puolella.
- BCFE (Broadcast Control Function Entity) huolehtii levitysviestien käsittelystä käyttäen alempien tasojen palveluja Tr-SAP- ja UM-SAP-rajapintojen kautta.
- PNFE (Paging and Notification Function Entity) ilmoittaa tulevista puheluista päätelaitteille, joilla ei ole olemassa RRC-tason yhteyttä. PNFE käyttää samoja rajapintoja alempien tasojen palvelujen käyttämiseen kuin BCFE.
- DCFE (Dedicated Control Function Entity) käsittelee kaikki yhdelle päätelaitteelle ominaiset toiminnot alempien kerrosten Tr-SAP-, UM-SAP- ja AM-SAP-rajapintojen kautta.
- SCFE (Shared Control Function Entity) varaa PDSCH- ja PUSCH-kanavat TDD-pohjaisissa verkoissa.
- TME (Transfer Mode Entity) hoitaa eri toimintojen väliset kytkennät.

Toimintojen keskinäiset suhteet näkyvät kuvassa 14. RRC tarjoaa ylemmille tasoille erilaisia palveluita kuten levitystien siirto sekä RRC-yhteyden muodostaminen, ylläpito

ja päättäminen UTRANin ja päätelaitteen välillä. Se myös varaa resursseja radiotieltä ja valitsee käytettävän solun ensimmäisen kirjautumisen aikana ja solun vaihdon yhteydessä.



Kuva 14: RRC-toimintamalli. /1/

MAC-tason tehtäviin kuuluu huolehtia loogisten kanavien kuvaamisesta fyysisille kanaville, valita oikea siirtotapa jokaiselle kuljetuskanavalle ja hallita päätelaitteiden datavirtojen priorisointia. Se myös kanavoi sanomaliikennettä MAC- ja RLC-tason sekä MAC-tason ja fyysisen tason välillä, salaa läpinäkyvän liikenteen sekä seuraa ja tilastoi liikennemääriä.

RLC-tason (Radio Link Control) toimintoihin kuuluu datavirtojen huolehtiminen siirtotien päätepisteiden välillä. Muihin tehtäviin kuuluu sovellusten sanomien paloittelu ja koaminen ja käyttäjätietojen siirtäminen kahden pisteen välillä.

4.2 HSPA

HSPA (High Speed Packet Access) on yhteisnimitys 3GPP:n julkaisemille lataus- ja lähetystekniikoille, joilla saatiin lisää siirtonopeutta molempiin suuntiin. HSDPA (High Speed Download Packet Access) julkaistiin Release 5:n myötä ja HSUPA (High Speed Upload Packet Access) julkaistiin Release 6:n myötä nimellä E-DCH (Enhanced – Uplink DCH). Tarvetta molempaan puoliseen nopeuden kasvatukseen voidaan perustella sovelluksilla,

joissa tarvitaan hyvä yhteys molempiin suuntiin. Tällaisia voivat olla esimerkiksi VoIP ja videopuhelut.

Molemmat tekniikat toimivat U_u -rajapinnalla, ja molemmissa tukiasema hallitsee liikennettä. HSUPA poikkeaa kuitenkin HSDPA-tekniikasta siten, että se on vapaa ohjaamaan verkossa oleville päätelaitteille siirtyvää dataa. Siirtotien kapasiteettia voidaan puolestaan soveltaa statistista aikajakokanavointia.

4.2.1 HSDPA

HSDPA ei tuo muutoksia UTRAN-arkkitehtuuriin vaan tuo radiotielle uusia kuljetuskanavia sekä fyysisiä kanavia. Yksi uusista kanavista on HS-DSCH (High Speed – Downlink Shared Channel), joka on lataussuuntaan toimiva datan siirtoon tarkoitettu kanava ja se siirtyy fyysisen tason HS-DPSCH-kanavalla (High Speed – Dedicated Physical Shared Channel). HS-DSCH poikkeaa hieman ominaisuuksiltaan DCH-kanavasta seuraavalla tavalla:

- Samalla aikajakokanavoidulla kanavalla siirretään jaetusti kaikkien käyttäjien data.
- Lähetysaikaväli TTI on saatu pienennettyä 80–10 ms:sta 2 ms:iin, jonka ansiosta järjestelmä pystyy reagoimaan päätelaitteiden pyyntöihin ja kapasiteetin varauksiin nopeammin, mikä taas vaatii nopeampaa dataliikenteen ohjausta, jotta verkko pystyy reagoimaan muutoksiin nopeammin.
- Yhteensä 15 rinnakkaista kanavaa voidaan käyttää jokaisessa 2 ms:n aikavälissä, käyttäen levitykseen kullakin kanavalla hajautusavainta levityskertoimella SF-16. Tällä voidaan 2 ms:n aikana lähettää 15:n eri käyttäjän dataa tai yksi käyttäjä voi saada koko aikavälin itselleen käyttäen 15:ta eri hajautusavainta.
- Nopea tehonsäätö ei sisälly lataussuuntaiseen järjestelmään, jolloin lähetteen sovitus siirtotielle vaatii valitsemaan tilanteeseen sopiva modulaatio, koodaus ja hajautus.

- Pääteläite liikennöi vain yhden tukiaseman kanssa kerrallaan, joten pehmeä solunvaihto ei ole mahdollista.
- QPSK-modulaatio on vaihdettu 16QAM-modulaatioon, jonka ansiosta nopeus on kaksinkertaistunut, sillä QPSK-modulaatiolla saadaan siirrettyä 2 bittiä symbolia kohden, kun taas 16QAM siirtää 4 bittiä symbolia kohden.
- H-ARQ (Hybrid – Automatic Repeat Request) palauttaa negatiivisen tai positiivisen kuittauksen lähettäjälle virheellisestä sanomasta 10 ms:n sisällä. Tämä on mahdollista siirtämällä kuittauksen käsittely verkosta tukiasemaan.
- Konvoluutiokoodauksen sijaan datan suojauksessa käytetään turbokoodausta, sillä H-ARQ mahdollistaa erilaisten turbokoodien muodostamisen uusintalähe-tyksissä. Siinä vastaanottaja voi yhdistää tallennettujen virheellisten sanomien turbokoodien käsittelyn ja löytää oikean datan.

Toinen uusi kanava on HS-SCCH (High Speed – Shared Control Channel), joka on lataussuunnan merkinantokanava. Se kulkee aina kaksi aikaväliä HS-DSCH-kanavaa edellä, jotta pääteläite osaa varautua ajoissa sille tulevaan dataan. Kolmas uusi kanava on lähetys-suunnan HS-PDCCH (High Speed – Physical Dedicated Control Channel), joka kuljettaa kuittauksia ja kanavan laatuparametreja, joiden avulla tukiasema pystyy laskemaan päätelaitteille lähetettävän tiedon määrän.

HSDPA:n latausnopeuteen vaikuttaa ennen kaikkea käytetty modulaatio, koodaus ja se, kuinka monta kanavaa käyttäjä saa käyttöönsä 2 ms aikavälistä. Taulukossa 3 on luokiteltuna näiden perusteella kategorioihin eri siirtonopeudet. Nopeudet ovat teoreettisia eivätkä vastaa todellisia nopeuksia. /12./

Taulukko 3: HSDPA-nopeudet. /12/

HS-DSCH - luokka	SF-16 kanavien lkm	TTI- väli	Modulointi	Huippunopeus Mbit/s
Category 1	5	3	QPSK & 16QAM	1,2
Category 2	5	3	QPSK & 16QAM	1,2
Category 3	5	2	QPSK & 16QAM	1,8
Category 4	5	2	QPSK & 16QAM	1,8
Category 5	5	1	QPSK & 16QAM	3,6
Category 6	5	1	QPSK & 16QAM	3,6
Category 7	10	1	QPSK & 16QAM	7,3
Category 8	10	1	QPSK & 16QAM	7,3
Category 9	15	1	QPSK & 16QAM	10,2
Category 10	12	1	QPSK & 16QAM	14,4
Category 11	5	2	QPSK	0,9
Category 12	5	1	QPSK	1,8

4.2.2 HSUPA

Myös HSUPA tuo mukanaan muutaman uuden kanavan. Yksi niistä on datan siirtoon tarkoitettu E-DCH-kuljetuskanava (Enhanced – Data Channel), joka käyttää siirtoon rinnakkain fyysisen tason E-DPDCH-kanavaa (Enhanced – Dedicated Physical Data Channel) datan siirtoon ja merkinantokanavaa E-DPCCH (Enhanced – Dedicated Control Data Channel) omalla hajautusavaimella siirrettävän datan tietojen ominaisuuksien kuvaamiseen. E-DPCCH-kanavan hajautusavain on 256 lastun mittainen ja merkinantosanoma siirretään 2 ms:n aikavälissä.

E-DCH-kanavan sanoman lähetystä edeltää 24 bitin jakojäännöstarkisteen laskeminen ja sen lisääminen MAC-kerroksen sanomaan sekä sen paloittelu bittilohkoiksi. Sanoma suojataan 1/3-turbokoodauksella, jonka jälkeen sijoitetaan kuljetuskanavan bitit vastaavalle fyysiselle kanavalle ja muodostetaan H-ARQ. Lopuksi sanoman bitit sijoitetaan fyysisille kanaville eri hajautusavaimilla, jonka jälkeen bitit voidaan levittää.

Muita uusia lataussuunnan kanavia on E-HICH (Enhanced – Hybrid ARQ Indication Channel), jota tukiasema käyttää kuittautustietojen välittämiseen päätelaitteille. E-AGCH (Enhanced – Absolute Grant Channel) on merkinantokanava, jolla tukiasema ilmoittaa päätelaitteille sallitun lähetystehon. Asteittaiseen päätelaitteiden tehonsäätöön tukiasema käyttää E-RGCH-kanavaa (Enhanced – Relative Grant Channel).

Toisin kuin HSDPA, jossa pehmeä solunvaihto ei ole mahdollista, niin HSUPA-tekniikassa se on mahdollista. Solunvaihdossa RNC lähettää kuittauksen päätelaitteelle useamman tukiaseman kautta, jolloin päätelaite lopettaa datan siirron. Tämän jälkeen RNC valitsee sopivamman tukiaseman, josta se ilmoittaa sekä tukiasemalle että päätelaitteelle, jonka jälkeen tukiasema ilmoittaa tehonsäädöstä käyttäen joko E-AGCH- tai E-RGCH-kanavaa. Myös HSUPA on jaettu eri kategorioihin, kuten taulukosta 4 nähdään. /12./

Taulukko 4: HSUPA-nopeudet. /12/

E-DHC luokka	E-DHC ha-jautuskoodien lkm	TTI ms	Bitit/jakso TTI = 10	Bitit/jakso TTI = 2	Siirtonopeus Mbit/s
Category 1	1	10	7296	-	0,76
Category 2	2	10 ja 2	14592	2919	1,46
Category 3	2	10	14592	-	1,46
Category 4	2	10 ja 2	20000	5837	2,92
Category 5	2	10	20000	-	2,00
Category 6	4	10 ja 2	20000	11520	5,76

4.2.3 HSPA Evolution

HSPA Evolutioniin tai HSPA+:aan on Release 7:n myötä tullut parannus, joka parantaa tehonkulutusta, pienentää latenssia ja kasvattaa datanopeuksia. Tehon kulutusta saadaan pienennettyä niin sanotulla epäjatkuvalle lähetykselle. Ennen tätä päivitystä päätelaite jatkoi fyysisen ohjauskanavan lähettämistä, vaikka datakanavaa ei lähetettykään. Ohjauskanavan lähetystä ja vastaanottoa pidettiin yllä, kunnes verkko määrää

vaihtamaan tilaa. Päivityksen myötä ohjauskanavan lähetys lopetetaan välittömästi, kun datakanavan lähetys lakkaa, ja sallii samalla lähettimen sammuttamisen.

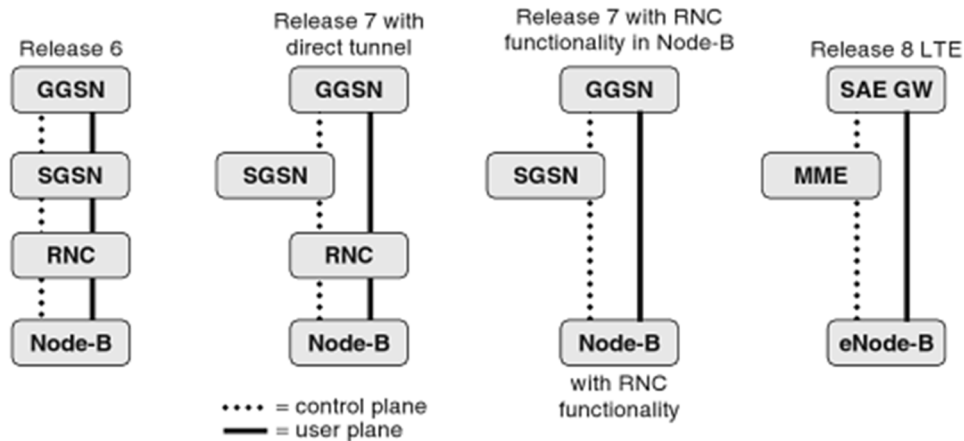
Lataussuuntaan on vastaavaa epäjatkuva vastaanotto, jossa päätelaitteen tarvitsee vain silloin tällöin tutkia, alkaako lataussuuntainen datan lähetys uudelleen. Esimerkkinä, kun ladataan nettisivu, sivun latauduttua päätelaite menee välittömästi epäjatkuvaan lataus- ja lähetystilaan.

HSPA+ kasvattaa lataussuunnan datanopeutta kasvattamalla kaistanleveyttä ja paremmalla modulaatiolla sekä käyttämällä useamman antennin tekniikkaa. Lataussuunnan modulaatioksi on mahdollista valita 64QAM, mutta se vaatii erittäin hyvän signaalikohinasuhteen. Tämä on mahdollista ainoastaan sisätiloissa makrosoluissa ja sillä voidaan saavuttaa jopa 21 Mbit/s latausnopeus.

Lataussuunnan MIMO pitää sisällään kaksi lähetysantennia tukiasemassa ja kaksi vastaanottoantennia päätelaitteessa ja sillä saadaan tuplattia datanopeus lähettämällä kaksi datavirtaa hyvillä kanavaolosuhteilla. MIMO-varmistustila käyttää vain yhtä datavirtaa poistamalla toisen kanavista, jos olosuhteet eivät ole suotuisat. Valinta yhden tai kahden datavirran käyttöön perustuu päätelaitteen palautteeseen. Release 8 mahdollistaa MIMO-antennitekniikan ja 64QAM-modulaation yhdistämisen ja täten saavuttaen 42 Mbit/s latausnopeuden.

Release 7 tuo lähetysuuntaan 16QAM-modulaation tuplaten lähetysnopeuden 11,5 Mbit/s. HSUPA ei pidä sisällään yhden käyttäjän MIMO-antennitekniikkaa, sillä se vaatisi päätelaitteeseen kahta tehonvahvistajaa ja siten se ei ole osa HSPA-evoluutiota.

Release 6:ssa on neljä verkkoelementtiä käyttäjä- ja ohjaustasossa: RNC, SGSN, GGSN ja tukiasema, mutta Release 7 tuo tähän muutoksia. Suuri muutos on matala-arkkitehtuurinen runkoverkko, jossa suoratunneli menetelmällä voidaan ohittaa SGSN-solmu sekä siirtämällä RNC:n toimintoja tukiasemaan, jolloin vain kaksi elementtiä on tarpeen kuten kuvassa 15. Nyt tukiasema hoitaa niin liikkuvuuden hallinnan, salauksen, uudelleenlähetyksen kuin tunnisteiden pakkauksen ja on yhtenäinen Release 8:n LTE-ratkaisun kanssa. Tällä saadaan vähennettyä latenssia huomattavasti sekä vähennettyä vaikutusta muihin tukiasemiin.



Kuva 15: HSPA-evoluutio kohti matala-arkkitehtuuria. /34/

4.2.4 HSPA Multicarrier

HSPA+ tuo paljon uudistuksia, mutta kaikista uudistuksista huolimatta käytössä on sama 5 MHz:n kaistanleveys. Release 8 tuo tähän lataussuuntaan muutoksen tuomalla kahdella 5 MHz:n kanta-aallolla toimivan DC-HSDPA-tekniikan nostamalla latausnopeuden 42,2 Mbit/s 64QAM-modulaatiolla. Release 9 puolestaan tuo DC-HSUPA-tekniikan lähetyssuuntaan sekä mahdollistaa MIMO-antennitekniikan ja DC-HSDPA-tekniikan yhdistämisen 64QAM-modulaatioon tuplata latausnopeuden 84,4 Mbit/s. Useamman aallon MC-HSDPA tulee vasta Release 10:n myötä tarjoten kolmen ja neljän kanta-aallon yhdistämistä MIMO-antennitekniikan kanssa ja Release 11 lisää kanta-aaltojen lukumäärää kuuteen ja kahdeksaan kanta-aaltoon ja niiden yhdistämisen MIMO-antennitekniikan kanssa. HSPA-tekniikan evoluutio on nähtävissä kuvassa 16 ja liitteessä 1 on esitettyä HSPA+ ja MC-HSDPA-tekniikoiden tuomat lisänopeudet. /34; 35./

DC-HSPA perustuu ensisijaiseen ja toissijaiseen kanta-aaltoon ja kuten yhden kanta-aallon tapauksessa ensisijainen kanta-aalto tarjoaa päätelaitteelle kaikki lataussuunnan fyysiset kanavat datansiirtoon kuin myös kanavat lähetyssuuntaiseen datansiirtoon.

Ensisijainen kanta-aalto siirtää seuraavat kanavat: fyysisen tason datansiirtokanavan (HS-PDSCH), vastaavan merkinantokanavan (HS-SCCH), jakeittaisen Fractional DPCH-kanavan (F-DPCH) helpottamaan lähetyssuunnan tehonsäätöä sekä E-DCH-kanavaan liittyvät kuittauksen ilmaisun kanavan (E-HICH), merkinantokanavan (E-AGCH) ja asteittaiseen tehonsäädön kanavan (E-RGCH). DC-HSDPA-tekniikassa toissijainen kanta-aalto

siirtää toisen parin HS-PDSCH sekä HS-SCCH kanavia lataussuuntaan ja DC-HSUPA-tekniikan tapauksessa toissijainen kantaalto siirtää myös kaksoiskappaleet lähetyssuunnan fyysisistä kanavista tukemaan toista lähetyssuunnan kantaaltoa. Tämä johtaa siihen, että kahta lähetyssuunnan kantaaltoa voidaan tukea vain, jos tuetaan samalla kahta lataussuunnan kantaaltoa.

3GPP Release 7

UE can receive and transmit on single 5 MHz carrier



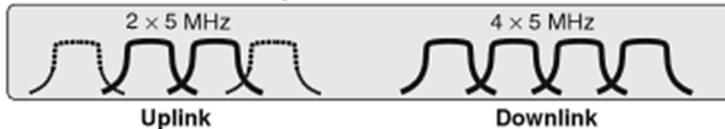
3GPP Releases 8-9

UE can receive and transmit on two adjacent 5 MHz carriers



3GPP Release 10

UE can receive on four adjacent 5 MHz carrier

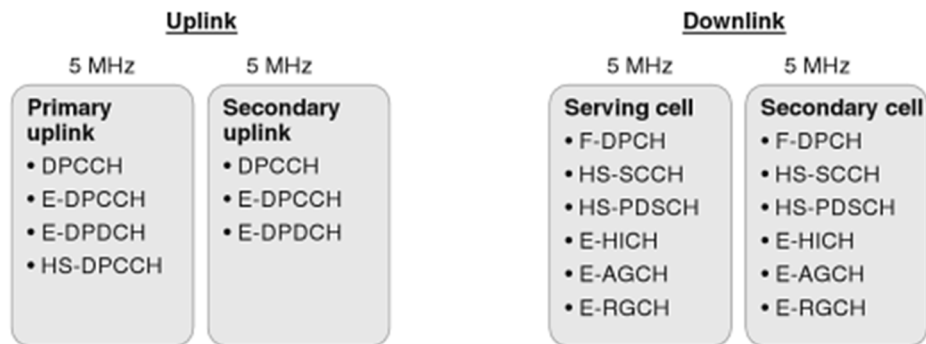


Kuva 16: HSPA Multicarrier -evoluutio. /34/

DC-HSDPA-tekniikan osalta päätelaite arvio kanavan laadun CQI-arvon (Channel Quality Indicator) avulla molemmille kantaalloille erikseen ja toimittaa lähetyssuuntaan HARQ-kuittaukset molemmille lataussuunnan kantaalloille erikseen. Kaikki tämä lähetyssuunnan fyysisen tason palaute kuljetetaan yhdellä HS-DPCCH-kanavalla lataussuunnan ensisijaisella taajuudella mahdollistaen sen, että DC-HSDPA voi toimia yhdellä lataussuunnan kantaallolla. DC-HSDPA tarvitsee kaksi CQI-arvoa ja kaksi kuittausta lähetyssuuntaan. Jos MIMO on yhdistetty tähän, niin silloin tarvitaan sekä neljä CQI-arvoa että kuittausta. MIMO ja neljä kantaaltoa vaativat kahdeksan CQI-arvoa ja kuittausta.

DC-HSUPA-tekniikan tapauksessa lataussuunnan E-DCH-kanavan fyysinen ohjauskanava (E-DPCCH) sekä datakanava (E-DPDCH) voidaan molemmat jakaa molemmille kantaalloille. Jaetut fyysiset kanavat on nähtävissä kuvassa 17. Kaikki fyysiset kanavat voidaan siirtää molemmilla taajuuksilla HS-DPCCH-kanavaa lukuun ottamatta, joka siir-

tyy ainoastaan ensisijaisella taajuudella. Kumpi tahansa kantaalto voi tosin olla ensisijainen tai toissijainen.



Kuva 17: Fyysisten kanavien sijainti DC-HSPA-tekniikassa. /34/

Lataussuunnan tehonsäädöt toimivat itsenäisesti jokaiselle kantaallolle johtuen nopeasta häipymisestä, joka voi olla eri 5 MHz:n siirtymässä samalla taajuusalueella kuin myös siitä, että kahden kantaallon tehotasot voivat olla erilaiset. Tukiasema arvio erikseen jokaisen lähetyssuunnan kantaallon signaalinhäiriösuhteen SIR-arvon (Signal-to-Interference Ration) lataussuunnan DPCCH-kanavalla. Tehonsäätökomento kuljetetaan F-DPCH-kanavalla vastaavalla lataussuunnan kantaallolla. Toissijainen taajuus häivytetään ja korkeampaa lähetystehoä käytetään toissijaiselle taajuudelle enemmän kuin ensisijaiselle taajuudelle.

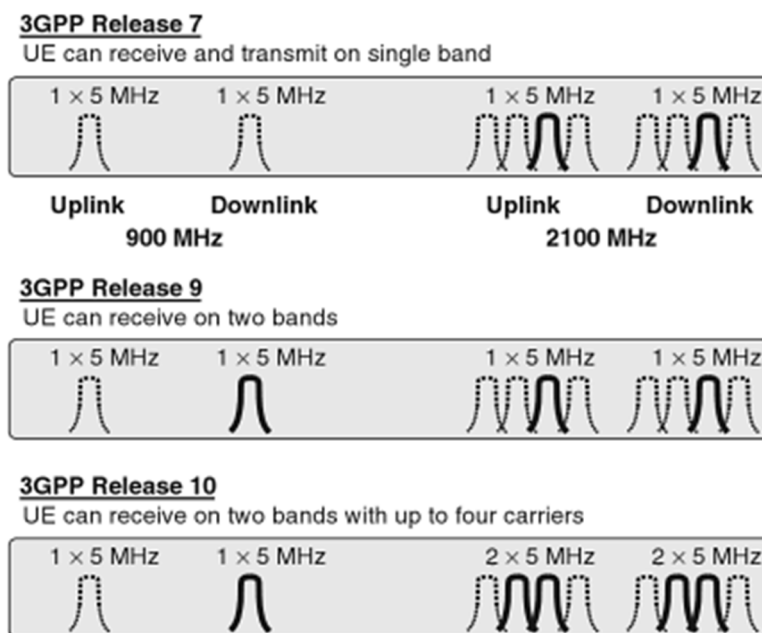
Kaikki muut fyysiset kanavat, kuten yhteinen pilottikanava (P-CPICH), synkronointikanavat (SCH), hajasaantikanava (AICH), käyttäjähaun ilmaisinkanava (PICH) sekä Broadcast-kanava (P-BCH) voidaan lähettää molemmilla taajuuksilla. Näin mahdollistetaan päätelaitteiden toiminta rinnakkain samoilla kantaalloilla uusien MC-HSPA-päätelaitteiden kanssa. DC-HSPA-tekniikassa on myös mahdollista sitoa toissijainen kantaalto ainoastaan DC-HSPA-tekniikan käyttöön, jolloin se siirtää ainoastaan P-CPICH-kanavaa kanavan arviointia varten, muttei muita yhteisiä kanavia.

Pakettien ajoitus tapahtuu yhdessä molempien tai useamman kantaallon kanssa, ja se saa CQI-raportteja kaikilta lataussuunnan kantaalloilta. Ajoitus perustuu useisiin arvoihin, kuten CQI-arvoihin, QoS-prioriteetteihin ja puskurissa olevan datan määrään tarkoituksena maksimoida käyttäjän datanopeus ja järjestelmän tehokkuus. Linkin muuttaminen ja L1-uudelleenlähetykset (HARQ) tehdään kullakin kantaallolla erikseen.

samalla taajuudella kuin ensimmäinenkin lähetys. DC-HSPA ei tee muutoksia RLC-tasolla, sillä datavirta jaetaan kahdelle kanta-aallolle MAC-tasolla.

4.2.5 Dual band HSDPA

Release 9 tuo tullessaan mahdollisuuden käyttää kahta eri taajuutta samanaikaisesti latauksessa. Useimmilla operaattoreilla on joka tapauksessa vähintään kaksi taajuus- aluetta käytössään. Euroopassa ja Aasiassa voidaan käyttää taajuusaluetta I (2100 MHz) ja taajuusaluetta VIII (900 MHz), Amerikassa taajuusalueita II (1900 MHz) ja IV (1700/2100 MHz) voidaan käyttää yhdessä sekä joissain Aasian markkina-alueilla taa- juusalueet I ja V (850 MHz). Release 10 mahdollistaa useamman taajuusalueen yhdis- tämisen näiden kesken. Evoluutio kohti dual band HSDPA -tekniikkaa on nähtävissä kuvassa 18.



Kuva 18: HSDPA multiband -evoluutio. /34/

Dual band HSDPA on kohtalaisen helppo toimenpide radioverkoille, joissa kaksi taa- juusaluetta on jo valmiiksi asetettuna paikalle, mutta päätelaitteille asettaminen onkin sitten haastavampaa. Vaikka useimmat päätelaitteet toimivatkin jo vähintään kahdella eri taajuudella, niin niitä käytetään kuitenkin eri aikaan. Dual band HSDPA -tekniikan tapauksessa päätelaitteen on vastaanotettava kaksi taajuusaluetta samanaikaisesti, mikä monimutkaistaa päätelaitteen puolella, sillä vastaanottimen on käytettävä molem-

pia taajuuksia samanaikaisesti riippumatta siitä, mitä taajuusalueita päätelaite käyttää lähettämiseen.

Matalammalla taajuudella on parempi etenemismatka, mikä tekee kahden eri taajuuden kuuluvuusalueista erikokoisia. Ajoitus voidaan tehdä kahden taajuusalueen välillä dynaamisesti 2 ms:n päätelmillä, jotka perustuvat päätelaitteelta tulleisiin CQI-arvoihin, jotka ottavat suoraan kohinan sekä häiriön huomioon.

Kahden taajuusalueen HSPA on määritetty ainoastaan lataussuuntaan ja lähetyssuunnan liikenne hoidetaan käyttäen vain yhtä taajuusalueita. RNC valitsee kahdesta käytettävästä taajuusalueesta lähetyssuunnan taajuusalueen. Lähetyssuunnan kantoaalloille voidaan joutua suorittamaan taajuuksien välinen kanavanvaihto siinä tapauksessa, että lataussuunnan taajuus toimii korkeammalla taajuudella ja päätelaitteelta loppuu kuuluvuusalue. Tällöin voidaan lataussuunnan siirto luovuttaa matalammalle taajuusalueelle. /34./

5 LTE ja LTE Advanced

Vuonna 2005 3GPP sai tehtäväkseen kehittää seuraavan sukupolven puhelinjärjestelmää, joka perustuisi pelkästään pakettikytkentäiseen verkkoon. Kehitystä tehtiin kahdessa eri LTE-projektissa kehittäen uutta ilmarajapintaa ja radioverkkoa. Vähän myöhemmin uuden runkoverkon kehitykseen keskittyi SAE (System Architecture Evolution), joka kuitenkin yhdistettiin myöhemmin LTE-verkon kanssa EPS-projektiksi (Evolved Packet System). Kuitenkin LTE oli jo tunnetumpi nimitys, joten se jäi lopulliseksi nimeksi.

Pakettikytkentäisen verkon lisäksi tilan vaihtoa nopeutettiin siten, että lepotilasta täysin kytkettyyn tilaan kestää alle 100 ms. Käyttäjaliikenteen viivettä vähennettiin huomattavasti, kun DSL-verkossa se on 15 ms ja HSPA-verkossa 50 ms, niin LTE-ilmarajapinnassa se on vain 5 ms.

LTE-verkossa päätelaitteella on IP-osoite koko ajan, joten sen ei tarvitse odottaa sen saamista ennen kuin se pääsee Internetiin. IP-osoite annetaan vain, kun kytkeydytään

ensimmäisen kerran verkkoon tai uudelleen yhteyden katkettua. Antennitekniikkana käytetään MIMO-antenneja ja tukee sekä TDD- että FDD-tekniikkaa.

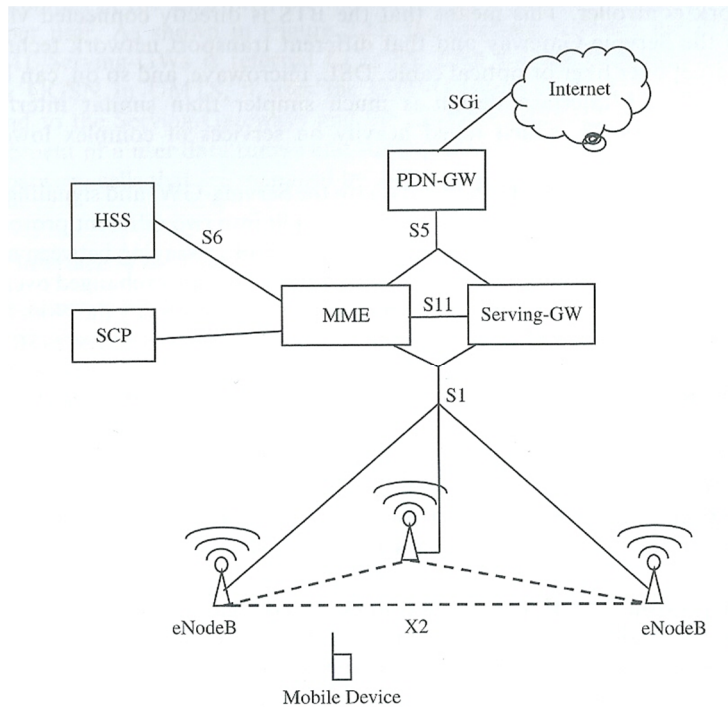
LTE ei vielä ole 4G-tekniikkaa, vaan siitä jatkokehitetty LTE-Advanced vasta täyttää IMT-Advanced määrittämät. LTE-Advanced on taaksepäin yhteensopiva LTE:n kanssa, joten verkon arkkitehtuuri, kanavat ja protokollapino pysyvät samana. Muutosta tulee kanavien kaistanleveyden kasvulla ja antennien lukumäärän lisäyksellä MIMO:ssa.

5.1 E-UTRAN

LTE-verkon radorajapinta on nimeltään E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network), ja sen rakenne on yksinkertaisempi kuin UMTS-verkon UTRAN. E-UTRAN -rajapinnassa äly on siirretty tukiasemiin, joihin on siirretty osa RNC:n toiminnoista. Tukiasema eli eNodeB (Enhanced NodeB) huolehtii liikenteen hallinnasta itsenäisesti ja varmistaa palvelun laadun. Solunvaihto tapahtuu tukiasemien kesken käyttäen niiden välistä X2-rajapintaa, joka kuitenkin ei ole pakollinen, vaan solunvaihto voidaan suorittaa myös SAE-verkon kautta. Yhteys tukiaseman ja SAE-verkon välillä, samoin kuin MME:n (Mobility Management Entity) välillä, hoidetaan S1-rajapinnan kautta käyttäen IP-protokollaa. S1 voidaan jakaa kahteen, S1-C (S1-Control), joka siirtää merkinantoa päätelaitteen ja MME:n välillä ja S1-U (S1-User), joka puolestaan siirtää dataa päätelaitteen ja SAE-verkon välillä. Kuvassa 19 on esitettyä LTE:n keskeiset laitteet ja rajapinnat.

MME ja SAE suorittavat yhdessä samoja toimintoja kuin SGSN UMTS-verkossa. MME:n toimintoihin kuuluu käyttäjien liikkuvuuden ja istunnon hallinta, mikä tarkoittaa käyttäjän todentamista ja solunvaihdon avustamista. Muita tehtäviä ovat päätelaitteiden seuranta ja yhteydenpito muihin verkkoihin, kuten GSM:ään ja UMTS:iin.

SAE pitää sisällään yhden tai kaksi laitetta, jotka ovat S-GW (Serving Gateway) ja P-GW (Packet Data Network Gateway). S-GW reitittää ja siirtää datan P-GW-yhdyskäytävälle, joka puolestaan siirtää ne Internetiin SGI-rajapinnan kautta. P-GW-käytävän tehtäviin kuuluu myös IP-osoitteiden jakaminen päätelaitteille. S-GW-käytävän ja P-GW-käytävän välinen rajapinta on nimeltään S5- ja S-GW-käytävän ja MME:n välinen puolestaan S11 SAE:n ollessa kaksi erillistä laitetta.



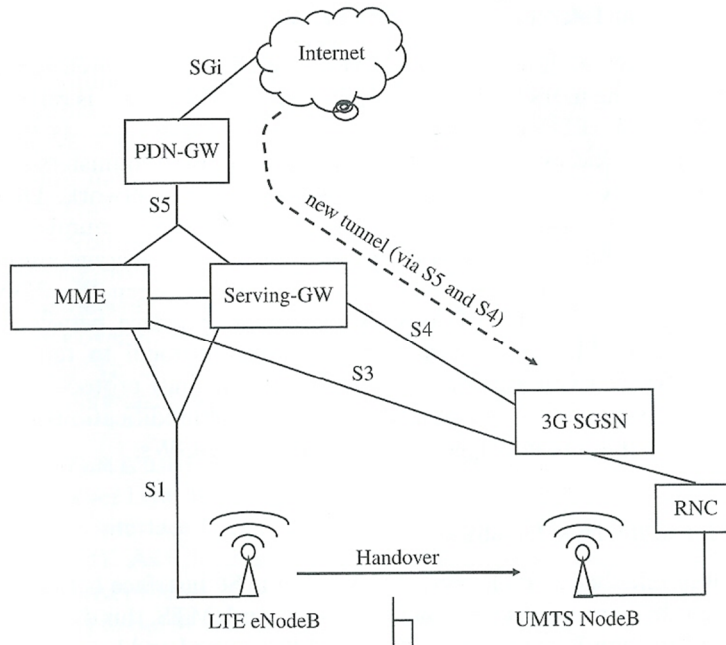
Kuva 19: LTE-arkkitehtuuri. /29/

Kotirekisteriä vastaava laite on HSS (Home Subscriber Server), joka on paranneltu versio HLR-rekisteristä. Se pitää sisällään tilaajan tiedot GSM-, GPRS-, UMTS- ja LTE-verkoista saman operaattorin sisällä. SCP (Service Control Point) puolestaan huolehtii laskutuksesta.

Solunvaihto LTE-verkon ja UMTS-verkon tai GSM-verkon kanssa hoidetaan SGSN-solmun kautta kuvan 20 mukaisesti. Päätelaitteen siirtyessä toiseen verkkoon se ilmoittaa tukiasemalle uudesta verkosta. Tämä puolestaan välittää tiedot MME:lle, joka ottaa yhteyttä uuden verkon SGSN-solmuun S3-rajapintaa pitkin. Kun kaikki tarvittavat valmistelut solunvaihtoa varten on tehty, lähettää MME solunvaihtokäskyn tukiaseman kautta päätelaitteelle. Solunvaihdon jälkeen datayhteys tukiaseman ja S-GW:n välillä reititetään uudelleen SGSN-solmulle, jolle MME luovuttaa tilaajanhallinnan. S-GW pysyy kuitenkin edelleen yhteydessä SGSN-solmuun S4-rajapinnan kautta. /29; 31./

Lataussuunnassa LTE käyttää ilmarajapinnassa OFDMA-tekniikkaa (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), joka yhden kanta-aallon sijaan lähettää useita kaapekaistaisia kanta-aaltoja rinnakkain riippuen käytetystä kaistanleveydestä. Sen etuna on, että rinnakkaisten kanta-aaltojen ei tarvitse olla siirtonopeudeltaan nopeita ja se puolestaan auttaa pienentämään monitiehäipymistä, joka johtuu signaalien viipymises-

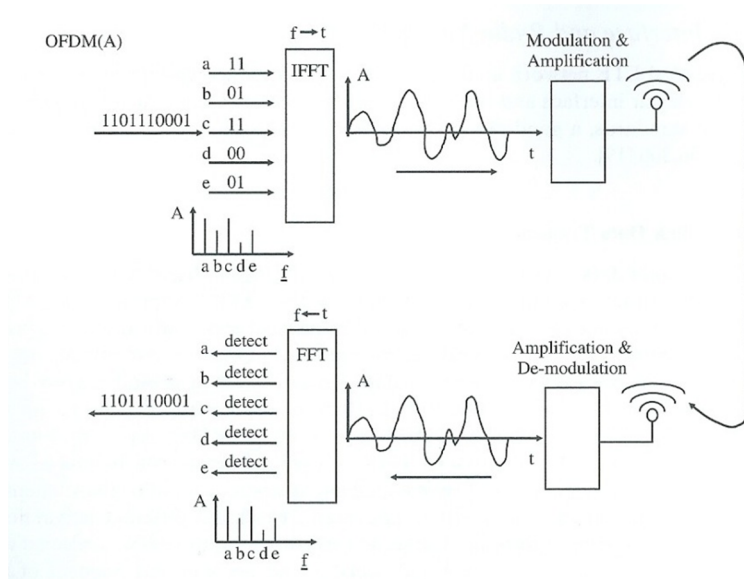
tä matkalla ja saapumista siten eri aikaan perille. Jokainen kantoaalto voidaan lähettää eri taajuudella sekä moduloida erikseen käyttäen QPSK-, 16QAM- tai 64QAM-modulaatiota.



Kuva 20: LTE- ja UMTS-solunvaihto. /29/

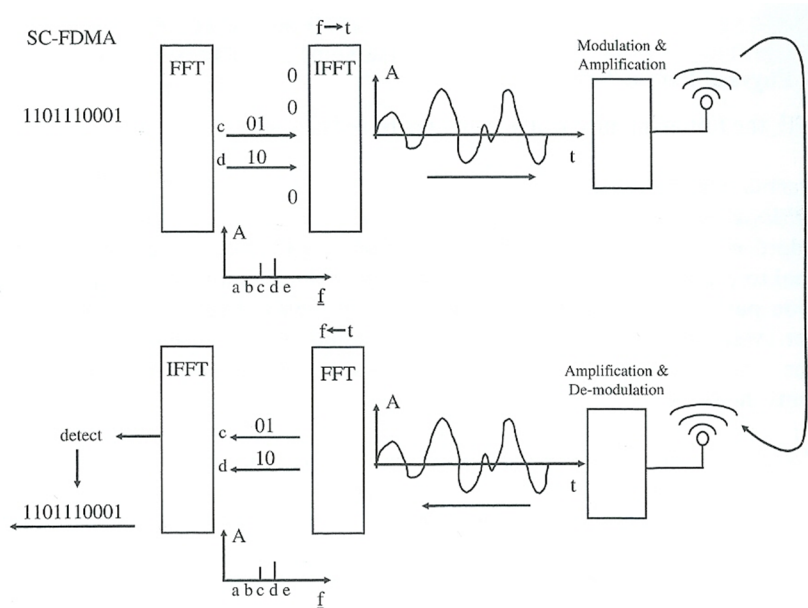
Lataussuunnassa jokainen kantoaalto käy läpi käänteisen Fourier-muunnoksen IFFT (Inverse Fast Fourier Transformation), josta saatu signaali vielä moduloidaan ja vahvistetaan ennen lähetystä, jotta se pystytään vastaanottamaan. Vastaanotossa puolestaan toimitaan päinvastoin, ensin demoduloidaan ja vahvistetaan signaalia, jonka tulos puolestaan viedään nopean Fourier-muunnoksen FFT (Fast Fourier Transformation) läpi. Kuvassa 21 on lataussuunnan OFDMA-periaate.

Lähetysuuntaan käytetään muista verkoista poiketen eri tekniikka, lähetysuunnassa on käytössä SC-FDMA-tekniikka (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access). Koska OFDMA-tekniikassa on korkea tehonkulutus, jota kuvataan PAPR-arvolla (Peak to Average Power) johtuen useasta rinnakkaisesta kantoaallostosta, täytyi päätelaitteen virrankulutuksen pienentämiseksi ottaa käyttöön vähemmän tehoa käyttävä tekniikka. SF-FDMA perustuu kuitenkin OFDMA-tekniikkaan, mutta nimestään huolimatta sekin lähettää useita kantoaaltoja.



Kuva 21: OFDMA-modulaatio lataussuunnassa. /29/

Lähetysuunnassa toimitaan lähes samalla tavalla kuin lataussuunnassakin. Erona kuitenkin on, että kantaallot käyvät ensin läpi FFT-muunnoksen, josta saatu tulos käy vielä IFFT-muunnoksen läpi. Vastaanotossa puolestaan signaali viedään FFT-muunnoksen läpi ja saatu tulos lopulta IFFT-muunnoksen läpi. Kuvassa 22 on puolestaan esitettyä lähetysuunnan SC-FDMA-tekniikan periaate. /29./

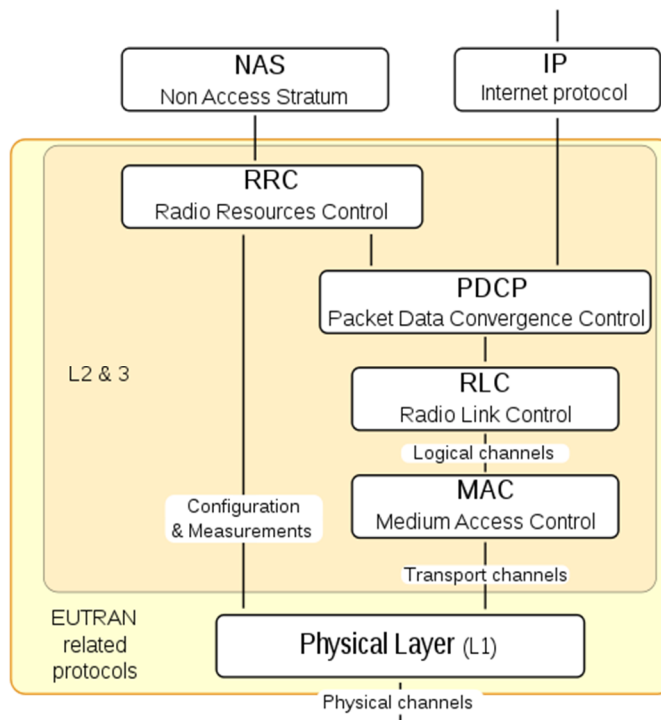


Kuva 22: SC-FDMA-modulaatio lähetysuuntaan. /29/

5.2 LTE-kanavat ja protokollapino

UMTS-verkon tavoin LTE-verkossa on kolme tasoa, missä L1 on fyysinen taso, L2 on siirtoyhteystaso ja L3 on verkkotaso. Fyysinen taso siirtää tietoja ilmarajapinnan ja MAC-tason välillä, huolehtii yhteyden sovittamisesta, tehon ohjauksesta ja solun etsimisestä synkronoinnin ja solunvaihdon yhteydessä. Se myös huolehtii mittauksista LTE:n sisällä ja muihin järjestelmiin ja siirtää ne RRC-tasoon. Kuvassa 23 on esitettyä LTE:n protokollapino.

MAC-alitaso tarjoaa loogisia kanavia RLC-alitasolle ja kanavoi niitä fyysisen tason kanaviksi. Se myös hoitaa virheenkorjauksen käyttäen H-ARQ-menetelmää sekä priorisoi loogisia kanavia päätelaitteen välille dynaamisen ajoituksen avulla.



Kuva 23: LTE-protokollapino. /30/

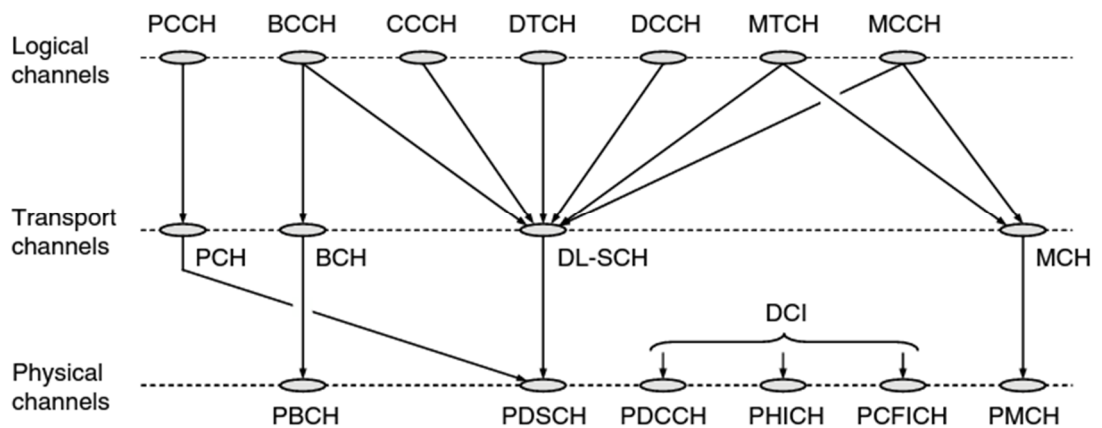
RLC-taso kuljettaa PDCP:n (Packet Data Convergence Control) protokollan datayksiköitä PDU (Protocol Data Unit), ja se voi toimia kolmessa eri tilassa riippuen tarjotusta luotettavuudesta. Tilasta riippuen se voi tarjota ARQ-virheenkorjausta, PDU:n segmentointia tai ketjuttamista, sisäsekvenssin uudelleentilausta sekä havaita duplikaatteja.

PDCP tarjoaa RRC-tasolle sen datan salausta ja eheyden takaamista, kun taas IP-tasolle se tarjoaa IP-pakettien kuljettamista ROHC (Robust Header Compression) -otsikon pakkausta, salausta ja riippuen RLC-tason sisäsekvenssin tilasta se voi havaita duplikaatteja sekä solunvaihdon yhteydessä lähettää uudelleen omia palveludatayksiköitä SDU (Service Data Unit).

RRC huolehtii AS-tason (Access Stratum) liittyvistä levitetystä järjestelmätiedoista ja NAS-viestien (Non-Access Stratum) kuljettamisesta, tilaajan hausta, RRC-yhteyden luomisesta ja vapauttamisesta ja salaussavaimen hallinnasta.

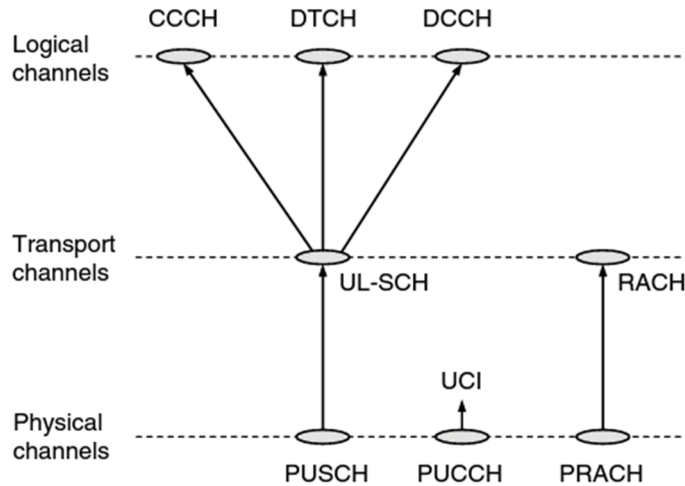
NAS on protokolla päätelaitteen ja MME:n välillä verkon sisäpuolella. Muiden välillä se suorittaa päätelaitteiden todentamista, turvatarkastusta ja tuottaa osan paging-viesteistä. /30./

LTE:n kanavat voidaan jakaa kolmeen eri tasoon. Näitä ovat fyysisen tason kanavat, kuljetustason kanavat ja loogiset kanavat.



Kuva 24: LTE:n kanavat lataussuuntaan. /31/

Kanavat voidaan jakaa vielä lataussuunnan kanaviin, kuten kuvassa 24, ja lähetyssuunnan kanaviin, kuten kuvassa 25.



Kuva 25: LTE:n kanavat lähetyssuuntaan. /31/

MAC-taso tarjoaa loogisia kanavia RRC-tasolle, ja ne on kuvattu niiden kuljettamien tietojen mukaan ohjauskanaviksi, sillä ne kuljettavat ohjaus- ja asetustietoja, joiden avulla LTE-verkko toimii. Loogiset kanavat ovat seuraavat:

- BCCH-kanava (Broadcast Control Channel) lähettää solun kaikille päätelaitteille verkon järjestelmätietoja, joiden avulla päätelaite löytää verkon asetukset ja tietoja siitä kuinka liittyä verkkoon. /29; 31./
- PCCH-kanava (Paging Control Channel) etsii päätelaitteita solutasolta, joiden sijainti ei ole verkon tiedossa. Tästä syystä hakuviestiä on lähetettävä useassa solussa.
- CCCH-kanava (Common Control Channel) lähettää ohjaustietoja yhdessä ha-jasaannin kanssa.
- DCCH-kanava (Dedicated Control Channel) lähettää suunnattuja ohjaustietoja tukiasemalta päätelaitteelle tai päätelaitteelta tukiasemalle, kuten asetustietoja solunvaihdon yhteydessä.
- MCCH-kanava (Multicast Control Channel) lähettää ohjaustietoja, joita tarvitaan vastaanottamaan MTCH-kanava.
- MTCH-kanavaa (Multicast Traffic Channel) käytetään MBMS-palvelun (Multimedia Broadcast/Multicast Service) lähetykseen lataussuunnassa.

- DTCH-kanava (Dedicated Traffic Channel) käytetään käyttäjän datan lähetykseen molempiin suuntiin. Tätä kanavatyyppiä käytetään kaikkiin lähetyssuunnan ja ei-MBSFN (Multicast-Broadcast Single Frequency Network) lataussuunnan käyttäjän datan lähetyksiin.

LTE-verkon loogiset kanavat muistuttavat UMTS-verkon ja HSPA-tekniikan loogisia kanavia, mutta ovat yksinkertaisempia ja niitä on vähemmän. Kuljetuskanavat puolestaan vastaavat siitä, miten dataa siirretään. LTE:n kuljetuskanavat ovat:

- BCH-kanavalla (Broadcast Channel) on määrittelyjen mukainen kiinteä kuljetuskaista, ja se kuljettaa osia BCCH-kanavan järjestelmätiedoista.
- PCH-kanava (Paging Channel) siirtää PCCH-kanavan tietoja, ja se tukee epäjatkuvaa vastaanottoa DRX (Discontinuous Reception), joka auttaa säästämään päätelaitteen akkua herättämällä sen vastaanottamaan PCH-kanavan lähetyksiä määrätyissä aikaväleissä.
- DL-SCH-kanava (Downlink Shared Channel) on lataussuunnan pääasiallinen kuljetuskanava. Se tukee LTE:n avainominaisuuksia, kuten dynaaminen nopeuden sopeutuminen, kanavasta riippuvaa ajoitusta taajuus- ja aika-alueella, H-ARQ-mentelmää pehmeällä yhdistämisellä ja spatiaalista multipleksointia. Se tukee myös DRX-toimintoa tarjoten kuitenkin aina-päällä kokemuksen. DL-SCH kuljettaa myös osia BCCH-kanavan järjestelmätiedoista, joita ei ole linkitetty BCH-kanavalle eikä yksisoluisille MBMS-palveluille.
- MCH-kanava (Multicast Channel) tukee MBMS-palvelua.
- UL-SCH -kanava (Uplink Shared Channel) on vastaava kanava kuin DL-SCH, mutta kuljettaa lähetyssuunnan dataa.

Fyysisen taso on vastuussa lähetettävän datan koodaamisesta ja moduloinnista. Se myös huolehtii fyysisen tason H-ARQ-käsittelystä ja moniantennijärjestelmän käsittelystä ja huolehtii kuljetuskanavien siirtämisestä fyysisille kanaville. Fyysisiä kanavia ovat muun muassa seuraavat:

- PDSCH-kanava (Physical Downlink Control Channel) on pääasiallinen fyysinen kanava unicast-lähetyksille ja etsintätiedoille. Sillä siirretään myös käyttäjien dataa.
- PBCH-kanava (Physical Broadcast Channel) lähettää päätelaitteelle järjestelmätietoja, joiden avulla se pystyy liittymään verkkoon.
- PMCH-kanavaa (Physical Multicast Channel) käytetään MBSFN-operaatioihin.
- PDCCH-kanavaa (Physical Downlink Control Channel) käytetään lataussuunnan ohjaustietojen välitykseen, pääasiassa PDSCH-kanavan ajastuspäätöksiä ja PUSCH-kanavan ajastus varmistuksia.
- PUSCH-kanava (Physical Uplink Control Channel) on päätelaittekohtainen, joka kuljettaa H-ARQ-kuittauksia verkosta saaduista datakehyksistä, aikataulutuspyyntöjä päätelaitteelta, jos lähetettävää dataa on vielä puskurissa ja kanavan laadun parametreja CQI (Channel Quality Indications), joiden avulla tukiasema tietää mitä modulaatiota ja koodausta käyttää lataussuunnassa. /29./
- PHICH-kanava (Physical H-ARQ Indicator Channel) siirtää H-ARQ-kuittaukset, joiden avulla päätelaitteelle ilmoitetaan, pitääkö lähetys lähettää uudelleen.
- PCFICH-kanava (Physical Control Format Indication Channel) ilmoittaa päätelaitteille tarpeelliset tiedot PDCCH-kanavan dekodaukseen, kuten PDCCH-kanavan datan määrän.
- PUCCH-kanavalla (Physical Uplink Control Channel) päätelaite lähettää H-ARQ-kuittauksia tukiasemalle, ilmoittaen, vastaanottiko se lataussuunnan datan kokonaisuutena. Sillä myös lähetetään tietoja kanavan tilasta lataussuunnassa. Myös PUCCH-kanavia on jokaiselle päätelaitteelle oma.
- PRACH-kanavaa (Physical Random Access Channel) käytetään, kun päätelaite ottaa yhteyttä tukiasemaan ensimmäisen kerran tai kun yhteyttä ei ole luotu lähetyssuuntaan ja pyydetään uutta yhteyttä.

- SCH-kanava (Synchronization Channel) auttaa päätelaitetta synkronoitumaan solun kanssa ja löytämään resursseja, joissa lähetystiedot sijaitsevat. /29./

Jokaiselle kuljetuskanavalle on olemassa vastaava fyysisen tason kanava, mutta on muutama fyysinen kanava, joille ei vastaavaa kuljetuskanavaa löydy. Näitä kutsutaan L1/L2-ohjauskanaviksi. Lataussuunnan DCI-kanavat (Downlink Control Information) tarjoaa päätelaitteille tarpeelliset tiedot lataussuunnan datan vastaanottamiseen ja dekodaukseen. UCI-kanava (Uplink Control Information) puolestaan tarjoaa ajastimen ja H-ARQ-protokollan päätelaitteen sen hetkisen tilanteen kanssa. /31./

6 Mittalaitteistot ja mittausten analysointi

6.1 Mittausmenetelmät ja laitteet

Matkapuhelimesta saatujen tietojen keruuseen käytettiin Ascomin TEMS Investigation 10.0.3 -ohjelmaa, joka on suunniteltu langattomien verkkojen vianetsintään, optimointiin, todentamiseen ja ylläpitoon. TEMS tukee useimpia matkapuhelinverkkoja, kuten GSM/GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA, LTE ja WiMAX. Mittauksia voidaan suorittaa niin rakennusten sisällä kuin ulkona kävellessä tai ajoneuvolla liikkeessä. Ohjelman käyttö vaatii aina avaimen, joko virtuaaliavaimen tai USB-tikussa olevan avaimen. Ilman tätä ohjelmaa ei voida edes käynnistää.

TEMS Investigation toimii useimpien matkapuhelinvalmistajien puhelimilla esim. Nokia, Sony Ericsson, Samsung, liittämällä puhelin kaapelilla tietokoneeseen ja yhdistämällä se ohjelmaan. Yhdistämisen jälkeen ohjelma tarkkailee kaikkea merkinantoliikennettä puhelimen ja matkapuhelinverkon välillä ja tarvittaessa tallentaa jokaisesta sessiosta tiedoston, joka pitää sisällään kaiken merkinantoinformaation. Jälkeenpäin voidaan tutkia tallennettuja tietoja ilman, että puhelimen tarvitsee olla kytkettynä.

Testeissä käytetty matkapuhelin oli Sony Ericssonin W995, joka oli kytkettynä USB-kaapelilla kannettavaan tietokoneeseen. Tietokoneessa oli asennettuna 64-bittinen Windows 7 sekä samanaikaisesti ulkoinen GPS-laite. Dataliittymää kuormitettiin puhe-

limen ollessa tietokoneessa kytkettynä ja käyttäen Firefox-internetselainta tietokoneella. Puhelin puolestaan tukee seuraavia 2G- ja 3G-taajuuksia sekä datayhteyksiä:

- GSM 850, 900, 1800, 1900
- WCDMA 850, 900, 1900, 2100
- GPRS, EDGE, HSDPA, HSUPA /32/

W995:n maksimidatansiirtonopeudet ovat

- GPRS 32 – 48 kbit/s
- EDGE 236,8 kbit/s
- HSDPA 7,2 Mbit/s
- HSUPA 2 Mbit/s /32/

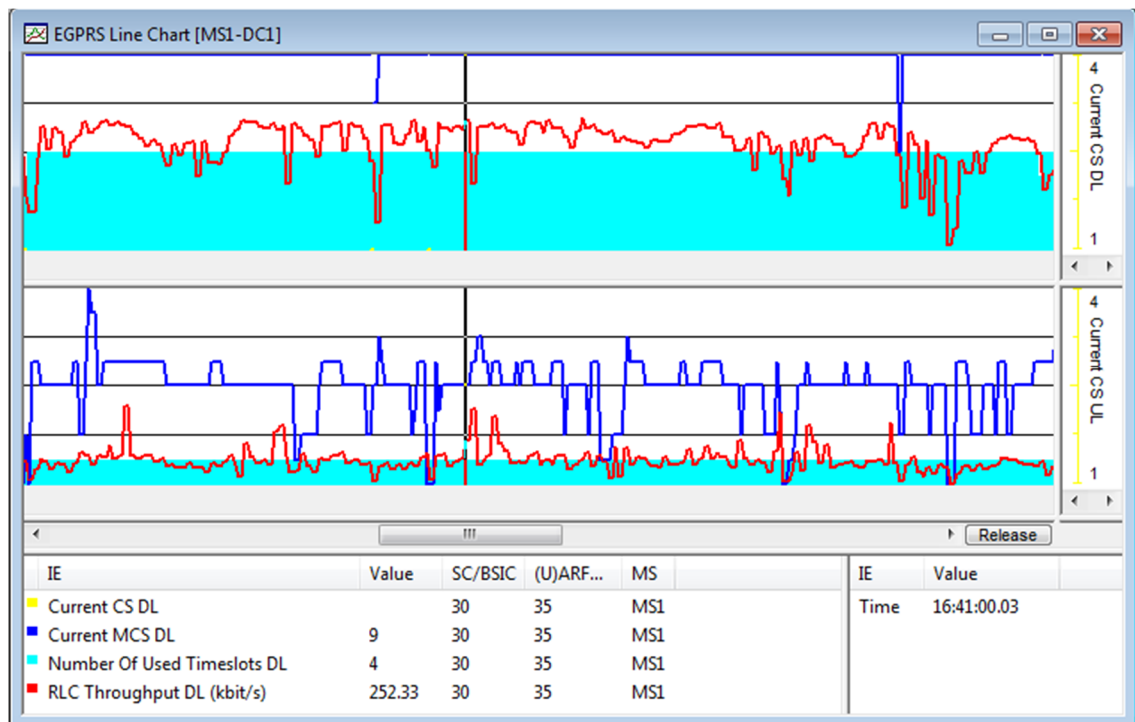
Mittauksia suoritettiin viidessä eri pisteessä pakottaen puhelimen olemaan ainoastaan joko 2G- tai 3G-verkossa kytkettynä. Ensimmäinen piste oli Helsingin esikaupunkialueella Vuosaarella, toinen piste keskustassa Bulevardilla koulurakennuksen sisätiloissa kolmannessa kerroksessa, kolmas piste oli auton ollessa liikkeellä Tuusulanväylällä Kehä I:n ja Kehä III:n välillä ajonopeuden ollessa 100 km/h koko matkan ajan. Neljäs piste oli Länsisatamassa laivan sisältä ja viimeinen piste laivan ollessa liikkeellä merellä. Viimeisen pisteen aikana puhelin oli asetettuna 3G-verkolle, mutta tarvittaessa siirtyen 2G-verkkoon, joten vaihtelut verkkojen välillä ovat tapahtuneet automaattisesti 3G-verkon ollessa kuulumattomissa.

Mittauksissa käytettiin paikallaan olevissa pisteissä kahta eri sivustoa. Ensimmäisellä sivulla ladattiin ftp:n kautta pienempi 1Mrnd-tiedosto EDGE päällä ja suurempi 10Mrnd-tiedosto HSDPA päällä. Toinen oli mobiilidataliittymiä varten kehitetty latausnopeutta mittaava sivusto. Lataussivusto löytyy osoitteesta <ftp://ftp.funet.fi/dev/> ja nopeustesti osoitteesta <http://www.mobilespeedtest.com/>. Liikkeellä ollessa internetyhteyttä pidet-

tiin yllä koko ajan kuuntelemalla YLE X -internetradiota osoitteessa <http://areena.yle.fi/radio>.

6.2 Mittaustulokset

Ensimmäisenä tarkastellaan esikaupunkialueen mittauspistettä, jonka mittaukset suoritettiin iltapäivällä. Kuvassa 26 on esitettyä EGPRS Line Chart [MS1-DC1] viivadiagrammi. Ylempi osa diagrammista esittää lataussuunnan arvoja ja alemmassa on esitettyä samat arvot lähetyssuunnassa. Vaaleansinisellä palkilla kuvataan käytetyt aikavälit, punainen viiva merkitsee RLC-tason datansiirtonopeutta, keltainen viiva kuvaa GPRS-tekniikan CS-koodauksen tasoa ja sininen viiva puolestaan EDGE-tekniikan MCS-koodauksen tasoa. Alimmassa osassa kohdassa Value on merkittynä valitun kohdan arvot, SC/BSIC kertoo tukiaseman tunnisteen, (U)ARFCN radiokanavan numeron ja MS kuvaa vain käytettävää päätelaitetta.



Kuva 26: EGPRS Line Chart [MS1-DC1].

Mittauksen tarkempia ja numeerisia tietoja saadaan kuvasta 27 EGPRS Status [MS1] ja GSM Data Throughput [MS1]. Tärkeimpiä tietoja EGPRS Status -osiossa ovat ylipänä nähtävät lähetyssuunnan ja lataussuunnan käytetyt aikavälit, sen alapuolelta löytyvät käytetyt koodausmenetelmät ja modulaatiot. Toinen huomionarvoinen kohta on Data Mode,

joka kertoo käytetyn lataustekniikan. GSM Data Throughput puolestaan esittää eri tasojen datanopeuksia lähetys- ja lataussuunnassa.

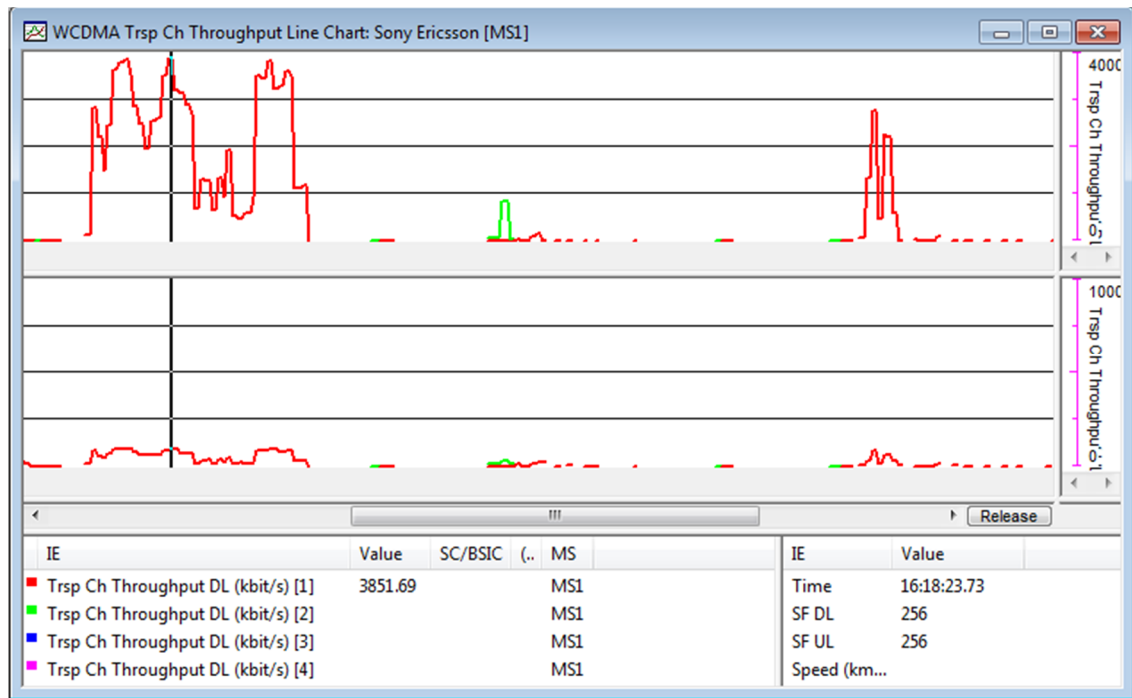
Lataussuunnassa koko session ajan oli käytössä neljä aikaväliä. Käytännössä katsoen datan siirrossa käytettiin EDGE-tekniikkaa koodauksen ollessa enimmäkseen MCS-9 ja modulaatio 8PSK muutamaa lyhyttä hetkeä lukuun ottamatta, jolloin koodaus oli CS-1 ja modulaatio GMSK. Maksimilatausnopeus oli 252 kbit/s keskinopeuden vaihdellessa 100 kbit/s ja 240 kbit/s välillä. Lähetyspuolen aikavälit olivat enimmäkseen yksi ja korkeimmillaan kaksi. Lähetysnopeudet pysyivät pieninä, sillä näissä testeissä keskityttiin enemmän latauspuoleen. Koodaus vaihtelee laajasti MCS-1:stä aina MCS-9:ään modulaation ollessa enimmäkseen 8PSK.

Element	Uplink	Downlink
Number of TS used	1	4
Coding Scheme	MCS-5	MCS-9
Modulation	8PSK	8PSK
TFI	19	14
LLC Window Size		
EGPRS Window Size	256	480
Cell GPRS Support	-	YES
Cell EGPRS Support	-	YES
Data Mode	-	EDGE
RAC	-	58
GMM State	-	
GRR State	-	Packet Transfer Mode
TLLI	-	3810768458
NC	-	NC0: MS controlled cell re-s...
NMO	-	Network mode of operation I
C Value	-	62
Link Quality Control UL	-	Incremental redundancy
EGPRS BEP (Mean)	-	31
EGPRS BEP (Variance)	-	7

Element	Uplink	Downlink
App. Throughput [kbit/s]		
SNDCP Throughput [kbit/s]	15.04	168.45
LLC Throughput [kbit/s]	15.57	169.12
RLC Throughput [kbit/s]	8.77	252.33
RLC Throughput [%]	39	100
SNDCP BLER [%]	0	0
LLC BLER [%]	0	0
RLC BLER [%]	0	0

Kuva 27: EGPRS Status [MS1] ja GSM Data Throughput [MS1].

Samassa pisteessä suoritettu mittaus käyttäen HSPA-tekniikkaa nähdään kuvan 28 WCDMA Trsp Ch Throughput Line Chart: Sony Ericsson [MS1] viivadiagrammissa. Siinä ylempi osa kuvastaa lataussuunnan datanopeuksia ja alempi lähetyssuunnan. Kuvassa 29 HSDPA Analysis [MS1] HS Session näyttää onko yhteys käytössä, SCCH Channelization Codes No Of näyttää käytettävien koodien lukumäärän ja Channelization Codes ilmaisee käytettävät koodit.



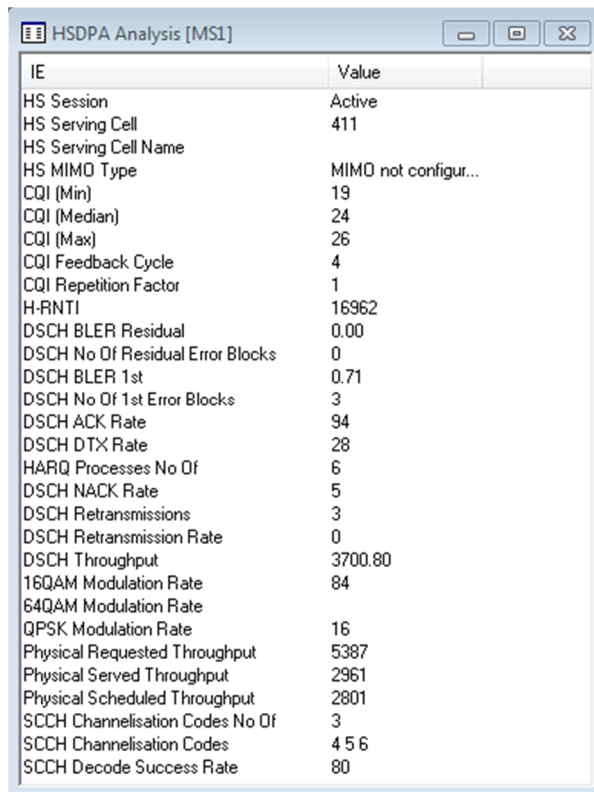
Kuva 28: WCDMA Trsp Ch Throughput Line Chart: Sony Ericsson [MS1].

Kuvan 28 oikeassa alakulmassa olevat SF-arvot ovat lataus- ja lähetyssuunnan hajautuskoodien lukumäärä WCDMA-verkolle, eivätkä ne vaikuta HSPA-tekniikan lataus- tai lähetyssuuntaan.

Suurin latausnopeus oli 3851 kbit/s modulaation ollessa 16QAM sekä käyttäen kolmea koodia. Käytetyt koodit olivat 4, 5 ja 6.

Toinen mittauspiste oli Metropolian koulun sisätiloissa Bulevardilla puolenpäivän aikoihin. GSM-aikavälit ovat samat kuin edellisessäkin pisteessä, eli lataussuuntaan on neljä aikaväliä käytössä ja lähetyssuuntaan yksi. Maksimilatausnopeus oli 170 kbit/s, mikä on noin kolmanneksi pienempi kuin esikaupunkialueella. Latausnopeus oli keskimäärin pienempi pysytellen 160 kbit/s nopeudessa, kuten kuvasta 30 näkee ja MCS-

koodauksen taso vaihtelee hieman useammin. Toisaalta lähetyssuunnassa koodauksen taso ei vaihtele yhtä paljon kuin esikaupunkialueella.

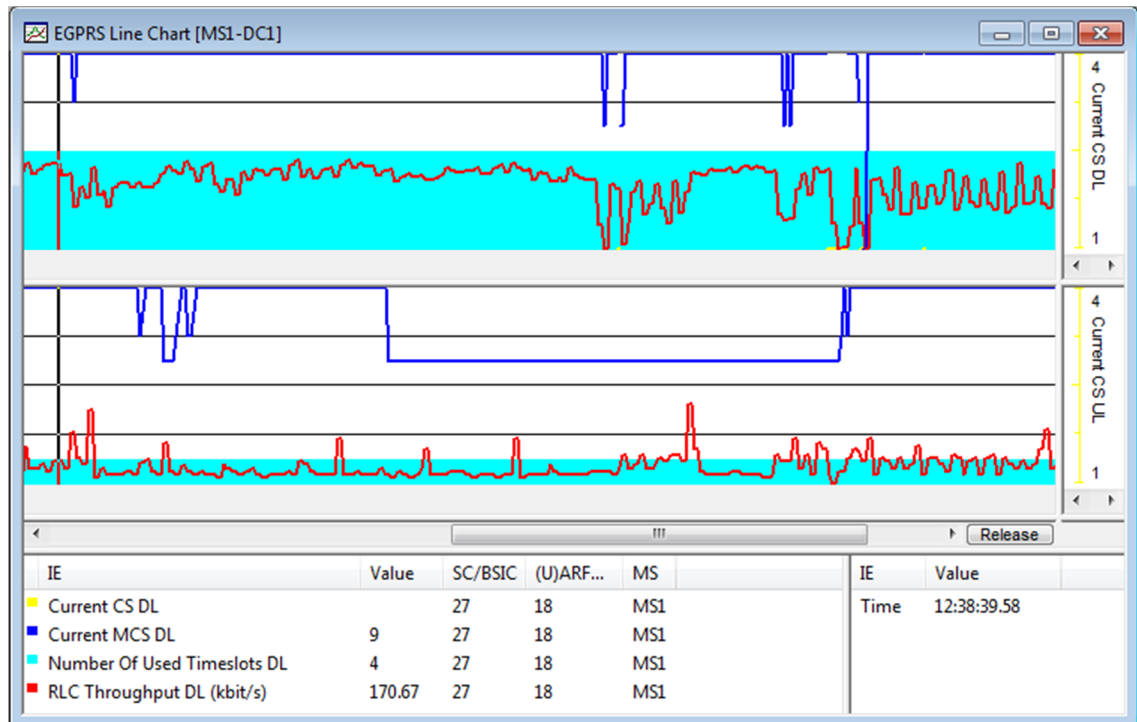


IE	Value
HS Session	Active
HS Serving Cell	411
HS Serving Cell Name	
HS MIMO Type	MIMO not configur...
CQI (Min)	19
CQI (Median)	24
CQI (Max)	26
CQI Feedback Cycle	4
CQI Repetition Factor	1
H-RNTI	16962
DSCH BLER Residual	0.00
DSCH No Of Residual Error Blocks	0
DSCH BLER 1st	0.71
DSCH No Of 1st Error Blocks	3
DSCH ACK Rate	94
DSCH DTX Rate	28
HARQ Processes No Of	6
DSCH NACK Rate	5
DSCH Retransmissions	3
DSCH Retransmission Rate	0
DSCH Throughput	3700.80
16QAM Modulation Rate	84
64QAM Modulation Rate	
QPSK Modulation Rate	16
Physical Requested Throughput	5387
Physical Served Throughput	2961
Physical Scheduled Throughput	2801
SCCH Channelisation Codes No Of	3
SCCH Channelisation Codes	4 5 6
SCCH Decode Success Rate	80

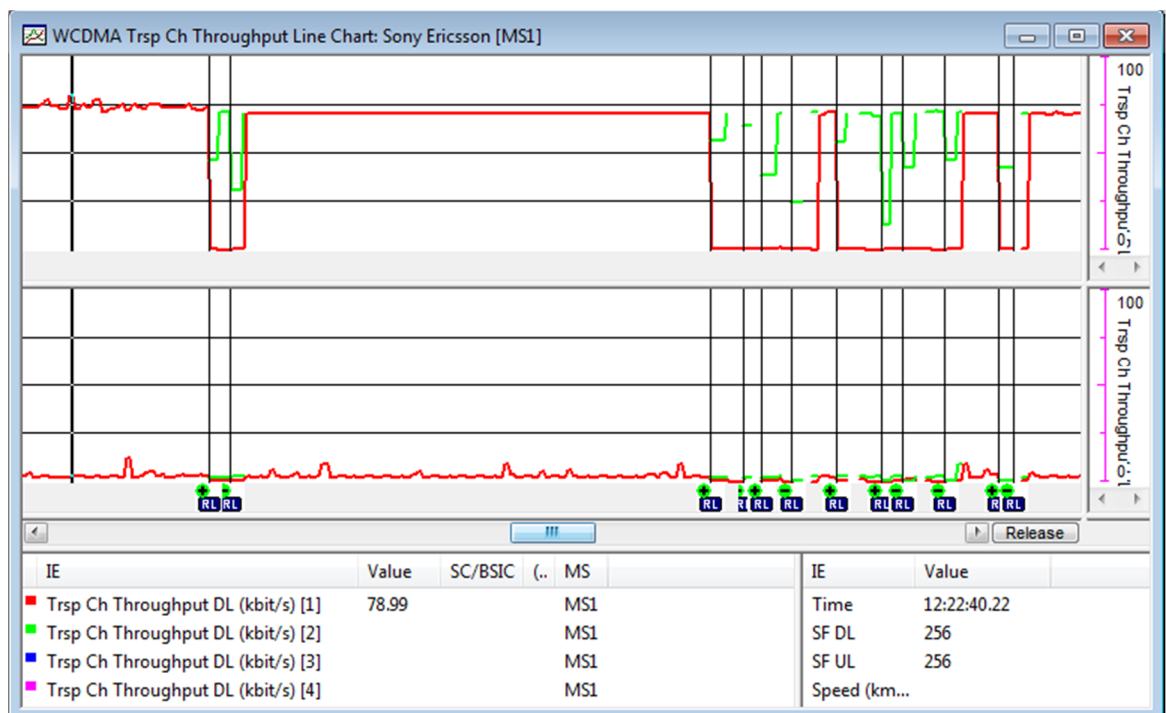
Kuva 29: HSDPA -analyysi [MS1].

Esikaupunkialueen ja keskustan välillä on kohtalainen eroavaisuus käytettäessä EDGE-tekniikkaa, mutta vielä suurempi ero on käytettäessä HSDPA-tekniikkaa, kuten kuvasta 31 voi nähdä. Latausaika on pidentynyt merkittävästi sen johdosta, että esikaupunkialueen 3 Mbit/s latausnopeus on tippunut keskustassa keskimäärin 69 kbit/s. Maksimilatausnopeus oli vain 78 kbit/s.



Käytettyjen koodien lukumäärä ei ole muuttunut mihinkään, vaan on edelleen samat kolme koodia. Lukuun ottamatta alun suurta lähetyssuunnan nopeuspiikkiä myös lähetyksenopeus on huomattavasti pienempi.




Kuva 30: Metropolian GSM-mittaustulokset.



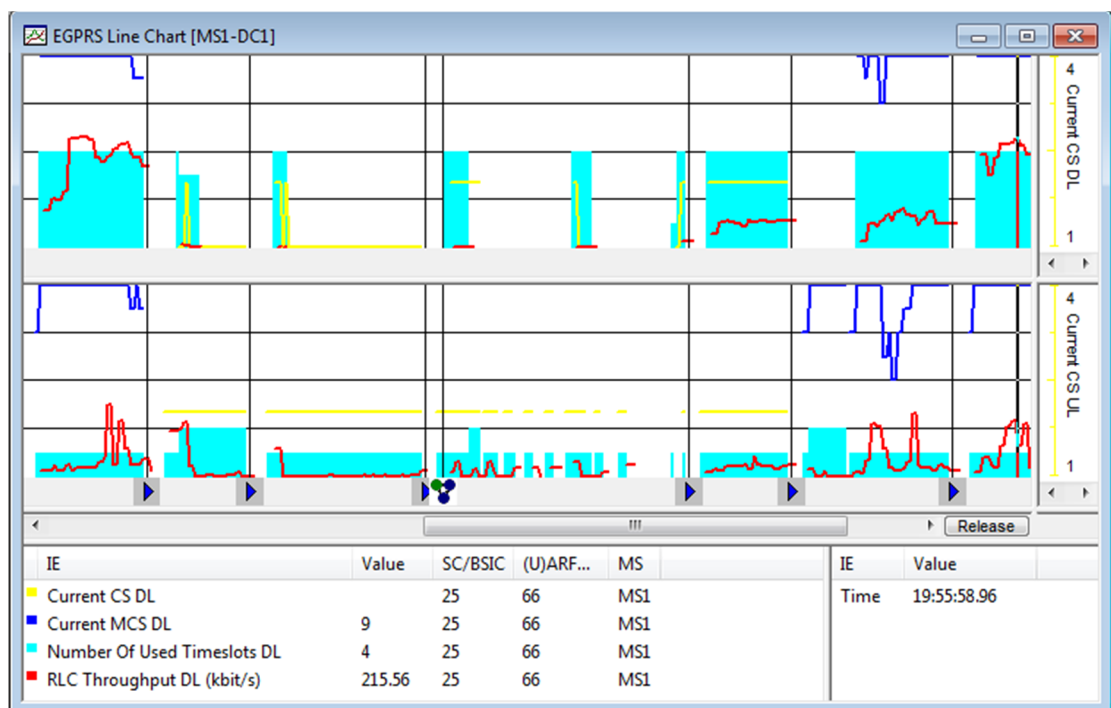
Kuva 31: Metropolian HSPA-mittaustulokset.

Kuvassa 31 merkintä  tarkoittaa radiolinkin lisäystä, jossa määritetään samalla scrambling code, pehmeä solunvaihto sekä tapahtumatyyppi.  puolestaan poistaa

radiolinkin ja  tarkoittaa sekä radiolinkin lisäyksen ja poiston suorittamista samanaikaisesti.

Kolmas mittauspiste oli liikkuvasta autosta mitattu internetradion kuuntelu yhteyden auki pitämiseksi koko matkan ajan. Ajonopeuden ollessa 100 km/h tukiasemat vaihtuvat tiuhaan, ja lataus katkeaa useasti, kuten kuvasta 32 on nähtävissä. Jokaisen solunvaihdon yhteydessä on pieni katkos ennen kuin yhteys saadaan muodostettua uudelleen.

Maksimilatausnopeudeksi saadaan 215 kbit/s ainoastaan matkan loppupäässä, sillä vaihtelu on suurta koko matkan ajan. MCS-koodaus vaihtelee MCS-6:n ja MCS-9:n välillä latauksen käyttäessä EDGE-tekniikkaa, mutta latauksen vaihtuessa GPRS-tekniikkaan koodaus on silloin CS-2. Kuten olettaa saattaa, on latausnopeus pienempi niissä kohdin, joissa GPRS oli käytössä. Lähetys suunnan koodaukset vastaavat paljolti lataussuunnan koodauksia, vaikkakin lähetys suunnan yhteyksiä on hieman enemmän tukiasemien vaihtuessa.

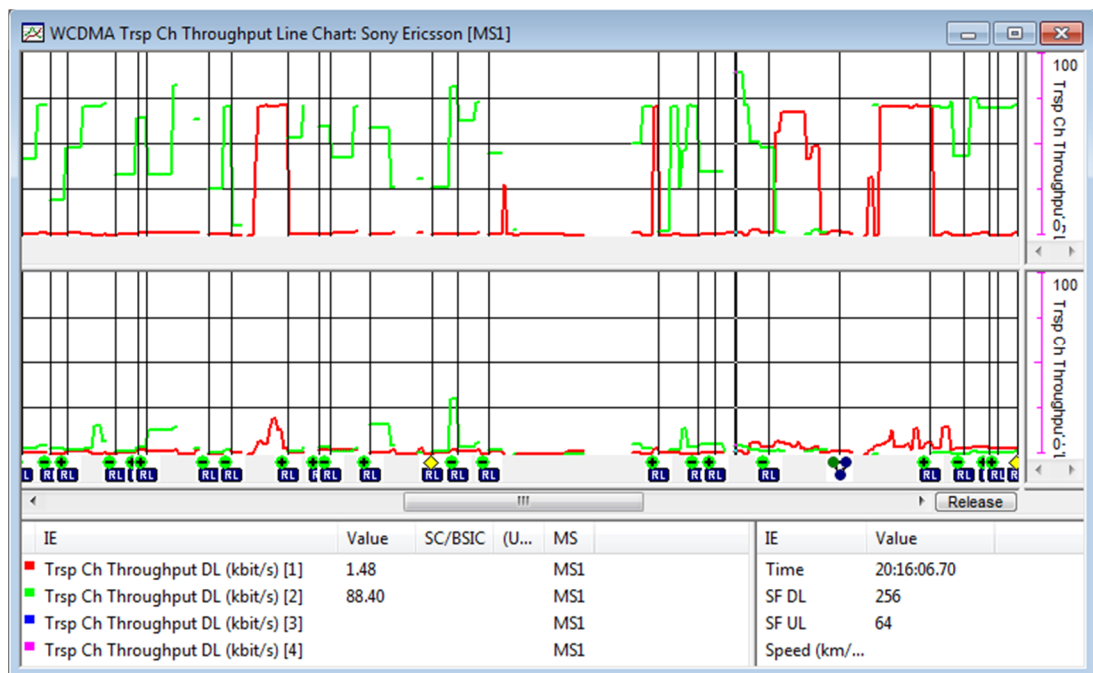


Kuva 32: GSM-mittaukset liikkeellä.

Kuvassa 32 nähtävä ►-merkintä tarkoittaa solunvaihtoa GSM-verkossa tai UTRAN-verkon taajuudensisäistä vaihtoa. GSM puolella annetaan uusi tukiaseman tunnistekoodi BSIC. Merkintä 📶 puolestaan tarkoittaa puhelimen vaihtaneen reititysalueetta.

HSPA-tekniikkaan siirryttäessä tukiaseman vaihdosta johtuvat katkot latauksessa ovat lyhyempiä, mutta niitä on enemmän, kuten kuvasta 33 näkee. Latausnopeudet ovat myös tasaisemmat johtuen siitä että, tukiaseman keila vaihtuu toiseen ja latausta saadaan jatkettua nopeammin. Latausnopeus oli keskimäärin 70 kbit/s ja maksimissaan 88 kbit/s modulaation ollessa QPSK.

Tukiaseman vaihdon kohdalla tulee pidempiaikainen katkos johtuen siitä, että HSDPA ei tue pehmeää solun vaihtoa. HSUPA tukee pehmeää solunvaihtoa, mutta se ei tässä mittauksessa tuo juurikaan yhtenäisempää yhteyttä, vaan yhteys katkeaa hetkeksi samaan aikaan HSDPA:n kanssa.

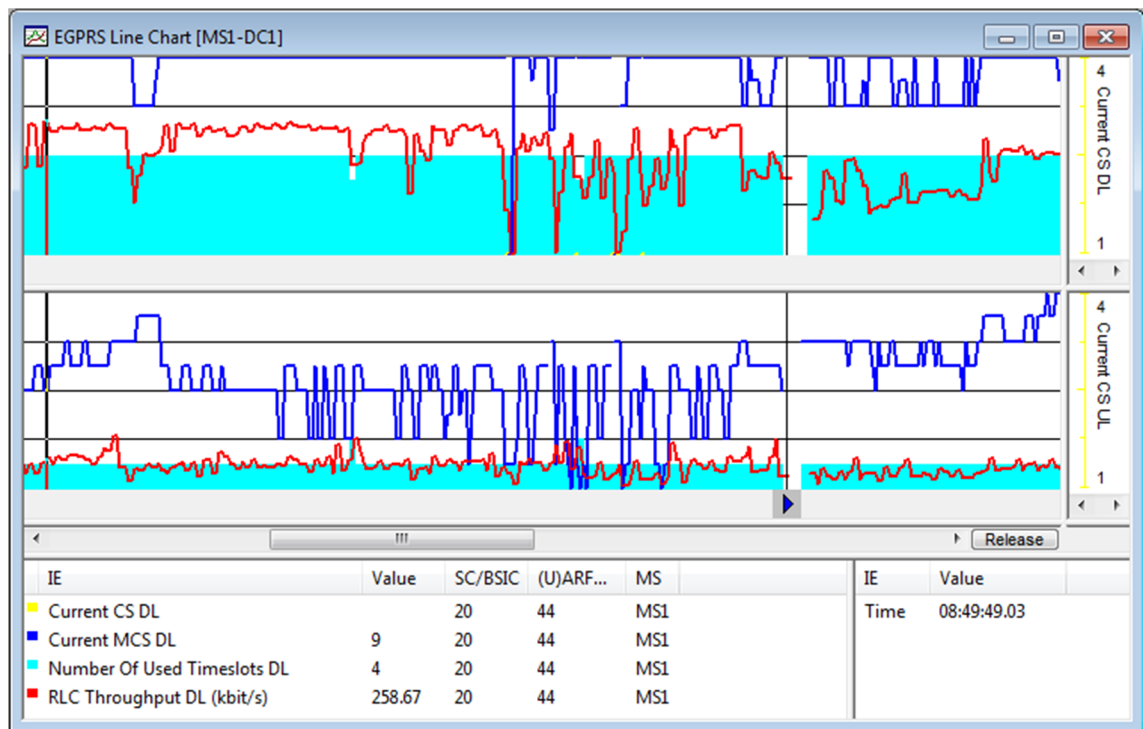


Kuva 33: HSPA-mittaukset liikkeellä.

Neljännessä pisteessä Helsingin Länsisatamassa GSM-mittauksen tulokset ovat paremmat kuin vähän matkan päässä olleessa Metropolian mittauspisteessä. Tämä voi johtua aikaisemmasta ajankohdasta ja siitä, ettei ympärillä ole asutusta eikä siten käyttäjiä niin paljon. Mittaukset suoritettiin laivan sisältä sen ollessa satamassa.

Latausnopeus oli keskimäärin 240 kbit/s, kun koodaus oli MCS-9 ja tippui 120 kbit/s tienoille koodauksen ollessa MCS-7. GPRS:n tullessa EDGE:n tilalle ja koodauksen muuttuessa CS-2:si latausnopeus tippui 50 kbit/s tienoille. Korkein saavutettu latausnopeus oli 258 kbit/s. Kuvassa 34 on satamassa mitatut tulokset. Lataussuunnassa oli käytössä enimmäkseen neljä aikaväliä ja lähetyssuuntaan yksi.

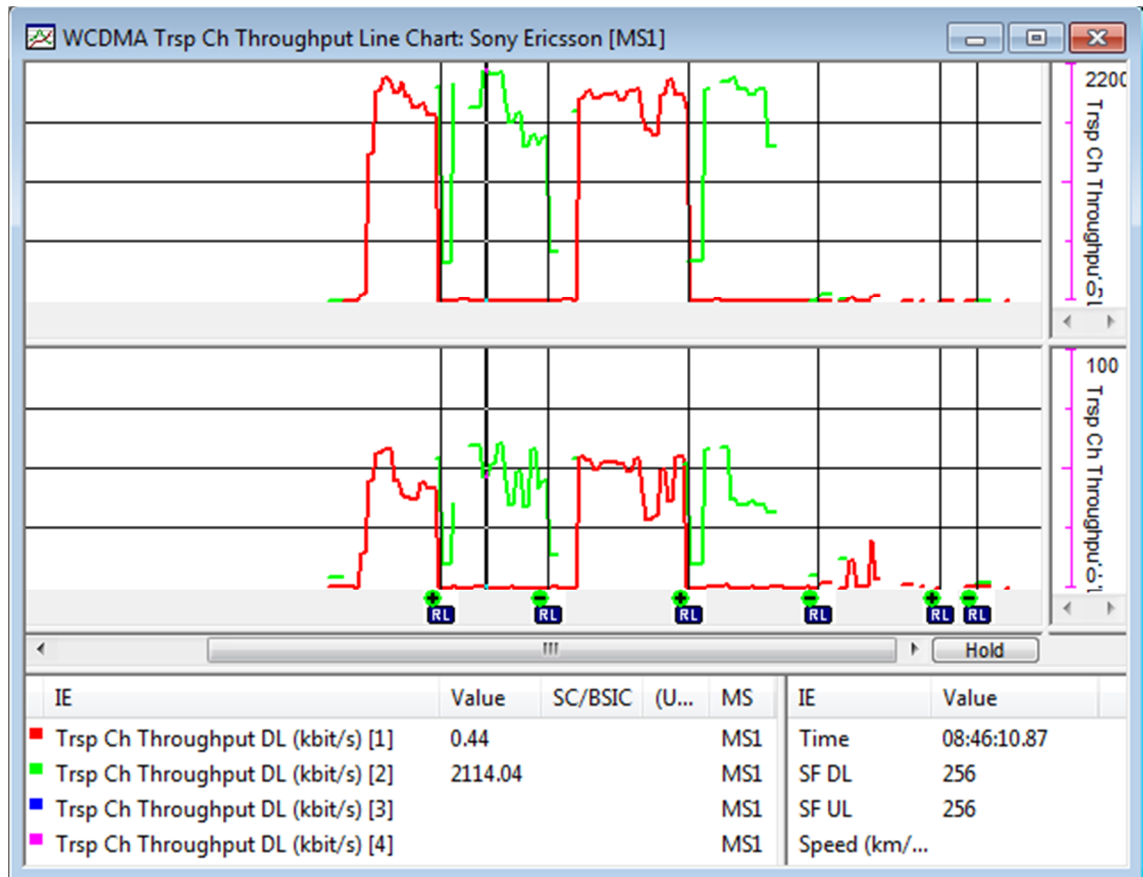
Koodauksen taso vaihtelee huomattavasti tiuhempaan tahtiin niin latauspuolella kuin lähetysspuolella verrattuna muihin mittaustuloksiin. Tämä saattaa johtua laivan metallirakenteesta, joka vaimentaa signaalia. Lähetysspuolen koodauksen muuttuminen ei vaikuta lähetyssnopeuteen yhtä paljon kuin se vaikuttaa latauspuolella. Ei edes MCS-koodauksen vaihtuessa CS-koodaukseen.



Kuva 34: Länsisataman GSM-mittaukset.

Myös HSPA-mittaukset tuottavat paremmat tulokset sataman luona kuin Metropolian lähetysspuolella. Keskiarvo latausnopeus oli 2 Mbit/s ja maksimissaan 2114 kbit/s ja modulaatio oli QPSK. Kuvassa 35 on nähtävissä HSPA-mittauksen tulokset Länsisatamasta.

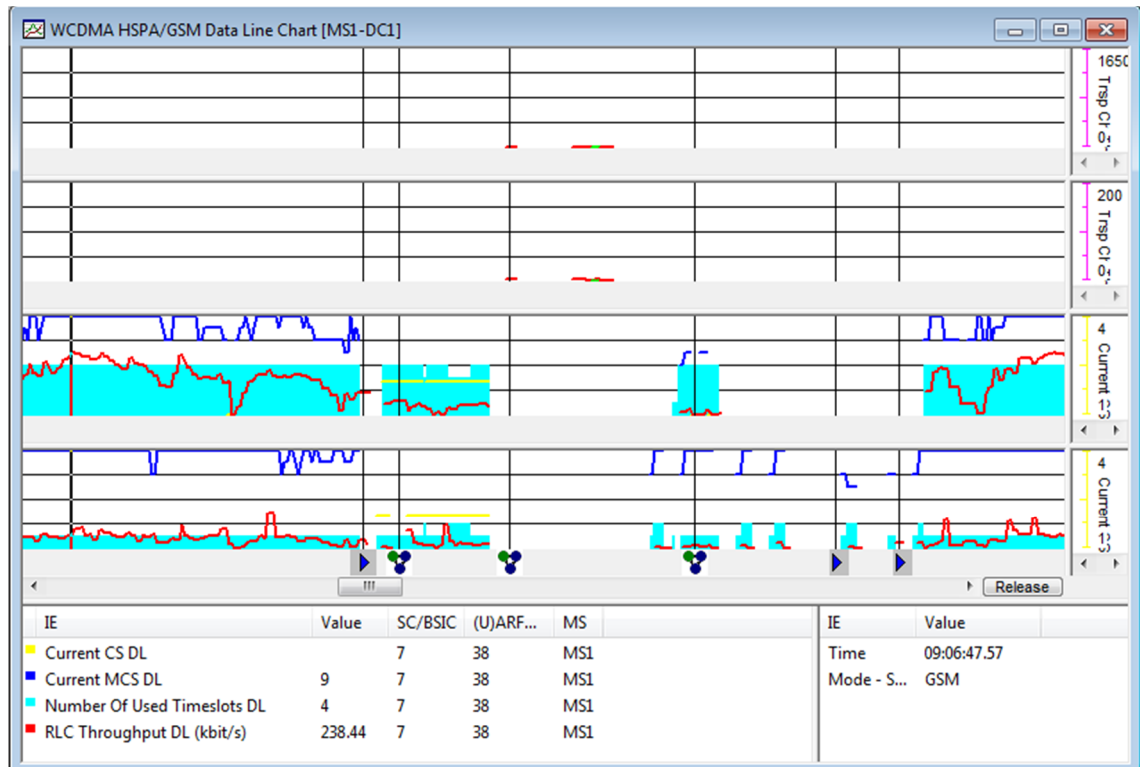
Tässä mittauspisteessä ensimmäinen ladattu testitiedosto oli pienempi kuin kahdessa muussa mittauspisteessä. Tästä johtuen lataus sujui nopeammin ja kuviosta tuli huomattavasti lyhyempi kuin muista.



Kuva 35: HSPA-mittaukset Länsisatamassa.

Viimeisenä pisteenä on matka laivalla Helsingistä pois päin kohti avomerta. Koko mittauksen ajan yhteyttä pidettiin yllä internetradiota kuuntelemalla. Yhteys sai vaihtua vapaasti 3G:n ja 2G:n välillä, mihin vain yhteyden taso riitti.

Helsingin edustalla merellä HSDPA-nopeudet tippuvat nopeasti alas, aivan rannan tuntumassa voi saada QPSK-modulaatiolla 150 – 800 kbit/s, mutta jo hieman pidemmällä nopeus tippuu tasaiseen 33 kbit/s. Tässä vaiheessa on EDGE parempi vaihtoehto, sillä sen kantama on pidempi ja nopeus vaihtelee 90 kbit/s ja 200 kbit/s välillä. Suurin mitattu nopeus oli 238 kbit/s, kuten kuvassa 36. MCS-koodaus vaihtelee tiuhaan MCS-7:n ja MCS-9:n välillä.

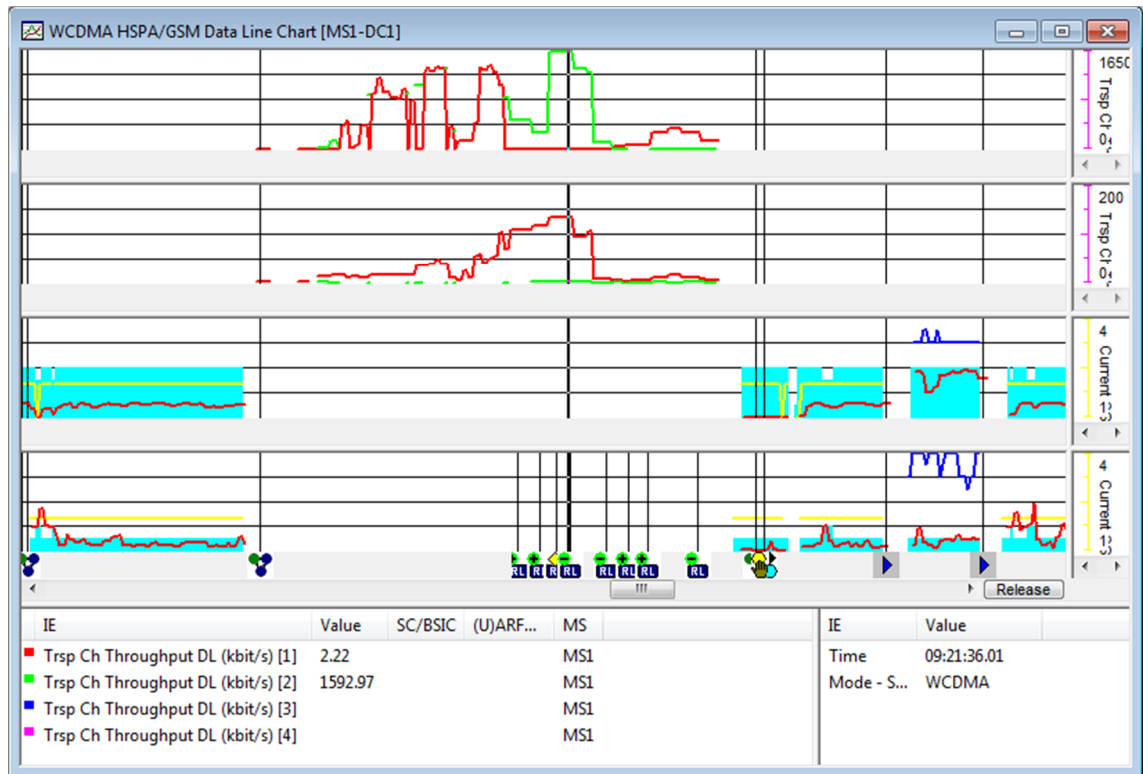


Kuva 36: EDGE-maksimilatausnopeus.

Jopa etäämpänä satamasta on mahdollista saada parempi HSPA-yhteys kuin aivan sataman edestä. Oikeassa kohdassa voi saada 16QAM-modulaation avulla 1200 kbit/s latausnopeuden. Mitattu maksiminopeus oli kuvan 37 mukainen 1592 kbit/s.

Kuvassa 37 📶 tarkoittaa kanavanvaihtoa UTRAN-verkosta GSM-verkon datakanavalle.

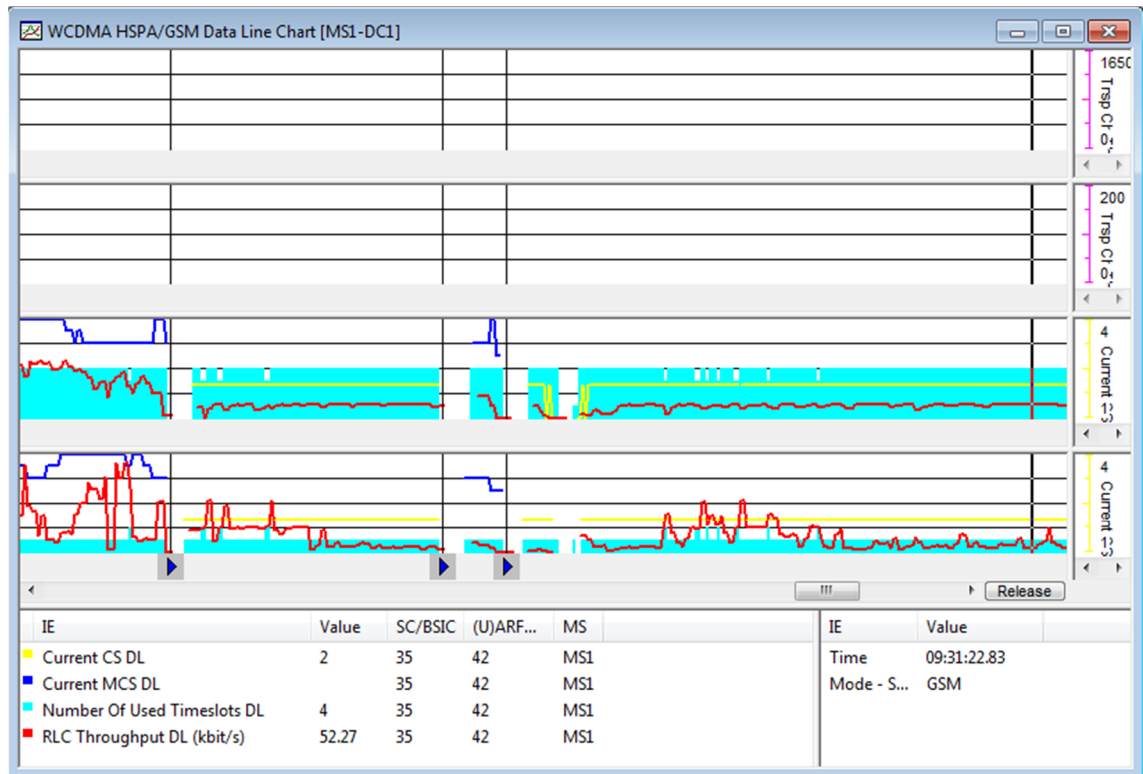
Lukuun ottamatta muutamia kohtia, joissa HSPA-yhteys on mahdollinen, pidemmällä rannikosta vain GPRS-yhteys on käytettävissä. CS-2-koodauksella GPRS-latausnopeus on vakaan tasainen pysyen 50 kbit/s latausnopeudessa. Hetkittäin voi GPRS vaihtua EDGE-yhteyteen tai HSDPA-yhteyteen. Vaihto EDGE-verkkoon lisää latausnopeutta, mutta HSDPA ei sitä välttämättä tuo, sillä muutamaa korkeampaa arvoa lukuun ottamatta latausnopeus pysyy alle 40 kbit/s. Korkein GPRS-latausnopeus oli 52 kbit/s, kuten kuvassa 38.



Kuva 37: HSDPA-maksimilatausnopeus.

Tuloksista voi tehdä muutamia selviä päätelmiä; taajama-alueilla HSDPA-tekniikka on selvästikin nopeampi vaihtoehto kuin GPRS tai EDGE, mutta keskustassa voi ruuhka-aikoina EDGE olla nopeampi vaihtoehto, jos yhtäaikaisia käyttäjiä on paljon samalla tukiasemalla.

Toiseksi, nopeasti liikkuvassa ajoneuvossa voi aivan hyvin käyttää internetiä ei aika-kriittisissä sovelluksissa, mutta kuten internetradion kuunteleminen ei onnistu, koska yhteys katkeaa liian usein ja uudelleen yhdistäminen ei onnistu tarpeeksi nopeasti, jotta kuuntelu olisi tarpeeksi yhtenäistä. Tämä voi myös johtua puhelimesta. Jos puhelu halutaan siirtää IP-verkkoihin, eivät tämän kaltaiset katkokset puhelun aikana ole sallittuja.



Kuva 38: GPRS-maksimilatausnopeus.

Merellä oltaessa aivan rannan lähetyvillä HSPA-tekniikalla pärjää, mutta vähänkin pidemmällä kannattaa vaihtaa EDGE-yhteyteen. Pidemmällä saaristossa enää GPRS-yhteys on mahdollista. IP-pohjainen puhelu ei tule korvaamaan GSM-puheluita vielä vähään aikaan, sillä uudet tekniikat eivät riitä kattamaan kaikkia alueita.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli mitata GSM- ja UMTS-yhteyksiä Helsingin keskustan alueella ja kaupungin laitamilta sekä liikkuvassa kohteessa. Tässä asiassa onnistuttiin ja lisäksi siihen tulivat mittaukset merellä. Kaikkien tarpeellisten tietojen kaivaminen mittaustuloksista TEMS Investigation-ohjelman avulla ei ollut helppoa. Ohjelma oli minulle tuntematon muutamaa koulussa suoritettua harjoitusta lukuun ottamatta, eikä kunnon ohjeita sen käytöstä ole saatavilla tai internetistä löydä neuvoja yksittäisten arvojen esille tuomiseksi.

Toisena tavoitteena oli esitellä eri tiedonsiirto menetelmiä, joita on ollut käytössä sekä syventävää tietoa nykyisistä mobiilidataliittymistä. Mielestäni eri tekniikoiden esittely on

työhön nähden riittävää, sillä siinä esitetään riittävällä tarkkuudella, miten GPRS, EDGE, HSPA ja LTE toimivat. Lisänä on vielä esitetty uusi DC-HSPA. Tietenkin näitä tekniikoita olisi voitu esittää tarkemmin, mutta se olisi pidentänyt tekstin pituutta huomattavasti ottaen huomioon alueen laajuuden, joka käsittää kolme sukupolvea, eikä olisi tuonut siihen merkittävää lisäarvoa.

Aiheen tutkiminen opetti minulle paljon GSM-verkon ja UMTS-verkon toiminnallisuudesta sekä niiden eroista kuin myös tutustutti LTE-verkkoon. Aikaisemmin ei minua kiinnostanut matkapuhelinverkkojen toiminta tai kehitys, mutta tämän työn jälkeen seuraan tarkemmin mihin suuntaan tulevat sukupolvet kehittyvät. Työn myötä myös TEMS Investigation tuli hieman tutummaksi, mutta on edelleen suurimmaksi osaksi minulle tuntematon ja tulee sellaisena pysymään, ellei tulevaisuudessa tule sille tarvetta työn puolesta. Ilman tutustumista eri matkapuhelinverkkojen toiminnallisuuteen ennen ohjelman käyttöä en olisi pystynyt tulkitsemaan puoliakaan ohjelman antamista tiedoista.

Työn aikana ehti muutama asia muuttua. Ensiksikin operaattoreiden painostuksesta LTE hyväksytään 4G-tekniikaksi, joten LTE Advanced tulee todennäköisesti olemaan viidennen sukupolven tekniikkaa. Toiseksi operaattorit ovat ottaneet käyttöönsä dual cell – HSPA-tekniikan ja sitä mainostetaan 4G-tekniikkana. Tämän takia lisäsin kyseisen tekniikan esittelyyn tähän työhön.

Tätä työtä pystyisi jatkamaan helposti vielä lisää. Toivon, että seuraavaan työhön voidaan sisällyttää HSPA-mittausten lisäksi uuden DC-HSPA-mittaukset sekä LTE-mittaukset ja vertailla näiden etuja keskenään. Kunhan muutaman vuoden kuluttua Octa Cell + MIMO HSDPA sekä multiband HSDPA tulevat markkinoille, niin myös nämä voidaan lisätä mittauslistalle.

Lähteet

- /1/ Granlund, Kaj, Langaton tiedonsiirto. Jyväskylä: Docendo Finland Oy. 2001.
- /2/ Mobile Radio Telephone. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 23.02.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_radio_telephone.
- /3/ Autoradiopuhelin. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 23.02.2012]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Autoradiopuhelin>.
- /4/ MTD. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 23.02.2012]. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/MTD_\(mobile_network\)](http://en.wikipedia.org/wiki/MTD_(mobile_network)).
- /5/ OLT. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 23.02.2012]. Saatavissa: [http://fi.wikipedia.org/wiki/OLT_\(televerkko\)](http://fi.wikipedia.org/wiki/OLT_(televerkko)).
- /6/ 1G. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 24.02.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/1G>.
- /7/ Penttinen, Jyrki, Tietoliikennetekniikka – Perusverkot ja GSM. WSOY. 2006.
- /8/ NMT. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 24.02.2012]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/NMT>.
- /9/ AMPS. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 24.03.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Mobile_Phone_System.
- /10/ TACS. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 24.03.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Total_Access_Communication_System.
- /11/ 2G. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 02.04.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/2G>.
- /12/ Granlund, Kaj, Tietoliikenne. Jyväskylä: Docendo Finland Oy. 2007.
- /13/ GSM. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 02.04.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM>.
- /14/ CdmaOne. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 02.04.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/CdmaOne>.

- /15/ D-AMPS. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 02.04.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_AMPS.
- /16/ CSD. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 02.04.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Circuit_Switched_Data.
- /17/ HSCSD Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 02.04.2012]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/HSCSD>.
- /18/ The Evolution of EDGE. [Verkkodokumentti, viitattu 03.04.2012]. Saatavissa: http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/evolution_to_edge.pdf.
- /19/ GPRS & EDGE. [Verkkodokumentti, viitattu 03.04.2012]. Saatavissa: <http://www.3gpp.org/article/gprs-edge>.
- /20/ UMTS. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 10.04.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System.
- /21/ FOMA. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 12.04.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/FOMA>.
- /22/ Okada, Takashi, NTT DoCoMo Technical Journal Vol. 10 No. 2. [Verkkodokumentti, viitattu 12.04.2012]. Saatavissa: http://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol10_2/vol10_2_047en.pdf.
- /23/ CDMA2000 1X / 1XRTT basics tutorial. Radio-Electronics.com. [Verkkodokumentti, viitattu 12.04.2012]. Saatavissa: <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/3gpp2/cdma2000-1xrtt-basics-tutorial.php>.
- /24/ HSPA. 3GPP.org [Verkkodokumentti, viitattu 17.04.2012]. Saatavissa: <http://www.3gpp.org/HSPA>.
- /25/ 4G. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 19.04.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/4G>.
- /26/ Long Term Evolution. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 19.04.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution.
- /27/ LTE-Advanced. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 19.04.2012]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced.
- /28/ WiMAX. WiMAX Forum. [Verkkodokumentti, viitattu 19.04.2012]. Saatavissa:

http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_802.16m.pdf.

- /29/ Sauter, Martin, Beyond 3G – bringing networks, terminals and the web together. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. 2009.
- /30/ E-UTRAN. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.05.2012]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRAN>.
- /31/ Dahlman, Erik, Parkvall, Stefan, Sköld, Joham, Beming, Perm, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband. United Kingdom: Academic Press. 2008.
- /32/ Sony Ericsson W995. GSMarena. [Verkkodokumentti, viitattu 13.07.2012]. Saatavissa: http://www.gsmarena.com/sony_ericsson_w995-2682.php.
- /33/ EDGE MCS coding schemes and classes. Radio-electronics.com. [Verkkodokumentti, viitattu 13.07.2012]. Saatavissa: <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/gsm-edge/mcs-coding-schemes-classes.php>.
- /34/ Holma, Harri, Toskala, Antti, WCDMA for UMTS – HSPA evolution and LTE. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. 2010.
- /35/ 3GPP TS 25.306 V11.3.0 (2012-09). [Verkkodokumentti, viitattu 4.12.2012]. Saatavissa: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25306.htm>.

HSPA+ ja MC-HSDPA nopeudet

HS-DSCH - luokka	SF-16 kanavien lkm	Modulointi	MIMO, Multi Cell	Huippunopeus Mbit/s
Category 13	15	64QAM		17,6
Category 14	15	64QAM		21,1
Category 15	15	16QAM	MIMO	23,4
Category 16	15	16QAM	MIMO	28,0
Category 17	15	64QAM tai MIMO		23,4
Category 18	15	64QAM tai MIMO		28,0
Category 19	15	64QAM	MIMO	35,3
Category 20	15	64QAM	MIMO	42,2
Category 21	15	16QAM	Dual Cell	23,4
Category 22	15	16QAM	Dual Cell	28,0
Category 23	15	64QAM	Dual Cell	35,3
Category 24	15	64QAM	Dual Cell	42,2
Category 25	15	16QAM	Dual Cell + MIMO	46,8
Category 26	15	16QAM	Dual Cell + MIMO	56,0
Category 27	15	64QAM	Dual Cell + MIMO	70,6
Category 28	15	64QAM	Dual Cell + MIMO	84,4
Category 29	15	64QAM	Triple Cell	63,3
Category 30	15	64QAM	Triple Cell + MIMO	126,6
Category 31	15	64QAM	Quad Cell	84,4
Category 32	15	64QAM	Quad Cell + MIMO	168,8
Category 33	15	64QAM	Hexa Cell	126,6
Category 34	15	64QAM	Hexa Cell + MIMO	523,2
Category 35	15	64QAM	Octa Cell	168,8
Category 36	15	64QAM	Octa Cell + MIMO	337,5