

Perttu Lehtimäki

# Matkapuhelinverkkojen datasiirto ja siirtonopeuteen vaikuttavat tekijät

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Tietotekniikka  
Insinöörityö  
7.11.2013

Tekijä(t) Otsikko	Perttu Lehtimäki Matkapuhelinverkkojen datasiirto ja siirtonopeuteen vaikuttavat tekijät
Sivumäärä Aika	42 sivua 7.11.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikennetekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Kari Järvi
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle omana aiheena mielenkiinnosta matkapuhelinverkkojen datasiirtopalveluja kohtaan.</p> <p>Insinöörityön tavoitteena oli selvittää, millä eri tekijöillä on vaikutus tiedonsiirtonopeuteen eri sukupolvien matkapuhelinverkoissa.</p> <p>Aluksi perehdyttiin matkapuhelinverkkojen datasiirtopalveluiden toteutukseen GSM/GPRS/EGPRS-, UMTS/HSPA- sekä LTE-verkoissa. Seuraavaksi selvitettiin tarkemmin, mitkä eri tekijät ja parametrit vaikuttavat käyttäjän tiedonsiirtonopeuteen eri verkkotekniikoissa.</p> <p>Verkossa suoritetuilla mittauksilla pyrittiin selvittämään, mitkä parametriarvot ovat käytössä operaattoreiden verkoissa ja mikä on niiden vaikutus tiedonsiirtonopeuteen. Mittaustulosten analysoinnilla selvitettiin, miten teoreettiset ja mitatut arvot vastaavat toisiaan. Lisäksi verkossa suoritettiin nopeusmittauksia eri maantieteellisillä alueilla, jotta saatiin yleiskuva eri verkkotekniikoiden suorituskyvystä.</p> <p>Työn tuloksena saatiin kattava arvio mobiilidatasiirtoon vaikuttavista tekijöistä eri sukupolvien matkapuhelinverkoissa.</p>	
Avainsanat	GPRS, EDGE, HSDPA, HSUPA, LTE

Author(s) Title	Perttu Lehtimäki Transmission Speed in Mobile Network Communications
Number of Pages Date	42 pages 7 November 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Telecommunications
Instructor(s)	Kari Järvi, Principal Lecturer
<p>The aim of this graduate study was to explain which different factors and parameters have an impact on data transfer speed of the mobile networks in each generation.</p> <p>At the beginning of the study there is a short survey of the data transfer services in GSM/GPRS/EGPRS, UMTS/HSPA and LTE networks. Next, different parameters that affect the data transfer speed in each network technology are explained in more detail.</p> <p>Several data transfer measurements were carried out for each network technology to resolve which parameters have been configured in operator networks, and what is their impact on the data transfer speed. the results were analyzed to explain how the theoretical and measured values correspond with each other.</p> <p>This study provides a comprehensive explanation to the factors and parameters that play an important role in mobile data transfer.</p>	
Keywords	GPRS, EDGE, HSDPA, HSUPA, LTE

## Sisälllys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Datasiirto mobiiliverkoissa	2
2.1	Mobiilidatasiirron kehitysvaiheet	2
2.1.1	GSM:n piirikytkentäinen datasiirto	2
2.1.2	GSM:n pakettikytkentäinen datasiirto	3
2.1.3	3G:n pakettikytkentäinen datasiirto	9
2.1.4	LTE:n datasiirto	13
3	Datasiirtopalvelun parametrit	16
3.1	GPRS-palvelun parametrit	16
3.1.1	GPRS-järjestelmän kanavakoodausluokat	16
3.1.2	Moniaikaväliluokat	18
3.1.3	GPRS:n resurssien jako	19
3.2	EGPRS:n parametrit	20
3.2.1	EGPRS:n kanavakoodausluokat	20
3.2.2	EGPRS:n resurssien jako	22
3.3	3G:n parametrit	22
3.3.1	Release 99:n parametrit	22
3.3.2	HSPA:n parametrit	22
3.3.3	HSPA:n resurssien jako	26
3.4	LTE:n parametrit	27
3.4.1	LTE:n tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavat tekijät	27
3.4.2	LTE:n resurssien jako	29
4	Datasiirtopalvelun mittaukset	32
4.1	Mittauslaitteisto	32
4.2	Mittaukset verkossa	33
5	Mittaustulokset ja palveluiden käytön vertailu	34
5.1	GPRS-mittaustulokset	34
5.2	EGPRS/EDGE-mittaustulokset	35

5.3	3G/WCDMA-mittaustulokset	36
5.4	Nopeustesti	38
6	Yhteenveto	41
	Lähteet	42

## Lyhenteet

3GPP	3th Generation Partnership Project. Ryhmittymä, joka määrittelee kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmää.
16QAM	16-state Quadrature Amplitude Modulation. 16-tilainen amplitudimodulaatio.
64QAM	64-state Quadrature Amplitude Modulation. 64-tilainen amplitudimodulaatio.
ALA	Automatic Link Adaptation. Automaattinen linkkisovitus.
ARFCN	Absolute Radio-Frequency Channel Number. Absoluuttinen radiokanavan numero.
bps	Bits per second. Bittiä sekunnissa, tiedonsiirtoyksikkö.
BSIC	Base Station Identity Code. Tukiaseman tunnuskoodi.
CC	Channellization Code. Kanavointikoodi.
DC-HSDPA	Dual Cell - High Speed Downlink Packet Access. Kahden solun HSDPA-tekniikka.
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution. GSM:n uudistettu modulointimenetelmä.
EGPRS	Enhanced GPRS. Laajennettu GPRS, joka käyttää EDGE- tekniikkaa.
EHSD	Enhanced High Speed Data. HSCSD:n evoluutioversio.
EPC	Evolved Packet Core. LTE:n kehittynyt pakettirunkoverkko.
E-UTRAN	Evolved-UTRAN. Kehittynyt WCDMA:n radioverkko.
FBI	Final Block Indicator. Viimeisen lohkon tunnistin.
FEC	Forward Error Correction. Virheenkorjausmekanismi.
Gbps	Gigabit per second. Gigabittiä sekunnissa, tiedonsiirtoyksikkö.
GGSN	Gateway GPRS Support Node. GPRS-yhdyskäytäväsolmu.
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying. GSM:n modulointimenetelmä.
GPRS	General Packet Radio Service. GSM:n pakettidatapalvelu.

GSM	Global System for Mobile communications. 2. sukupolven maailmanlaajuinen matkapuhelinjärjestelmä.
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data. Nopea piirikytkentäinen GSM-datapalvelu.
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access. UMTS:n datasiirtopalvelu, joka mahdollistaa suuret latausnopeudet.
HSPA	High Speed Packet Access. UMTS:n datasiirtopalvelu, joka mahdollistaa suuret lataus- ja lähetysnopeudet. (Yhteinen termi HSDPA:lle ja HSUPA:lle).
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access. UMTS:n datasiirtopalvelu, joka mahdollistaa suuret lähetysnopeudet.
IP	Internet Protocol. Verkkokerroksen reitittävä tietosähke pohjainen protokolla.
kbps	Kilobit per second. Kilobittiä sekunnissa, tiedonsiirtoyksikkö.
LTE	Long Term Evolution. HSPA-palveluiden jatkokehitys ja 4. sukupolven matkapuhelinjärjestelmä.
Mbps	Megabit per second. Megabittiä sekunnissa, tiedonsiirtoyksikkö.
MIMO	Multiple Input Multiple Output. Moniantennitekniikka.
MU-MIMO	Multi-User MIMO. Moniantennitekniikka, jossa radiotie muodostuu useiden erillään olevien pisteiden välillä.
MCS	Modulation and Coding Scheme. Modulaatio- ja koodauskäytäntö.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access. Ortogonaalinen taajuusjakoinen modulaatiotekniikka.
PCU	Packet Control Unit. Paketinohjausyksikkö.
PSK	Phase Shift Keying. Vaihemodulaatio.
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying. Kvadratuuri vaihemodulaatio.
RNC	Radio Network Controller. Radioverkko-ohjain.
SC	Scrambling Code. Sekoituskoodi.
SC-FDMA	Single Carrier- Frequency Division Multiple Access. Yhtä kantoaaltoa käyttävä taajuusjakoinen modulaatiotekniikka.

SF	Speeding Factor. UMTS:n radiotiellä käytetty levityskerroin, jonka mukaan kanavalla käytetty tiedonsiirtonopeus määräytyy.
SGSN	Serving GPRS Support Node. GPRS-operointisolmu.
TBF	Temporary Block Flow. Väliaikainen lohkovuoparametri.
TDMA	Time Division Multiple Access. Aikajakoinen modulaatiotekniikka.
TFI	Temporary Flow Identity. Väliaikainen vuotunniste.
TTI	Transmission Time Interval. Siirtojakso.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. Kolmannen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä.
USF	Uplink State Flag. GPRS-aikavälin monikäytöstä huolehtiva lippu.
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network. UMTS:n radioverkko.
VoIP	Voice over Internet Protocol. Pakettimuotoinen puheensiirto IP-verkossa.
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access. Laajakaistainen koodijakoinen modulaatiotekniikka.

## 1 Johdanto

Matkapuhelinverkkojen datasiirto on kasvanut viimeisen kahden vuoden aikana arviolta 600 %. Tähän on syynä kannettavien päätelaitteiden yleistyminen. Erityisesti älypuhelimien ja tablettien käyttö on moninkertaistanut siirtokapasiteettitarvetta verkoissa. Tämä asettaa mobiilioperaattoreille haasteita, jotta ne pystyvät tarjoamaan tasalaatuaista palvelua kaikkialla verkossa. Monille käyttäjille mobiililaajakaista on ainoa yhteys Internetiin.

Työn alkuosassa tutustutaan eri sukupolvien matkapuhelinverkkojen datasiirtopalveluiden toteutukseen. Tarkastelun kohteina ovat GSM/GPRS/EGPRS-, 3G/HSPA- sekä LTE-tekniikat. Luvussa 3 käydään läpi, mitkä parametrit vaikuttavat datasiirtonopeuteen ja mikä on teoreettinen maksiminopeus eri tekniikoilla. Luvussa 4 tutustutaan käytettyyn mittalaitteistoon ja mittausten suorittamiseen. Luvussa 5 analysoidaan mittaustuloksia ja arvioidaan verkon parametrisointi ja suorituskyky tekniikkakohtaisesti, sekä vertaillaan saatuja tuloksia teoreettisiin arvoihin.

Standardien nopea kehittyminen ja uusien päätelaitteiden markkinoille tulo vaatii operaattoreilta jatkuvaa verkkojen kehittämistä, ja edeltävienkin verkkosukupolvien ylläpidosta on huolehdittava. Tällä hetkellä rinnakkain toimii kolme eri verkkosukupolvea. Tässä työssä on perehdytty eri verkkosukupolvien datasiirtopalveluihin ja niiden suorituskykyyn.

## 2 Datasiirto mobiiliverkoissa

### 2.1 Mobiilidatasiirron kehitysvaiheet

#### 2.1.1 GSM:n piirikytkentäinen datasiirto

GSM-järjestelmän piirikytkentäinen datansiirto toimii käyttäjän kannalta periaatteessa kuten tavanomainen kiinteän verkon modeemiyhteys. Pääasiallisena erona on se, että GSM-puhelimeen ei tarvitse kytkeä erillistä modeemia, koska lähete on GSM-verkon sisällä jo valmiiksi täysin digitaalista. Täyden nopeuden liikennekanavalla käyttäjän maksimidatanopeus 9,6 kbps muokataan radiotielle 12 kbps-kehysrakenteeseen, ja verkon sisäisen virheenkorjauksen FEC:n (Forward Error Correction) jälkeen lopullinen nopeus on sama kuin puhelälähetteellä eli 22,8 kbps. [1, s. 146]

Piirikytkentäinen data kehittyi asteittain melko nopealla aikataululla vuodesta 1999 lähtien. Nopeutta 9,6 kbps on mahdollista nostaa aluksi datan kompressiolla V.42bis sekä kevennetyllä kanavakoodauksella (virheenkorjaus). Kompressiolla voidaan tyypillinen tekstitiedosto pakata noin puoleen tai neljäsosaan alkuperäisestä, jolloin sen siirtoon kuluva aika vähenee vastaavasti. Kevennetyllä kanavakoodauksella saadaan datanopeus puolestaan kasvatetuksi arvoon 14,4 kbps yksittäisellä aikavälillä.

Seuraavana kehitysvaiheena on ollut rinnakkaisten kanavien käyttömahdollisuus eli nk. multislott-tekniikka. Tällöin käyttäjän datanopeus moninkertaistuu vastaavasti. Sekä multislott että kevennetty kanavakoodaus sisältyvät nopeaan piirikytkentäiseen datapalveluun HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), jonka maksiminopeus voi alkuvaiheessa olla 57,6 kbps alasuuntaan (downlink) käytettäessä V.120-yhteystapaa ISDN-verkkoon.

Kehityspolun seuraavassa vaiheessa GSM-radorajapinnalle tulee uusi modulointimenetelmä, jolloin alkuperäinen 0,3 GMSK vaihtuu 8-PSK-modulaatioon. Palvelua kutsutaan nimellä EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution). EDGE on tarkoitettu käytettäväksi ensisijaisesti GPRS- ja HSCSD-palveluiden laajentajana, jolloin niitä kutsutaan termeillä EGPRS (Enhanced GPRS) ja EHSD (Enhanced High Speed Data). EDGE:ä voidaan periaatteessa käyttää myös puhepalvelun parannukseen. Näillä

näkymin GSM-datansiirtonopeudet jäävät EDGE:n mahdollistaviin nopeuksiin, ja seuraavana kehitysasteena on varsinainen kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä. [1, s. 292-293]

EHSD pitää sisällään perinteisen GSM-datapalvelun tavoin sekä virheenkorjaavan (NT, non-transparent) että vakionopeuksisen (T, transparent) siirtomuodon. Niillä saavutetaan nopeusluokkia, joista tehokkaimmat ovat lähellä 64 kbps. Koska EHSD on piirikytkentäinen datansiirtomenetelmä, sille pätevät täsmälleen samat rajoitukset kuin muillekin piirikytkentäisille GSM-datansiirtopalveluille. Siten A-rajapinnan ja kiinteän verkon tiedonsiirtonopeudet estävät yli 64 kbps -yhteyksien käytön. Hyötynä GSM-dataan ja HSCSD-yhteyksiin nähden on kuitenkin se, että suuret nopeudet voidaan toteuttaa käyttämällä ainoastaan yhtä tai kahta aikaväliä moniaikavälitekniikan (multislot) määritelmien mukaisesti.

EHSD-palvelussa voidaan käyttää Release 99 -spesifikaatioiden mukaisesti 8-PSK-modulaatiota käyttäjän nopeuksille 28,8 kbps, 32,0 kbps ja 43,2 kbps aikaväliä kohden. Nopeutta 28,8 kbps voidaan käyttää sekä virheenkorjaavana (NT, nontransparent) että vakionopeuksisena (T, transparent). Nopeutta 32 kbps voidaan käyttää vain vakionopeuksisesti, ja nopeutta 43,2 kbps puolestaan vain virheenkorjaavasti. EHSD:n yhteydessä voidaan käyttää edelleen myös perus-HSCSD-nopeuksia eli 4,8 kbps, 9,6 kbps ja 14,4 kbps aikaväliä kohden. Tällöin modulaatiomenetelmä on perinteinen 0,3 GMSK. [2, s. 228-229.]

Piirikytkentäisen datasiirron sovellusmahdollisuuksia ovat lähinnä hidasta tiedonsiirtoa käyttävät ohjaus- ja valvontasovellukset sekä aikakriittiset sovellukset kuten tosiaikainen videokuvan siirto.

### 2.1.2 GSM:n pakettikytkentäinen datasiirto

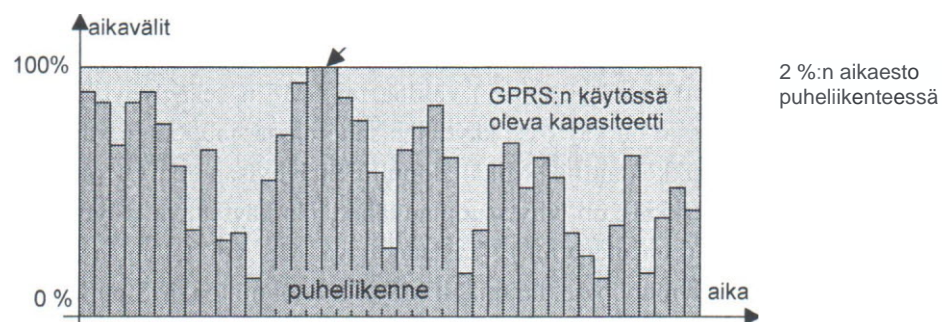
Kaikki tähän mennessä olleet GSM-datasiirtomenetelmät ovat olleet käyttäjän kannalta piirikytkentäisiä, eli käyttäjä on muodostanut yhteyden, siirtänyt dataa ja lopettanut yhteyden. Seuraavana kehitysasteena on pakettikytkentäinen datasiirto GPRS (General Packet Radio Service), joka on otettu vaiheittain käyttöön Suomessa vuosien 2000-2001 aikana. GPRS käyttää useita kanavakoodausluokkia, joista "kevyin" mahdollistaa

käyttäjälle noin 21,4 kbps-datanopeuden. GPRS:ään on spesifioitu myös multislot-toiminne, jolloin teoreettinen maksiminopeus voi olla noin 170 kbps käytettäessä maksimia kahdeksaa aikaväliä rinnakkaisesti. Käytännössä maksimidatanopeus on huomattavasti alhaisempi, mutta joka tapauksessa useita kymmeniä kilobittejä sekunnissa riippuen verkon kuormituksesta ja laitteiden ominaisuuksista.

GSM:n pakettikytkentäinen datapalvelu GPRS on tarkoitettu purskeisen datan välitykseen, jolloin useat käyttäjät voivat jakaa samat radiorajapinnan resurssit tarpeen mukaan. GPRS-palvelussa operaattorin on mahdollista laskuttaa vain välitetystä datasta toisin kuin piirikytkentäisessä palvelussa, jossa laskutus tapahtuu yhteysajan perusteella.

Pakettikytkentäisen datapalvelun käyttöönotto aiheuttaa GSM-verkkoon paljon uudistuksia. Verkkoon tarvitaan sekä uusia verkkoelementtejä että nykyisten elementtien ohjelmisto- ja laitteistopäivityksiä. Lisäksi palvelussa tarvitaan GSM-verkon laajennus, IP-pohjainen (Internet Protocol) GPRS-runkoverkko. Runkoverkko voidaan toteuttaa jo olemassaolevalla infrastruktuurilla.

Vaikka GPRS aiheuttaa merkittäviä investointeja operaattoreille, on järjestelmän toiminta suunniteltu kapasiteetin suhteen hyvin joustavaksi. Olemassaolevilla resursseilla, jotka piirikytkentäisiltä yhteyksiltä jäävät käyttämättä, voidaan siirtää pakettidataliikennettä kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. GPRS käyttää piirikytkentäisiltä GSM-yhteyksiltä jääviä vapaita aikavälejä [1]

GPRS-verkosta voidaan yhdistyä esimerkiksi IP-protokollan mukaisiin Internet-verkkoihin joustavasti, koska GPRS-verkko näkyy ulkopuolisille dataverkoille tavanomaisena Internet-aliverkkona kuten yritysten intranet. GPRS-päätelaitteilla ja

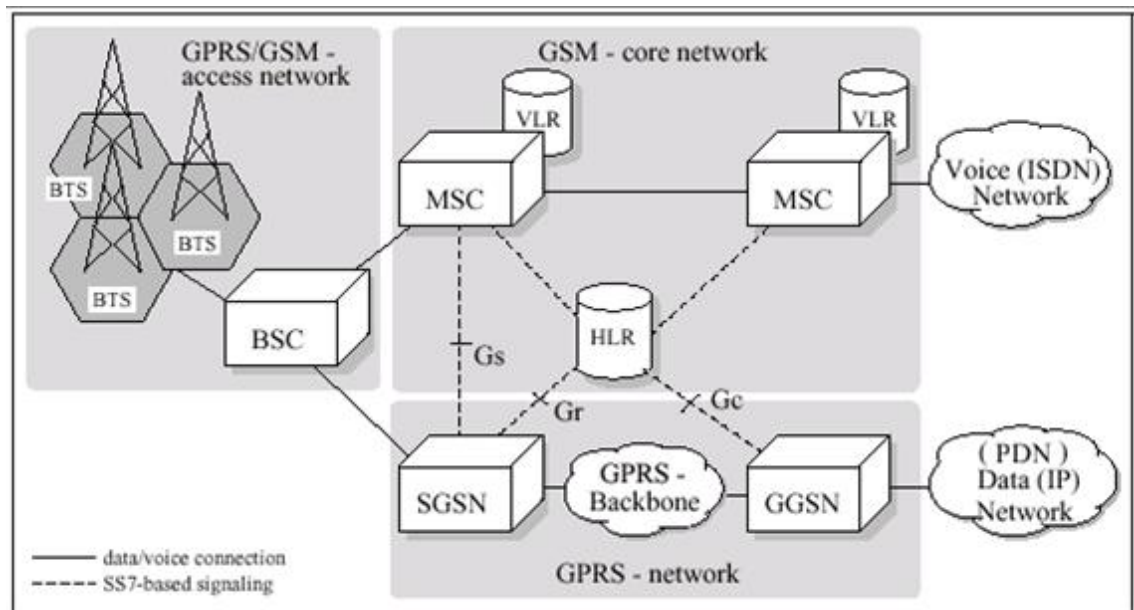
-verkkoelementeillä on omat Internet-osoitteensa, jotka voivat olla myös ns. private-osoitteita (esim. 10.x.x.x).

Päätelaitteet muuttuvat GPRS-palvelussa täysin verrattuna GSM-puhelimiin. GPRS-MS kiinnittyy virran kytkemisen jälkeen loogisesti suoraan GPRS-runkoverkkoon ja on jatkuvassa valmiustilassa lähettämään ja vastaanottamaan dataa. Tällöin ei nopeaa merkinantoa lukuun ottamatta tarvita erillistä yhteydenmuodostusta, toisin kuin piirikytkentäisten yhteyksien alussa modeemien kättelyineen.

Päätelaitteella ei myöskään valita erikseen tilaajanumeroita, vaan liikennöinti on IP-protokollan mukaista. Pakettilähetyksen aloittamiseen merkinantoinen kuluu tyypillisesti muutaman sadan millisekunnin aika, koska merkinanto noudattaa samoja periaatteita kuin puhepalvelussa. [1, s. 158-159]

GPRS-radiokanavien periaate on määritetty joustavaksi. TDMA-kehyksessä voidaan periaatteessa käyttää 1...8 aikaväliä käyttäjän yhteyttä kohden päätelaitteesta riippuen siten, että uplink- ja downlink-aikavälien määrä voi olla erisuuruinen, ja siirtosuunnat ovat täysin riippumattomia toisistaan. Radiorajapinnan resurssit voidaan jakaa dynaamisesti puhe- ja dataliikenteen kesken riippuen verkon palveluiden kuormituksesta ja verkon määrittämisestä. Pakettikytkentäisen palvelun avulla voidaan teoriassa saavuttaa, kun käytetään maksimimäärää aikavälejä ja kevyintä kanavakoodausta, hetkellinen datanopeus 171 kbps. Käytännön nopeus riippuu vahvasti laitteiston tukemista ominaisuuksista sekä verkon kuormituksesta ja häiriötasosta. Todennäköinen alkuvaiheen GPRS-verkon datansiirtonopeus rajoittuu siten muutamaan kymmeneen kilobittiin sekunnissa käyttäjää kohden.

GPRS:ssä määritetään kaksipiste- ja monilähetepalvelut, jotka vastaavat periaatteiltaan GSM-järjestelmän lyhytsanomapalvelua (SMS) ja solulähetystä (CB), mutta ovat GPRS:ssä monipuolisempia. Myös GSM:n lyhytsanomapalvelu on määritetty toimimaan GPRS-verkossa.



Kuva 2. GSM/GPRS-verkon arkkitehtuuri [3]

Uusia verkkoelementtejä perinteiseen GSM-verkkoon verrattuna ovat operointisolmu SGSN (Serving GPRS Support Node), yhdyskäytäväsolmu GGSN (Gateway GPRS Support Node), GPRS-rekisteri (GR, GPRS register), BSC:n yhteyteen tuleva paketiinhjauyksikkö PCU (Packet Control Unit) sekä erillinen GPRS-runkoverkko. GSM-verkon BTS:iin ja BSC:hin tulee ohjelmisto- ja mahdollisesti laitteistomuutoksia riippuen laitteistototeutuksesta ja -versiosta, ja HLR vaatii ohjelmistomuutoksen (kuva 2).

Edellisten lisäksi GPRS-spesifikaatiot määrittävät mahdollisuuden nk. luvalliseen yhteyden seurantaan (Legal Interception), johon liittyy oma elementtinsä. Termiä GSN (GPRS Support Node) eli GPRS-tukisolmu käytetään yleismerkityksessä tarkoittamaan SGSN- ja GGSN-elementtejä. GPRS-verkossa voi olla yksi tai useampi GSN, ja se pitää sisällään määritysten mukaiset toiminnot GPRS-palvelujen mahdollistamiseen.

SGSN toimii samalla hierarkkisella tasolla kuin MSC seuraten yksittäisten GPRS-päätelaitteiden sijaintia. SGSN tietää MS:n sijainnin solun tai reititysalueen RA (Routing Area) tarkkuudella riippuen päätelaitteen liikkuvuuden hallintatilasta MM (Mobility Management). SGSN huolehtii myös käyttäjän tunnistamiseen (authentication) ja suojaukseen (ciphering) liittyvistä toiminnoista. GPRS-yhteys on siten salattu välillä MS-SGSN. SGSN huolehtii lisäksi verkkoon pääsystä (access).

SGSN kytkeytyy BSC:ssä olevaan PCU:hun Frame Relay -verkon kautta. SGSN kommunikoi GPRS-verkon muiden verkkoelementtien kanssa (GGSN ja BG).

SGSN-elementin kautta voidaan myös kerätä tarpeellista laskutustietoa GPRS-yhteyksistä, eli SGSN:n kautta voidaan muodostaa laskutustikettejä CDR (Charging Data Record). Tärkein laskutukseen vaikuttava seikka on radorajapinnan resurssien käyttö. GPRS-järjestelmässä voidaan perus-GSM:stä poiketen laskuttaa esimerkiksi perustuen vain lähetettyyn ja vastaanotettuun käyttäjän dataan, vaikka yhteys olisi loogisesti muodostettuna kauemminkin. Perinteinen GSM:n piirikytkentäinen yhteys laskutetaan periaatteessa aina yhteysajan perusteella, vaikkei varsinaista dataa siirrettäisikään.

Muita SGSN-elementtiin liittyviä toimintoja ovat mm. käyttäjän pakettidatan kompressointi ja pakettien segmentointi ennen PCU:lle ja MS:lle lähettämistä. Myös solunvalinnasta huolehtiminen kuuluu SGSN:n tehtäviin. GSM-järjestelmästä poiketen GPRS-palvelussa ei käytetä kanavanvaihtoa (handover), vaan solun vaihto tapahtuu käyttämällä solunvalinta- ja uudelleenvalintatoimintoja.

GGSN mahdollistaa datansiirron ulkopuolisten dataverkkojen ja GPRS-verkon välillä. GGSN on kytketty SGSN:ään IP-pohjaisen GPRS-runkoverkon kautta. Ulkopuolisille verkoille GGSN näkyy käytännössä IP-verkon reitittimenä (kuten yrityksen rajapintareititin). GGSN on GSM- tai UMTS-verkon (Universal Mobile Telecommunications System) ja ulkopuolisen dataverkon rajapinnassa, ja sen toiminta verkon sisällä on täsmälleen sama sekä GSM:lle että UMTS:lle.

GGSN tietää MS:n sijainnin SGSN:n tarkkuudella, kun MS ja GGSN ovat standby-tilassa, myös tilaajan vieraillessa muissa GPRS-verkoissa. Jos liikkuvuuden hallintatila on ready-tilassa, SGSN tietää MS:n sijainnin solun tarkkuudella. Vaikka GGSN on periaatteessa tavanomaista kiinteän verkon reititintä vastaava elementti, on GPRS- ja kiinteän dataverkon välillä merkittävä ero liikkuvuuden hallinnan suhteen. Siksi normaaleista reitittimistä poiketen GGSN:n on kyettävä reitittämään datayhteydet liikkuvassa ympäristössä. GGSN tavallaan "ankkuroi" yhteyden sen alkuketkistä lähtien. Se tarkoittaa sitä, että yhteys alkaa tietyn GGSN:n kautta. Riippuen GPRS-tilaajan

sijainnista ja liikkeistä GGSN kykenee reitittämään yhteyden eri SGSN:ien kautta saman datayhteyden aikana.

Yhteen GGSN-elementtiin voi olla kytkeytyneenä yksi tai useampi SGSN. Datapaketit SGSN:n ja GGSN:n välillä tunneloidaan erityisellä GTP-protokollalla (GPRS Tunnelling Protocol), jolloin järjestelmä on hyvin joustava mm. mahdollisesti uusien GPRS-järjestelmään spesifioitavien protokollien suhteen.

Kuten SGSN, myös GGSN kykenee keräämään laskutukseen liittyvää informaatiota eli laskutustikettejä pakettidatayhteyksistä. Erona on se, että GGSN pystyy keräämään erityisesti ulkopuolisiin dataverkkoihin liittyvää laskutustietoa. Paketinohjausyksikkö (PCU) huolehtii GSM:n tukiasemajärjestelmän (BSS) tai UMTS:n radiojärjestelmän (UTRAN) ja GPRS-runkoverkon välisestä yhteydestä. PCU erottelee GPRS-paketit piirikytkentäisistä yhteyksistä ja lähettää ne SGSN-elementille. PCU muodostaa nk. PCU-kehysä, jossa on 320 bittiä, ja sen lähetysaika on 20 ms. BSS ja UTRAN pystyvät yhtäläisen kehysrakenteen johdosta käsittelemään PCU-kehysä joustavalla tavalla. Sen lisäksi, että PCU huolehtii datan asettelusta PCU-kehysiin, PCU myös huolehtii kaikista radiotoiminnallisuuteen liittyvistä seikoista GPRS-verkossa. PCU:n tehtävinä ovat siten mm. GPRS-käyttäjien resurssien jako ja verkkoon pääsyn valvonta.

GPRS-rekisteri (GR) sisältää GPRS-tilaaja- ja -reititystiedot. GR on käytännössä yhdistetty HLR:ään lisäämällä siihen GPRS-spesifisiä tietuekenttiä, joten HLR:t vaativat GPRS-ohjelmistopäivityksen. [2, s. 49-56]

EGPRS mahdollistaa yhtä aikaväliä kohden maksiminopeuden 59,2 kbps, ja moniaikavälitekniikalla on mahdollisuus saavuttaa teoreettinen nopeus 384 kbps. Tämä on yksi UMTS-määritysten perusnopeuksista, joten EGPRS voisi tarjota laajan UMTS-palvelualueen näillä nopeuksilla, kun varsinainen UMTS-radioverkko sisältää paikallisesti tätä nopeammat datanopeudet. Kuten perus-GPRS:n tapauksessa, myös EGPRS:llä käytännön datanopeus jäänee huomattavasti teoria-arvoa alhaisemmaksi.

Maaseudulla operaattorit ovat nostaneet verkon datasiirtonopeutta EGPRS-tekniikan avulla, jos investointi 3G-tekniikkaan ei vielä ole ollut kannattavaa.

GPRS-sovellusmahdollisuuksia voivat olla esimerkiksi telemetria, junanohjaussysteemit, tietullit ja Internetin käyttö. Yleisesti ottaen kaikki purskeiseen datasiirtoon liittyvät tiedonsiirto-sovellukset, jotka vaativat lyhyen verkkoon kytkeytymisajan, ovat toteutettavissa GPRS:llä – maksimi datasiirtonopeus huomioonottaen. Sen sijaan esimerkiksi videokuvansiirto, jossa yhteydelle on taattava tietty perusnopeus ilman merkittäviä viiveitä, on ainakin periaatteessa järkevää toteuttaa piirikytkentäisellä tavalla. Käytännössä GPRS-läheteelle on määritetty palvelutasoluokkia, joista osa soveltunee myös videokuvan vaatimaan datansiirtoon.

GPRS-päätelaitteet jaotellaan toiminnallisuutensa perusteella kolmeen luokkaan.

**Luokka A:** MS:llä voi olla samanaikaisesti muodostettuna ja aktiivisena sekä piiri- että pakettikytkentäinen yhteysluokka.

**Luokka B:** MS voi automaattisesti valita joko piiri- tai pakettikytkentäisen yhteyden, mutta MS:llä voi olla aktiivisesti tiedonsiirtoon kytkettynä vain yksi palvelu kerrallaan; jos MS:llä on muodostettu sekä piiri- että pakettikytkentäinen yhteys, vain toista voidaan käyttää kerrallaan, jolloin toinen palvelu on vastaavasti odotustilassa.

**Luokka C:** Vain piiri- tai pakettikytkentäinen yhteys voi olla valittuna kerrallaan (manuaalisesti), eli MS:llä ei voi olla yhtäaikaisesti muodostettuna tai aktiivisena piiri- ja pakettikytkentäistä yhteyttä; tässä luokassa voi olla erikoistapauksena mahdollisuus vain pakettikytkentäiseen yhteyteen.

Päätelaitteet muuttunevat osittain "perinteisistä" malleista erikoissovelluksia vastaaviksi. Tällaisia sovelluksia ovat mm. raha-automaattien huoltotietojen välitys, sähkömittareiden etäluku sekä tietullien automaattinen maksu autoon integroidun GPRS-MS:n avulla. Näissä esimerkeissä järkevä valinta on luokan C päätelaite ilman piirikytkentäistä yhteysmahdollisuutta.

### 2.1.3 3G:n pakettikytkentäinen datasiirto

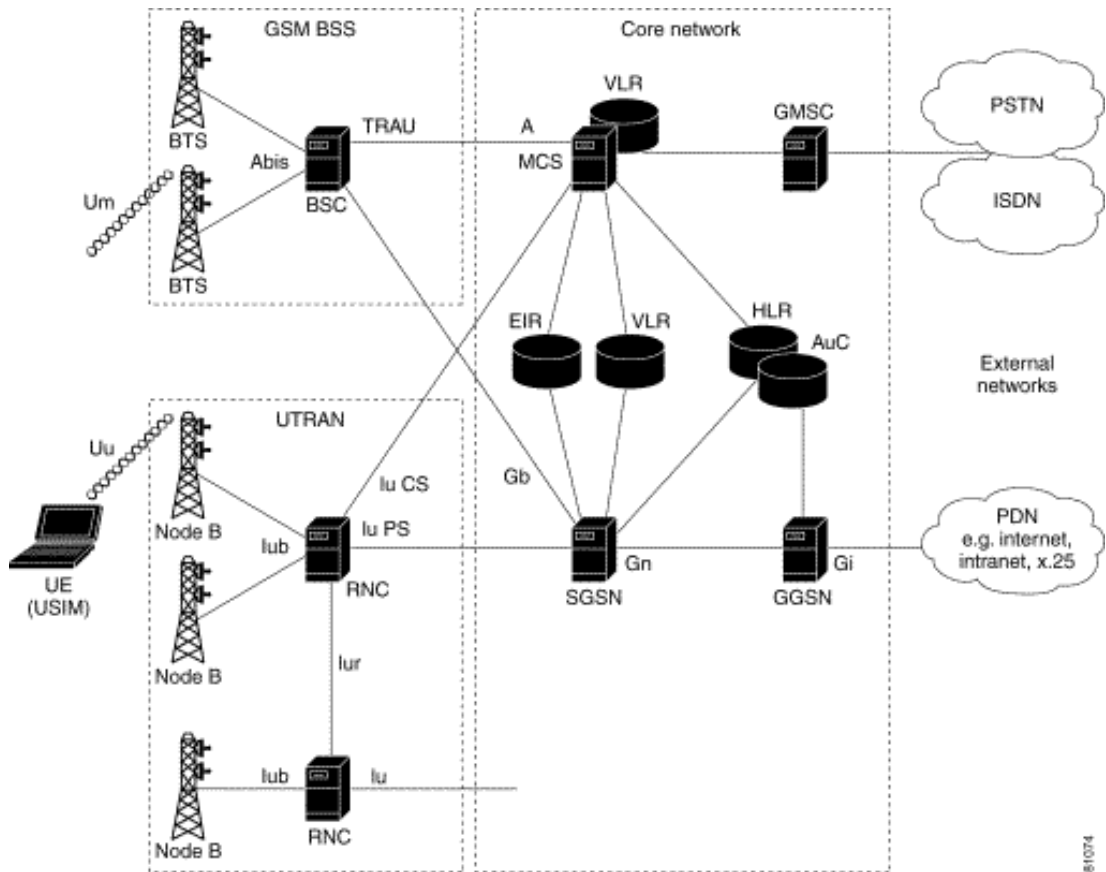
3G-järjestelmä tunnetaan Euroopassa paremmin nimellä UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), jonka määrittelytyön ETSI aloitti 1990-luvun alkupuolella. Vuoden 1999 aikana tapahtui ETSI:n UMTS-spesifioinnin järjestelyissä merkittäviä muutoksia. Kaikki 3G-järjestelmään liittyvä spesifointityö siirtyi 3GPP:n (3th

Generation Partnership Project) tehtäväksi, joka on jatkossakin vastannut 3G- ja 4G-järjestelmien spesifioinnista maailmanlaajuisesti.

UMTS mahdollistaa edeltäjiään suuremmat bittinopeudet, joten se voidaan mieltää multimedian käyttöön soveltuvaksi matkaviestinjärjestelmäksi. GSM-järjestelmä nivoutuu joustavasti 3G-järjestelmään. GSM, ja siitä erityisesti GPRS-runkoverkko voi jakaa samoja resursseja UMTS-järjestelmän kanssa. Kuvassa 3 on esitetty 3G-järjestelmän arkkitehtuuri GSM-järjestelmän rinnalla. UMTS:n määriteltiin aluksi vain uusi radioverkko UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network), joka koostuu tukiasemista (Node B) ja niitä ohjaavista radioverkko-ohjaimista RNC (Radio Network Controller). Radioverkon ja runkoverkon (Core network) yhdistää Iu-rajapinta, joka jakaantuu piirikytkentäiseen (CS) ja pakettikytkentäiseen (PS) osaan. Päätelaitteet (UE) liittyvät radioverkkoon Uu-rajapinnan kautta. Ilmarajapinnassa käytetään hajaspektritekniikkaa WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), jonka myötä datasiirtonopeudet ovat kasvaneet huomattavasti. UMTS-järjestelmässä WCDMA:n kaistanleveydeksi on määritelty 5 MHz.

Runkoverkkona voidaan käyttää yhteistä runkoverkkoa GSM-järjestelmän kanssa. Johtuen erilaisesta siirtotekniikasta Iu-rajapinnassa tarvitaan kuitenkin sovitinlaitteet runkoverkon puolella, ja SGSN on korvattu uudella 3G-SGSN:llä.

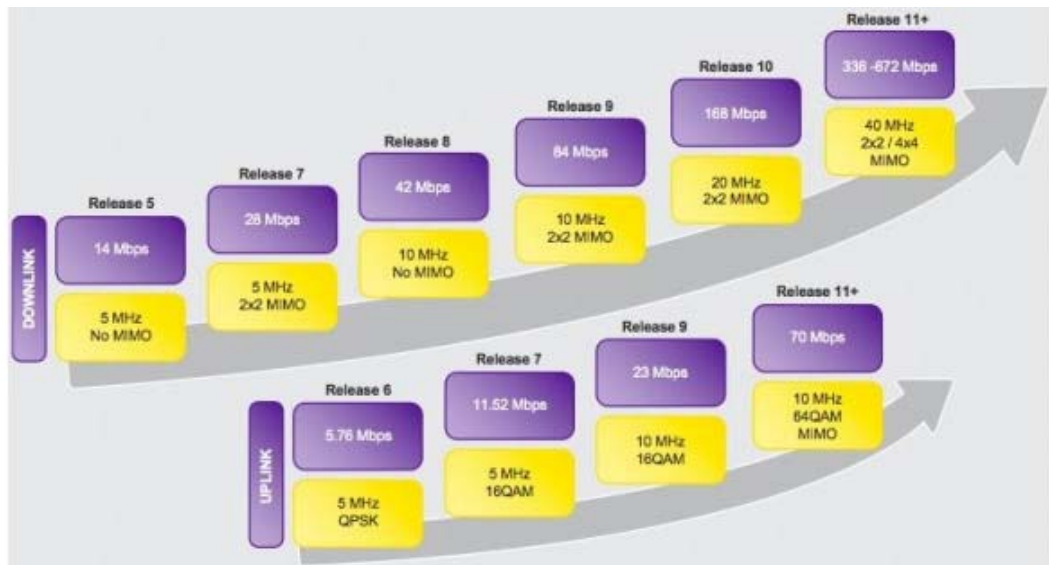
Spesifikaatioiden mukainen ensimmäinen UMTS-verkko on Release 99:n mukainen, joka määrittelee piirikytkentäiset palvelut sekä pakettikytkentäiset datasiirtopalvelut. Lisävaatimuksina ovat vähintään piirikytkentäisen 64 kbps- ja vähintään pakettikytkentäisen 2 Mbps -käyttäjänopeuden tukeminen.



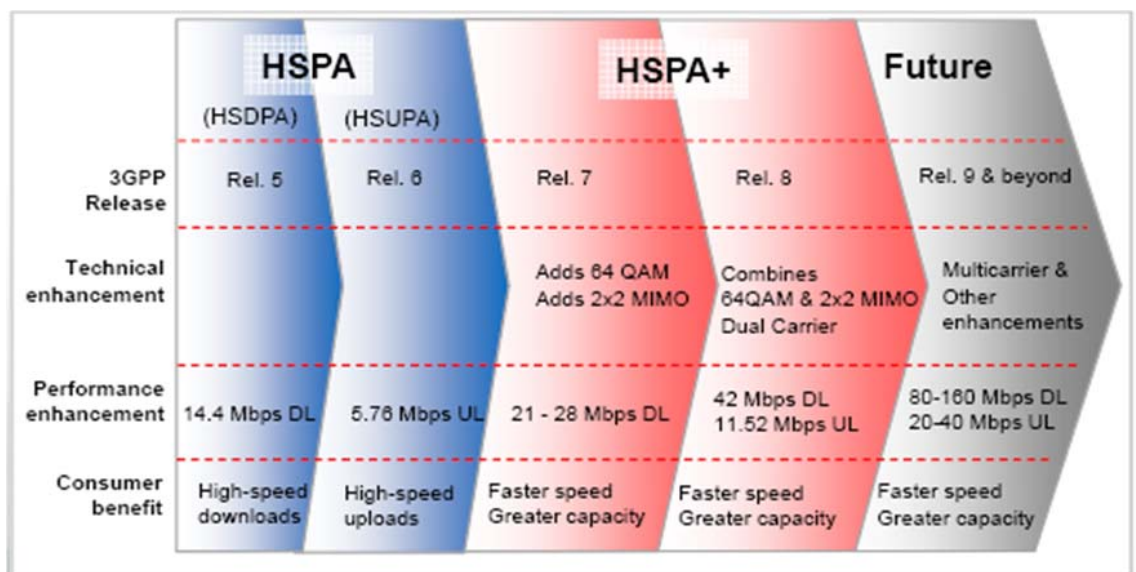
Kuva 3. 3G-verkon arkkitehtuuri [4]

Käytännössä tuetut maksiminopeudet jäivät kuitenkin vain arvoon 384 kbps. Release 99:n käyttöönotto tapahtui Suomessa vuonna 2002 ja vasta Release 5 ja sitä seuranneet julkaisut (Release 6, 7 ja 8) ovat tuoneet merkittäviä lisäyksiä datasiirtonopeuksiin.

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty julkaisut ja niihin liittyvät tekniikat ja suorituskykyarvot. HSPA (High Speed Packet Access) on yhteinen nimitys HSDPA- (High Speed Downlink Packet Access) ja HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) -tekniikoille. HSPA-arkkitehtuuri vaatii muutoksia radioverkkoon, protokolla-arkkitehtuuriin sekä verkkoelementtien toiminnallisuuteen ja rajapintoihin. Käytetyllä päätelaitteella pitää myös löytyä tuki verkon käyttämään Release-versioon.



Kuva 4. 3GPP-Julkaisut (Releases) [5]



Kuva 5. 3GPP HSPA ja HSPA+ [6]

Seuraavassa on kuvattu tarkemmin julkaisut ja niihin liittyvät tekniset parametrit.

### Release 5

Release 5 on ensimmäinen HSPA-tekniikkaa tukeva julkaisu, jossa määriteltiin HSDPA-tekniikan ominaisuudet. Se tukee maksimissaan 14,4 Mbps tiedonsiirtonopeutta, kun käytettävissä on 16QAM-modulaatiotekniikka ja maksimimäärä koodeja (15 koodia).

Release 5 ei vielä tue MIMO (Multiple Input Multiple Output) -moniantennitekniikkaa. Käytännössä nopeudet jäävät kuitenkin huomattavasti alhaisemmiksi, koska koodeja on käytettävissä rajattu määrä ja radiotien huonon laadun vuoksi joudutaan käyttämään enemmän virheenkorjausta ja mahdollisesti vain QPSK-modulaatiota.

### **Release 6**

Release 6 vaikuttaa ainoastaan HSUPA-tekniikkaan tuoden 5,76 Mbps tiedonsiirtonopeuden päätelaitteelta verkkoon päin.

### **Release 7**

Release 7 tuo parannuksen molempiin siirtosuuntiin. HSDPA-tekniikassa otetaan käyttöön 2x2 MIMO -tekniikka sekä 64QAM-modulaatio, jotka yhdessä mahdollistavat maksimissaan 28 Mbps:n teoreettisen tiedonsiirtonopeuden. HSUPA-tekniikka tukee 16 QAM -modulaatiotekniikkaa, joka kaksinkertaistaa aiemman siirtonopeuden.

### **Release 8**

Release 8 tuo tullessaan ns. Dual Carrier -tekniikan, jossa yhden kantoaallon sijasta käytetään kahta kantoaaltoa. Maksimitiedonsiirtonopeus on 42 Mbps alasuuntaan.

Release 7 ja Release 8 edustavat HSPA+ -tekniikkaa. Release 8 on myös ensimmäinen ns. LTE (Long Term Evolution) -julkaisu, ja sitä seuraavat julkaisut tuovat uudistuksia LTE-tekniikkaan.

Tällä hetkellä operaattorien 3G-verkot tukevat Release 7- ja 8-tekniikkaa, joita voidaan hyödyntää niitä tukevilla päätelaitteilla.

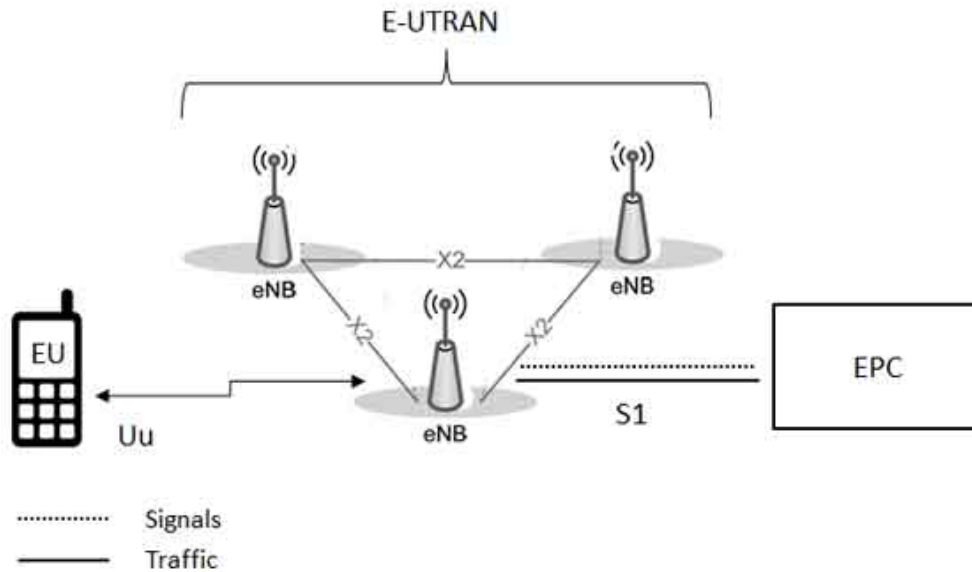
#### **2.1.4 LTE:n datasiirto**

LTE on ensimmäinen 3G-tekniikka, jossa radioliikenne tukiasemasta päätelaitteeseen on toteutettu erilaisella radiotekniikalla kuin radioliikenne päätelaitteesta tukiasemaan. Datan siirto tukiasemasta päätelaitteeseen tapahtuu OFDMA-tekniikalla (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ja päätelaitteesta tukiasemaan SC-FDMA-tekniikalla (Single Carrier- Frequency Division Multiple Access).

Data kulkee tukiasemasta päätelaitteeseen useita radioteitä pitkin eli niin sanotulla MIMO-tekniikalla, joka radiokanavan olosuhteista riippuen joko parantaa tiedonsiirron luotettavuutta tai mahdollistaa paljon tavallista suuremmat tiedonsiirtonopeudet. Standardi tukee monta erilaista tapaa MIMO:n hyödyntämiseen, joista paras valitaan tukiaseman ja päätelaitteen välillä vallitsevien kanavaolosuhteiden mukaan.

Mahdollisia ovat mm. perustekniikkana käytetty luotettavuutta parantava tila-taajuuskoodaus (Transmit diversity, käytännössä Space Frequency Block Code), tai olosuhteiden salliessa nopeuksia kasvattavat suljetun tai avoimen silmukan avaruudellinen limitys (closed/open-loop spatial multiplexing) tai lähetyksen tehoa suuntaava säteenmuodostus (beamforming). Lisäksi voidaan käyttää solun kokonaiskapasiteettia kasvattavaa MU-MIMOa (Multi-User MIMO), jossa samaa aika-taajuus-resurssia käyttää monta eri käyttäjää. LTE tukee useita eri modulaatiotekniikoita (QPSK, 16QAM ja 64QAM) sekä joustavaa kaistanleveyttä aina 20 MHz:iin saakka.

LTE-tekniikka ei tukeudu olevaan 2G/3G-tekniikkaan vaan vaatii sekä radioverkkoon että runkoverkkoon uudet laitteet. Kuvassa 6 on esitetty LTE-verkon arkkitehtuuri. Radioverkko E-UTRAN (Evolved-UTRAN) muodostuu pelkistä tukiasemista eNB, jotka on liitetty toisiinsa X2-rajapinnan kautta. Yhteys radioverkosta runkoverkkoon EPC (Evolved Packet Core) on toteutettu S1-rajapinnan kautta. LTE-verkko ei tue enää piirikytkentäisiä palveluita, vaan kaikki liikenne on pakettimuotoista IP-protokollaan pohjautuvaa tiedonsiirtoa. Näin ollen myös puheensierito perustuu VoIP (Voice over Internet Protocol) -tekniikkaan. EPC:n puolelta löytyvät yhdyskäytävät Internetiin sekä 2G/3G-mobiiliverkkoihin.



Kuva 6. LTE-verkon arkkitehtuuri [7]

LTE on julkaistu Release 8:sta lähtien. Kuvassa 7 on esitetty LTE-datasiirtonopeudet alasuuntaan eri kaistaleveyksillä kategorioittain. Teoreettinen maksiminopeus on 300 Mbps verkosta päätelaitteelle. Yläsuunnassa voidaan saavuttaa 75 Mbps:n maksiminopeus.

Table 1 LTE Categories (downlink data rate in bits/s)

Bandwidth used	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Category 1	10M	10M	10M	10M
Category 2	37.5M	50M	50M	50M
Category 3	37.5M	75M	100M	100M
Category 4	37.5M	75M	112.5M	150M
Category 5	75M	75M	225M	300M

Kuva 7. LTE Datasiirtonopeudet (Down Link) [8]

Release 10 määrittelee LTE-Advanced-tekniikan, mikä täyttää virallisesti 3GPP:n asettamat 4G-tekniikan vaatimukset. Siinä maksimitiedonsiirtonopeus alasuuntaan on 1 Gbps sekä yläsuuntaan 500 Mbps. Tällä hetkellä operaattorit tukevat Release 8:n mukaista LTE-tekniikka.

### 3 Datasiirtopalvelun parametrit

#### 3.1 GPRS-palvelun parametrit

Operaattori voi määrittää solun aikaväleistä tietyn minimiarvon GPRS-yhteyksille. Tällä menettelyllä voidaan taata GPRS-palvelua myös GSM-liikenteen kiiretuntien ja kuormahuippujen aikana. Toisaalta GPRS:lle voidaan määrittää myös maksimimäärä aikavälejä, jolloin minimin ja maksimin välinen aikavälien määrä on jaettavissa dynaamisesti piiri- ja pakettikytkentäisille yhteyksille kuvan. Loput aikavälit varataan siten piirikytkentäisille yhteyksille. Mikään ei estä tällaisessa ratkaisussa määrittämästä solua myös puhtaasti GPRS-liikenteelle.

Spesifikaatiot eivät ota kantaa kiinteiden GPRS-kanavien määrittämiseen, joten ratkaisu on laitevalmistajariippuvainen. Siten verkossa ei ole välttämättä mahdollisuutta määrittää kiinteitä GPRS-aikavälejä, tai niiden maksimilukumäärä on rajoitettu pienemmäksi kuin solun kokonaisuikavälien lukumäärä. Kiinteästi määritetyt GPRS-aikavälit vähentävät GSM-yhteyksien aikavälien lukumäärää. Mitä tehokkaammin puhepalvelulle voidaan tarjota kapasiteettia, sitä vähemmän resursseja jää jäljelle GPRS-yhteyksille. [2, s. 146-147]

GPRS-radiokanavien periaate on määritetty joustavaksi. TDMA-kehyksessä voidaan periaatteessa käyttää 1...8 aikaväliä käyttäjän yhteyttä kohden (päätelaiteriippuvainen) siten, että uplink- ja downlink-aikavälien määrä voi olla erisuuruinen. Radiorajapinnan resurssit voidaan jakaa dynaamisesti puhe- ja dataliikenteen kesken riippuen verkon palveluiden kuormituksesta ja verkon määrittämisestä. Pakettikytkentäisen palvelun avulla voidaan teoriassa saavuttaa, käytettäessä maksimia määrää aikavälejä ja tehokkainta kanavakoodausta, hetkellinen datanopeus 158...171 kbps. [1, s. 159-160]

##### 3.1.1 GPRS-järjestelmän kanavakoodausluokat

GPRS-järjestelmään on määritetty neljä kanavakoodausluokkaa, joita merkitään tunnuksilla CS-1...CS-4 (Channel coding Scheme). CS-1 käyttää tehokkainta kanavakoodausmenetelmää, joka on sama kuin GSM-järjestelmässä käytettävä

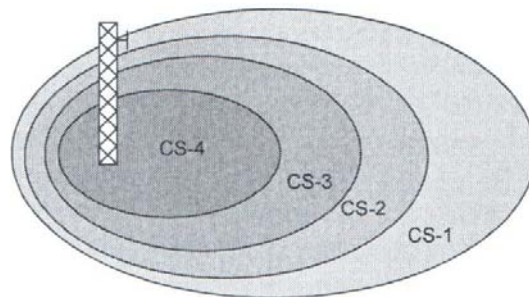
koodaus. CS-2 ja CS-3 ovat "kevennettyjä" versioita edellisestä, eikä CS-4-luokassa kanavakoodausta käytetä lainkaan.

Mitä tehokkaampaa kanavakoodausta käytetään, sitä pienempi hyötykuorman osuus on lähetteestä. Täten CS-1-kanavakoodauksella saavutettava käyttäjän tiedonsiirtonopeus aikaväliä kohden on luokkaa 9,05 kbps, kun vähiten suojatulla luokalla CS-4 nopeus on luokkaa 21,4 kbps. Taulukossa 1 on lueteltu GPRS-kanavakoodausluokkia vastaavia arvoja.

Taulukko 1. GPRS-kanavakoodausluokat ja datasiirtonopeudet [9]

Scheme	Code rate	USF	Pre-coded USF	Radio Block excl. USF and BCS	BCS	Tail	Coded bits	Punctured bits	Data rate kb/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	13.4
CS-3	≈3/4	3	6	312	16	4	676	220	15.6
CS-4	1	3	12	428	16	-	456	-	21.4

Mitä heikommin suojattua kanavakoodausluokkaa käytetään, sitä parempi on yhteyden C/I-suhteen oltava. Koska CS-1 vastaa puhekanavan suorituskykyä C/I-suhteen osalta, on sen avulla saatava peittoalue samaa luokkaa kuin tavallisessa GSM-verkossakin. Muut kanavakoodausluokat vaativat toimiakseen paremman C/I-suhteen, joten kullakin kanavakoodausluokalla on käytännössä kuvan 8 kaltaiset, toisistaan eriävät peittoalueet. Luokissa CS-2 ja CS-3 käytetään lävistystä (puncturing), ja luokassa CS-4 ei käytetä lainkaan koodausta.



Kuva 8. Kutakin GPRS-kanavakoodausluokkaa vastaa tietty peittoalue [1]

Kanavakoodaus vaikuttaa siis datanopeuteen ja saavutettavaan peittoalueeseen. Koska yhteydelle valitaan kulloinkin optimaalisin kanavakoodaus, tarkoittaa se käytännössä suurimpia datanopeuksia tukiaseman läheisyydessä ja pienimpiä peittoalueen rajoilla. Spesifikaatioiden mukaan kanavakoodausluokkien vaihto tapahtuu dynaamisesti yhteyden aikana, joten katkoksia ei tästä syystä tapahdu.

Päätelaitteiden on tuettava ensimmäisestä vaiheesta alkaen kaikkia GPRS-kanavakoodausluokkia CS-1...CS-4, kun taas tukiaseman on tuettava vain luokkaa CS-1. MS kykenee näin ollen kaikkiin GPRS-tiedonsiirtonopeuksiin 9,05/13,4/15,6/21,4 kbps, ja laitevalmistajasta riippuu, tukeeko tukiasema 9,05 kbps suurempia nopeuksia GPRS-palvelun alusta saakka. Yleisimmin käytetyt kanavakoodausluokat ulkosoluissa ovat CS-1 ja CS-2. [1, s. 160-161]

### 3.1.2 Moniaikaväli luokat

GPRS-palveluun on määritetty 29 moniaikaväli luokkaa (multislot classes) taulukon 2 mukaisesti. Taulukon lukuarvot pätevät luokkien 1...18 osalta samalla myös HSCSD-palvelulle.

Taulukko 2. GPRS-moniaikaväli luokat [10]

Multislot class	Maximum number of time slots used		Multislot class	Maximum number of time slots used	
	Reception RX	Transmission TX		Reception RX	Transmission TX
1	1	1	16	6	6
2	2	1	17	7	7
3	2	2	18	8	8
4	3	1	19	6	2
5	2	2	20	6	3
6	3	2	21	6	4
7	3	3	22	6	4
8	4	1	23	6	6
9	3	2	24	8	2
10	4	2	25	8	3
11	4	3	26	8	4
12	4	4	27	8	4
	3	3	28	8	6
14	4	4	29	8	8
15	5	5			

Taulukon RX tarkoittaa kunkin TDMA-kehyksen aikana vastaanotettujen (downlink) rinnakkaisten aikavälien (TS) maksimilukumäärää käyttäjää kohti, eli vastaanottoaikavälien lukumäärä voi olla välillä  $0 \leq \text{aikavälien lukumäärä} \leq \text{RX}$ . Sama periaate pätee taulukon lähetysaikaväleihin (TX) (Uplink). Luokissa saattaa olla kuitenkin rajoituksia lähetys- ja vastaanottoaikavälien yhteenlasketulle lukumäärälle.

### 3.1.3 GPRS:n resurssien jako

Kun GPRS-MS vastaanottaa dataa downlink-suunnassa, verkko jakaa resursseja dynaamisesti riippuen verkon kuormituksesta. Siten usea GPRS-käyttäjä voi jakaa samoja radiatorajapinnan resursseja samanaikaisesti.

Yhteyden alussa verkko päättää, kuinka monta aikaväliä ja miltä solun taajuudelta kullekin käyttäjälle voidaan määrittää. Usean käyttäjän samanaikainen yhteys samoilla aikaväleillä hallitaan TBF-parametrillä (Temporary Block Flow). Kullekin GPRS-käyttäjälle annetaan yhteyden ajaksi oma TBF-parametrin arvonsa, jotta MS:t voivat vastaanottaa vain itselleen tarkoitetut paketit aikavälien datavirrasta. TBF-parametria voidaan käyttää sekä uplink- että downlink-suunnassa, TBF on osa TFI-kentästä (Temporary Flow Identity). TFI-parametri on viiden bitin pituinen, joten sen arvo voi olla välillä 0...31.

TFI-parametrien arvot ovat riippumattomia toisistaan uplink- ja downlink-suunnissa, joten eri käyttäjillä voi olla sama parametrin arvo eri siirtosuunnissa. TFI on määritettynä tietylle käyttäjälle, kunnes TBF:n olemassaolo lakkaa, ja TFI:n arvo voidaan antaa uudelle käyttäjälle.

Resurssien määrittäminen downlink-suunnassa on hallittu toimenpide, koska verkko (PCU) pystyy jakamaan resurssit aina tarvittaessa myös usealle yhtäaikaiselle käyttäjälle samoilla aikaväleillä. Uplink-suunta on hieman monimutkaisempi, koska usean käyttäjän datalähetteet voisivat pahimmassa tapauksessa häiritä toisiaan yhteentörmäysten johdosta. Dynaaminen resurssien jako on joustava menetelmä. Se perustuu USF-parametrin (Uplink State Flag) käyttöön. USF on kolmen bitin pituinen parametri, eli se voi saada arvoja välillä 0...7. USF-parametrilla ilmaistaan downlinkissä MS:lle kulloinkin se seuraava uplink-radiolohko, jossa MS voi lähettää datapaketin tai

koko radiosanomana eli neljän lohkon pituisen pakettisarjan. Riippuen GPRS:n kanavakonfiguraatiosta, uplink-suunnassa voi olla käytännössä 6 tai 8 yhtäaikaista käyttäjää samalla aikavälillä.

GPRS:n resurssien vapautus on yhtä dynaamista kuin resurssien varauskin. Downlink-suunnassa MS:lle ilmaistaan pakettien loppuminen FBI-parametrin (Final Block Indicator) avulla. Se on yhden bitin pituinen parametri, ja kun verkko lähettää viimeisen paketin eli RLC/MAC-lohkon MS:lle, paketin yhteydessä oleva FBI:n arvo muutetaan ykköseksi. FBI-bitti on pakollinen osa RLC-otsikkokentässä. RLC:n kuittaustilassa (knowledge mode) FBI:n arvo on 1 viimeisessä radiolohkossa, kun kuittaamattomassa tilassa (unacknowledged mode) FBI:n arvo voi olla 1 missä tahansa neljästä viimeisestä radiolohkosta. Radiosanomahan koostuu neljästä peräkkäisestä radiolohkosta. [1, s. 75-77]

## 3.2 EGPRS:n parametrit

EGPRS on parannus ensimmäisen vaiheen GPRS-palveluun. EGPRS määrittää edeltäjänsä suuremman joukon kanavakoodausluokkia. Datansiirtonopeus saadaan siten huomattavasti korkeammaksi kuin perus-GPRS-palvelun yhteydessä yksittäistä aikaväliä kohden. EGPRS määrittää HSCSD:n tavoin myös moniaikavälitekniikan (multislot), jolla nopeutta saadaan edelleen kasvatettua. Moniaikavälitekniikan ja kanavakoodausluokkien kombinaatioilla on mahdollista saavuttaa teoriassa jopa yli 400 kbps datanopeus käyttäjää kohden. Arvo jäänee käytännössä kuitenkin huomattavasti alhaisemmaksi. [2, s. 228]

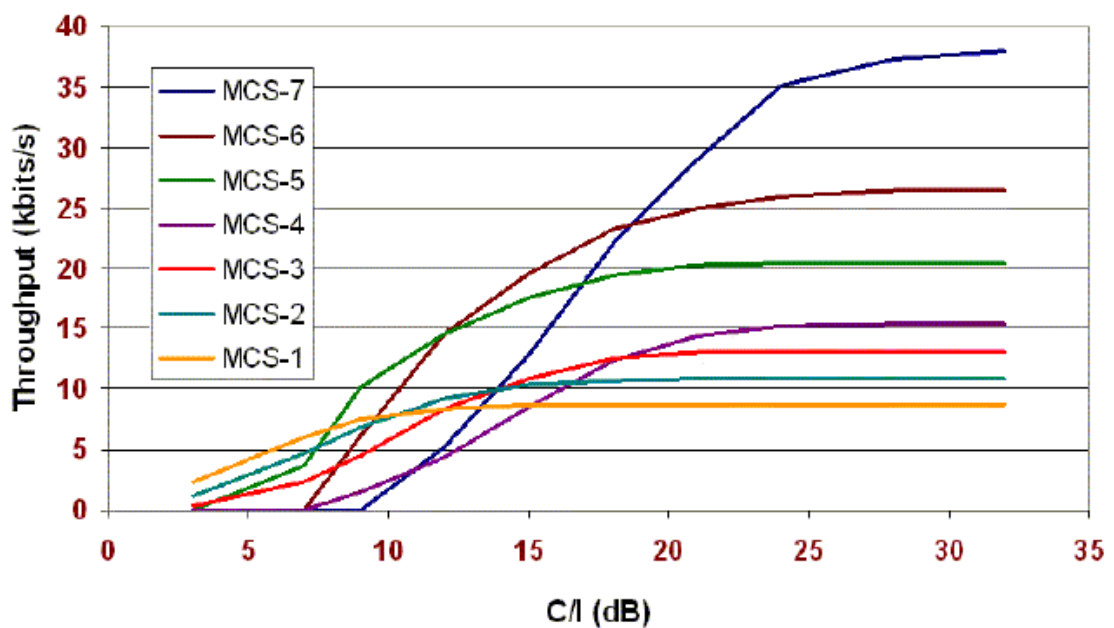
### 3.2.1 EGPRS:n kanavakoodausluokat

EGPRS:n käyttämiä kanavakoodausluokkia kutsutaan nimellä MCS (Modulation and Coding Scheme). Luokat MCS-1...MCS-4 käyttävät perinteistä GSM:n modulaatiota eli 0,3 GMSK:ta, kun luokat MCS-5...MCS-9 käyttävät uutta 8-PSK-modulaatiota. Taulukossa 3 on esitetty EGPRS:n kanavakoodausluokkiin liittyviä tärkeimpiä parametreja ja lukuarvoja.

Taulukko 3. EGPRS-kanavakoodauksiin liittyviä parametreja.

luokka	koodinopeus	otsikon koodinopeus	modulaatio	datanopeus (kbps)
MCS-1	0,53	0,53	0,3 GMSK	8,8
MCS-2	0,66	0,53	0,3 GMSK	11,2
MCS-3	0,80	0,53	0,3 GMSK	14,8
MCS-4	1,00	0,53	0,3 GMSK	17,6
MCS-5	0,37	1/3	8-PSK	22,4
MCS-6	0,49	1/3	8-PSK	29,6
MCS-7	0,76	0,36	8-PSK	44,8
MCS-8	0,92	0,36	8-PSK	54,4
MCS-9	1,00	0,36	8-PSK	59,2

Kuten EHSD:ssä, myös EGPRS:ssä on käytössä automaattinen linkkisovitus ALA (Automatic Link Adaptation). Kuva 9 esittää karkean periaatteen eri kanavakoodausluokilla saavutettavasta käyttäjän datanopeudesta. Kukin luokka on optimoitu toimivaksi vain tietyllä C/I-suhteen arvoalueella, minkä jälkeen datanopeus ei enää kasva C/I:n kasvaessa vaan saturoituu. Vaihtamalla kanavakoodausluokkaa "lennossa" eli seuraamalla kuvan 9 verhokäyrää saavutetaan ideaalisessa tapauksessa maksimaalinen datanopeus C/I:n funktiona. Käytännössä linkkisovitus ei välttämättä ole lähellä ideaalista tilannetta, mutta periaatteena tekniikka on toimiva.



Kuva 9. EGPRS:n kanavakoodausluokkien ja C/I-suhteiden vastaavuus [11]

### 3.2.2 EGPRS:n resurssien jako

EGPRS:n resurssien jako toimii samalla tavoin kuin GPRS-järjestelmässä. Ainoa muutos GPRS:ään verrattuna on uuden modulaatiotekniikan 8-PSK käyttöönotto radiotiellä, joka kolminkertaistaa siirtonopeuden aikaväliä kohden. Siirrettävän datamäärän kasvu pitää huomioida siirtoverkon mitoituksessa tukiasemasta runkoverkkoon päin.

## 3.3 3G:n parametrit

### 3.3.1 Release 99:n parametrit

3G-verkon radorajapinta käyttää WCDMA-tekniikkaa, jossa kaikki tukiasemat ja päätelaitteet toimivat samalla 5 MHz:n levyisellä taajuuskaistalla. Tukiasemat ja käyttäjät erotetaan toisistaan sekoituskoodien SC (Scrambling Code) avulla. Käyttäjän lähettämä data levitetään 5 MHz:n kaistalle kanavointikoodin CC (Channellization Code) avulla, johon on määritelty useita levityskertoimen SF (Spreading Factor) arvoja. Taulukossa 4 on esitetty SF-arvoja vastaavat tiedonsiirtonopeudet ylä- (UL) ja ala (DL) -suuntaan. Nämä nopeudet on määritelty Release 99:n palveluille. HSPA-tekniikassa (Release 5:stä eteenpäin) toteutus on erilainen. Release 99:ssä siirtojakson TTI (Transmission Time Interval) pirus on 10 ms, mikä tarkoittaa, että käyttäjä varaa tietyn kanavointikoodin 10 ms:n ajaksi.

Taulukko 4. WCDMA:n datasiirtonopeudet [12]

Radio bearer	SF	Radio bearer	SF
Speech 12.2 UL	64	Speech 12.2 DL	128
Data 64 kbps UL	16	Data 64 kbps DL	32
Data 128 kbps UL	8	Data 128 kbps DL	16
Data 144 kbps UL	8	Data 144 kbps DL	16
Data 384 kbps UL	4	Data 384 kbps DL	8

### 3.3.2 HSPA:n parametrit

HSPA on UMTS:n kehitysversio, joka nopeuttaa käyttäjän tiedonsiirtonopeutta molempiin siirtosuuntiin. HSDPA määrittelee käyttäjän latausnopeuden verkosta

päätelaitteelle, ja HSUPA vastaavasti käyttäjän lähetysnopeuden verkkoon päin. HSDPA on määritelty useampana peräkkäisenä julkaisuna (Release 5-11), joissa muutoksia on tapahtunut lähinnä modulaatio- ja antennitekniikassa.

HSDPA:ssa käyttäjän tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavat

- käytetty julkaisu (Release)
- päätelaitteen kategoria
- kanavointikoodien määrä
- modulaatiotekniikka
- koodinopeus
- TTI-jakson pituus
- samanaikaisten käyttäjien määrä verkossa
- MIMO-tasot.

Modulaatiotekniikka ja koodinopeus mukautuvat radiotien signaalin laadun mukaan ja siihen vaikuttavat pääasiassa päätelaitteen etäisyys tukiasemasta sekä radiotiellä olevat esteet. TTI-jakso on HSDPA:ssa vakio 2 ms. Kanavointikoodi käyttää HSDPA-palvelussa aina arvoa  $SF=16$ . Kanavointikoodeja on enimmillään käytettävissä 15 kappaletta ja niiden määrä riippuu päätelaitteen kategoriasta ja verkon konfiguroinnista. Jos samalla radiokanavalla tarjotaan myös Release 99:n palveluita, on käytettävissä olevien koodien määrä enintään 10. Yksittäinen käyttäjä voi saada tarvitsemansa määrän koodeja aina TTI-jakso kerrallaan. Jos lähetettävää dataa ei ole, siirrytään automattisesti hitaampaan palveluun, jolloin resurssit vapautuvat muiden käyttöön. Taulukossa 5 on esitetty HSDPA:n maksimi datasiirtonopeudet eri parametrien arvoilla. Parametreina ovat julkaisu (release), kategoria, koodien määrä, modulaatio, MIMO-tasot sekä koodinopeus. Taulukon 5 maksimitiedonsiirtonopeus on fyysisellä tasolla ja sovellustasolla nopeus on n. 85 % johtuen otsakkeen aiheuttamasta kuormasta.

Taulukko 5. HSDPA:n nopeudet kategorioittain [13]

3GPP Release	Category	Max. number of HS-DSCH codes	Modulation <sup>[note 1]</sup>	MIMO, Multi-Cell	Code rate at max. data rate <sup>[note 2]</sup>	Max. data rate [Mbit/s] <sup>[note 3]</sup>
Release 5	1	5	16-QAM		.76	1.2
Release 5	2	5	16-QAM		.76	1.2
Release 5	3	5	16-QAM		.76	1.8
Release 5	4	5	16-QAM		.76	1.8
Release 5	5	5	16-QAM		.76	3.6
Release 5	6	5	16-QAM		.76	3.6
Release 5	7	10	16-QAM		.75	7.2
Release 5	8	10	16-QAM		.76	7.2
Release 5	9	15	16-QAM		.70	10.1
Release 5	10	15	16-QAM		.97	14.0
Release 5	11	5	QPSK		.76	0.9
Release 5	12	5	QPSK		.76	1.8
Release 7	13	15	64-QAM		.82	17.6
Release 7	14	15	64-QAM		.98	21.1
Release 7	15	15	16-QAM	MIMO 2x2	.81	23.4
Release 7	16	15	16-QAM	MIMO 2x2	.97	28.0
Release 7	19	15	64-QAM	MIMO 2x2	.82	35.3
Release 7	20	15	64-QAM 16-QAM (MIMO)	MIMO 2x2	.98	28
Release 8	21	15	16-QAM	Dual-Cell	.81	23.4
Release 8	22	15	16-QAM	Dual-Cell	.97	28.0
Release 8	23	15	64-QAM	Dual-Cell	.82	35.3
Release 8	24	15	64-QAM	Dual-Cell	.98	42.2
Release 9	25	15	16-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	.81	46.7
Release 9	26	15	16-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	.97	55.9
Release 9	27	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	.82	70.6
Release 9	28	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO 2x2	.98	84.4
Release 10	29	15	64-QAM	Triple-Cell	.98	63.3
Release 10	30	15	64-QAM	Triple-Cell + MIMO 2x2	.98	126.6
Release 10	31	15	64-QAM	Quad-Cell	.98	84.4
Release 10	32	15	64-QAM	Quad-Cell + MIMO 2x2	.98	168.8
Release 11	33	15	64-QAM	Hexa-Cell	.98	126.6
Release 11	34	15	64-QAM	Hexa-Cell + MIMO 2x2	.98	253.2
Release 11	35	15	64-QAM	Octa-Cell	.98	168.8
Release 11	36	15	64-QAM	Octa-Cell + MIMO 2x2	.98	337.5
Release 11	37	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO 4x4	.98	168.8
Release 11	38	15	64-QAM	Quad-Cell + MIMO 4x4	.98	337.5

HSUPA:ssa TTI-jakso voi olla 10 tai 2 ms, ja levityskertoimen arvo vaihtelee. Niinikään Release 6 ei vielä tue mukautuvaa modulaatiota, mutta Release 7 määrittelee myös 16QAM-modulaation.

Taulukossa 6 on esitetty HSUPA-palvelun maksimidatasiirtonopeudet kategorioittain.

Taulukko 6. HSUPA:n nopeudet kategorioittain [14]

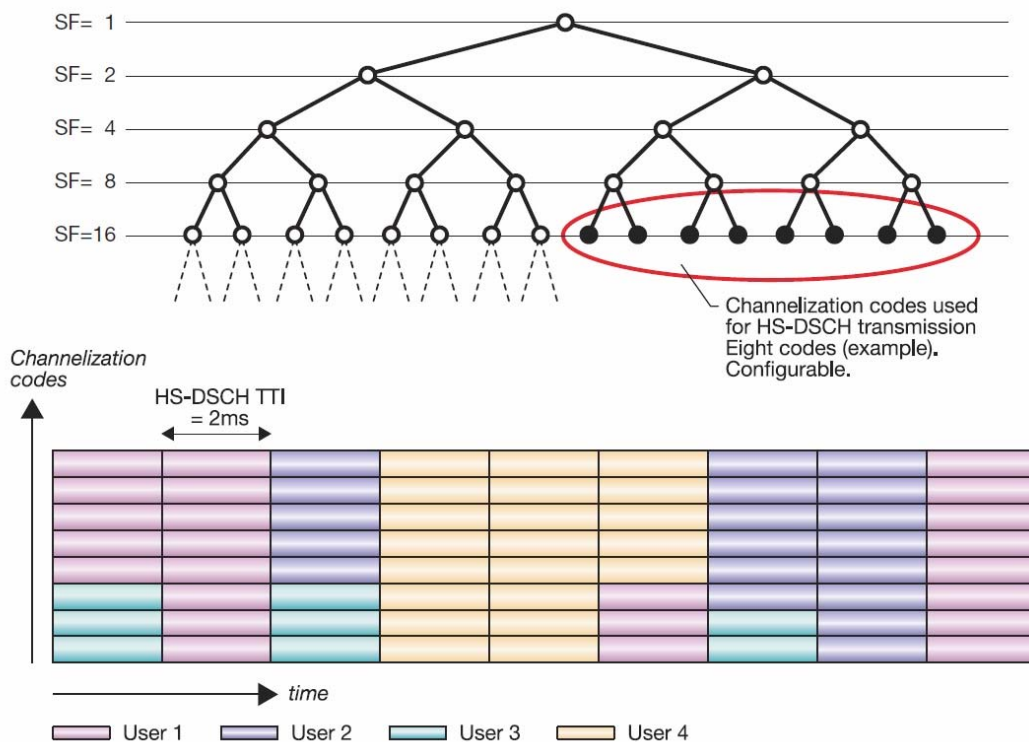
HSUPA Category	Max Uplink Speed	Examples
Category 1	0.73 Mbit/s	
Category 2	1.46 Mbit/s	
Category 3	1.46 Mbit/s	
Category 4	2.93 Mbit/s	Qualcomm 6290
Category 5	2.00 Mbit/s	Nokia: Nokia Asha 311, X3-02, X3-01, N8, C7,[2] C5,[3] C3-01, E52, E72, E55, 6700 Classic, N900, 5630 XpressMusic; BlackBerry: Storm 9500, 9530; HTC: Dream, Passion (Nexus One);[4] Sony Ericsson C510, Sony Ericsson C903, Sony Ericsson W705, Sony Ericsson T715, Samsung Wave, Samsung Wave II
Category 6	5.76 Mbit/s	Nokia CS-15, Nokia CS-17, Option GlobeTrotter Express 441/442, Option iCON 505/505M, Samsung i8910, Apple iPhone 4, <sup>[5]</sup> Huawei E180/E182E/E1820/E5832/EM770W/E392u-12/E392u-21, Micromax A60, ST-Ericsson M5730, Motorola Atrix 4G (enabled by software update), Samsung Galaxy S 4G, Sony Ericsson W995, Apple iPhone 5
Category 7 (3GPP Rel7)	11.5 Mbit/s	QPSK & 16QAM
Category 8 (3GPP Rel9)	11.5 Mbit/s	2 ms, dual cell E-DCH operation, QPSK only; see 3GPP Rel 9 TS 25.306 table 5.1g
Category 9 (3GPP Rel9)	22.9 Mbit/s	2 ms, dual cell E-DCH operation, QPSK and 16QAM; see 3GPP Rel 9 TS 25.306 table 5.1g
Category 10 (3GPP Rel11)	17.25 Mbit/s	2 ms, QPSK, 16QAM, and 64QAM; see 3GPP Rel 11 TS 25.306 table 5.1g
Category 11 (3GPP Rel11)	22.9 Mbit/s	2 ms, uplink MIMO, QPSK and 16QAM; see 3GPP Rel 11 TS 25.306 table 5.1g
Category 12 (3GPP Rel11)	34.5 Mbit/s	2 ms, uplink MIMO, QPSK, 16QAM, and 64QAM; see 3GPP Rel 11 TS 25.306 table 5.1g

### 3.3.3 HSPA:n resurssien jako

HSDPA:n resurssien jakoon vaikuttavat Release 5:ssa määritellyt uudet toiminnot. Vuorottelu (scheduling) valitsee, mitkä päätelaitteet (UE) käyttävät radioresursseja kunkin TTI-jakson aikana (TTI=2ms). Linkin sovitus (link adaptation) määrittelee kanavan koodinopeuden (CR=0,35-0,95) ja modulaation (QPSK,16QAM), jotta resursseja voidaan käyttää mahdollisimman tehokkaasti.

Päätökset perustuvat UE:n lähettämään CQI:in (Channel Quality Information), UE:n kategoriaan sekä palvelun tyyppiin. HSDPA:n erityispiirteena on, että kanavointikoodeja voidaan jakaa koodimultipleksoinnin lisäksi myös aikamultipleksoinnissa (kuva 10).

Aikamultipleksoinnissa UE:lle annetaan kaikki saatavilla olevat koodit TTI-jakson aikana, ja toinen päätelaite saa resurssit käyttöönsä seuraavan jakson aikana. Resurssit annetaan CQI:n perusteella parhaan laadun omaavalle radiokanavalle, jolloin verkon resurssit saadaan tehokkaimmin käyttöön. Jos käyttäjä ei tarvitse kaikkia koodeja jaksonsa aikana, voidaan ne antaa koodimultipleksoinnissa toiselle käyttäjälle. Maksimikanavanopeus HSDPA:ssa on 14.4 Mbps (Release 5).



Kuva 10. Koodien jako aika- ja koodimultipleksoinnilla [18]

Lähetys suunnassa jokainen päätelaite lähettää itsenäisesti ja voi käyttää kanavointikoodia arvosta SF=2 lähtien. Release 6:ssa maksiminopeus on 5,8 Mbps. TTI-jaksolle on vaihtoehtoiset arvot 2 ms tai 10 ms. Koska useampi päätelaite voi lähettää samanaikaisesti, suorittaa valinnan vastaanottava tukiasema (NodeB). Valintapäätös perustuu NodeB:n suorittamaan interferenssitason mittaukseen.

HSPA+ :ssa (Release 7 ja 8) uutena funktiona on suurempi modulaatioaste 64QAM (DL) ja 16QAM (UL) sekä MIMO-tekniikan käyttö DL-suunnassa. Maksimikanavanopeus alasuunnassa 64QAM:llä ja 15:llä koodilla on 21 Mbps ja yläsuunnassa 16QAM:llä 11 Mbps. Release 7:ssä tuetaan 2x2 MIMO:a, joka kaksinkertaistaa siirtonopeuden. Release 7:ssä maksiminopeus 16QAM:llä on 28 Mbps ja Release 8:ssa 64 QAM:llä 42 Mbps. Release 8 tukee lisäksi DC-HSDPA-tekniikkaa (Dual Cell-HSDPA), jossa käytetään kahta rinnakkaista 5 MHz:n kaistaa. [19]

### 3.4 LTE:n parametrit

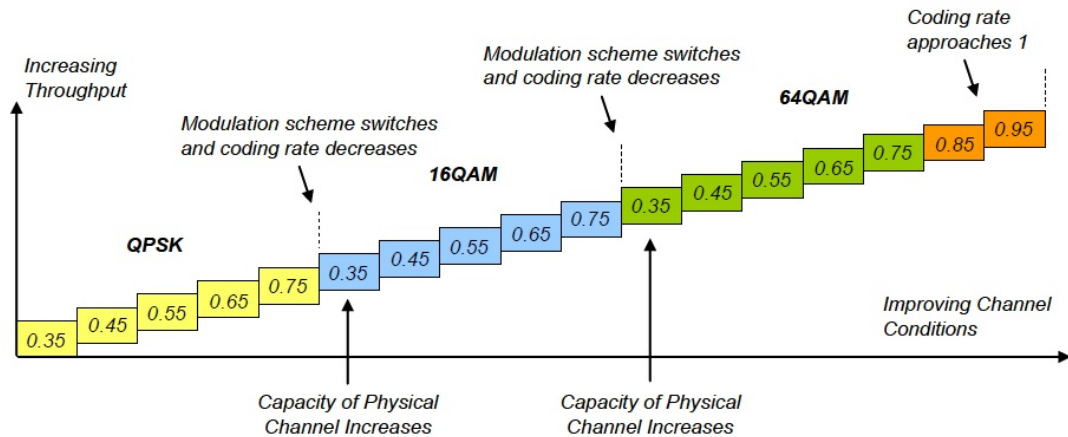
#### 3.4.1 LTE:n tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavat tekijät

LTE-tekniikassa radorajapinta on muuttunut koodijakotekniikasta (WCDMA) taajuuskanavointipohjaiseksi (OFDMA), mikä on aiheuttanut merkittäviä muutoksia tiedonsiirtonopeuteen ja radioresurssien jakoon. LTE tukee useita eri kaistanleveyksiä, joten kapasiteetin lisääminen tapahtuu joustavasti radiokaistaa lisäämällä.

LTE:ssä käyttäjän tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavat

- käytetty julkaisu (Release 8, Release 10)
- päätelaitteen kategoria (Category 1-10)
- kanavan kaistanleveys/resurssilohkojen määrä (1,4-20 MHz)
- MIMO-tasot(2x2, 4x4)
- modulaatiotekniikka (QPSK, 16QAM, 64QAM)
- koodinopeus (0,35-0,95)
- samanaikaisten käyttäjien määrä verkossa.

Modulaatiotekniikka ja koodinopeus mukautuvat radiotien signaalin laadun mukaan ja siihen vaikuttavat pääasiassa päätelaitteen etäisyys tukiasemasta sekä radiotiellä olevat esteet. (kuva 11 ).



Kuva 11. LTE:n nopeus radiotien ominaisuuksien suhteen [15]

Taulukossa 7 on esitetty ala- ja yläsuunnan teoreettiset maksiminopeudet Release 8:n ja Release 10:n osalta. Vaikuttavina parametreina ovat kategoria ja MIMO-tasojen määrä. Ko. taulukossa ei ole esitetty kaistanleveyden eikä modulaation vaikutusta datasiirtonopeuksiin. Arvoihin sisältyy myös otsakkeen/ohjaustiedon aiheuttama kuorma.

Taulukko 7. LTE nopeudet kategorioittain [16]

3GPP Release	User Equipment Category	Maximum L1 datarate Downlink	Maximum number of DL MIMO layers	Maximum L1 datarate Uplink
Release 8	Category 1	10.3 Mbit/s	1	5.2 Mbit/s
Release 8	Category 2	51.0 Mbit/s	2	25.5 Mbit/s
Release 8	Category 3	102.0 Mbit/s	2	51.0 Mbit/s
Release 8	Category 4	150.8 Mbit/s	2	51.0 Mbit/s
Release 8	Category 5	299.6 Mbit/s	4	75.4 Mbit/s
Release 10	Category 6	301.5 Mbit/s	2 or 4	51.0 Mbit/s
Release 10	Category 7	301.5 Mbit/s	2 or 4	102.0 Mbit/s
Release 10	Category 8	2998.6 Mbit/s	8	1497.8 Mbit/s

Taulukossa 8 on esitetty LTE:n teoreettiset maksiminopeudet fyysisellä tasolla parametreina kaistanleveys (1,4...20 MHz)/resurssilohkojen määrä, modulaatiotekniikat sekä MIMO-tasot. Oletuksena on, että radiotiellä ei tapahdu virheenkorjausta, jolloin koodaussuhde on 1,0. Näihin arvoihin ei koskaan käytännössä päästä, koska radiotie

vaatii aina hyvissäkin olosuhteissa jonkin verran virheenkorjausta. Lisäksi sovellustason dataan lisätään otsakkeen aiheuttama kuorma.

Taulukko 8. LTE:n teoreettiset maksiminopeudet [15]

		Channel Bandwidth					
		1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Resource Blocks in the frequency domain		6	15	25	50	75	100
Normal Cyclic Prefix	OFDMA symbols per 1 ms	14					
	Modulation symbol rate (MSPS)	1.0	2.5	4.2	8.4	12.6	16.8
	QPSK Bit Rate (Mbps)	2.0	5.0	8.4	16.8	25.2	33.6
	16QAM Bit Rate (Mbps)	4.0	10.1	16.8	33.6	50.4	67.2
	64QAM Bit Rate (Mbps)	6.1	15.1	25.2	50.4	75.6	100.8
	2×2 MIMO 64QAM Bit Rate (Mbps)	12.1	30.2	50.4	100.8	151.2	201.6
	4×4 MIMO 64QAM Bit Rate (Mbps)	24.2	60.5	100.8	201.6	302.4	403.2

Taulukossa 9 on esitetty LTE:n maksiminopeudet eri koodinopeuksien arvoilla. Parametreina ovat koodinopeus (0,75 ja 0,95), kaistanleveys, modulaatiotekniikka sekä MIMO-tasot. Datanopeus on sovellustason datanopeus ja oletuksena on 5 %:n otsakekuorma sekä 10 %:n uudelleenlähetys virheenkorjaustoimintena. Esim. verrattaessa taulukkoon 8 kaistanleveytenä 10 MHz ja modulaationa 64 QAM putoaa siirtonopeus arvosta 50,4 Mbps arvoon 28,7 Mbps.

Taulukko 9. LTE:n koodinopeuden vaikutus siirtonopeuteen [15]

		Coding Rate	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1 PDCCH Symbol	QPSK Bit Rate (Mbps)	0.75	-	2.8	4.7	9.6	14.4	19.2
	16QAM Bit Rate (Mbps)	0.75	-	5.6	9.5	19.1	28.7	38.3
	64QAM Bit Rate (Mbps)	0.75	-	8.5	14.2	28.7	43.0	57.5
	2×2 MIMO 64QAM Bit Rate (Mbps)	0.75	-	16.2	27.3	55.0	82.7	110.4
	4×4 MIMO 64QAM Bit Rate (Mbps)	0.75	-	30.6	51.5	103.8	156.1	208.4
	64QAM Bit Rate (Mbps)	0.95	-	10.7	18.0	36.3	54.5	72.9
	2×2 MIMO 64QAM Bit Rate (Mbps)	0.95	-	20.5	34.5	69.7	104.8	139.9
	4×4 MIMO 64QAM Bit Rate (Mbps)	0.95	-	38.7	65.2	131.5	197.7	264.0

### 3.4.2 LTE:n resurssien jako

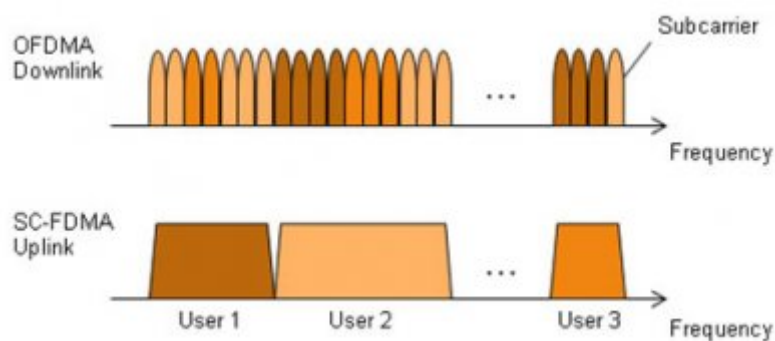
Vuoronjakaja (Scheduler) on pääkomponentti, jonka avulla saavutetaan nopeasti mukautuva ja tehokas radioresurssien käyttö. TTI-jakso LTE:ssä on vain 1 ms. Kunkin TTI-jakson aikana eNB:n vuoronjakaja valitsee fyysisen radioympäristön päätelaitekohtaisesti (UE). UE:t raportoivat niiden radiotien vastaanottotasosta, minkä perusteella vuoronjakaja päättää, mitä modulaatiota ja koodinopeutta tullaan

käyttämään. Ratkaisulla pystytään nopeasti mukautumaan radiokanavan laadun vaihteluihin.

Vuoronjakaja priorisoi palvelun laadun vaatimukset (QoS) UE:n kesken. LTE tukee sekä viiveherkkiä tosiaikaisia palveluita että suurta kaistaa vaativia datasiirtopalveluita. Vuoronjakaja informoi UE:a varatuista radioresursseista. eNB jakaa vuoroja UE:lle sekä ala- että yläsuunnassa. Jokaisessa UE:lle varatussa TTI:ssä on kuljetuslohko TB (Transport Block) käyttäjän tiedonsiirtoa varten.

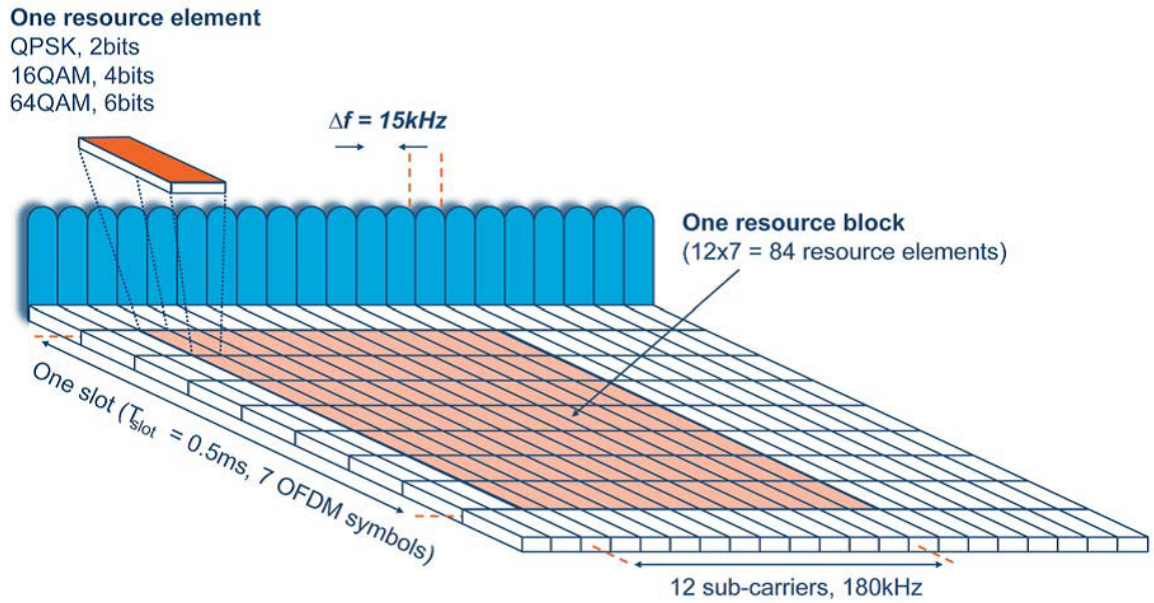
Alasuunnassa voi olla maksimissaan kaksi TB:a päätelaitetta kohden, jos käytetään MIMO-tekniikkaa. Kuljetuslohko TB voi sisältää dataa useista eri palveluista. Teoriassa suurin määrä käyttäjiä yhdessä TTI-jaksossa (1 ms) voi olla 440, jos käytetään 20 MHz:n kaistaa ja 4x4 MIMO -tekniikkaa.

Jotta saavutetaan tehokas radiokaistan käyttö on päädytty monikantoaaltotekniikkaan. Alasuunnassa käytetään OFDMA-tekniikkaa ja yläsuunnassa SC-FDMA-tekniikkaa (kuva 12).



Kuva 12. LTE:n monikantoaaltotekniikka [20]

OFDM on monikantoaaltotekniikka, jossa käytetty radiokaista on jaettu useaan kapeakaistaiseen alikantoaaltoon. Nämä alikantoaallot voidaan jakaa usean käyttäjän kesken. Tällä ratkaisulla saavutetaan tehokas kaistan käyttö (kuva 13). [20]



Kuva 13. LTE:n resurssilohko (downlink) [21]

Alasuunnassa resurssi voidaan kuvata taajuusjakoisesti. Alikantoaaltojen väli on 15 kHz. Yksi resurssielementti kuljettaa QPSK-, 16QAM- tai 64QAM -moduloituja bittejä. Esimerkiksi 64QAM:ssa jokainen resurssielementti kuljettaa 6 bittiä. OFDM-symbolit on ryhmitelty resurssilohkoiksi. Resurssilohkon koko on 180 kHz taajuustasossa ja 0,5 ms aikatasossa.

Jokaiselle käyttäjälle varataan tarvittava määrä resurssilohkoja aika-taajuustasolla. Mitä enemmän käyttäjä saa lohkoja ja mitä tehokkaampaa modulaatiota voidaan käyttää, sitä suurempi siirtonopeus saavutetaan. [21]

## 4 Datasiirtopalvelun mittaukset

### 4.1 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteiston kokoonpano oli yksinkertainen. Se koostui tietokoneesta, siihen asennetusta mittausohjelmistosta sekä koneeseen liitetystä matkapuhelimesta tai nettitikusta.

Mittausjärjestelmän kokoonpano oli (kuva 14):

- PC-tietokone: HP Elite Book 6930p
- Mittausohjelmistot: Ascom TEMS Investigation 10.0.3 ja Ookla speedtest (LTE-mittaukset)
- Datasiirron mittaus: Sony Ericsson W995 -matkapuhelin (GPRS, EDGE, HSPA) ja Huawei Mobile Broadband USB-Stick E392u-12 (HSPA, LTE).

Sony Ericsson W995:n tekniset ominaisuudet eri verkkotekniikoille:

- GPRS: Class 10, 4+1 aikaväliä, 32...48 kbps
- EDGE: Class 10, 236,8 kbps
- HSDPA/HSUPA: 7,2 Mbps/2,0 Mbps



Kuva 14. TEMS-mittauskalusto

## 4.2 Mittaukset verkossa

Mittauksen tavoitena oli selvittää, mitkä parametrit vaikuttavat matkapuhelinverkkojen tiedonsiirtonopeuksiin ja mitä parametreja operaattorit ovat määrittäneet verkkoonsa. Tarkoituksena ei ollut suorittaa varsinaisesti verkon nopeusmittauksia, mutta tulosten tarkasteluun on valittu ne hetket, jolloin siirtonopeus on ollut suurimmillaan.

Mittauksia on suoritettu kaupunkialueella (Helsinki, Tampere) sekä haja-asutusalueella (lähinnä GPRS- ja EDGE-palvelut) kahden eri operaattorin verkossa.

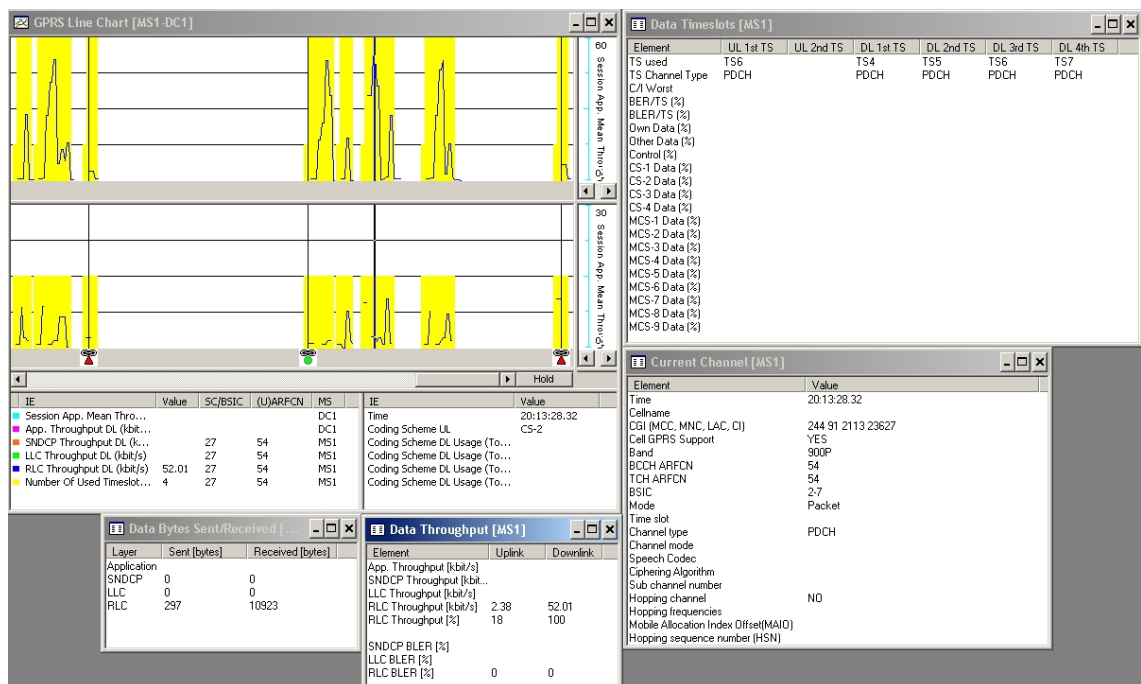
TEMS Investigation 10.0.3 ei tue vielä LTE-tekniikkaa, joten LTE:n osalta on suoritettu vain nopeustestejä Ookla speedtest -ohjelmistolla. Niiden perusteella on pyritty arvioimaan verkon suorituskykyä.

Mittauksia suoritettaessa verkon rakenteesta ei ole tarkkaa tietoa, joten etäisyys tukiasemasta ei ole tiedossa. Niin ikään sitä, kuinka monta samanaikaista käyttäjää verkossa on, ei mittalaitteilla pystytä todentamaan. Mittauksissa käytetyt liittymät ovat rajoittamattomalla tiedonsiirtonopeudella, joten niillä ei ole vaikutusta mittausten tuloksiin.

## 5 Mittaustulokset ja palveluiden käytön vertailu

### 5.1 GPRS-mittaustulokset

GPRS-mittaukset on suoritettu 900 MHz:n verkossa maaseudulla suhteellisen lähellä tukiasemaa. Kuvassa 15 on esitetty TEMS-analysaattorilla kerättyä mittaustietoa. Mittauksen aikana on luettu web-sivustoa, joka näkyy GPRS Line Chart:ssa purskeisena siirtona. Tukiaseman tunnus BSIC=27 ja radiokanava ARFCN=54. Maksimilatausnopeus on 52 kbps ja käytössä on ollut CS-2-koodaus. Yläsuuntaan nopeus on ollut n. 13 kbps suurimmillaan. Data Timeslots -ikkunasta nähdään, että alasuuntaan on ollut käytössä 4 aikaväliä ja yläsuuntaan yksi aikaväli. Mittaustuloksesta voidaan päätellä, että käyttäjä on saavuttanut hetkellisesti teoreettisen maksiminopeuden, koska CS-2 mahdollistaa 13,4 kbps aikaväliä kohden. GPRS:ssä toimii hallittu resurssienjako, joten yksittäinen käyttäjä saa maksiminopeuden käyttöönsä vain hetkittäin. Siihen vaikuttaa suuresti samanaikaisten dataa siirtävien käyttäjien määrä verkossa. Etäämpänä tukiasemasta CS-1-koodauksella nopeus on 9,05 kbps aikaväliä kohden.

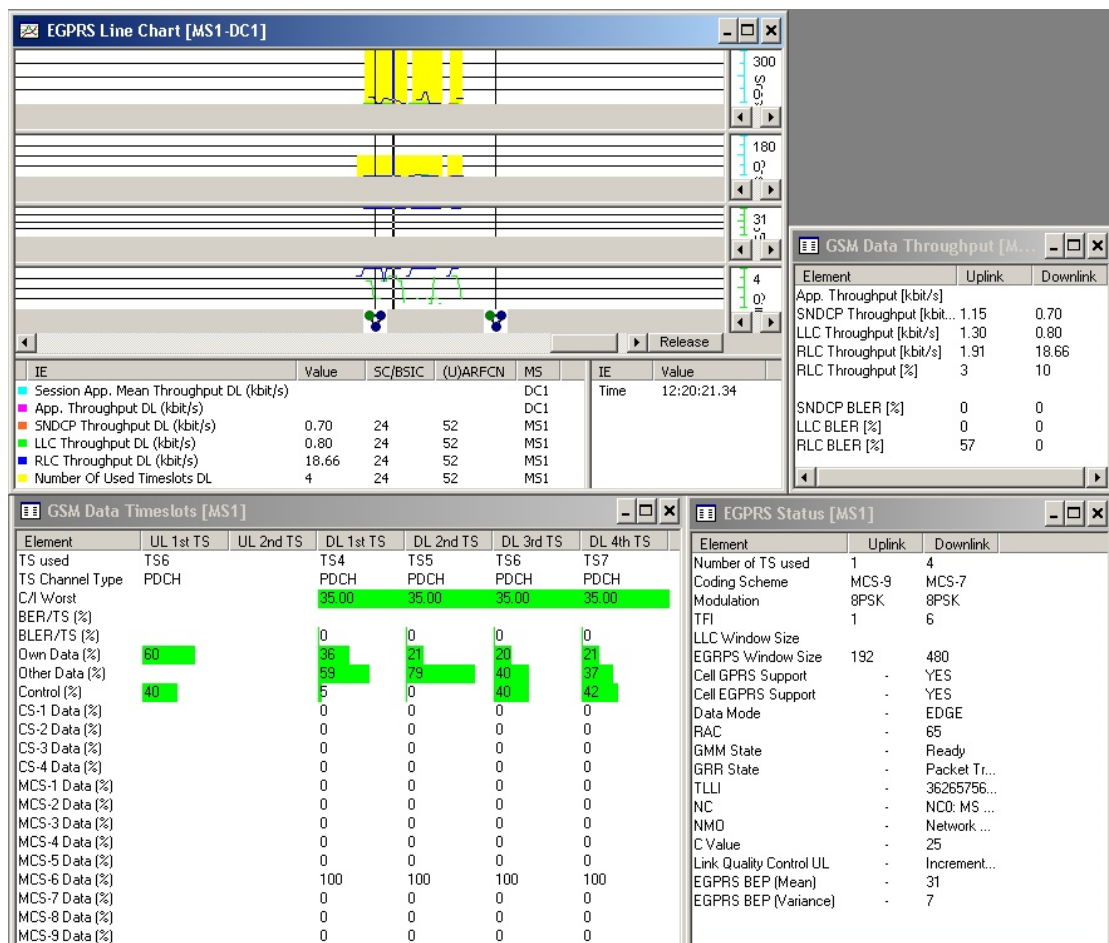


Kuva 15. GPRS-mittaus TEMS-analysaattorilla

## 5.2 EGPRS/EDGE-mittaustulokset

EDGE poikkeaa GPRS:stä ainoastaan radiotien modulaation osalta. Siinä käytetty 8PSK-modulaatiotekniikka mahdollistaa kolminkertaisen nopeuden radiotiellä. Käytettävissä ovat koodausluokat MCS-5...MCS-9. Muut parametrit ovat samat kuin GPRS-palvelussa. Teoreettinen maksiminopeus MCS-9-koodauksella on 59,2 kbps aikaväliä kohden, joten neljällä aikavälillä voidaan saavuttaa 236,8 kbps hetkellinen latausnopeus.

Kuvassa 16 on esitetty EGPRS-palvelun mittaustulokset. Käytössä on tukiasema BSIC=24 ja radiokanava ARFCN=52. Alasuunnassa on käytössä 4 aikaväliä, joissa on ollut käytössä MCS-7-koodaus. Yläsuunnan yhdessä aikavälissä on käytössä MCS-9-koodaus. Datasiirtonopeus tässä mittauksessa on ollut varsin alhainen (18 kbps), mikä johtuu siitä, että mittauksen aikana ei ole varsinaisesti siirretty dataa. Ko. EGPRS-tila on ollut vain välitilana HSPA-mittauksen aikana, kun tiedonsiirrossa on ollut alhainen kaistan tarve. Ko. tilassa on siirretty pääasiassa ohjausdataa ja siirtymä HSPA-tilaan on tapahtunut heti tiedonsiirron jatkuessa.

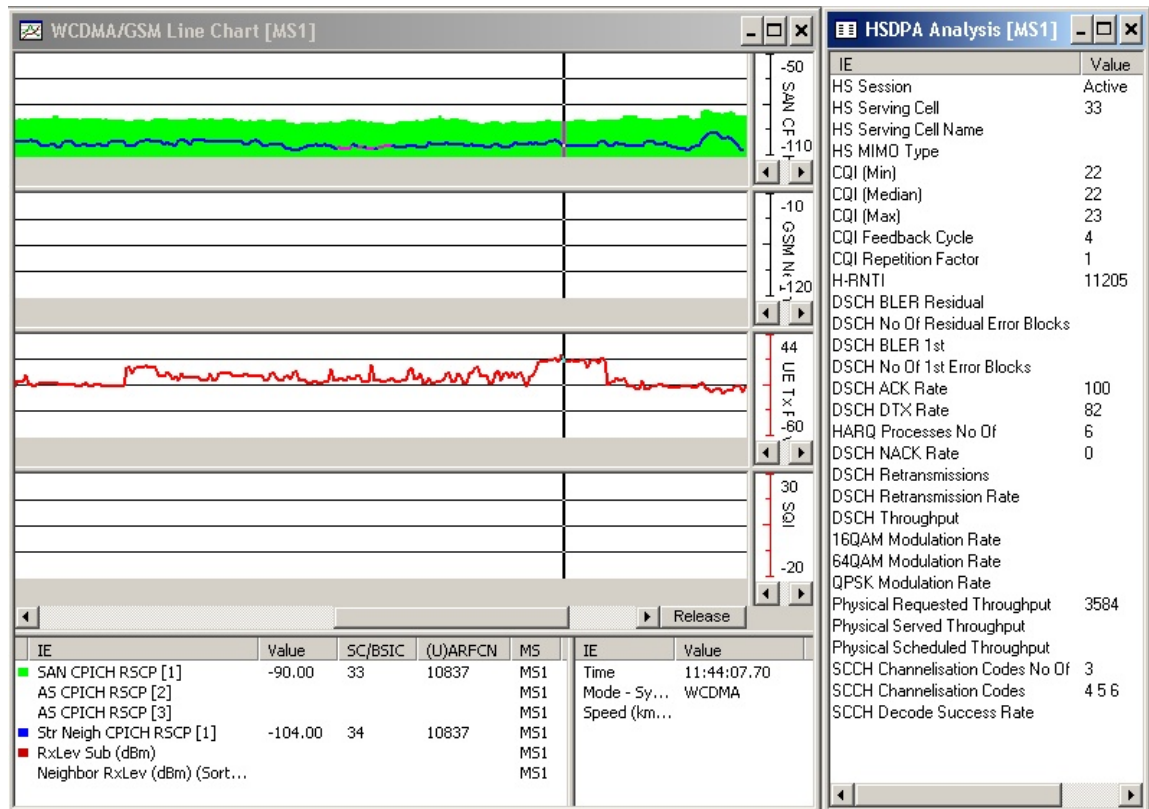


Kuva 16. EGPRS-mittaus TEMS-analysaattorilla

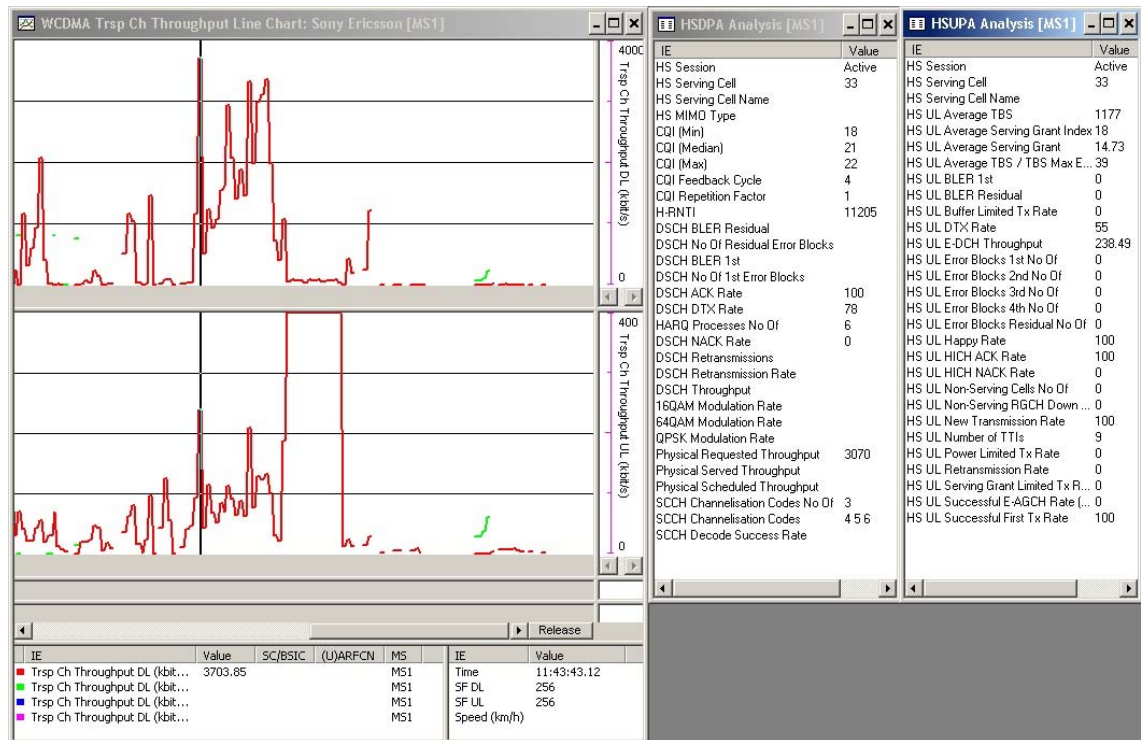
### 5.3 3G/WCDMA-mittaustulokset

3G-verkon mittaukset on suoritettu sekä HSPA- että HSPA+ -tekniikan omaavissa verkoissa. HSPA+ siirtää dataa alasuunnassa kahden solun kautta (DC-HSDPA) , jolloin saavutetaan kaksinkertainen nopeus HSDPA-tekniikkaan verrattuna.

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty HSPA-mittaus TEMS-analysaattorilla nopeustestin aikana. Mittaus on suoritettu tukiaseman SC=33 alaisuudessa radiokanavalla UARFCN=10837. Käytössä ovat olleet koodit 4, 5 ja 6. Keskimääräinen latausnopeus on 2,44 Mbps, mutta hetkellisesti on saavutettu 3,7 Mbps siirtonopeus. Yläsuunnassa siirtonopeus ko. mittaushetkellä on ollut 240 kbps, mutta nopeustestin mukaan keskimäärin 1,57 Mbps. Mittauksessa käytetty päätelaite tukee maksiminopeuksia 7,2/2 Mbps ala/yläsuunnassa ideaalisella radiotiellä, mutta käytännössä arvot jäävät yleensä puoleen johtuen radiotien virheenkorjauksesta ja jaetuista resursseista muiden samanaikaisten käyttäjien kesken.

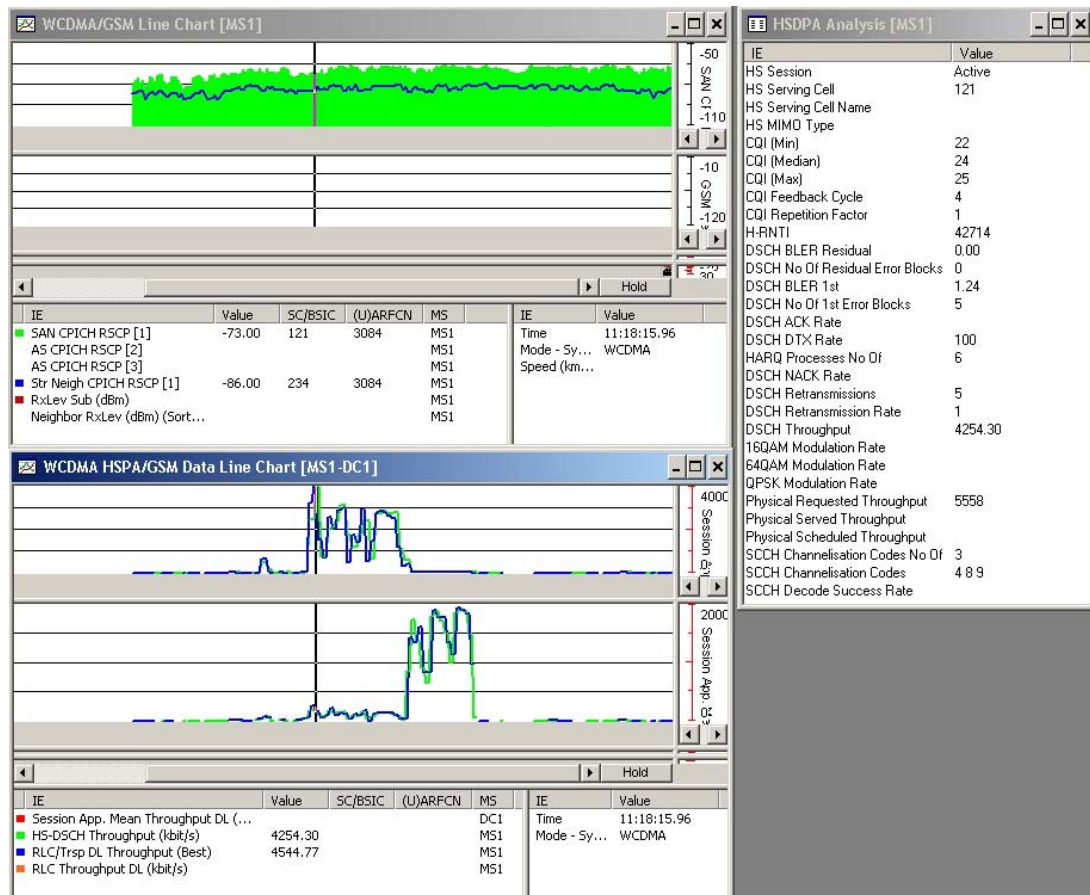


Kuva 17. HSDPA-mittaus TEMS-analysaattorilla



Kuva 18. HSPA-mittaus TEMS-analysaattorilla

Kuvassa 19 on esitetty DC-HSPA+ -mittaus TEMS-analysaattorilla nopeustestin aikana. Datsiirroksa on käytetty kahta solua SC=121 (vihreä) ja SC=234 (sininen) radiokanavalla UARFCN=3084. Solussa 121 fyysisen kanavan kuorma on ollut 5,558 Mbps ja sovellustasolla 4,254 Mbps. Käytössä ovat olleet kanavointikoodit 4, 8 ja 9. Nopeus vastaa varsin hyvin teoreettista arvoa, koska 3 koodilla käytettäessä 64QAM:lla päästään 4,6 Mbps nopeuteen.



Kuva 19. DC-HSPA+ -mittaus TEMS-analysaattorilla

#### 5.4 Nopeustesti

Koska TEMS-analysaattori 10.0.3 ei vielä tukenut LTE-mittauksia, tehtiin ne Internetissä julkaistulla Ooklan nopeustestiohjelmalla. Samalla mitattiin myös HSPA- ja HSPA+ -nopeuksia, koska LTE ei ole vielä levinnyt niin laajalle operaattorien verkkoon. Kuvassa 20 on esitetty Ooklan nopeustestin mittaussikkuna, josta näkyvät sekä latausnopeus (alasuunta) että lähetysnopeus (yläsuunta).

Taulukossa 10 on esitetty nopeustestin mittauksia. Mittauksia on suoritettu eri mittauspisteissä lukuisa määrä ja taulukkoon on merkitty pienin ja suurin arvo. HSPA-mittaus on suoritettu W995-päätelaitteella ja kaikki muut mittaukset Huawei E392:lla. LTE-mittaukset Tampereella on suoritettu eri vuorokauden aikoina, mistä johtuu suuri vaihteluväli. Osa mittauksista on suoritettu ajon aikana (n. 100 km/h), mikä ei oleellisesti pienentänyt siirtonopeuksia.



Kuva 20. Ooklan nopeustestin mittausikkuna [17]

Mittauksia suoritettaessa ei tarkkaan tiedetty tukiasemien sijaintia lukuunottamatta Nummelassa tehtyä LTE-mittausta. Siellä mittaus suoritettiin tukiaseman välittömässä läheisyydessä. Tästä johtuu myös paras mittaustulos. Mittauksissa käytetty Huawei E392 u-12 tukee maksiminopeuksia 100/50 Mbps ja edustaa 2x2 MIMO -tekniikkaa.

Noin 40 Mbps tiedonsiirtonopeuden saavuttamiseen hyvissä olosuhteissa riittänee 10 MHz:n kaista koodinopeuden ollessa 0,75 (taulukko 9).

DC-HSPA+ -verkon mittauksista Hämeenlinnassa ja Vihdissä voidaan päätellä, että koodeja on käytössä 15, mikä merkitsee että ko. soluja käytetään vain ko. datasiirtopalveluun. Teoreettiset maksiminopeudet olisivat 23,4/5,76 Mbps. Nopeustestillä suoritetuissa mittauksissa parametrien määrittely perustuu arvioon, koska tarkkaa tietoa verkosta ei saada.

Taulukko 10. Ooklan nopeustestin mittaustulokset

Tekniikka	Latausnopeus Mbps		Lähetysnopeus Mbps		Paikkakunta	Huom.
	pienin	suurin	pienin	suurin		
HSPA	2,84	2,84	1,47	1,47	Tampere	W995
HSPA+	3,12	3,59	2,21	2,32	Vihti	100 kmh
	1,48	1,80	1,50	1,50	Hyvinkään maaseutu	
	7,22	7,98	3,46	3,50	Valkeakoski (vt 3)	
	6,66	7,59	2,28	2,30	Valkeakoski (vt 3)	
DC-HSPA+	7,4	16,85	1,55	3,36	Vihti	100 kmh
	11,65	19,56	2,33	2,35	Hämeenlinna keskusta	
	8,61	9,52	1,59	1,62	Kalvola (vt 3)	
	6,98	7,83	1,48	3,29	Kalvola (vt 3)	
LTE	41,8	43,94	21,61	24,3	Nummela	
	22,4	37,35	6,55	12,33	Tampereen keskusta	
	23,65	31,67	7,24	9,70	Tampereen esikaupunki	
	8,69	25,67	0,81	1,16	Helsinki, keskusta	
	11,87	33,06	0,82	4,79	Espoo, Leppävaara	

## 6 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä mobiiliverkkojen datasiirtoon eri sukupolvien verkkotekniikoilla ja selvittää, mitkä eri tekijät ja parametrit vaikuttavat käyttäjän todelliseen tiedonsiirtonopeuteen niiden jäädessä yleisesti alle puoleen teoreettisesta maksiminopeudesta.

Selvitystä varten perehdyttiin ensin eri sukupolvien datasiirtopalveluihin ja niihin liittyviin parametreihin. Osa parametreista on tekniikkasidonnaisia, jolloin käyttäjän käyttämä päätelaite asettaa rajoituksia tiedonsiirtonopeuteen. Osaan parametreista voi operaattori vaikuttaa verkon konfiguroinnilla, jolloin datasiirtopalvelussa voi olla operaattorikohtaisia ja alueellisia eroja. Niin ikään radiotien ominaisuuksilla ja käyttäjien kokonaismäärällä on suuri vaikutus yksittäisen käyttäjän tiedonsiirtonopeuteen. Tutkimusta varten tarvittiin lukuisia datasiirtomittauksia eri verkkotekniikoilla ja mittaustulosten analysointia.

Verkkoanalysointilla suoritettujen mittaustulosten avulla pystyttiin selvittämään verkossa käytettyjen parametrien arvot, sekä pystyttiin arvioimaan hetkellinen maksiminopeus. Nopeustestiä käytettiin HSPA-, HSPA+- ja LTE-tekniikoiden datasiirtonopeuden mittaamiseen. LTE-verkon osalta tarkempi analysointi jäi tekemättä, koska sitä tukeva mittausohjelmisto ei vielä ollut saatavilla. Opinnäytetyön tekeminen antoi hyvän yleiskuvan datasiirtopalveluista ja niihin vaikuttavista tekijöistä, ja auttoi ymmärtämään, miksi enimmäisnopeuksia harvoin saavutetaan.

Mobiililaajakaista on jo nyt nopeampi monilla paikkakunnilla kiinteän verkon xDSL-tekniikkaan verrattuna. Uusien LTE-julkaisujen myötä saavutetaan ennenpitkää 1 Gbps latausnopeus, jolloin mobiililaajakaista haastaa lopullisesti kiinteän laajakaistan käyttäjän verkkopalveluna.

## Lähteet

- [1] Penttinen Jyrki, *GSM-tekniikka - Järjestelmän toiminta ja kehitys kohti UMTS-aikakautta*. Vantaa:WSOY.2001.
- [2] Penttinen Jyrki, *GPRS-tekniikka - Verkon rakenne, toiminta ja mitoitus*. Vantaa:WSOY.2001.
- [3] GPRS Network Architecture. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://smnawaz.blogspot.fi/2012/11/gprs-network-architecture.html>.
- [4] Overview of GSM, GPRS, and UMTS. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: [http://docstore.mik.ua/univercd/cc/td/doc/product/wireless/moblwrls/cm/mg\\_sg/cmzgsm.htm](http://docstore.mik.ua/univercd/cc/td/doc/product/wireless/moblwrls/cm/mg_sg/cmzgsm.htm).
- [5] EPS=LTE+SAE. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://bytheway.wordpress.com/2012/06/21/epsitesae/>.
- [6] The implementation of MIMO feature will double the data rate of mobile communication !!! [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.aliencoders.com/content/implementation-mimo-feature-will-double-data-rate-mobile-communication>.
- [7] LTE Network Architecture. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: [http://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_network\\_architecture.htm](http://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm).
- [8] Wireless Telecommunication. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://techon.nikkeibp.co.jp/english/handbook/smartphone/42.html>.
- [9] Method of link adaptation in enhanced cellular systems to discriminate between high and low variability. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.google.com/patents/EP1384344A1?cl=en>.
- [10] Method in the selection of a transfer window, and a mobile station. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.google.com/patents/WO2000056095A1?cl=en>.
- [11] University of Surrey. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.ee.surrey.ac.uk/ccsr/research/ilab/mcan/projects>.

- [12] WCDMA Chanellization Code. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.teletopix.org/3g-wcdma/wcdma-channelization-code/>.
- [13] High-Speed Downlink Packet Access. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed\\_Downlink\\_Packet\\_Access](http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed_Downlink_Packet_Access).
- [14] High-Speed Uplink Packet Access. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed\\_Uplink\\_Packet\\_Access](http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed_Uplink_Packet_Access).
- [15] Downlink Bit Rates. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.lte-bullets.com/LTE%20in%20Bullets%20-%20DL%20Bit%20Rates.pdf>.
- [16] E-UTRA. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>.
- [17] Sonera Speed Test. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: [nopusmittaus.sonera.fi](http://nopusmittaus.sonera.fi).
- [18] WCDMA evolved- High-speed packet-data services. Ericsson Review No.2,2003.
- [19] HSPA. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.3gpp.org/HSPA>.
- [20] LTE. [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [21] Maximizing Border:Long Term Evolution June 29,2010 [verkkodokumentti, viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://shishireahmed.blogspot.com>.



