

Tommi Väätäinen

WiMAX ja LTE neljännen sukupolven mobiililaajakaistateknologioina

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tommi Väätäinen WiMAX ja LTE neljännen sukupolven mobiililaajakaistatekno- logioina 74 sivua 27.3.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	tietoverkot
Ohjaaja	yliopettaja Tarmo Anttalainen
<p>Insinööriyössä tutkittiin ja vertailtiin kahta neljännen sukupolven (4G) langatonta laajakaista- ja matkapuhelinteknologiaa WiMAX:ia ja LTE:tä tavoitteena selvittää niiden tulevaisuuden näkymiä 4G-mobiililaajakaistamarkkinoilla. Työn alkuvaiheessa selvitettiin kummankin teknologian ominaisuudet ja standardien kehityshistoria tähän päivään asti. Työn loppuvaiheessa tutkittiin WiMAX:in ja LTE:n välistä kilpailuasetelmaa teknisten ominaisuuksien, markkina- ja kilpailutilanteen kannalta.</p> <p>WiMAX perustuu IEEE 802.16-standardiin. Vuonna 2004 julkaistu Fixed WiMAX kehitettiin kiinteitä laajakaista-, backhaul- ja hotspot-yhteyksiä varten ja vuonna 2005 julkaistu Mobile WiMAX Release 1.0 mobiililaajakaistayhteyksiä varten. LTE on vuonna 2009 julkaistu 3GPP-yhteistyöorganisaation standardi, joka kehitettiin parantamaan 3G-verkkojen tukiasemajärjestelmää ja optimoimaan 3G-verkkojen radioverkkoarkkitehtuuria.</p> <p>Teknisiltä ominaisuuksiltaan WiMAX ja LTE ovat hyvin lähellä toisiaan. Molemmat käyttävät OFDMA-siirtotekniikkaa tulosuunnassa, tukevat FDD- ja TDD-menetelmiä, moniantennitekniikkaa ja samoja modulaatiomenetelmiä. Suorituskykyjä verrattaessa LTE on edellä. LTE:n tiedonsiirtonopeudet ovat suuremmat ja viive pienempi. Kilpailuasetelmaa teknisten ominaisuuksien tai suorituskyvyn paremmuudesta ei kuitenkaan ole. Kummankin standardin kehitys tähtää täyttämään IMT-Advanced 4G-vaatimukset, WiMAX Forum Mobile WiMAX Release 2.0:lla ja 3GPP LTE-Advancedilla.</p> <p>WiMAX:in muutaman vuoden etumatka 4G-mobiililaajakaista- ja matkapuhelinmarkkinoilla on kääntymässä LTE:n eduksi. On ennustettu, että LTE-liittymien määrä ohittaa WiMAX-liittymien määrän vuoden 2012 aikana. LTE:n tulevaisuus 4G-markkinoilla näyttää vahvalta mutta WiMAX näyttää menettäneen operaattoreiden tuen. WiMAX pysyy markkinoilla kiinteillä laajakaistayhteyksillä, backhaul- ja hotspot-yhteyksillä, mutta tulevaisuus mobiililaajakaistamarkkinoilla riippuu Mobile WiMAX Release 2.0:n tulevaisuudesta.</p>	
Avainsanat	4G, WiMAX, LTE, laajakaista

Author Title Number of Pages Date	Tommi Väätäinen WiMAX and LTE as fourth generation mobile broadband technologies 74 pages 27 March 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Communications and Data Networks
Instructor	Tarmo Anttalainen, Principal Lecturer
<p>The aim of this thesis was to study and compare two fourth generation (4G) wireless broadband and cellular technologies, WiMAX and LTE, to foresee their future in the 4G mobile broadband markets. At the beginning the specifications of both technologies and the history of both standards were examined. At the end the competitive situation between the technologies based on their technical specifications and market share were examined.</p> <p>WiMAX is based on the IEEE 802.16 standard. Fixed WiMAX was developed for fixed broadband, backhaul and hotspot connections. Mobile WiMAX Release 1.0 was developed for mobile broadband connections. LTE is the standard for 3GPP projects, and it was developed to enhance the base station system of 3G networks and to optimize their radio access architecture.</p> <p>Comparing the technical specifications of WiMAX and LTE, they are very similar, but comparing their performance, LTE has an advantage. The data rates of LTE exceed WiMAX and its latency is lower. Despite this there is no competition and the development of both standards aims to fulfill IMT-Advanced 4G requirements.</p> <p>Despite WiMAX having a few years' head start in 4G mobile broadband markets, LTE is likely to overcome WiMAX. It has been predicted that LTE subscriptions will surpass WiMAX subscriptions in 2012. The future of LTE in 4G markets looks strong, but WiMAX seems to be losing the support of the network operators. WiMAX will stay in the markets with fixed broadband, backhaul and hotspot connections, but the future in the 4G mobile broadband markets will depend on the future of Mobile WiMAX Release 2.0.</p>	
Keywords	4G, WiMAX, LTE, broadband

Sisälllys

1	Johdanto	1
2	WiMAX-teknologia	2
2.1	Käyttökohteet	2
2.2	Laitteisto	3
2.3	Tekniset ominaisuudet	4
2.3.1	Palvelun laatu, QoS	5
2.3.2	Kanavointi- ja modulaatiomenetelmät	6
2.3.3	Tietoturva	8
2.4	WiMAX-standardit	8
2.5	WiMAX-toteutukset Suomessa ja maailmalla	10
2.6	Tulevaisuus	11
3	Matkapuhelinsukupolvet	12
3.1	Nollannen ja ensimmäisen sukupolven matkapuhelinteknologiat	12
3.2	Toisen sukupolven matkapuhelinteknologia	13
3.3	Kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia	14
3.4	Neljännän sukupolven matkapuhelinteknologia	16
4	Matkapuhelinverkot ja -standardit	17
4.1	Standardien kehitysvaiheet	17
4.2	GSM-standardit	20
4.3	GSM-standardin 2G-matkapuhelinverkon rakenne ja toiminta	32
4.4	GSM-standardin 3G-matkapuhelinverkon rakenne ja toiminta	41
4.5	CDMA2000-standardit	47
5	LTE-teknologia	48
5.1	Vaatimukset ja ominaisuudet	49
5.2	Radorajapinta E-UTRAN	51
5.3	Runkoverkko EPC	56
5.4	Self Organizing Networks SON	58
5.5	LTE-Advanced	60
6	WiMAX:in ja LTE:n teknologiavertailu	61
6.1	Tekniset ominaisuudet	62
6.2	Markkinatilanne	63
6.3	Tulevaisuus	65

7 Yhteenveto

66

Lähteet

67

Lyhenteet ja määritelmät

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project.</i> Yhteistyöorganisaatio, joka vastaa GSM-standardin kehittämisestä.
3GPP2	<i>3rd Generation Partnership Project 2.</i> Yhteistyöorganisaatio, joka vastaa CDMA2000-standardin kehittämisestä.
AES	<i>Advanced Encryption Standard.</i> Tiedon salausalgoritmi.
ARP	<i>Autoradiopuhelin.</i> Suomen ensimmäinen julkinen matkapuhelinverkko.
AuC	<i>Authentication Centre.</i> GSM-matkapuhelinverkon todennuskeskus.
BSS	<i>Base Station Subsystem.</i> GSM-matkapuhelinverkon tukiasemajärjestelmä.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access.</i> Koodijakoinen kanavanvaraustekniikka.
CSD	<i>Circuit Switched Data.</i> Piirikytkenäinen tiedonsiirtomuoto.
DES	<i>Digital Encryption Standard.</i> Tiedon salausalgoritmi.
DMS	<i>Data and Messaging Service.</i> NMT-puhelimissa mukana ollut tiedonsiirto-palvelu.
DSL	<i>Digital Subscriber Line.</i> Digitaalinen, puhelinverkossa toimiva tiedonsiirto-yhteys.
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol.</i> Käyttäjän tunnistusprotokolla.
EDGE	<i>Enhanced Data rates for Global Evolution.</i> GSM-matkapuhelinverkon pakettikytkentäinen tiedonsiirtomuoto.
EGPRS	<i>Enhanced GPRS.</i> GSM-matkapuhelinverkon pakettikytkentäinen tiedonsiirto-muoto.
EIR	<i>Equipment Identity Register.</i> GSM-matkapuhelinverkon laitetunnusrekisteri.
EPC	<i>Evolved Packet Core.</i> LTE-teknologian runkoverkko.
EPS	<i>Evolved Packet System.</i> LTE-teknologian radorajapinnan ja runkoverkon muodostava kokonaisuus.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute.</i> Eurooppalainen tele-alan standardoimisjärjestö.
EV-DO	<i>Evolution-Data Optimized.</i> CDMA2000-matkapuhelinverkon standardi.

FDM	<i>Frequency Division Multiplexing.</i> Taajuuteen perustuva kanavointitekniikka.
FOMA	<i>Freedom of Mobile Multimedia Access.</i> Japanilainen, maailman ensimmäinen kolmannen sukupolven matkapuhelinpalvelu.
GPRS	<i>General Packet Radio Service.</i> GSM-matkapuhelinverkon pakettikytkentäinen tiedonsiirtomuoto.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications, Groupe Spécial Mobile.</i> Maailman käytetyin toisen sukupolven matkapuhelinstandardi.
HLR	<i>Home Location Register.</i> GSM-matkapuhelinverkon kotirekisteri.
HSCSD	<i>High Speed Circuit Switched Data.</i> Piirikytkenäinen tiedonsiirtomuoto.
HSPA	<i>High-Speed Packet Access.</i> GSM-matkapuhelinverkon pakettikytkentäinen tiedonsiirtomuoto.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i> Kansainvälinen standardointityötä tekevä tekniikan alan järjestö.
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity.</i> Matkapuhelimen laitetunnus.
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity.</i> Matkapuhelimen SIM-kortille tallennettu yksilöllinen tunnistus.
IMT	<i>International Mobile Telecommunications.</i> Kolmannen sukupolven matkaviestinteknologiaperhe.
ITU	<i>International Telecommunication Union.</i> Kansainvälinen televiestintäliitto.
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution Service.</i> Nopeiden radioverkkojen teknologia.
LOS	<i>Line of Sight.</i> Radioliikenteessä lähettimen ja vastaanottimen välillä oleva näköyhteys.
LTE	<i>Long Term Evolution.</i> GSM-matkapuhelinverkon neljännen sukupolven teknologia.
MAC	<i>Media Access Control.</i> IEEE 802 -verkkojen varaamisen ja liikennöinnin hoitava järjestelmä.
MAN	<i>Metropolitan Area Networks.</i> Kaupunkialueilla toimiva tiedonsiirtoverkko.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output.</i> Radioliikenteessä toimiva useamman lähettimen ja vastaanottimen tekniikka.
MMR	<i>Mobile Multihop Relay.</i> WiMAX-tekniikassa käytetty välitukiasema.
MSC	<i>Mobile Switching Center.</i> GSM-matkapuhelinverkon keskus.

NLOS	<i>None Line of Sight.</i> Radioliikentessä lähettimen ja vastaanottimen väliltä puuttuva näköyhteys.
NMT	<i>Nordiska Mobiltelefongruppen, Nordisk Mobiltelefon.</i> Pohjoismaissa toiminut analoginen ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkko.
NSS	<i>Network and Switching Subsystem.</i> GSM-matkapuhelinverkon keskusjärjestelmä.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access.</i> Usean käyttäjän mahdollistava kanavanjakotekniikka.
OSI	<i>Open Systems Interconnection Reference Model.</i> Seitsemään kerrokseen perustuva tiedonsiirtoprotokollia kuvaava malli.
PKM	<i>Privacy Key Management.</i> Päätelaitteen ja tukiaseman väliseen tunnistautumiseen käytetty avainten hallintaprotokolla.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation.</i> Vaihe- ja amplitudimodulaation yhdistävä modulointitekniikka.
QoS	<i>Quality of Service.</i> Tietoliikenteen luokittelua ja priorisointia, palvelun laatua, kuvaava termi.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying.</i> Nelivaiheiseen vaiheavainnukseen perustuva modulaatiomenetelmä.
SAE	<i>System Architecture Evolution.</i> LTE-tekniikan runkoverkkoarkkitehtuurin parantamiseen ja optimointiin keskittyvä projekti.
SC	<i>Single Carrier.</i> Yhtä taajuutta ja kantoaaltoa käyttävä kanavointimenetelmä.
SIM	<i>Subscriber Identity Module.</i> Älykortti, joka sisältää tilaajan tunnistetiedot.
SON	<i>Self Organizing Network.</i> 4G-matkapuhelinverkkojen toimintamalli.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access.</i> Aikajakoinen kanavanjakotekniikka.
TIA	<i>Telecommunications Industry Association.</i> Yhdysvaltalainen telealan standardointijärjestö.
TMSI	<i>Temporary Mobile Subscriber Identity.</i> Matkapuhelimen ja tukiaseman välisessä liikenteessä käytetty tilapäinen tilaajatunniste.
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband.</i> Neljännen sukupolven CDMA2000 matkapuhelinstandardi.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System.</i> Kolmannen sukupolven matkaviestinstandardi.

VLR	<i>Visitor Location Register.</i> GSM-matkapuhelinverkon vierailijarekisteri.
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access.</i> UMTS-verkoissa käytettävä radiorajapinta.
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access.</i> IEEE 802.16 –standardiin perustuva langaton laajakaistatekniikka.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia ja vertailla kahta neljännen sukupolven langatonta laajakaista- ja matkapuhelinteknologiaa, WiMAX:ia (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ja LTE:tä (Long Term Evolution). Työn alkuvaiheessa selvitetään molempien teknologioiden ominaisuudet sekä standardien kehityshistoria aiempien sukupolvien kautta tähän päivään asti.

Tämän päivän laajakaista- ja matkapuhelinverkot perustuvat toisen ja kolmannen sukupolven teknologioihin ja standardeihin. Kolmannen sukupolven myötä standardien määrä on vähentynyt ja neljänteen sukupolveen siirryttäessä langattomiksi laajakaista- ja matkapuhelinstandardeiksi ovat jäämässä vain WiMAX ja LTE. Ne usein ymmärretään kilpaileviksi teknologioiksi ja työn loppuvaiheessa vertaillaan näitä kahta standardia ominaisuuksien, käyttötarkoituksen ja markkinatilanteen suhteen sekä tutkitaan kummankin standardin tulevaisuuden näkymiä neljännen sukupolven laajakaista- ja matkapuhelinmarkkinoilla.

Sekä WiMAX- että LTE-standardit esiteltiin kolmannen sukupolven myötä. Vaikka varsinkin LTE usein mainitaan neljännen sukupolven teknologiana, se todellisuudessa vastaa kolmannen sukupolven standardin määritykset. Joulukuussa 2010 Kansainvälinen Televiestintäliitto ITU (International Telecommunication Union) kuitenkin kevensi neljännen sukupolven teknologian vaatimuksia ja määrityksiä tiedonsiirtonopeuden osalta, joten sekä WiMAX:ia että LTE:tä tänä päivänä pidetään neljännen sukupolven teknologiana. Molemmista on kuitenkin tulossa aidosti neljännen sukupolven vaatimukset ja määritykset täyttävä teknologia, Mobile WiMAX Release 2.0 sekä LTE-Advanced (Long Term Evolution Advanced).

Matkapuhelinsukupolvien, -verkkojen sekä -standardien yhteydessä yleensä mainitaan vain LTE, kun taas WiMAX mainitaan vain kiinteiden laajakaistayhteyksien yhteydessä. WiMAX-teknologian käyttö mobiililaajakaistayhteytenä sekä osana matkapuhelinjärjestelmää on kuitenkin lisääntymässä. Tänä päivänä markkinoilla on jo matkapuhelimia, joissa on mukana myös WiMAX-teknologiaa. Neljännen sukupolven standardin tuoma nopea tiedonsiirto avaakin molemmille teknologioille mahdollisuuksia sekä laajakaista- että matkapuhelinkäytössä.

2 WiMAX-teknologia

WiMAX on kehityksen alla oleva langaton laajakaistateknologia ja perustuu IEEE-järjestön (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.16-standardiin. Laajan kantoalueensa ja langattomuutensa ansiosta WiMAX sopii hyvin laajakaistayhteyksien tarjoamiseen harvaan asutuille seuduille, toimien niin sanottuna last mile -yhteytenä. Termillä tarkoitetaan asiakasyhteyksiä, missä kiinteän laajakaistayhteyden rakentaminen ei kustannusmielessä ole järkevää. [1.]

WiMAX-teknologia tarjoaa pitkän kantaman, 50 kilometriä, ja suuren tiedonsiirtonopeuden, 70 Mbit/s. Molemmat ovat saavutettavissa mutta eivät yhtä aikaa. Pitkän kantaman vuoksi tiedonsiirrossa joudutaan käyttämään tehokkaampaa virheenkorjausta, mikä alentaa siirtonopeutta. Lyhyemmällä kantamalla, virheenkorjausta keventämällä, saavutetaan suurempi tiedonsiirtonopeus. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että siirtonopeudet jäävät alle 40 Mbit:n/s ja kantama noin 10 kilometriin.

WiMAX Forum (www.wimaxforum.org) omistaa WiMAX-tavaramerkin ja valvoo sitä käyttävien laitteiden yhteensopivuutta sekä lisensoi käytettävät taajuualueet. Lisäksi Forum pyrkii edistämään WiMAX-järjestelmien käyttöönottoa tiiviissä yhteistyössä palvelun tuottajien, teleoperaattorien ja eri maiden hallitusten kanssa.

2.1 Käyttökohteet

WiMAX-teknologian tiedonsiirtonopeus ja kantama mahdollistavat useita eri käyttökohteita. Pitkä kantama mahdollistaa langattoman laajakaistayhteyden vaihtoehtona perinteisille kaapeli- ja DSL-yhteyksille (Digital Subscriber Line). Kantamaan kuitenkin vaikuttavat etäisyys ja mahdollinen näköyhteys tukiasemaan. Kahden tukiaseman tai tukiaseman ja päätelaitteen välinen etäisyys ilman näköyhteyttä on noin 10 kilometriä, hyvin suunnatulla antennilla, ilman näköyhteyttä, noin 20 kilometriä ja näköyhteyden kanssa noin 50 kilometriä. Kantamaan kuitenkin vaikuttavat heikentävästi radioaaltojen etenemistä vaimentavat fyysiset esteet sekä sääolosuhteet, kuten vesi- tai lumisade ja sumu. [2.]

Laajakaistayhteyksien lisäksi merkittävä käyttökohde ovat niin sanotut backhaul-yhteydet, joita tietoliikenteessä käytetään muun muassa runkoverkkoliitännöissä. WiMAX-verkkoa voidaan hyödyntää esimerkiksi yhtiön lähiverkon liittämiseksi runkoverkkoon sekä niin sanottujen hotspot yhteyksien tarjoamiseen, millä tarkoitetaan langattoman lähiverkon, WLAN (Wireless Local Area Network), liittämistä runkoverkkoon. Monet internet-kahvilat hyödyntävät tätä tekniikkaa. Backhaul-yhteyksiä käytetään myös matkapuhelinverkoissa tukiaseman ja puhelinkeskuksen välissä, etenkin haja-asutusalueilla.

Näiden lisäksi WiMAX-teknologiaa käytetään myös kannettavissa päätelaitteissa, tietokoneissa ja matkapuhelimissa, mutta matkapuhelinalalla kilpailu on tiukka. Vaikka nykyisin käytössä oleva WiMAX-teknologia täyttää kolmannen sukupolven matkapuhelin-teknologian vaatimukset ja aidosti neljännen sukupolven WiMAX-standardi on hyväksytty ja julkaistu keväällä 2011, matkapuhelinviestinnässä WiMAX-teknologia on jäämässä neljännen sukupolven matkapuhelinteknologian, LTE:n, kehityksen alle.

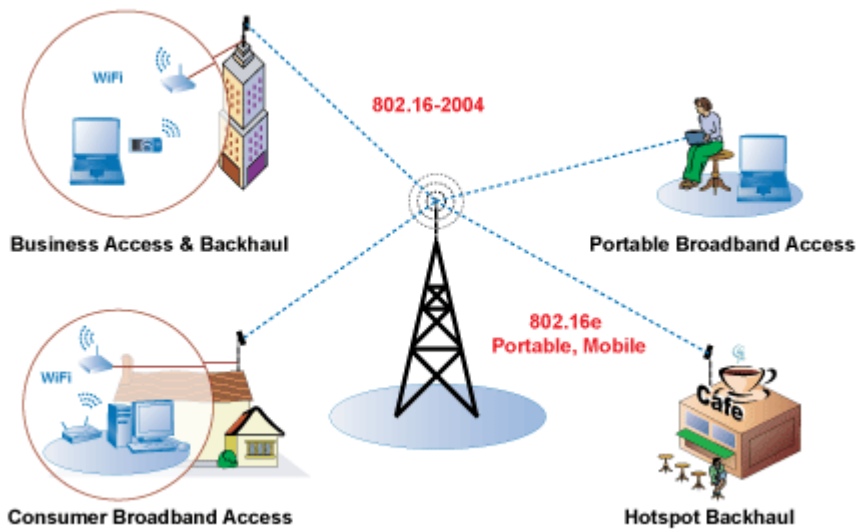
2.2 Laitteisto

WiMAX-järjestelmä koostuu kahdesta osasta, tukiasemasta ja asiakaspäätelaitteesta. WiMAX-tukiasema voi olla oma, itsenäinen masto tai tukiasema voidaan sijoittaa esimerkiksi matkapuhelinverkon tukiasemamastoon, rakennuksen katolle tai muuhun korkeaan paikkaan, kuten vesitorniin. Asiakaspäätelaitteet ovat sisä- ja ulkotiloihin asennettavia malleja sekä kannettaviin päätelaitteisiin ja tietokoneisiin integroitavia malleja.

Asiakaspäätelaitteet voidaan jakaa sovellettavan tekniikan mukaan kahteen eri alueeseen, kiinteisiin ja liikuteltaviin tai kannettaviin laitteisiin. Kiinteissä asennuksissa päätelaitteet ovat sisä- tai ulkotiloihin sijoitettavia radiolaitteita, joissa on lähetin, vastaanotin ja antenni. Ulkotiloihin asennettaessa voidaan myös käyttää sisäyksikköä, johon voidaan tarvittaessa kytkeä esimerkiksi langaton lähiverkko. Kannettavia, liikuteltavia päätelaitteita ovat matkapuhelimet, PDA-laitteet (Personal Digital Assistant) sekä tietokoneet, joissa WiMAX-teknologian integrointi hoidetaan laitteen sisäisellä WiMAX-piirillä tai ulkoisella USB-liitännällä (Universal Serial Bus). Teknologialle ominaista ovat päätelaitteen liikkuvuus sekä katkeamaton yhteys liikkeen aikana. Laitteet pystyvät vastaan-

ottamaan ja lähettämään tietoa liikkeessä, ilman katkoksia, jopa nopeudessa 120 km/h. [3.]

Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen WiMAX-verkko, jossa ovat sekä kiinteä (consumer) että kannettava (portable) päätelaite laajakaistayhteydellä, yritys- ja backhaul-yhteydet sekä hotspot-yhteys.



Kuva 1. WiMAX-verkko [4].

2.3 Tekniset ominaisuudet

WiMAX-standardi 802.16 kattoi alun perin taajuusalueen 10–66 GHz, johon myöhemmin lisättiin 2–11 GHz:n alue. Taajuusalue rajoitettiin 66 GHz:iin, sillä suuremmat taajuudet lyhentävät tukiaseman toiminta-aluetta merkittävästi, varsinkin kaupunkialueella, missä korkeat rakennukset aiheuttavat peittoalueita.

Kiinteissä WiMAX-asennuksissa käytetään taajuusalueita 2–11 GHz sekä 10–66 GHz ja kannettavissa päätelaitteissa taajuusaluetta 2–6 GHz. Toistaiseksi vain taajuudet 2,3 GHz, 2,5 GHz, 3,5 GHz ja 4,9 GHz ovat lisensoituja ja yleisesti käytössä maailmalla. Näiden lisäksi lisensoimattomista taajuuksista 5,3 GHz ja 5,8 GHz ovat osittain käytössä. [5.]

WiMAX-standardin tiedonsiirtoon liittyvät asiat määritellään OSI-mallin (Open Systems Interconnection Reference Model) kahdella alimmalla kerroksella, fyysisellä ja siirtoyhteyskerroksella. Fyysinen kerros määrittelee käytettävät modulaatiomenetelmät ja kanavointi- eli multipleksointimenetelmät sekä fyysiset ominaisuudet radioyhteyttä varten. Siirtokerroksen alikerros, MAC-kerros (Media Access Control), määrittelee ominaisuudet radioyhteyden muodostamista varten. Lisäksi MAC-kerros huolehtii palvelun laadusta QoS (Quality of Service), mahdollistaa eri kaistanleveyksien varaamisen ja määrittää WiMAX:in tietoturvaan liittyvät määritykset.

2.3.1 Palvelun laatu, QoS

Palvelun laatu määrittelee, miten hyvin langaton teknologia pystyy välittämään tietoa ja palveluita, kuten ääntä ja videokuvaa. Merkittävimmät parametrit ovat viive eli latenssi, huojunta eli synkronointivirhe ja pakettien häviäminen. WiMAX-teknologia tarjoaa suhteellisesti hyvin pienen viiveen (jopa alle 10 millisekuntia) radiolinkkien välillä, kun viive mitataan läpi koko siirtokanavan.

Hyvä palvelun laatu edellyttää tiedonsiirron priorisointia, siellä missä aika on merkittävä tekijä, esimerkiksi siirrettäessä ääntä ja kuvaa. Priorisoinnin toteuttamiseksi kiinteissä WiMAX-asennuksissa on käytössä 4 luokkaa ja kannettavissa päätelaitteissa 5 luokkaa. [6.]

Taulukossa 1 on esitetty eri palveluluokat, sovellukset ja niiden QoS-parametrit priorisointia varten. Extended real-time Packet Services (ErtPS) on käytössä vain kannettavissa päätelaitteissa.

Taulukko 1. Palvelun laatu, WiMAX:in QoS-parametrit [6].

Palveluluokka	Sovellukset	QoS-parametrit
Unsolicited Grant Service (UGS)	IP-puhe	Huojunnan ja maksimiviiveen sieto sekä jatkuva maksiminopeus
real-time Packet Service (rtPS)	Ääni ja videokuva	Liikenteen priorisointi, maksimiviiveen sieto sekä jatkuva ja varattu maksiminopeus
Extended real-time Packet Services (ErtPS)	IP-puhe aktiviteetin tunnistuksella	Liikenteen priorisointi, huojunnan ja maksimiviiveen sieto sekä jatkuva ja varattu maksiminopeus
non-real-time Packet Services (nrtPS)	File Transfer Protocol (FTP)	Liikenteen priorisointi sekä jatkuva ja varattu maksiminopeus
Best Effort (BE)	Tiedonsiirto, internetin selailu jne.	Liikenteen priorisointi ja varattu maksiminopeus

2.3.2 Kanavointi- ja modulaatiomenetelmät

Kanavointi eli multipleksointi tarkoittaa monen signaalin yhdistämistä siirron ajaksi yhteiselle siirtotielle varaamalla siirtotiestä jokaiselle käyttäjälle osan joko kiinteästi tai pitkäksi aikaa. Modulaatiomenetelmät määrittelevät keinot tiedon siirtoa varten, esimerkiksi radioaaltojen välityksellä. Modulaatiolla siirrettävä tieto sovitetaan siirtotielle yhdistämällä alkuperäiseen signaaliin kantoaalto.

WiMAX-standardin kehityksen alkuvaiheessa käytettiin SC-menetelmää (Single Carrier), jossa yhtä kantoaaltoa käyttäen informaatio lähetettiin siirtotielle. Tämän jälkeen standardiin lisättiin OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) sekä OFDM:n usean käyttäjän mahdollistava versio OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). OFDM perustuu taajuusjakoiseen FDM-kanavointitekniikkaan (Frequency Division Multiplexing). Sen sijaan että informaatio lähetettäisiin leveämpää kaistaa käyttäen, kuten SC-menetelmässä, OFDM:ssä käytetään useita apukantoaaltoja, joita käyttäen informaatio lähetetään siirtotielle rinnakkain ja samanaikaisesti.

OFDM:n apukantoaaltojen modulaatiossa käytetään vaihe- ja amplitudimodulaatiomenetelmiä QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ja QAM (Quadrature Amplitude

Modulation). QPSK eli nelivaiheinen vaiheavainnus on yksi eksponentiaalisista modulaatiomenetelmistä, joka käyttää kantoaallon neljää vaihetta, esimerkiksi 0, +90, +180 ja +270 astetta. QAM-menetelmässä signaali koostuu kahdesta kantoaallostaa, joiden vaihesiirtymä on 90 astetta. QAM-modulaation jälkeen signaali sisältää sekä vaihe- että amplitudimuutoksen, mistä johtuen QAM-menetelmää voidaan myös pitää vaihe- ja amplitudimodulaation yhdistävänä modulaatiomenetelmänä.

Eri modulaatiomenetelmiä käyttämällä voidaan vaikuttaa kantamaan ja tiedonsiirtonopeuteen. Käyttämällä vähemmän häiriöherkkää modulaatiomenetelmää (QPSK) saadaan kantamaa kasvatettua. Toisaalta kantaman kasvaessa tiedonsiirtonopeus pienenee. Eri modulaatiomenetelmien tyypillinen vaikutus kantamaan on seuraavanlainen [7]:

- 64-QAM, kantama 3 kilometriä
- 16-QAM, kantama 3–6 kilometriä
- QPSK, kantama 6–10 kilometriä.

Taulukossa 2 on esimerkkejä taajuuden, koodauksen ja eri modulaatiomenetelmien vaikutuksesta tulo- ja lähtösuunnan (downlink ja uplink) tiedonsiirtonopeuteen.

Taulukko 2. Kaistanleveyden (MHz), modulaatiomenetelmän ja koodauksen vaikutus tulo- ja lähtösuunnan tiedonsiirtonopeuteen (Mbit/s) [8].

Modulaatio	Code rate	5 MHz kaistanleveys		10 MHz kaistanleveys	
		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
QPSK	1/2	3,17	2,28	6,34	4,70
QPSK	3/4	4,75	3,43	9,50	7,06
16-QAM	1/2	6,34	4,57	12,67	9,41
16-QAM	3/4	9,50	6,85	19,01	14,11
64-QAM	2/3	12,67	9,14	25,34	18,82
64-QAM	3/4	14,26	10,28	28,51	21,17

Code rate tarkoittaa hyötydatan suhdetta siirrettyyn datamäärään. Esimerkiksi 3/4 tarkoittaa, että jokaista kolmea databittiä varten generoidaan yhteensä neljä bittiä dataa, mikä tarkoittaa 75 %:n hyötysuhdetta.

2.3.3 Tietoturva

WiMAX-tekniikan tietoturva-asiat määritellään MAC-kerroksen tietoturvakerroksella (Privacy Sublayer). Verkkoon tunnistautumiseen kiinteissä WiMAX-verkoissa käytetään X.509-sertifikaatteja ja siirrettävän tiedon suojaamiseen 56-bittistä salausalgoritmia DES (Digital Encryption Standard). Liikuteltavissa ja kannettavissa päätelaitteissa tunnistautumiseen käytetään EAP-menetelmää (Extensible Authentication Protocol), joka on yleisesti käytössä langattomissa verkoissa. Salausalgoritmina käytetään AES-menetelmää (Advanced Encryption Standard), joka on toteutettu esimerkiksi 152-bittisellä salauskoodilla.

Sekä kiinteissä että kannettavissa toteutuksissa tukiaseman ja asiakaspäätelaitteen vastaanottimen väliseen tunnistautumiseen käytetään PKM-menetelmää (Privacy Key Management).

2.4 WiMAX-standardit

WiMAX-termi kehitettiin määrittelemään IEEE 802.16 -standardin mukaisia langattomia laajakaistaverkkoja. Kehitystyö alkoi vuonna 1999, kun perustettiin työryhmä kehittämään ja määrittämään standardeja kaupunkiympäristössä olevia langattomia laajakaistayhteyksiä eli MAN-verkkoja (Metropolitan Area Networks) varten. [9.]

Alkuvaiheessa kehitystyö keskittyi kiinteisiin laajakaistayhteyksiin ja vuonna 2004 valmistui standardi 802.16-2004, jota kutsutaan myös nimellä Fixed WiMAX. Tästä kehitettiin vuonna 2005 802.16e-2005, joka sisältää kannettavien päätelaitteiden määrittämiset ja standardit. Tästä johtuen standardista käytetään myös nimeä Mobile WiMAX.

Mobile WiMAX -standardin jälkeen on julkaistu muutama standardi, joissa on pääasiassa lisätty WiMAX-verkon valvontaan ja hallintaan liittyviä asioita. Neljännen sukupolven WiMAX-standardi, 802.16m, joka myös tunnetaan nimellä Mobile WiMAX Release 2.0 tai WirelessMAN-Advanced, hyväksyttiin maaliskuussa 2011 ja julkaistiin toukokuussa 2011. [9.]

802.16-2001 ja 802.16-2004

Vuonna 2001 valmistui ensimmäinen standardi, 802.16-2001, joka määritteli käytettävän taajuusalueen, 10–66 GHz, sekä toimintaperiaatteen line-of-sight (LOS). LOS tarkoittaa radiosignaalin esteetöntä tietä lähettimen ja vastaanottimen välillä. Standardia kutsutaan myös nimellä Local Multipoint Distribution Service (LMDS), johtuen käytettävästä monipistetiedonsiirtotekniikasta (P2MP, PTMP tai PMP), jonka mukaan yhdestä pisteestä asiakkaalle päin on useita eri tiedonsiirtoväyliä.

802.16-2004 on vuonna 2004 hyväksytty, voimassa oleva standardi, joka sisältää kaikki siihen asti määritellyt standardit. Tärkein näistä on 802.16a, joka valmistui vuonna 2003. Se toi mukanaan 2–11 GHz:n taajuusalueen ja non-line-of-sight –toimintaperiaatteen (NLOS), eli enää ei vaadittu radiosignaalin esteetöntä kulkua lähettimen ja vastaanottimen välillä. NLOS vaati myös muutoksen fyysiseen tiedonsiirtoon ja toteutusta varten standardiin lisättiin OFDM-modulaatio ja OFDMA-kanavanjakotekniikka.

802.16e-2005

Vuonna 2005 valmistui 802.16e-2005, joka sisältää parannuksia 802.16-2004-standardiin ja tuen kannettaville päätelaitteille. Yksi parannuksen kohteista oli palvelun laatu, QoS, ja uusista toiminnallisuuksista mukaan tuli skaalautuva OFDMA. Lisäksi standardin mukana tuli MIMO-teknologia (Multiple Input Multiple Output), jossa tiedonsiirtoon lähettimen ja vastaanottimen välillä käytetään useampaa antennia.

802.16j

Joulukuussa 2009 julkaistun standardin 802.16j yksi tavoitteista oli lisätä tukiasemien peittoaluetta ja parantaa verkon kapasiteettia käyttämällä niin sanottua multihop relay -tekniikkaa. Multihop relay on välitukiasema, joka toimii radiolinkkinä päätelaitteen ja varsinaisen WiMAX-tukiaseman välille lisäten käytettävissä olevaa kaistanleveyttä ja pyrkien säästämään päätelaitteen akkua. Tekniikasta käytetään myös nimeä MMR (Mobile Multihop Relay), koska se on suunniteltu pääasiassa liikkuville päätelaitteille.

802.16m

Uusin standardi on 802.16m (Mobile WiMAX Release 2.0), josta käytetään myös nimitystä Advanced Air Interface. Standardin tavoitteena oli kehittää ja parantaa radioyhteyden suorituskykyä. Merkittävin ja asiakkaalle näkyvin tavoite on saavuttaa kiinteälle WiMAX-yhteydelle siirtonopeus 1 Gbit/s ja kannettavalle (mobiili) yhteydelle 100 Mbit/s, mikä täysin vastaa ITU:n määrittelemiä neljännen sukupolven teknologian vaatimuksia.

802.16m-standardin mukaisia toiminnallisia ja suorituskykyyn vaikuttavia määrittelyjä on useita, esimerkiksi [10]:

- radiolinkin ja päätelaitteen välisten yhteysnopeuksien nosto
- viiveen pienentäminen
- palvelun laadun (QoS) parantaminen
- toiminta eri radioliityntäverkoissa (esimerkiksi WCDMA-tekniikkaan perustuvat UMTS, LTE ja FOMA)
- yhdenaikaisten käyttäjämäärien kasvattaminen
- paikannukseen liittyvien palveluiden parantaminen.

2.5 WiMAX-toteutukset Suomessa ja maailmalla

WiMAX on käytössä ympäri maailmaa, ja tietoisuus teknologiasta kasvaa koko ajan. WiMAX Forum organisaatioon kuuluu useita paikallisia organisaatioita, jotka tukevat teknologian kehittämistä ja levitystä paikallisesti. Erityisesti Kiina, Japani, Intia, Taiwan, Brasilia ja Venäjä ovat merkittävästi edistäneet tietoisuutta teknologiasta aktiivisesti järjestämällä konferensseja ja tapahtumia.

WiMAX-verkkoja on 150:ssä eri maassa 583 (tilanne toukokuussa 2011) ja määrä kasvaa koko ajan. Suurin osa verkoista on 802.16-2004-verkkoja eli Fixed WiMAX –verkkoja, joista myös käytetään nimitystä 802.16d. Loput ovat 802.16e-verkkoja eli Mobile WiMAX-verkkoja. [11.]

Molempia WiMAX-toteutuksia on kaikilla mantereilla ja jopa Tyynen valtameren saarilla, Tongalla ja Fidzilla, mikä kertoo kiinnostuksesta tekniikkaan ja sen mahdollisuuksista pitkän kantaman laajakaistatoteutuksissa [12].

Suomessa on tällä hetkellä 15 operaattoria, jotka tarjoavat WiMAX-verkkopalveluita, ja suunnitteilla on lisää. Maantieteellisesti nämä verkot ovat ympäri maata, pääasiassa kuitenkin haja-asutusseuduilla, mutta myös muutama kaupunkiverkko (MAN) on olemassa esimerkiksi Turussa ja pääkaupunkiseudulla. [13.]

2.6 Tulevaisuus

WiMAX-tekniologian käyttö ei kuitenkaan sulje pois muita langattomia tekniologioita, kuten WLAN:a tai WPAN:a (Wireless Personal Area Network, esimerkiksi Bluetooth), vaan WiMAX pitäisikin nähdä täydentävänä, olemassa oleville palveluille lisäarvoa tuovana ratkaisuna. WiMAX:in tarjoama kantama ja tiedonsiirtonopeus ovat jo tänä päivänä varsin tyydyttävällä tasolla ja käyttöönotettaessa neljännen sukupolven standardin mukaiset verkot nopeudet riittävät erinomaisesti suurta tiedonsiirtokapasiteettia vaativiin sovelluksiin.

Suurin este WiMAX-tekniologian käyttöönotossa ovat infrastruktuurin puute ja hinnoittelu. WiMAX-tekniologia vaatii investointeja, ja vähäinen käyttö pitää hinnat korkealla. Suurimmat investoinnit kohdistuvat WiMAX:in verkkoinfrastruktuurin rakentamiseen, vaikka olemassa olevia matkapuhelinverkon tukiasemamastoja voidaankin hyödyntää. Päätelaitteiden hinnat ovat kalliita, mutta kysynnän kasvaessa myös hinta alenee. WiMAX-laajakaistaliittymien hinnat ovat samalla tasolla kuin vastaavat mobiililaajakaistaliittymien hinnat. [14.]

Suomessa pidettiin marraskuussa 2009 ensimmäistä kertaa langattomien radiotaajuuksien huutokauppa [15]. Huutokaupan järjesti Viestintävirasto, joka Suomessa vastaa radiotaajuuksien hallinnoinnista. Taajuuksille varattiin kolme neljännen sukupolven verkkolupaa (LTE) ja yksi Mobile WiMAX -lupa. Alkuvuodesta 2009 WiMAX:ia kehittävä siruyhtiö Intel ilmoitti olevansa kiinnostunut luvasta. Intelin mukaantulo olisi saattanut lisätä kiinnostusta WiMAX-tekniologiaan ja olisi mahdollisesti lisännyt kannettavien päätelaitteiden määrää, joissa WiMAX-tekniologia on mukana. Intel kuitenkin vetäytyi huu-

tokaupasta, ja WiMAX lupaa haki kyproslainen Wimax Finance Limited sekä Finnet-yhtiöön kuuluva Pirkanmaan Verkko Oy, joka voitti huutokaupan. LTE-luvat menivät DNA:lle, Elisalle sekä TeliaSoneralle. [16.]

3 Matkapuhelinsukupolvet

Matkapuhelinteknologioiden eri kehitysvaiheet määritellään sukupolvien mukaan. Tunnusomaisia piirteitä eri sukupolville ovat samankaltainen toimintaperiaate sekä käyttäjille tarjottavat palvelut ja niihin läheisesti liittyvät teknologian tarjoama matkapuhelinverkon kapasiteetti ja tiedonsiirtonopeus.

Matkapuhelinteknologian kehitys jaetaan viiteen eri sukupolveen, alkaen analogisista matkapuhelinverkoista ja päätyen digitaalisiin, suuren kapasiteetin matkapuhelinverkoihin.

3.1 Nollannen ja ensimmäisen sukupolven matkapuhelinteknologiat

Ensimmäinen kehitysvaihe oli niin sanottu nollannen sukupolven matkapuhelinteknologia. Ensimmäiset laitteet esiteltiin jo 1940-luvulla, ja kehitystyö jatkui aina 1970-luvulle saakka. Nollannen sukupolven matkapuhelinteknologian ongelma oli siirtyminen tukiasemasolun alueelta toiselle. Yhteys katkesi aina siirtymisen aikana.

Näkyvin Suomessa toiminut järjestelmä oli ARP (Autoradiopuhelin). Se oli ensimmäinen Suomessa toiminut kaupallinen ja julkinen matkapuhelinverkko. Verkon käyttö saavutti suurta suosiota mutta teknologian rajoittuneisuuden vuoksi verkko ruuhkautui helposti. Verkko oli 1990-luvun alkupuolelle asti käsivälitteinen. ARP oli myös pitkään ainoa matkapuhelinverkko, jonka kuuluvuusalue kattoi koko Suomen. ARP-puhelinverkko suljettiin Suomessa vuoden 2000 lopussa. [17.]

Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinteknologia toi mukaan katkeamattoman yhteyden liikuttaessa tukiasemasolun alueelta toiselle. Teknologian kehitys alkoi 1970-luvulla, ja ensimmäiset verkot otettiin käyttöön 1980-luvun alussa. Suomessa ja Pohjoismaissa oli käytössä NMT (Nordiska Mobiltelefongruppen, myöhemmin Nordisk

Mobiltelefon), joka toimi kahdella eri taajuusalueella: 450 MHz ja 900 MHz. Aluksi käytössä oli NMT-450-verkko ja kapasiteetin alkaessa loppua käyttöön otettiin NMT-900-verkko. NMT oli myös maailman ensimmäinen täysautomaattinen matkapuhelinverkko. Vuoden 2002 lopussa NMT-verkko suljettiin Suomessa. [18.]

Nollannen ja ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkot olivat analogisia, ja niillä siirrettiin käytännössä vain ääntä. NMT-teknologiassa oli mukana palvelu tiedonsiirtoa varten, DMS (Data and Messaging Service), mutta sitä ei juurikaan käytetty. Molempien sukupolvien verkkojen kuuluvuusalue oli maksimissaan noin 30 kilometriä ja verkon rakenne samantyyppinen, käsittäen keskuksen, tukiaseman ja puhelimen. NMT-verkossa tosin kuuluvuusaluetta voitiin säädellä tarvittavan kapasiteetin mukaan. Kaupunkialueella voitiin käyttää pienempiä soluja, mutta samalla voitiin palvella suurempia käyttäjämääriä.

3.2 Toisen sukupolven matkapuhelinteknologia

Toisen sukupolven matkapuhelinteknologiasta (2G, 2nd Generation) alkaen yleistyivät tunnetut lyhenteet (2G, 3G ja 4G) viittaamaan eri sukupolviin. Samalla yleistyi sukupolven kehitysvaiheessa julkaistujen laajennuksien lyhenteet, kuten 2.5G ja 2.75G. Laajennukset yleisesti tarkoittivat parannuksia tiedonsiirtonopeuteen, mikä edesauttoi uusien, palveluiden, kuten WAP:n (Wireless Application Protocol), MMS:n (Multimedia Messaging Service) ja WWW:n (World Wide Web) käyttöönottoa. [19.]

Ensimmäinen toisen sukupolven matkapuhelinverkko kaupalliseen tarkoitukseen avattiin Suomessa vuonna 1991. Toisen sukupolven matkapuhelinverkko oli täysin digitaalinen, ja se toi mukanaan muun muassa puheen salauksen, mikä oli tähän asti puuttunut kokonaan. Salauksen puuttuessa puheluja oli mahdollista kuunnella. Yksinkertaisella radiovastaanottimella, oikealle taajuudelle viritettynä, pystyi kuuntelemaan käynnissä olevaa puhelua.

Matkapuhelinverkon digitalisointi toi mukanaan myös paljon muitakin parannuksia. Radioliikenteessä tarvittiin vähemmän tehoa signaalin kuljettamiseen. Ensimmäisen sukupolven matkapuhelimiin verrattuna matkapuhelimien akut kestivät pidempään ja samal-

la pienenivät merkittävästi. Matkapuhelinverkon digitalisoinnin tavoitteena oli myös äänen laadun parantaminen.

Toisen sukupolven matkapuhelinverkkojen suurin yhteysetäisyys oli likimain sama kuin ensimmäisellä sukupolvella, noin 30 kilometriä. Ensimmäisissä julkaistuissa toisen sukupolven verkoissa ei juuri ollut datansiirto-ominaisuuksia, jotka myöhemmin toteutettiin sekä piiri- että pakettikytkentäisinä.

Toisesta sukupolvesta alkaen matkapuhelinstandardien kehitys pääsi kunnolla vauhtiin. Euroopassa standardisoitiin GSM (Global System for Mobile Communications), Pohjois-Amerikassa, lähinnä Yhdysvaltoja ja Kanadaa varten DigitalAMPS (Advanced Mobile Phone System), sekä Pohjois-Amerikan ja joidenkin Aasian maiden markkinoita varten cdmaOne (Code Division Multiple Access). DigitalAMPS tunnetaan myös nimellä IS-136 (Interim Standard 136) ja cdmaOne nimellä IS-95 (Interim Standard 95). Näiden lisäksi tuli käyttöön muutamia paikallisia standardeja, kuten PDC (Personal Digital Cellular) Japanissa, ja operaattoreiden kehittämiä standardeja, kuten Motorolan iDEN (Integrated Digital Enhanced Network). Kolmannen matkapuhelinsukupolven myötä nämä paikalliset standardit ja operaattoreiden omat standardit sulautuivat joko GSM- tai CDMA2000-standardeihin. [20.]

Joulukuussa 1998 standardien kehitys jakaantui kahden eri organisaation, 3GPP:n (3rd Generation Partnership Project) ja 3GPP2:n (3rd Generation Partnership Project 2) vastuulle. 3GPP kehittää GSM-perheen standardeja, kun taas 3GPP2 CDMA2000-standardeja, joka perustuu IS-95-standardiin. GSM- ja CDMA2000-perheiden standardit ovat olleet perustana kolmannen ja neljännen sukupolven matkapuhelinstandardeja kehitettäessä ja kattavat lähes 100 % markkinoista. GSM-standardi on selvästi suositumpi lähes 90 %:n markkinaosuudella (tilanne 31.12.2009). [20; 21.]

3.3 Kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia

Molempien kolmannen sukupolven yhteistyöorganisaatioiden, 3GPP:n sekä 3GPP2:n, tavoitteena on luoda maailmanlaajuisesti soveltuvia ja käyttökelpoisia teknisiä määrittelyjä matkaviestintää varten. Kummankin organisaation taustalla on ITU:n IMT-2000-

projekti (International Mobile Telecommunications), joka paremmin tunnetaan nimellä 3G. [22.]

Aluksi IMT-2000 oli joukko GSM- ja CDMA2000-perheiden standardeja, mutta projektia täydennettiin myöhemmin kahdella teknologialla, DECT:illä (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) ja WiMAX:illa, jotka täyttävät IMT-2000-standardin vaatimukset. DECT ja WiMAX eivät kumpikaan ole varsinaisia matkapuhelinteknologioita, mutta täydentävät sukupolven teknologiaa omilla ominaisuuksillaan. DECT on ETSI-standardi (European Telecommunications Standards Institute) lähinnä kotikäyttöön tarkoitetuille langattomille puhelimille. [23.]

Kuten toisen sukupolven matkapuhelinteknologian laajennukset, kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologian laajennusten myötä tiedonsiirtonopeudet edelleen kasvoivat, mikä mahdollisti esimerkiksi videopuhelut, television katselun sekä paikkatietoon perustavat palvelut, kuten sääpalvelut ja erilaiset yrityshaut.

Ensimmäisen kaupallisen kolmannen sukupolven matkapuhelinverkon avasi NTT DoCoMo syksyllä 2001 Japanissa. Se oli esiversio WCDMA-teknologiasta (Wideband CDMA) ja tunnetaan nimellä FOMA (Freedom of Mobile Multimedia Access) eikä se aluksi ollut yhteensopiva UMTS-teknologian (Universal Mobile Telecommunications System) kanssa. NTT DoCoMo kuitenkin päivitti verkon vuoteen 2004 mennessä yhteensopivaksi Euroopassa yleisen UMTS-teknologian kanssa. FOMA oli myös ensimmäinen GSM-perheen standardin mukainen 3G-matkapuhelinverkko. [24.]

Ensimmäinen CDMA2000-perheen kaupallinen 3G-matkapuhelinverkko avattiin Yhdysvalloissa vuonna 2003, mutta se ajettiin myöhemmin alas. Samana vuonna Verizon Wireless avasi toisen CDMA2000-perheen 3G-matkapuhelinverkon, joka perustui 1xEV-DO-teknologiaan (Evolution-Data Optimized) ja on edelleen toiminnassa. Nykyisin Verizon Wireless on Yhdysvaltojen suurin operaattori. Myös Euroopassa ensimmäiset kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot esiteltiin vuonna 2003 ja ne perustuivat WCDMA-teknologiaan. [25.]

Vuoden 2007 loppuun mennessä kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot olivat levinneet ympäri maailmaa. Taulukossa 3 on yhdysvaltalaisen Morgan Stanley-liikepankin

joulukuussa 2009 esittelemät 3G-matkapuhelinverkkojen osuudet ja arviot kaikista matkapuhelinverkoista maailmanlaajuisesti.

Taulukko 3. 3G-matkapuhelinverkkojen osuudet ja arviot kaikista matkapuhelinverkoista [26].

	2007	2008	2009E	2010E	2011E	2012E	2013E	2014E
Länsi-Eurooppa	17 %	25 %	39 %	54 %	67 %	77 %	85 %	92 %
Japani	72 %	84 %	91 %	96 %	98 %	99 %	99 %	100 %
Asia (pois lukien Japani)	4 %	5 %	7 %	13 %	19 %	25 %	31 %	37 %
Pohjois-Amerikka	20 %	29 %	38 %	46 %	54 %	61 %	67 %	74 %
Itä-Eurooppa	2 %	5 %	9 %	16 %	26 %	29 %	34 %	40 %
Lähi-Itä ja Afrikka	1 %	3 %	7 %	12 %	19 %	25 %	30 %	35 %
Etelä- ja Keski-Amerikka	1 %	2 %	4 %	7 %	10 %	12 %	15 %	17 %
Yhteensä	8 %	11 %	15 %	21 %	27 %	33 %	38 %	43 %

Luvuissa mukana olevat 3G-tekniologiat ovat WCDMA, HSPA (High-Speed Packet Access), TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access), 1xEV-DO, LTE ja WiMAX. Sama tutkimus esitteli myös 3G-matkapuhelinliittymien määrät ja sen mukaan vuoden 2008 lopussa maailmassa oli noin 430 miljoonaa 3G-liittymää. Vuoden 2014 loppuun mennessä arvioidaan olevan noin 2,8 miljardia 3G-matkapuhelinliittymää. [26.]

3.4 Neljännen sukupolven matkapuhelintekniologia

Vuonna 2002 ITU esitteli strategian neljännen sukupolven matkapuhelintekniologiasta. Tekniologia sai nimekseen IMT-Advanced, mutta se tunnetaan paremmin lyhenteellä 4G. Kehitystyö on edelleen käynnissä, ja ensimmäiset kaupalliset 4G-matkapuhelinverkot avattiin vuonna 2009. Todellisuudessa mikään näistä verkoista ei vielä täytä IMT-Advanced määrittämiä vaikkakin niitä markkinoitiin 4G-matkapuhelinverkkoina.

Joulukuussa 2009 Tukholmassa ja Oslolla avattiin ensimmäiset kaupalliset LTE-matkapuhelinverkot, mutta nämäkään eivät vielä ole täysin 4G-standardin mukaisia, vaikka LTE usein yhdistetäänkin 4G-matkapuhelinverkoksi. Syksyllä 2009 esitelty ja maaliskuussa 2011 hyväksytty LTE-Advanced on ensimmäinen IMT-Advanced vaatimukset täyttävä 4G-standardi.

Neljännän sukupolven teknologian pääpaino on IP-pohjaisten (Internet Protocol) palveluiden tuominen matkapuhelimeen sekä tietoturvan parantaminen.

Neljännän sukupolven myötä teknologian standardointi jäi enää 3GPP organisaation vastuulle. 3GPP2 on lopettanut CDMA2000-perheen 4G-standardin, UMB:n (Ultra Mobile Broadband) kehityksen, sillä standardin pääsponsorin, Qualcommin ilmoitti loppuvuodesta 2008 keskeyttävänsä UMB-standardin kehityksen ja keskittyvänsä LTE:n kehitykseen. Samaan aikaan 3GPP lisäsi LTE-standardiin tuen CDMA2000-pohjaisiin teknologioihin. Tämä johti siihen, että suurin osa CDMA2000-teknologiaa käyttävistä operaattoreista on 4G-teknologiaan siirryttäessä ilmoittanut ottavansa käyttöön joko LTE:n tai WiMAX:in. WiMAX ei kuitenkaan matkapuhelin puolella ole vahvoilla, ja näin ollen LTE:stä on tulossa ainoa vaihtoehto päivitettäessä 3G-matkapuhelinverkkoja 4G-verkoiksi. [27.]

4 Matkapuhelinverkot ja -standardit

4.1 Standardien kehitysvaiheet

Nollannen ja ensimmäisen matkapuhelinsukupolvien aikana matkapuhelinstandardien kehitys oli paikallisten operaattoreiden tai muutamien operaattoreiden yhteistyöorganisaatioiden vastuulla. Yleisesti standardit olivat paikalliseen käyttöön, kuten NMT pohjoismaissa, Sveitsissä, Hollannissa ja Itä-Euroopassa, AMPS Yhdysvalloissa ja Australiassa, TACS (Total Access Communications System) Englannissa, C-450 silloisessa Länsi-Saksassa, Portugalissa ja Etelä-Afrikassa, Radiocomm2000 Ranskassa sekä RTMI (Radio Telefono Mobile Integrato) Italiassa. Näiden lisäksi esimerkiksi Japanissa oli useita eri standardeja. [28.]

Hyvin pian huomattiin tarve yhtenäistää standardeja ja luoda maanosan tai useita maanosia kattava standardi. Tähän tarpeeseen CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) perusti vuonna 1982 GSM-työryhmän (Groupe Spécial Mobile) tarkoituksenaan luoda koko Euroopassa toimiva matkapuhelinjärjestelmä. Vuonna 1989 GSM-järjestelmän standardointi siirrettiin ETSI:n vastuulle. [29.]

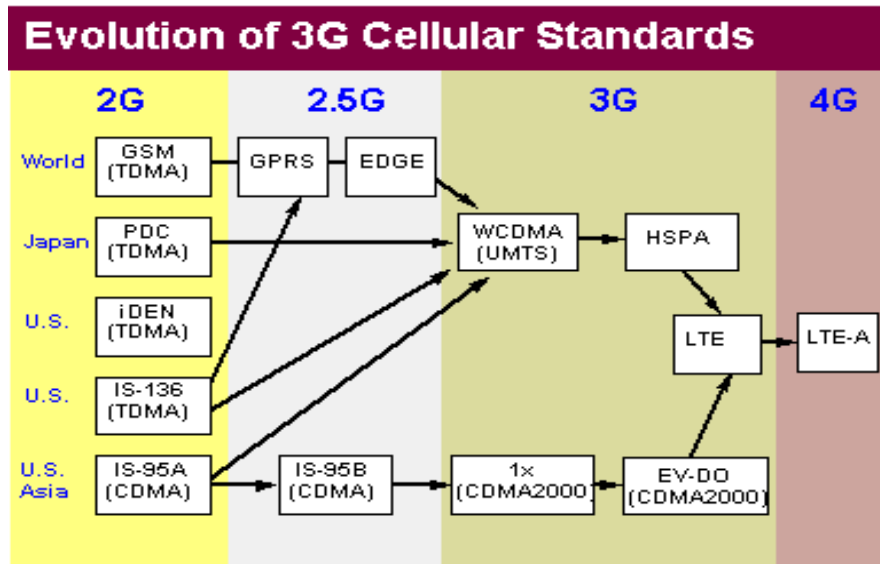
Yhdysvalloissa samaan tarpeeseen perustettiin vuonna 1988 TIA (Telecommunications Industry Association), joka vastaa cdmaOne- sekä DigitalAMPS-standardien kehityksestä. Nykyisiä DigitalAMPS-standardiin perustuvia matkapuhelinverkkoja ollaan ajamassa alas ja ne tullaan korvaamaan cdmaOne-standardin versiolla CDMA2000. [29.]

Sekä GSM, cdmaOne ja DigitalAMPS olivat ensimmäiset toisen sukupolven matkapuhelinstandardit, joista GSM ja cdmaOne, myöhemmin CDMA2000, ovat nykyisin laajimmin käytetyt standardit, GSM:n kuitenkin hallitessa markkinoita lähes 90 %:n markkinaosuudella. Näiden lisäksi toisen sukupolven aikana oli muutama muukin standardi, lähinnä Yhdysvalloissa ja Aasiassa, mutta näistä yksittäisistä standardeista on alettu luopua, ja siirtymävaihe CDMA2000-pohjaisiin ratkaisuihin on menossa. [26; 29.]

Matkapuhelinsukupolvien myötä tapahtunut standardien kehitys ja yhtenäistäminen johti useiden toisen sukupolven standardien sulautumiseen kolmannen sukupolven standardeihin.

Kuvassa 2 on esitetty matkapuhelinstandardien kehitysvaiheet 2G-matkapuhelinverkosta kohti 4G-verkkoja.

From Computer Desktop Encyclopedia
© 2009 The Computer Language Co. Inc.



Kuva 2. Matkapuhelinstandardien kehitysvaiheet [30].

Kolmannen sukupolven myötä matkapuhelinstandardien jako kahteen oli jo selvä. 3GPP vastasi GSM-perheen standardoinnista ja 3GPP2 CDMA2000-perheen standardoinnista. Neljänteen sukupolven siirryttäessä ainoaksi standardiksi on jäämässä LTE, mikä osaltaan helpottaa standardin kehitystä, mutta toisaalta saattaa kilpailun puuttuessa olla ongelmakin. Keskittymällä yhden standardin kehittämiseen resurssien käytön optimointi ja valvonta on helpompaa. Kilpailun puuttuessa standardien kehittämiseksi jää enemmän aikaa, mikä varmasti parantaa laatua, mutta toisaalta saattaa pidentää standardin kehityskaarta.

Matkapuhelinsukupolvien myötä myös matkapuhelinverkko (matkaviestinverkko) muuttui ja verkoista otettiin käyttöön sukupolvia kuvaavat nimet, 2G-matkapuhelinverkko, 3G-matkapuhelinverkko ja 4G-matkapuhelinverkko.

4.2 GSM-standardit

GSM-standardin myötä tullut matkapuhelinverkkojen digitalisointi edesauttoi uusien ominaisuuksien ja palveluiden kehittämisen ja tarjoamisen käyttäjille. Ensimmäiset versiot GSM-matkapuhelinverkoista sisälsivät äänenlaatuun ja tietoturvaan liittyviä parannuksia ja myöhemmin mukaan otettiin tiedonsiirtoon liittyviä palveluita. Näiden ominaisuuksien ja palveluiden kehittäminen asetti paineita myös itse GSM-standardin kehittämiseksi. Käyttäjälle näkyvin asia ovat tiedonsiirtoon liittyvät palvelut, niiden nopeus ja kapasiteetti, mikä nopeasti näkyikin standardin kehityksessä.

1990-luvun alussa esitellyissä GSM-verkoissa kaikissa ei ollut tiedonsiirto-ominaisuuksia vaan ne olivat puhepalveluita varten. Piirikytkentäisen tiedonsiirtoteknologian käyttöönotto GSM-verkoissa mahdollisti datapalveluiden käytön. Tiedonsiirtovaatimusten kasvaessa myös tiedonsiirtoteknologia kehittyi, piirikytkentäisestä teknologiasta siirryttiin pakettikytkentäiseen tiedonsiirtoteknologiaan. Samalla standardin kehityksen painopiste selkeästi siirtyi tiedonsiirtonopeuden ja -kapasiteetin kasvattamiseen.

Aluksi 2G-matkapuhelinverkkojen tiedonsiirtomenetelmänä käytettiin piirikytkentäistä CSD-menetelmää (Circuit Switched Data) ja tästä kehitettiin HSCSD (High Speed Circuit Switched Data). Paineet tiedonsiirtokapasiteetin kasvattamiseen ja pakettikytkentäisen ratkaisun kehittämiseen toivat GPRS-teknologian (General Packet Radio Service). Seuraava luonnollinen kehitysaskel oli GPRS-standardin tiedonsiirtonopeuden kasvu. Tästä syntyikin EGPRS (Enhanced GPRS, tunnetaan myös nimellä EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution)). HSCSD ja GPRS tunnetaan myös 2.5G-matkapuhelinverkon standardeina ja EGPRS 2.75G-matkapuhelinverkon standardina. EGPRS täyttää IMT-2000 projektin 3G-vaatimukset, mutta nopeus ei vastaa tämänpäivän 3G-matkapuhelinverkkoja. Siksi standardista usein näkee käytettävän lyhennettä 2.75G. [31; 32.]

3G-matkapuhelinverkkojen mukana GSM-standardeissa käytetty radorajapinta vaihtui aikajakaisesta TDMA-rajapinnasta (Time Division Multiple Access) koodijakoiseen CDMA-rajapintaan (Code Division Multiple Access). GSM:n seuraaja UMTS oli ensimmäinen GSM-perheen teknologia, jossa oli CDMA-pohjainen radorajapinta. Seuraava vaihe matkalla kohti 4G-matkapuhelinverkkoja oli UMTS:n suorituskykyä parantamaan kehitetty HSPA (High Speed Packet Access), ja siitä edelleen kehitetty HSPA+ (Evolved

HSPA). 2G-matkapuhelinverkkojen myötä tulleet siirtymävaiheen lyhenteet ovat käytössä myös 3G-matkapuhelinverkoissa. UMTS tunnetaan lyhenteellä 3G, HSPA lyhenteellä 3.5G ja HSPA+ lyhenteellä 3.75G. HSPA:n rinnalla kehitetty LTE on ensimmäinen ehdokas 4G-matkapuhelinverkoksi, mutta on edelleen siirtymävaiheen standardi, mistä syystä siitä käytetään lyhennettä 3.9G. [33; 34.]

Piirikytkentäiset 2G-standardit CSD ja HSCSD

Piirikytkentäinen tiedonsiirto CSD oli ensimmäinen GSM-standardin tiedonsiirtomuoto dataliikennettä varten. 3GPP julkaisi standardin vuonna 1992, ja se tunnetaan paremmin nimellä GSM-data. Siinä tiedonsiirtokanavan päiden välille muodostetaan kiinteä yhteys. Tiedonsiirtokanavan varauksessa käytetty aikajakoinen kanavanvaraustekniikka TDMA perustuu radiosignaalin aikajakoon, jossa signaali on jaettu kahdeksaan aikaväliin, jotka muodostavat TDMA-kehiksen. GSM-datan käyttämän yhden aikavälin tiedonsiirtonopeus oli 9,6 kbit/s. [20.]

Aikajakoisessa kanavanvaraustekniikassa on kuitenkin huonot puolensa. Jos jokainen aikaväli on käytössä, ei uutta yhteyttä voida muodostaa. Sama ongelma tulee vastaan tukiasemasolua vaihdettaessa. Yhteys katkeaa, jos uuden solun kaikki aikavälit on varattu. Myös siirtotien kapasiteetin hyödyntäminen on ongelma. Aikajakoisessa kanavanvaraustekniikassa jokaiselle linjalle varataan tietty aikajakso, vaikka linjalla ei olisikaan liikennettä. [20.]

Tiedonsiirtonopeuden kasvattamista varten CSD:stä kehitettiin HSCSD, jonka 3GPP julkaisi vuonna 1997. Yksi nopeuteen vaikuttavista parannuksista olivat erilaiset tiedonsiirrossa käytetyt virheenkoraustasot. Alkuperäinen GSM-data oli suunniteltu toimimaan koko matkapuhelinverkon alueella ja huonoimmassa mahdollisessa tilanteessa. Tällöin tiedonsiirron virheenkoraukselle jouduttiin varaamaan suuri osa tiedonsiirtokapasiteetista. HSCSD tarjoaa useita virheenkoraustasoja riippuen päätelaitteen yhteyden laadusta tukiasemaan. Parhaissa olosuhteissa virheenkorausta vähentämällä yhden aikavälin tiedonsiirtonopeus voitiin nostaa 9,6 kbit:stä/s 14,4 kbit:iin/s. [20.]

Toinen parannus oli useamman aikavälin käyttö. Enimmillään päätelaitteella saattoi olla käytössä neljä aikaväliä jolloin parhaissa mahdollisissa olosuhteissa tiedonsiirtonopeus

oli 4 x 14,4 kbit/s eli 57,6 kbit/s. Huonoimmillaankin tiedonsiirtonopeus neljää aikaväliä käyttäen oli 4 x 9,6 kbit/s eli 38,4 kbit/s.

Myös HSCSD:ssä on huonot puolensa. Usein matkapuhelinverkossa äänipuhelut priorisoidaan tiedonsiirron edelle, jolloin ruuhkatilanteessa saattaa olla mahdollista, että tiedonsiirtoa varten ei ole käytössä kaikkia neljää aikaväliä. Tästä huolimatta HSCSD-liittymien hinnoittelu perustui kaikkien neljän aikaväliin varaamiseen ja käyttöön. Tämä teki HSCSD:stä käyttäjälle huomattavan kalliin, sillä varatessaan tiedonsiirtoyhteyden käyttäjä maksoi kaikista neljästä aikavälistä riippumatta siitä käyttikö niitä vai ei.

Piirikytkentäisellä ratkaisulla on myös yksi etu sitä seuranneeseen pakettikytkentäiseen tiedonsiirtoon nähden. Vasteaika on lyhyt, koska tiedonsiirtoyhteys on koko ajan toiminnassa ja päätelaite voi lähettää paketteja tiedonsiirtokanavaan koko ajan. Pakettikytkentäisessä tiedonsiirrossa päätelaite joutuu odottamaan lupaa pakettien lähettämiseen. [20.]

Pakettikytkentäiset 2G-standardit GPRS ja EGPRS

Piirikytkentäisen tiedonsiirron kalleus johti nopeasti pakettikytkentäisten standardien kehittämiseen, joista ensimmäisenä, vuonna 1998, 3GPP julkaisi GPRS-standardin. Pakettikytkentäisessä tiedonsiirrossa siirrettävä data jaetaan pieniin osiin, paketteihin. GPRS:ssä tiedonsiirtoyhteys voi olla koko ajan toiminnassa, mutta tiedonsiirtokanava varataan vain paketin lähetyksen ajaksi. Tiedonsiirtokanavan varaus vain lähetyksen ajaksi teki pakettikytkentäisestä tiedonsiirrosta halvempaa kuin piirikytkentäinen tiedonsiirto. Asiakas maksoi vain lähettämästään datan määrästä, ei yhteysajasta kuten piirikytkentäisessä tiedonsiirrossa. Tiedonsiirtomäärien kasvaessa myös hinnoittelu on muuttunut. Nykyisin monet operaattorit tarjoavat kiinteähintaisia sopimuksia, jolloin kohtuullisella kuukausihinnalla voi siirtää rajattomasti dataa. [20; 35.]

GPRS:ssä päätelaitteet jaetaan kolmeen luokkaan, jotka kuvaavat laitteen toimintaa puhe- ja dataliikenteessä. Päätelaiteluokan A laitteet pystyvät samanaikaisesti välittämään puhe- ja dataliikennettä. Nykyisin myynnissä olevista päätelaitteista suurin osa on luokan A laitteita. Laiteluokan B laitteet pystyvät välittämään puhe- tai dataliikenteestä vain toista kerrallaan. Esimerkiksi tiedonsiirto keskeytyy puhelun ajaksi, mutta

jatkuu heti kun puhelu on päättynyt. Vaikka A-luokan laitteita on runsaasti myynnissä, siitä huolimatta käytössä olevista laitteista suurin osa on edelleen luokan B laitteita. Laiteluokan C laitteet pystyvät myös välittämään puhe- tai dataliikenteestä vain toista kerrallaan, mutta erona B-luokkaan C-luokan laitteissa siirto puhe- ja dataliikenteen välillä täytyy tehdä käsin. [35.]

GPRS:n myötä tiedonsiirtonopeudet eivät juurikaan parantuneet. Teoreettinen maksimi tiedonsiirtonopeus on noin 171,2 kbit/s, mutta käytännössä nopeudet jäävät 30–40 kbit:iin/s, eli samalle tasolle kuin piiriyhteyksessä HSCSD:ssä. Myös viive on erittäin suuri, jopa 600–700 ms. GPRS kuitenkin mahdollisti uusien palveluiden käyttöönoton, kuten multimediaviestit (MMS), pikaviestimet (instant messaging) sekä erilaiset IP-pohjaiset palvelut (WAP ja WWW). [20.]

Kuten piiriyhteyksessä CSD ja HSCSD myös GPRS käyttää aikajakoista kanavanvarausta (TDMA). GPRS:ssä kuitenkin aikavälejä voidaan varata siirrettävän tiedon perusteella. Jos päätelaitteeseen siirretään enemmän dataa, voidaan varata enemmän aikavälejä tulevalle datalle ja päinvastoin, päätelaitteesta dataa siirrettäessä voidaan varata enemmän aikavälejä lähtevälle datalle.

GPRS-standardin määrittelemän lähtevän ja tulevan datan aikavälin tiedonsiirtonopeuteen vaikuttaa monta tekijää, kuten operaattorin tarjoamien aikavälien määrä tukiasemassa, kanavansalauksessa, koodauksessa ja virheenkorjauksessa käytetty menetelmä sekä aikaväluokka (multislot class), joka kuvaa matkapuhelimen kykyä hyödyntää samanaikaisesti useampia lähteviä ja tulevia aikavälejä. [35.]

GPRS-standardissa kanavansalauksessa, koodauksessa ja virheenkorjauksessa on käytössä neljä luokkaa. CS-1-luokkaa (Coding Scheme) käytetään, kun matkapuhelin on kaukana tukiasemasta ja virheenkorjauksessa joudutaan käyttämään raskainta menetelmää. Matkapuhelimen ollessa lähellä tukiasemaa voidaan kanavansalauksessa, koodauksessa ja virheenkorjauksessa käyttää kevyintä menetelmää CS-4. Taulukossa 4 on esitelty eri luokkien vaikutus yhden aikavälin tiedonsiirtonopeuteen (GPRS).

Taulukko 4. Eri luokkien vaikutus yhden aikavälin tiedonsiirtonopeuteen [35].

Koodausmenetelmä	Nopeus kbit/s
CS-1	9,05
CS-2	13,4
CS-3	15,6
CS-4	21,4

Matkapuhelinten kehittyessä niiden kyky hyödyntää useampia aikavälejä parani. Samalla aikaväli luokkien määrää lisättiin ja tänä päivänä on 45 erilaista luokkaa kuvaamaan matkapuhelimen kykyä hyödyntää tulevia ja lähteviä aikavälejä samanaikaisesti. Yleisimmät nykypäivän matkapuhelimet tukevat luokkaa 8, 10 tai 32. Eri luokkien kykyä hyödyntää aikavälejä kuvataan summalla, esimerkiksi luokka 8 on 4+1, luokka 10 on 4+2 ja luokka 32 on 5+3, missä ensimmäinen luku kuvaa tulevien aikavälien maksimimäärää ja jälkimmäinen luku lähtevien aikavälien maksimimäärää. Yleensä matkapuhelimet eivät kuitenkaan pysty hyödyntämään summan tulosta sellaisenaan, vaan jokaiselle aikaväli luokalle on määritetty myös maksimimäärä yhdenaikaisia aikavälejä. Tästä erotuksena ovat aikaväli luokat 13–29, joissa maksimimäärää ei ole rajoitettu ja esimerkiksi tuleva data voi saada käyttöönsä koko TDMA-kehiksen eli kaikki 8 aikaväliä. Näitä luokkia tukevia matkapuhelimia ei kuitenkaan ole myynnissä.

Radioverkko voi siirrettävän tiedonperusteella määrätä puhelimelle tarjottavien aikavälien määrän. Matkapuhelin, joka tukee luokkaa 32, voi paljon tietoa vastaanottaessaan saada viisi aikaväliä tulevalle tiedolle, jolloin lähtevälle tiedolle jää yksi aikaväli. Vastavasti paljon tietoa lähettäessään, matkapuhelin voi saada kolme aikaväliä lähtevälle tiedolle ja kolme aikaväliä tulevalle tiedolle. Yleisesti luokan 32 matkapuhelin pystyy maksimissaan, siirrettävän tiedon luonteesta riippuen käyttämään kombinaatioita 5+1, 4+2 tai 3+3 tuleville ja lähteville aikaväleille. Taulukossa 5 on esitelty eri aikaväli luokkien tulevien ja lähtevien aikavälien maksimimäärät.

Taulukko 5. Esimerkkejä eri aikaväliiluokista [35].

Aikaväliluokka	Aikavälien maksimimäärä		
	Tuleva aikaväli	Lähtevä aikaväli	Yhteensä
1	1	1	2
8	4	1	5
10	4	2	5
29	8	8	ei rajoitusta
32	5	3	6
45	6	6	7

GPRS-standardin maksimitiedonsiirtonopeus saavutettaisiin käyttämällä kaikkia kahdeksaa aikaväliä ja kevyintä menetelmää CS-4, jolloin nopeus olisi $8 \times 21,4$ kbit/s eli 171,2 kbit/s. Taulukossa 6 on esitelty GPRS:n teoreettiset maksimitiedonsiirtonopeudet, jos kaikki kahdeksan aikaväliä ovat käytössä.

Taulukko 6. GPRS:n teoreettiset maksimi tiedonsiirtonopeudet 8:lla aikavälillä [35].

Koodaus menetelmä	Nopeus kbit/s
CS-1	$8 \times 9,05 = 72,4$
CS-2	$8 \times 13,4 = 107,2$
CS-3	$8 \times 15,6 = 124,8$
CS-4	$8 \times 21,4 = 171,2$

GPRS:n käyttämä GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) on hyvin häiriöitä sietävä taajuusmodulaatiomenetelmä.

Vuonna 2003 avattiin Yhdysvalloissa ensimmäinen GPRS:stä kehitetty EGPRS:ään perustuva matkapuhelinverkko, jossa on GMSK:n lisäksi käytössä tehokkaampi modulaatiomenetelmä 8-PSK (8 Phase Shift Keying) sekä yhdeksän modulaatio- ja koodausluokkaa (MCS, Modulation and Coding Scheme). 8-PSK on yksi monivaiheisista eksponentiaalisista modulaatiomenetelmistä, jonka nelivaiheista versiota (QPSK) myös WiMAX hyödyntää. EGPRS hyödyntää GMSK-modulaatiomenetelmää neljässä alemmassa luokassa ja tehokkaampaa 8-PSK:ta viidessä ylemmässä luokassa. [36.]

Tehokkaampi modulaatiomenetelmä ja useampi virheenkorjausluokka luonnollisesti kasvattivat tiedonsiirtonopeutta hyvissä olosuhteissa. EGPRS:ssä yhden aikavälin tiedonsiirtonopeus vähän laski verrattuna GPRS:ään, mutta teoreettinen maksimi kasvoi 473,6 kbit:iin/s ja viive laski 150 ms:iin. EGPRS:n perusnopeutena pidetään neljää aika-

väliä käyttäen 236,8 kbit/s. Käytännössä kuitenkin EGPRS:n tiedonsiirtonopeudet ovat noin 200 kbit/s, mutta GPRS:ään verrattuna parannus on huomattava; nelinkertainen tiedonsiirtonopeus ja neljäsosaan laskenut viive ovat käyttäjän kannalta merkittäviä parannuksia. Taulukossa 7 on esitelty EGPRS:n teoreettiset maksiminopeudet sekä yhdellä että kaikilla kahdeksalla aikavälillä eri modulaatiomenetelmillä.

Taulukko 7. EGPRS:n teoreettiset maksimi tiedonsiirtonopeudet [36].

Luokka	Nopeus kbit/s Yksi aikaväli	Nopeus kbit/s 8 aikaväliä	Modulaatio
MCS-1	8,80	70,4	GMSK
MCS-2	11,2	89,6	GMSK
MCS-3	14,8	118,4	GMSK
MCS-4	17,6	140,8	GMSK
MCS-5	22,4	179,2	8-PSK
MCS-6	29,6	236,8	8-PSK
MCS-7	44,8	358,4	8-PSK
MCS-8	54,4	435,2	8-PSK
MCS-9	59,2	473,6	8-PSK

EGPRS:stä on kehitetty parannettu versio Evolved EDGE. Radiorajapintaa on edelleen parannettu käyttämällä vielä tehokkaampia modulaatiomenetelmiä sekä dual carrier -tekniikkaa. Tiedonsiirtonopeudelle on luvattu jopa 1 Mbit/s. Kaupallisia Evolved Edge -matkapuhelinverkkoja ei maailmalla vielä ole, mutta kiinnostusta aiheeseen on. Monet matkapuhelinoperaattorit eivät vielä ole valmiita sjoittamaan 3G-matkapuhelinverkkoihin kustannussyistä. Siirtyminen GPRS:n kautta EGPRS:ään ja siitä Evolved EDGE:een on huomattavasti halvempaa ja helpompaa ja suorituskyky on 3G-matkapuhelinverkkojen tasolla. [37.]

3G-standardit UMTS ja HSPA

3GPP julkaisi ensimmäisen 3G-standardin vuonna 1999, ja se sai nimekseen Release '99, joka tunnetaan myös UMTS-teknologian perustana. UMTS-teknologian kehityksen alusta alkaen pääpaino on ollut tiedonsiirrossa, mikä näkyi teknologian ensimmäisen version tiedonsiirtonopeudessa 384 kbit/s, mikä on enemmän kuin 2G-standardin teknologioissa. 384 kbit/s pidetään myös UMTS-teknologian perusnopeutena, mikä on 3G-matkapuhelinverkkojen tarjoama miniminopeus. Todellisuudessa tiedonsiirtonopeudet 3G-verkossa saattavat jäädä alle 384 kbit/s johtuen käyttäjämääristä, operaatto-

rin tarjoamasta kapasiteetista, mahdollisista radiosignaaliin kohdistuvista ulkoisista häiriöistä sekä verkon ruuhkautumisesta.

UMTS perustuu GSM:n aiempiin standardeihin sisältäen GPRS- ja EGPRS-komponentit, mutta radorajapinta vaihtui aikajakoisesta TDMA-rajapinnasta koodijakoiseen WCDMA-rajapintaan (Wideband Code Division Multiple Access). Tästä johtuen UMTS-tekniikasta näkee käytettävän myös nimeä WCDMA. UMTS ja siitä kehitetty HSPA mahdollistavat käyttäjälle aiempaa nopeamman tiedonsiirron ja samalla operaattoreille tehokkaamman taajuusalueiden käytön sekä enemmän kapasiteettia jaettavaksi. Näin myös operaattorit hyötyvät WCDMA:n käyttöönotosta pystyen palvelemaan useampia käyttäjiä kuin TDMA:han perustuvissa 2G-matkapuhelinverkoissa. [38; 39.]

CDMA, jonka yksi muoto WCDMA on, on koodijakoinen kanavointitekniikka, jossa monipääsytekniikka on toteutettu hajaspektritekniikalla (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum). Siinä käytetään hajautuskoodia, jonka avulla lähetettävä signaali hajoitetaan annetulle kaistanleveydelle, ja samaa koodia käyttäen signaali kootaan vastaanottimessa. Antamalla käyttäjille omat, yksilölliset hajautuskoodit, samalle kaistanleveydelle voidaan sijoittaa useita käyttäjiä eri signaalien häiritsemättä toisiaan.

UMTS (WCDMA) on nimensä mukaisesti laajakaistainen CDMA-tekniikka. UMTS:ssä kantaaltoa varten varataan 5 MHz:n kaista, kun taas CDMA2000-standardiin perustuvissa matkapuhelinverkoissa käytetään 1,25 MHz:n kaistanleveyttä. UMTS:ssä tiedonsiirto on kaksisuuntainen, lähetys ja vastaanotto tapahtuvat samanaikaisesti (full duplex). Käytössä on kaksi eri versiota: FDD (Frequency Division Duplex) ja TDD (Time Division Duplex). Taajuusjakoisessa FDD-menetelmässä kantaalolle varataan omat 5 MHz:n kaistat sekä tulo- että lähtösuunnassa. Aikajakoisessa TDD-menetelmässä sama 5 MHz:n kaista on jaettu sekä tulo- että lähtösuunnan kesken. FDD-menetelmä on yleisesti käytössä UMTS-verkoissa ympäri maailmaa, kun taas TDD-menetelmään perustuva TD-SCDMA-verkko (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) on käytössä vain Kiinassa. [40.]

Perusteet 3G-verkoille varattavista taajuusalueista luotiin jo vuonna 1992, jolloin World Administrative Radio Conference suositteli taajuusalueiden 1885–2025 MHz ja 2110–2200 MHz käyttöä IMT-2000-verkoissa. UMTS/WCDMA käyttöön näiltä alueilta varattiin

- 1920–1980 MHz WCDMA FDD (lähtösuunnassa)
- 2110–2170 MHz WCDMA FDD (tulosuunnassa)
- 1900–1920 MHz WCDMA TDD
- 2010–2025 MHz WCDMA TDD.

UMTS:n perusnopeus 384 kbit/s on itse asiassa tulosuunnan tiedonsiirtonopeus, ja se on määritelty koko kuuluvuusalueelle kaupunkiolosuhteissa ja ulkotilassa. Sisätiloissa, pienten matkapuhelinsolujen (pikosolu) alueella tulosuunnan tiedonsiirtonopeus saattaa olla jopa 2 Mbit/s. Lähtösuunnan nopeus UMTS:ssä on 128 kbit/s. Tiedonsiirtonopeuden lisäksi viive on merkittävä tekijä, joka vaikuttaa käyttäjän kokemaan teknologian kehittymiseen. UMTS:n ensimmäisessä versiossa (Release '99) viive kuitenkin jäi samalle tasolle kuin 2G-standardin EGPRS-verkoissa (150 ms). [39.]

UMTS:n ensimmäisen version kehitys oli alun perin suunnattu piirikytkentäisiä verkkoja ajatellen, eikä näin ollen kovin hyvin soveltunut pakettikytkentäiseen tiedonsiirtoon. Samaan aikaan kuitenkin kasvoi tarve entistä nopeampaan tiedonsiirtoon. Monet päätelaitesovellukset ja -palvelut vaativat yhä nopeampia verkkoja ja tarve siirtyä kiinteästä laajakaistayhteydestä mobiililaajakaistaan lisääntyi. Päätelaitesovelluksia ja -palveluita haluttiin käyttää muutenkin kuin kiinteällä laajakaistayhteydellä. [41.]

3GPP:n vuonna 2001 julkaisema Release 4 oli ensimmäinen askel kohti nopeampia pakettikytkentäisiä, IP-pohjaisia kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoja. Tiedonsiirtonopeuden ja viiveen kannalta Release 4 ei tuonut käyttäjälle näkyviä muutoksia verrattuna edelliseen versioon, Release '99:ään. Parannuksia tehtiin lähinnä GPRS/EGPRS- sekä UMTS-radioverkkoon sekä erilaisiin käyttäjän palveluihin kuten MMS:ään, IMS:ään (IP Multimedia Services) ja paikkatietoon perustuviin sovelluksiin. Tärkeimpänä uusista toiminteista kuitenkin oli kokonaan IP-pohjainen runkoverkko, joka loi edellytykset 3GPP:n seuraaville julkaisuille. [38.]

Vuonna 2002 3GPP julkaisi Release 5:n, jossa HSPA esiteltiin ensimmäisen kerran. Julkaisussa oli mukana HSDPA (High Speed Downlink Packet Access). HSDPA sisälsi määrittelyt tulosuunnan tiedonsiirtoa varten. Tämän lisäksi julkaisu esitteli IMS-teknologian (IP Multimedia Subsystem) sekä edelleen parannuksia GPRS/EGPRS-radioverkkoon. IMS on standardi, joka määrittelee yleisen arkkitehtuurin IP-puhe- (VoIP, Voice over IP) ja multimedialpalveluita varten. Release 6 julkaistiin vuonna 2004, ja siinä oli mukana HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), ja se sisälsi määrittelyt lähtösunnan tiedonsiirtoa varten. Tämän lisäksi julkaisussa oli parannuksia ja lisäyksiä IMS-teknologiaan sekä merkittävänä, uutena toimintona yhteistoiminta UMTS- ja WLAN-verkkojen välillä. Release 6:n myötä HSPA jakaantui kahteen erilliseen osaan, HSDPA:han ja HSUPA:han. Molemmilla on omat vaatimukset ja ominaisuudet, mistä johtuen niitä usein käsitellään erillisinä kokonaisuuksina. Yleisesti HSPA:lla tarkoitetaan UMTS-verkoissa toimivaa yhdistelmää, jossa on mukana sekä HSDPA (Release 5) että HSUPA (Release 6). [38.]

HSPA toi mukanaan lukuisia merkittäviä parannuksia teknologiaan ja sitä kautta myös huomattavasti paremman suorituskyvyn. Seuraavassa on esitelty muutama HSPA:n (Release 5 ja Release 6) myötä tulleita parannuksia [41; 42]:

- edistyneempi modulaatiomenetelmä; HSDPA:ssa käytetään QPSK-menetelmän lisäksi 16-QAM-menetelmää, jolloin saavutetaan jopa tiedonsiirtonopeus 14 Mbit/s. HSUPA:ssa on edelleen käytössä QPSK, mutta tiedonsiirtonopeus on kasvanut 5,74 Mbit:iin/s.
- lyhyempi lähetysaikajakso (Transmission Time Interval, TTI); Käyttämällä lyhyempää aikajaksoa (2 ms HSDPA:ssa ja 10 ms tai 2 ms HSUPA:ssa) viivettä saadaan pienennettyä. HSDPA:ssa viive on 100 ms ja HSUPA:ssa 50 ms.
- HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request); Automaattinen uudelleenlähetys HARQ perustuu tiedonsiirrossa tapahtuvaan virheen havaitsemiseen ja korjaamiseen sekä uudelleenlähetykseen. HARQ on toteutettu tukiasemassa ja sen toiminnasta vastaa tukiaseman MAC-kerros, mikä lisää luotettavuutta tulosuunnan tiedonsiirrossa.

HSPA:n mukanaan tuoma suorituskyky toi vaatimuksia myös matkapuhelinten ominaisuuksiin. Niiden pitää pystyä palvelemaan HSPA:n tarjoamia eri yhdistelmiä, riippuen

muun muassa käytettävästä modulaatiomenetelmästä (HSDPA), lähetysaikajaksosta (TTI) sekä tiedonsiirrossa käytettävästä lohkon koosta. Tämän vuoksi 3GPP jakoi matkapuhelimet eri kategorioihin perustuen niiden tukemiin HSPA-ominaisuuksiin. Sekä HSDPA:lle että HSUPA:lle määriteltiin omat kategoriat, toiminnaltaan kuitenkin samantyyppiset, mutta eri muuttujilla ja tiedonsiirtonopeuksilla. Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty HSDPA:n ja HSUPA:n eri kategoriat sekä eri parametrien vaikutus tiedonsiirtonopeuteen.

Taulukko 8. HSDPA:n (Release 5) eri matkapuhelinkategoriat ja niiden tarjoamat suurimmat tiedonsiirtonopeudet [43; 44].

Kategoria	Minimi TTI väli	Lohkon koko (bits)	Modulaatio	Nopeus Mbit/s
1	3	7298	16-QAM, QPSK	3,6
2	3	7298	16-QAM, QPSK	3,6
3	2	7298	16-QAM, QPSK	3,6
4	2	7298	16-QAM, QPSK	3,6
5	1	7298	16-QAM, QPSK	3,6
6	1	7298	16-QAM, QPSK	3,6
7	1	14411	16-QAM, QPSK	7,2
8	1	14411	16-QAM, QPSK	7,2
9	1	20251	16-QAM, QPSK	10,1
10	1	27952	16-QAM, QPSK	14
11	2	3630	QPSK	1,8
12	1	3630	QPSK	1,8

Taulukko 9. HSUPA:n (Release 6) eri matkapuhelinkategoriat ja niiden tarjoamat suurimmat tiedonsiirtonopeudet [43; 44].

Kategoria	2 ms TTI tuettu	Lohkon koko (10 ms TTI)	Lohkon koko (2 ms TTI)	Nopeus Mbit/s
1	Ei	7110	-	0,7
2	Kyllä	14484	2798	1,4
3	Ei	14484	-	1,4
4	Kyllä	20000	5837	2,0 (10 ms TTI) 2,9 (2 ms TTI)
5	Ei	20000	-	2,0
6	Kyllä	20000	11520	2,0 (10 ms TTI) 5,74 (2 ms TTI)

Vuonna 2007 julkaistiin Release 7, joka toi edelleen parannuksia ja uudistuksia HSPA-teknologiaan sekä lisää matkapuhelinkategorioita tukemaan näitä uusia ominaisuuksia. Tehokkaampia ja edistyneempiä modulaatiomenetelmiä otettiin käyttöön. Tulosuunnas-

sa otettiin käyttöön 64-QAM ja lähtösuunnassa modulaatiomenetelmiin lisättiin 16-QAM. Tulosuunnassa käyttöön otettiin moniantennitekniikka MIMO. Release 7:n myötä tiedonsiirtonopeudet kasvoivat enimmillään 28 Mbit:iin/s tulosuunnassa käyttäen 16-QAM-modulaatiota ja MIMO-moniantennitekniikkaa ja 11,5 Mbit:iin/s lähtösuunnassa käyttäen 16-QAM-modulaatiota. [45.]

Release 7 ei kuitenkaan vielä tukenut 64-QAM-modulaatiota MIMO-tekniikan yhteydessä, vain 16-QAM oli tuettu. Vuonna 2008 julkaistu Release 8 kuitenkin korjasi tämän. Tulosuunnassa voitiin käyttää 64-QAM-modulaatiota ja MIMO-tekniikkaa samanaikaisesti. Release 8 esitteli myös dual carrier HSPA:n (DC-HSPA tai Dual Cell HSPA). Koska kuitenkin tiedonsiirto on pääasiassa tulosuunnassa, dual carrier -tekniikka otettiin käyttöön vain tulosuunnassa, mistä johtuen lyhenteenä yleisesti käytetään DC-HSDPA:ta. Dual carrier -tekniikassa tulosuunnassa varataan kaksi WCDMA-kantoaaltoa. Release 8:ssa dual carrier- tekniikka ei kuitenkaan ollut tuettu MIMO-tekniikan kanssa samanaikaisesti, mutta DC-HSDPA kaksinkertaisti Release 7:n tiedonsiirtonopeudet ilman MIMO-tekniikka 64-QAM-modulaatiota käyttäen, tarjoten tulosuunnassa jopa 42,2 Mbit/s datasiirtonopeuden. [45.]

Joulukuussa 2009 julkaistiin Release 9, jossa dual carrier -tekniikka ja MIMO yhdistettiin. Julkaisussa esiteltiin myös multicarrier-tekniikka sekä tulo- että lähtösuunnassa. Multicarrier-tekniikalla voidaan kasvattaa 5 MHz:n kaistojen määrää ja tulosuunnassa tavoitteena on neljä kaistaa. Lähtösuunnassa multicarrier-tekniikka on toteutettu dual carrier -tekniikalla (DC-HSUPA), mistä johtuen lähtösuunnan tiedonsiirtonopeus kaksinkertaistui verrattuna Release 7:ään. Tulosuunnassa dual carrier -tekniikka yhdistettynä MIMO-tekniikkaan 64-QAM-modulaatiota käyttäen voidaan saavuttaa jopa 84,4 Mbit/s tiedonsiirtonopeus, multicarrier-tekniikalla jopa yli 100 Mbit/s. [45.]

3GPP:n julkaisut Release 7, Release 8 ja Release 9 tunnetaan myös nimellä Evolved HSPA (HSPA+). Taulukoissa 10 ja 11 on esitetty 3GPP Release 7:n, Release 8:n ja Release 9:n eri matkapuhelinkategoriat sekä eri parametrien vaikutus tulo- ja lähtösuunnan tiedonsiirtonopeuteen.

Taulukko 10. 3GPP Release 7, Release 8 ja Release 9 tulosuunnan tiedonsiirtonopeudet [45].

Kategoria	3GPP Release	Modulaatio	Kommentti	Nopeus Mbit/s
13	7	64-QAM		17,6
14	7	64-QAM		21,1
15	7	16-QAM	MIMO	23,3
16	7	16-QAM	MIMO	28,0
17	7	64-QAM 16-QAM	MIMO	17,6 23,3
18	7	64-QAM 16-QAM	MIMO	21,1 28,0
19	8	64-QAM	MIMO	35,3
20	8	64-QAM	MIMO	42,2
21	8	16-QAM	DC-HSDPA	23,4
22	8	16-QAM	DC-HSDPA	28,0
23	8	64-QAM	DC-HSDPA	35,3
24	8	64-QAM	DC-HSDPA	42,2
25	9	16-QAM	DC-HSDPA + MIMO	46,7
26	9	16-QAM	DC-HSDPA + MIMO	55,9
27	9	64-QAM	DC-HSDPA + MIMO	70,6
28	9	64-QAM	DC-HSDPA + MIMO	84,4

Taulukko 11. 3GPP Release 7 ja Release 9 lähtösuunnan tiedonsiirtonopeudet [45].

Kategoria	3GPP Release	Modulaatio	Kommentti	Nopeus Mbit/s
7	7	16-QAM		11,5
8	9	QPSK	DC-HSUPA	11,5
9	9	16-QAM	DC-HSUPA	23,0

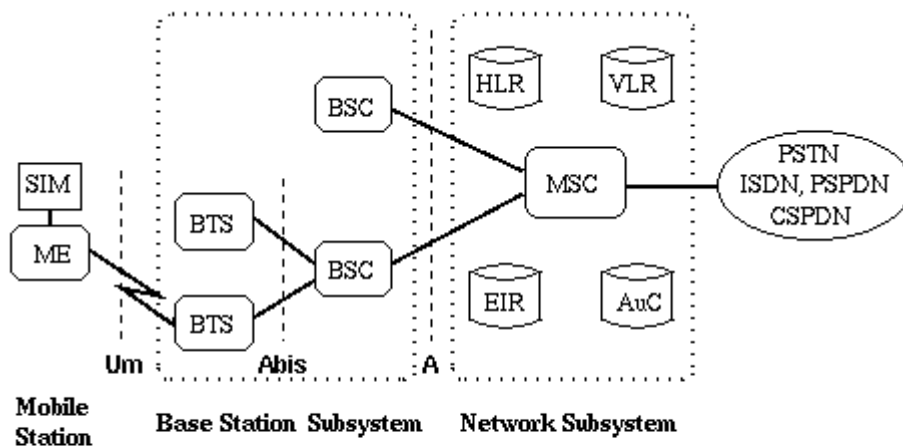
4.3 GSM-standardin 2G-matkapuhelinverkon rakenne ja toiminta

2G-matkapuhelinverkko perustuu tukiasemien muodostamiin soluihin, joihin päätelaite muodostaa yhteyden etsimällä laitetta lähimpänä olevan solun. 2G-verkko koostuu seuraavista osista [46]:

- tukiasemajärjestelmä BSS (Base Station Subsystem)
- päätelaite MS (Mobile Station)

- keskusjärjestelmä NSS (Network and Switching Subsystem)
- rekisterit
- verkonhallintajärjestelmä OSS (Operation Support Subsystem) tai NMS (Network Management System)
- mahdolliset GPRS-runkoverkon osat.

Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaistettu GSM-standardin 2G-matkapuhelinverkon arkkitehtuuri.



SIM	Subscriber Identity Module	BSC	Base Station Controller	MSC	Mobile services Switching Center
ME	Mobile Equipment	HLR	Home Location Register	EIR	Equipment Identity Register
BTS	Base Transceiver Station	VLR	Visitor Location Register	AuC	Authentication Center

Kuva 3. 2G-matkapuhelinverkon (GSM-matkapuhelinverkko) arkkitehtuuri [47].

Tukiasemajärjestelmä BSS (Base Station Subsystem)

Tukiasemajärjestelmä BSS jakautuu kahteen osaan, varsinaisiin tukiasemiin BTS (Base Transceiver Station) sekä tukiasemaohjaimiin BSC (Base Station Controller). Tukiasemajärjestelmän ja keskusjärjestelmän välissä on lisäksi transkooderi- ja nopeudensovituslaitteisto TRAU (Transcoder and Rate Adaptation Unit), joka hoitaa puheen koodauksen ja dekodauksen sekä sovittaa tiedonsiirtonopeudet eri verkkojen välillä, esimerkiksi 2G-verkon ja perinteisen puhelinverkon PSTN:n (Public Switched Telephone Network) välillä. [46.]

Tukiasema sisältää tarvittavat komponentit radioliikenteen ylläpitoon päätelaitteen kanssa sekä kommunikointiin tukiasemaohjaimen kanssa:

- lähetin- ja vastaanotinyksiköt
- teholähteet
- antennikaapelit
- antennit
- mastot
- vahvistimet
- liikenteen salauskomponentit.

Tukiasemajärjestelmän sisältämien radiokomponenttien vuoksi järjestelmästä käytetään myös nimeä Radio Access Network (RAN). 2G-matkapuhelinverkon radioverkoista on muutama eri versio, riippuen radioverkon ominaisuuksista ja sen tarjoamista palveluista. GRAN (GSM Radio Access Network) toimii piiri- ja pakettikytkentäisissä CSD-, HSCSD- ja GPRS-verkoissa. GERAN (GSM EDGE Radio Access Network) on identtinen GRAN-radioverkon kanssa, mutta siihen on lisätty EGPRS:n mukanaan tuomat ominaisuudet ja palvelut. Näiden lisäksi on vähän käytetty ERAN (EDGE Radio Access Network), jossa on vain EGPRS:n ominaisuudet ja palvelut. [46.]

Tukiaseman muodostaman solun kantavuus ja kuuluvuus vaihtelee sadasta metristä 35 kilometriin, riippuen käytetystä solutyypistä ja laitteistosta solun sisällä. GSM-standardin toisen sukupolven matkapuhelinteknologian käyttämä aikajakoinen kanavanvaraus tekniikka TDMA rajoittaa maksimikantavuuden 35 kilometriin. Solutyyppi valitaan ympäristön, halutun kantaman ja kuuluvuusalueen sekä käytettävän taajuuden mukaan:

- makrosolu; pisin kantama, lähettimet ja vastaanottimet kaupunkialueella korkeiden talojen katoilla ja maaseudulla mastoissa
- mikrosolu; kantama noin kaksi kilometriä, lähettimet ja vastaanottimet kaupunkialueella matalampien talojen katoilla
- pienet, sisätiloihin tarkoitetut solut (pikosolu)
- niin sanotut sateenvarjosolut, joilla parannetaan pienempien solujen peittoaluetta ja kuuluvuutta.

Tukiasema yleensä aina pitää sisällään useita lähetin- ja vastaanotinyksiköitä, jotta voidaan palvella eri 2G-matkapuhelinverkon taajuusalueita, 850/900 MHz ja 1800/1900 MHz, sekä mahdollisia sektoreita, joihin tukiaseman muodostama solu voi olla jaettu.

Tukiasemajärjestelmän kaikkia toimintoja ohjaa tukiasemaohjain BSC. Jokaisen ohjaimen alueella on useita kymmeniä tukiasemia ja niiden muodostamia soluja. Tukiasemaohjain vastaa radioliikenteen allokoinnista, kerää tietoa matkapuhelimista ja järjestelmästä sekä ohjaa liikennettä oman alueensa tukiasemien välillä. Tukiasemaohjain voi myös olla oma, itsenäinen matkapuhelinkeskus, jolloin ohjaimessa on mukana SS7-signaalointiprotokolla (Signaling System number 7) ja liittynät matkapuhelinkeskukseen sekä mahdolliseen GPRS-runkoverkkoon tukiasemanohjaimen alueella. [46.]

Tukiasemajärjestelmään kuuluu lisäksi tarvittavat liittynät GSM-verkon muihin osiin. Um-liityntä on radiorajapinta päätelaitteen ja tukiaseman välillä, jonka kautta kaikki tarvittava liikenne päätelaitteen ja tukiaseman välillä kulkee. Radiorajapinnan läpi kulkee muun muassa seuraavanlaista liikennettä:

- signaalointi eli merkinanto, joka hoitaa puhelun muodostamisen ja purkamisen
- puhelun hallintaan liittyvä liikenne
- kanavanvaihtoon (handover) liittyvä liikenne
- tehonhallintaan liittyvä liikenne
- autentikointi
- paikkatiedon päivitys sekä rekisteritietojen välitys.

Tukiaseman ja tukiasemaohjaimen välinen Abis-liityntä sekä tukiasemaohjaimen ja matkapuhelinkeskuksen välinen A-liityntä ovat pääasiassa liikennekanavien siirtoon ja synkronointiin. Näiden lisäksi tukiasemajärjestelmässä on liityntä transkooderi- ja nopeudensovituslaitteistoa varten. [46.]

Päätelaite MS (Mobile Station)

Päätelaitteissa on kaksi osaa, varsinainen laite ME (Mobile Equipment) ja tilaajan tiedot sisältävä älykortti SIM (Subscriber Identity Module). Päätelaite yhdistää kaikki tarvittavat laitteet ja ohjelmistot, jotta laite voi toimia matkapuhelinverkossa.

Varsinainen laite on matkapuhelin ME, joka vastaa ainoastaan toiminnallisuudesta eri taajuusalueilla, 2G-verkoissa 850/900/1800/1900 MHz ja 3G-verkoissa 900/2100 MHz. Näitä monitaajuuspuhelimia sekä molemmissa verkoissa toimivia kaksitoimipuhelimia on nykyisin markkinoilla runsaasti.

SIM-kortti vastaa kaikista matkapuhelinviestinnän toiminnoista ja ominaisuuksista. Kortin ominaisuuksien ansiosta tilaaja (matkapuhelinverkon käyttäjä) voi vaihtaa puhelinta tai operaattoria, ja tilaajan tiedot säilyvät kortilla. Samat toiminnot ovat mahdollisia myös ulkomailla, sillä useimmat matkapuhelinoperaattorit ovat tehneet niin sanotun verkkovierailusopimuksen (roaming), jonka ansiosta omaa SIM-korttia voi käyttää ulkomailla. Yhtä hyvin voi oman SIM-kortin vaihtaa ulkomaillakin toiseen puhelimeen tai vastaavasti hankkia paikallisen SIM-kortin ja käyttää sitä ulkomailla.

Päätelaitteen liittymiseen GSM-matkapuhelinverkkoon sekä päätelaitteen ja tukiaseman välisen liikenteen salaamisen ja tilaajan identiteetin suojaamiseksi käytetään erilaisia algoritmeja tietoturvan varmistamiseksi. GSM-verkkoon liittymisen todentamiseen GSM-verkoissa käytetään SIM-kortilla olevaa salausavainta sekä haaste-vastemenetelmää. 128-bittinen satunnaisluku (RAND) lähetetään päätelaitteeseen, josta SIM-kortti laskee 32-bittisen vasteen (SRES) käyttäen kortilla olevaa yksilöllistä salausavainta (Ki) sekä A3-algoritmia. Tämä 32-bittinen vaste lähetetään takaisin GSM-verkkoon, jossa verrataan siellä olevaa vastetta. Jos vasteet täsmäävät, päätelaitteelle sallitaan pääsy GSM-verkkoon. [48.]

Päätelaitteen ja tukiaseman välisen liikenteen salaamiseksi käytetään SIM-kortilla olevaa A8-algoritmia. Algoritmin avulla lasketaan 64-bittinen salakirjoitusavain (Kc) käyttäen todennusvaiheessa saatua satunnaislukua sekä SIM-kortilla olevaa yksilöllistä salausavainta. Saadulla 64-bittisellä salakirjoitusavaimella ja A5-algoritmillä puhe- ja dataliikenne salataan ja puretaan. A3- ja A8-algoritmit ovat hyvin samankaltaisia, ja ne on usein toteutettu yhtenä algoritmina, COMP128, jota on myöhemmin parannettu muun muassa tietoturvan osalta. Myös liikenteen salaukseen ja purkuun käytettävästä A5-algoritmista on useita versioita, joista nykyisin on käytössä A5/3-algoritmi. [48.]

Tilaajan identiteetin suojaamiseksi GSM-verkoissa käytetään tilapäistä identiteettiä, TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity), SIM-kortilla olevan yksilöllisen identi-

teetin IMSI (International Mobile Subscriber Identity) sijaan. Yksilöllistä identiteettiä käytetään kerran, todennuksen yhteydessä, mutta sen jälkeen kaikki liikennöinti tapahtuu tilapäisellä identiteetillä.

Keskusjärjestelmä NSS (Network and Switching Subsystem) ja rekisterit

Keskusjärjestelmä vastaa puheluiden ohjaamisesta ja kytkennästä sekä pitää yllä tietoa päätelaitteen sijainnista, jotta puhelut, tekstiviestit, multimediaviestit ja dataliikenne kulkevat oikein tilaajalta toiselle. Alun perin järjestelmän runkoverkko oli piirikytkentäinen ja palveli perinteisiä GSM-verkon sovelluksia. Pakettikytkentäisen tiedonsiirtomenetelmän myötä järjestelmään lisättiin rajapinta GPRS-runkoverkkoon liittymistä varten.

Keskusjärjestelmän pääkomponentti on matkapuhelinkeskus MSC (Mobile Switching Center). Keskus vastaa puheluiden kytkennästä GSM-verkon sisällä sekä GSM-verkon ja ulkopuolisen verkon välillä, välittää tekstiviestit tekstiviestikeskukselle, vastaa piiri- ja pakettikytkentäisestä tiedonsiirrosta sekä ohjaa ja valvoo tukiasemakeskuksia.

Matkapuhelinkeskus vastaa myös liikkuvuuteen ja kanavanvaihtoon (handover) liittyvistä toiminnoista päätelaitteen siirtyessä tukiaseman alueelta toiselle. Tällöin matkapuhelinkeskus vastaa kanavanvaihdosta tukiasemaohjaimien välillä tai kanavanvaihdosta omasta matkapuhelinkeskuksesta toiseen keskukseseen.

GSM-matkapuhelinverkossa on lisäksi runsaasti erilaisia lisäpalveluita, joiden toimintaa matkapuhelinkeskus ohjaa. Lisäpalveluita ovat muun muassa konferenssipuhelut, laskutus, puhelinvastaaja sekä mahdolliset toiminnot puhelun aikana, kuten puhelun siirto pitoon.

Matkapuhelinkeskuksen toiminnan edellytyksenä ovat rekisterit, erilaiset tietokannat, joissa on kaikki tarpeellinen tieto keskuksen toimintojen ohjaamiseen. Näistä rekistereistä kaksi, kotirekisteri HLR (Home Location Register) ja vierailijarekisteri VLR (Visitor Location Register), ovat pakollisia matkapuhelinkeskuksen toiminnalle. Näiden lisäksi keskuksessa voi olla todennuskeskus AuC (Authentication Centre), laitetunnusrekisteri EIR (Equipment identity register) sekä ryhmäpuhelurekisteri GCR (Group Call Register). Kotirekisterin ja vierailijarekisterin lisäksi todennuskeskus ja laitetunnusrekisteri ovat

yleisessä käytössä, mutta GSM-verkon ryhmäpuhelu ominaisuutta varten olevaa ryhmäpuhelurekisteriä käytetään harvemmin. [46.]

Kotirekisteri HLR sisältää jokaisen GSM-matkapuhelinverkon käyttäjän tiedot, jotka ovat käyttäjän SIM-kortilla. Jokainen SIM-kortti sisältää yksilöllisen tunnusteen IMSI, joka on ensijainen tallenne kotirekisterissä. Toinen tärkeä tallenne kotirekisterissä on MSISDN (Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network), joka on käyttäjän puhelinnumero. Käyttäjällä voi olla useampia MSISDN-numeroita, joista ensijaista käytetään puhelu- ja tekstiviestiliikenteessä ja toissijaisia numeroita esimerkiksi tiedonsiirrossa ja puhelinvastaajassa. Yksilöllisen tunnusteen ja puhelinumeron lisäksi kotirekisterin HLR muita tallenteita ovat muun muassa:

- käyttäjän omistamat ja tilaamat GSM-verkon palvelut
- GPRS-asetukset pakettikytkentäistä tiedonsiirtoa varten
- nykyinen paikkatieto
- puhelunsiirtoon liittyvät asetukset.

Kotirekisterin tallenteisiin liittyviä GSM-matkapuhelinverkon ohjaustietoja välittää MAP-protokolla (Mobile Application Part). Rekisteri vastaanottaa ja käsittelee protokollan välittämät tapahtumat ja viestit, kirjoittaa ne tarvittaessa rekisteriin ja välittää edelleen esimerkiksi vierailijarekisterille. Kotirekisterin pääasiallinen tehtävä kuitenkin on huolehtia päätelaitteiden toimivuudesta niiden liikkuessa vierailijarekisterin alueelta toiselle, matkapuhelinkeskuksen alueelta toiselle sekä maasta toiseen.

Vierailijarekisteri VLR sisältää tiedot tukiaseman alueella vierailevasta päätelaitteesta. Jokaista tukiasemaa palvelee vain yksi vierailijarekisteri. Tästä johtuen päätelaite ja sen tiedot voivat olla kerrallaan vain yhdessä vierailijarekisterissä. Päätelaitteen liikkuessa saman vierailijarekisterin alueen sisällä sijaintitieto päivitetään vain vierailijarekisterin sisällä. Päätelaitteen saapuessa uuden vierailijarekisterin alueelle vierailijarekisteri pyytää kotirekisteriltä laitteen tiedot ja ilmoittaa samalla kotirekisterille laitteen uuden sijainnin. Vastaavasti päätelaitteen poistuessa vierailijarekisterin alueelta tai päätelaitteen ollessa esimerkiksi sammutettuna tietyn ajan laitteen tiedot poistetaan vierailijarekisteristä. Vierailijarekisterissä on käytännössä samat tiedot kuin kotirekisterissä, lisättyinä

todennustiedoilla ja kotirekisterin osoitteella. Näin ollen vierailijarekisteri vastaa päätelaitteen toimivuudesta ja sille määritellyistä palveluista omalla alueellansa. [46.]

Todennuskeskus AuC vastaa päätelaitteen GSM-matkapuhelinverkkoon liittymisen todennuksesta. Keskukseen on tallennettu päätelaitteen SIM-kortilla olevat algoritmit (yleensä A3 ja A8 tai niiden yhdistelmä COMP128) sekä salausavain päätelaitteen ja tukiaseman välisen liikenteen avaamiseen, salaamiseen ja tilaajan identiteetin suojaamiseksi. Todennuskeskus ei suoranaisesti itse osallistu prosessiin, vaan luo todennus- ja salausprosessia varten kolmesta eri luvusta koostuvan paketin (RAND, SRES ja Kc). Matkapuhelinkeskus lähettää päätelaitteeseen 128-bittisen satunnaisluvun (RAND). Satunnaisluvun (RAND) avulla lasketaan lisäksi kaksi muuta lukua, 32-bittinen vaste (SRES) ja 64-bittinen salakirjoitusavain (Kc). Todennus- sekä puhe- ja dataliikenteen salausprosessit on kuvattu aiemmin päätelaitteen yhteydessä.

Laitetunnusrekisterissä EIR (Equipment Identity Register) pidetään yllä päätelaitteen tunnistetietoja, kuten IMEI-koodia (International Mobile Equipment Identity). Koodin perusteella päätelaite voidaan sulkea, estää pääsy matkapuhelinverkkoon sekä päätelaitetta voidaan seurata. Rekisteri onkin kehitetty varastettujen matkapuhelimen seurantaan ja mahdollista sulkemista varten. Laitetunnusrekisterissä ei sinällään ole paljon tietoa, ja siksi se onkin usein liitetty osaksi kotirekisteriä. [46; 48.]

Verkonhallintajärjestelmä NMS (Network Management System)

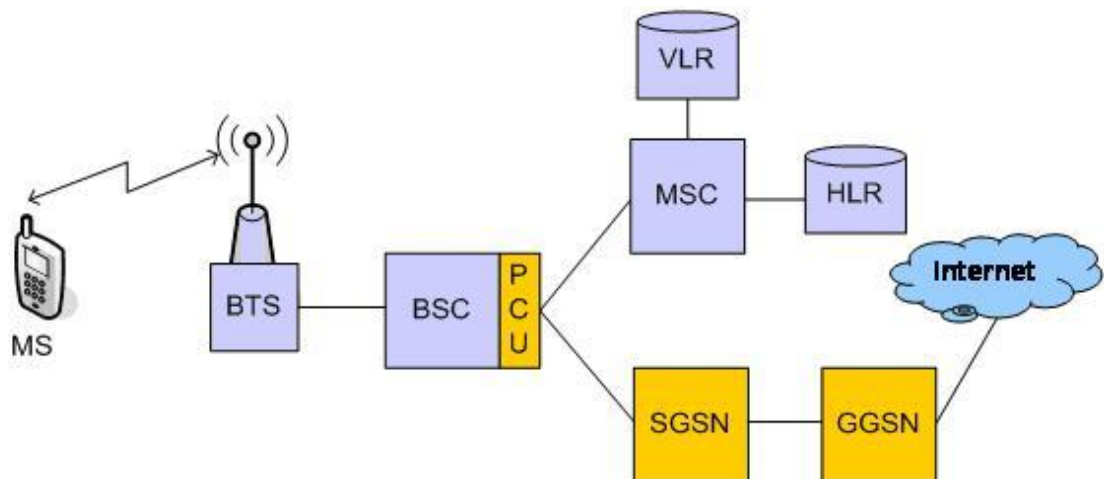
Verkonhallintajärjestelmä NMS vastaa matkapuhelinverkon hallinnasta, ohjauksesta ja ylläpidosta. Hallintajärjestelmä on yhteydessä tukiasemajärjestelmään ja keskusjärjestelmään, jolloin hallintajärjestelmän kautta voidaan valvoa matkapuhelinjärjestelmän eri osia, tehdä muutoksia parametreihin, joilla ohjataan matkapuhelinjärjestelmän toimintaa sekä asentaa ohjelmistoja matkapuhelinjärjestelmän eri osiin. [46.]

GSM-matkapuhelinverkon GPRS-komponentit

Pakettikytkentäisen tiedonsiirron myötä nykypäivän 2G-matkapuhelinverkot sisältävät tarvittavat komponentit GPRS-runkoverkkoon liittymistä varten. GPRS-runkoverkko toi mukanaan IP-pohjaisen liikenteen ja sitä hyödyntävät palvelut. Verkon pohjana on

GSM-matkapuhelinverkko, johon on lisätty GPRS-komponentit ja rajapinta GPRS-runkoverkkoa varten. Näitä GPRS-komponentteja kutsutaan nimellä GSN (GPRS Support Node), ja ne vastaavat pakettikytkentäisestä tiedonsiirrosta päätelaitteen ja pakettikytkentäisen verkon PDN:n (Packet Data Network) välillä. [49.]

Kuvassa 4 on esitetty yksinkertaistettu 2G-matkapuhelinverkko lisättynä GPRS-komponenteilla (keltaiset laatikot).



Kuva 4. 2G-matkapuhelinverkko lisättynä GPRS-komponenteilla [50].

GGSN (Gateway GPRS Support Node) on GPRS-matkapuhelinverkon pääkomponentti ja vastaa tiedonsiirrosta ja liikennöistä GPRS-verkon ja ulkoisen pakettikytkentäisen verkon, kuten internetin välillä. SGSN (Serving GPRS Support Node) vastaa päätelaitteen pakettidatan välityksestä. Näiden kahden komponentin lisäksi tukiasemaohjaimen BSC liitetään PCU (Packet Control Unit), joka erottelee piiri- ja pakettikytkentäisen liikenteen ja ohjaa liikenteen joko GPRS-verkkoon tai piirikytkentäiseen verkkoon. Lisäksi PCU tarjoaa fyysisen ja loogisen liittynän ulos tukiasemajärjestelmästä BSS. Eri GPRS-komponenttien muodostamaa sisäistä IP-pohjaista verkkoa kutsutaan Intra-PLMN-runkoverkoksi (Public Land Mobile Network). Intra-PLMN-runkoverkot liitetään toisiinsa Inter-PLMN-runkoverkon avulla Border Gatewayn kautta. [49.]

Fyysisten GPRS-komponenttien lisäksi 2G-matkapuhelinverkko vaatii ohjelmistopäivityksiä rekistereihin eli keskusjärjestelmän NSS eri tietokantoihin, tukiasemaan BTS ja tukiasemaohjaimen BSC pakettidatan käsittelyä ja liikennöintiä varten.

GPRS-komponenttien mukana 2G-matkapuhelinverkon arkkitehtuuriin lisättiin uusia liityntöjä eli rajapintoja lähinnä pakettidatan siirtoa ja käsittelyä varten tukiasemajärjestelmän BSS, eri rekistereiden ja komponenttien GGSN:n ja SGSN:n välillä. Seuravassa on esitelty näistä rajapinnoista muutama [49]:

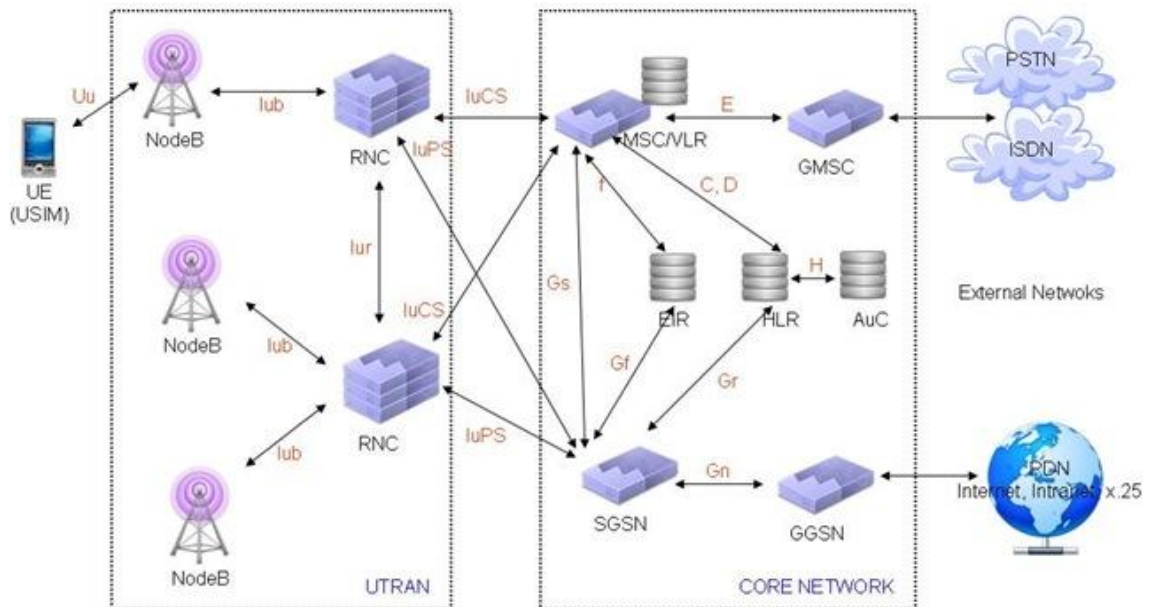
- Gb, rajapinta tukiasemajärjestelmän BSS ja SGSN:n välillä GPRS-liikennettä ja signalointia varten
- Gn, IP-pohjainen data- ja signalointirajapinta kahden SGSN:n tai SGSN:n ja GGSN välillä Intra-PLMN runkoverkon sisällä
- Gp, IP-pohjainen data- ja signalointirajapinta kahden GGSN:n välillä Inter-PLMN runkoverkossa, tarjoten tietoturvaan ja reititykseen liittyvät toiminnot Border Gateway:n ja palomuurin avulla
- Gi, GGSN:n ja ulkoisen verkon (internet, X.25) välinen rajapinta
- Gr, SGSN:n ja kotirekisterin HLR välinen rajapinta
- Gc, GGSN:n ja kotirekisterin HLR välinen rajapinta.

GPRS:stä kehitettiin EGPRS, joka lisäsi luotettavuutta ja tarjosi suuremman tiedonsiirtonopeuden. EGPRS:n verkkoarkkitehtuuri on periaatteessa täysin sama kuin GPRS:n. Siinä on samat verkkokomponentit, rajapinnat, protokollat ja toiminnot. Ainoastaan radio-rajapintaa on parannettu käyttämällä edistyneempiä modulaatio- ja koodausmenetelmiä tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseksi.

4.4 GSM-standardin 3G-matkapuhelinverkon rakenne ja toiminta

3G-matkapuhelinverkko, UMTS-verkko, perustuu GSM-matkapuhelinverkkoon sisältäen melkein kaikki GPRS-verkon komponentit. Hyvin usein UMTS-verkko on päivitetty 2G-verkko, jolloin sekä 2G- että 3G-komponentit ovat mukana ja käytössä. Terminologian kannalta erot näkyvät tukiasemajärjestelmässä, missä suurimmat muutokset itse teknologiaan ovat. UMTS-verkon tukiasemajärjestelmä UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) koostuu tukiasemista Node B ja niitä valvovista ja ohjaavista yksiköistä RNC (Radio Network Controller). Samalla päätelaitteelle ja älykortille määriteltiin uudet nimet UE (User Equipment) ja USIM (UMTS SIM tai Universal SIM). [51.]

Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistettu 3G-matkapuhelinverkko.



Kuva 5. 3G-matkapuhelinverkko [52].

3G-matkapuhelinverkon yhtenä tavoitteena on ollut yksinkertaistaa 2G-matkapuhelinverkon rakennetta. Siinä missä 2G-verkko koostui useasta eri osasta, 3G-verkossa on kolme osaa [51]:

- UE (sisältää USIM-älykortin)
- UTRAN
- Core Network.

UE (User Equipment) on 3G-verkossa toimiva päätelaite, hyvin usein monitaajuusmatkapuhelin, joka toimii sekä 2G- että 3G-matkapuhelinverkoissa. Markkinoilla on monitaajuuspuhelimia, jotka tukevat 2G- ja 3G-verkkojen taajuuksalueita (850/900/1800/1900/2100 MHz), joko osittain tai kokonaan. Matkapuhelinteknologian kehittyessä myös matkapuhelimen ominaisuuksia parannettiin vastaamaan teknologian asettamiin vaatimuksiin. Matkapuhelimissa olevat sovellukset vaativat riittävän isoja

värinäyttöjä ja matkapuhelinten pienentyessä myös akun koko pieneni. Samalla akun kestolta vaadittiin enemmän ja litium-ioni-akut otettiin käyttöön niiden pienen koon ja keston vuoksi. UE sisältää älykortin USIM. Se on kehittyneempi versio SIM-älykortista, mutta sisältää samat tiedot kuin SIM-kortti ja toimii käytännössä samalla tavalla. USIM-älykortin tietoturvaominaisuuksia on parannettu algoritmejä kehittämällä ja kortin tallennuskapasiteetti on kasvanut.

Kuten UE, myöskään UMTS Core Network ei juurikaan muuttunut siirryttäessä 2G-verkoista 3G-verkkoihin. Core Network vastaa toiminnaltaan 2G-verkkojen keskusjärjestelmää NSS lisättynä GPRS-runkoverkon osilla. UMTS Core Network voidaan jakaa kahteen osaan tiedonsiirto-ominaisuuksien perusteella, piiri- ja pakettikytkentäiseen, joista molemmat osat perustuvat 2G-verkkoon. Myös jaetut osat, kuten eri rekisterit ja todennuskeskus, pohjautuvat 2G-verkkoon. [51.]

UMTS-verkon tukiasemajärjestelmä UTRAN on kokonaan uusi. Radiorajapinnan vaihtuessa aikajakaisesta koodijakoiseen ja uusien taajuusalueiden käytön myötä tukiasemajärjestelmä uusittiin ja samalla yksinkertaistettiin. UTRAN, kuten 2G-verkon tukiasemajärjestelmä BSS, sisältää kaksi osaa, tukiaseman Node B ja niitä valvovan ja ohjauvan yksikön RNC. Yhdessä päätelaitteen UE kanssa UTRAN vastaa WCDMA-tekniikan radioresurssien hallinnasta (RRM; Radio Resource Management), joka koostuu viidestä toiminnallisesta osasta [53]:

- tehonsäätö (valvonta ja ohjaus, power control)
- solun vaihto (handover)
- pääsynhallinta (admission control)
- kuormanhallinta (load control)
- pakettiajoitus (packet scheduling).

Tukiasema Node B sisältää samat komponentit kuin 2G-verkon BTS. Erona 2G-verkon tukiasemaan yksi Node B voi palvella useampia tukiasemien muodostamia soluja tai sektoreita riippuen tukiaseman antennityypeistä. 3G-verkon suuremmasta taajuudesta johtuen myös tukiasemien muodostamien solujen peittoalue on pienempi kuin vastaavien 2G-verkon solujen eikä solun koko ole vakio kuten 2G-verkoissa. 3GPP Release 5:n

myötä myös tukiasemaan Node B on lisätty toiminnallisuutta, jotta HSDPA:n vasteaikaa saadaan pienennettyä.

Tukiasema Node B hoitaa CDMA-pohjaisille matkapuhelinverkoille erittäin tärkeää tehtävää: tehonvalvontaa ja -ohjausta (power control). Tehonvalvonnan ja -ohjauksen tavoitteena on pitää häiriötaso radiorajapinnassa mahdollisimman pienenä sekä tarjota vaadittu palvelun laatu (Quality of Service). On tärkeää, että tukiasema vastaanottaa signaalin kaikista alueellansa olevista matkapuhelimista yhtä voimakkaana riippumatta siitä, kuinka kaukana matkapuhelin on tukiasemasta. Matkapuhelinten lähettäessä samalla teholla, lähempänä olevien matkapuhelinten signaali kuuluu paremmin ja kaukana olevien signaali saattaa jopa jäädä vastaanottamatta. Tukiasema ohjaa kauempana olevia matkapuhelimia lähettämään suuremmalla teholla ja lähempänä olevia pienemmällä teholla. Näin ollen tukiasema vastaanottaa signaalin kaikista alueellansa olevista matkapuhelimista yhtä voimakkaana ja kaikkia voidaan palvella. [53.]

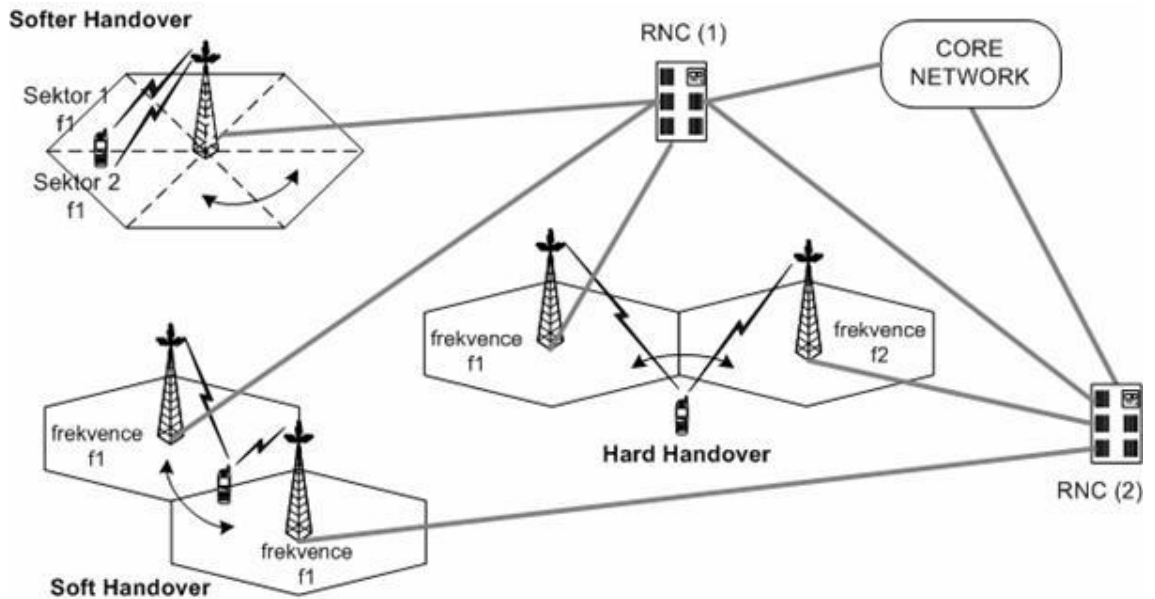
Tukiasema Node B valvoo myös omaa tehon käyttöä. Hyvin usein eri tukiasemien muodostamat solut tai sektorit risteävät, jolloin niiden signaalit saattavat häiritä toisiaan. Tämän vuoksi tukiasemien lähetys- ja vastaanottotehot pidetään mahdollisimman alhaalla, kuitenkin niin, että kaikkia alueella olevia matkapuhelimia voidaan palvella.

Tehonvalvonnassa ja -ohjauksessa käytetään kahta menetelmää: open loop ja closed loop. Open loop -menetelmää käytetään ensimmäisessä yhteydenotossa matkapuhelimen ja tukiaseman välillä, ennen kuin yhteys on kokonaan muodostettu. Matkapuhelin mittaa tukiasemasta vastaanotetun signaalin voimakkuuden, arvioi sen perusteella vaadittavan lähetystehon ja lähettää sen jälkeen käyttämällä kyseessä olevaa arvoa. Closed loop -menetelmää käytetään matkapuhelimen kommunikoidessa tukiaseman kanssa. Tukiasema mittaa jatkuvasti (1,5 kHz:n taajuudella eli 1500 kertaa sekunnissa) matkapuhelimen lähetystehoa ja lähettää tarvittaessa matkapuhelimelle tehonsäätökäskyn, jonka perusteella matkapuhelin säättää lähetystehoaan. Closed loop -menetelmällä säädetään matkapuhelimien tehotasot samalle tasolle, eli tukiasema vastaanottaa matkapuhelimien signaalin yhtä voimakkaana, riippumatta matkapuhelimen etäisyydestä tukiasemaan. Closed loop -menetelmää käytetään sekä tulo- että lähtösuunnassa. [53.]

Solunvaihto (handover) on oleellinen osa matkapuhelinten liikkuvuuden hallintaa ja siitä vastaa radioverkko-ohjain RNC (Radio Network Controller). Matkapuhelimen liikkueessa sen pitää pystyä vaihtamaan solua ja pitämään palvelun laatu hyvänä. RNC monitoroi matkapuhelimen ja tukiaseman vastaanottamia signaaleja, ja jos monitoroitava kanava on alle raja-arvon ja parempi radiokanava on saatavilla, RNC suorittaa kanavanvaihdon (handover). Solun (kanavan) vaihto jaetaan kolmeen tapaukseen [54]:

- soft handover; Matkapuhelin on kahden tai useamman samalla taajuudella toimivan tukiasemasolun kuuluvuusalueella ja muodostaa samanaikaisen yhteyden useaan tukiasemaan. Tämä mahdollistaa luotettavamman ja saumattomamman solunvaihtoprosessin. Kun yhteys tukiasemaan ei enää toimi, yhteys tukiasemaan katkaistaan ja matkapuhelin jatkaa viestintää toimivien tukiasemayhteyksien kanssa.
- softer handover; Matkapuhelin on saman tukiaseman kahden eri sektorin vaikutusalueella ja muodostaa samaan tukiasemaan yhteyden molempien sektoreiden kautta. Softer handover on mahdollista vain, kun matkapuhelin kuulee signaalin saman tukiaseman kahden eri sektorin kautta. Tämä tapahtuu esimerkiksi silloin, kun kaksi eri sektoria ovat limittäin tai vielä yleisemmin, radiosignaalin heijastumisen (esimerkiksi rakennuksista) aiheuttaman monitie-etenemisen vuoksi.
- hard handover; Matkapuhelin on kahden eri taajuudella toimivan tukiasemasolun kuuluvuusalueella. Hard handover prosessissa yhteys vanhaan tukiasemaan puretaan ennenkuin uusi yhteys uuteen tukiasemaan luodaan. Tästä johtuen käyttäjä saattaa kokea lyhyen katkoksen yhteydessä. Hard handover tapahtuu aina kun matkapuhelin siirtyy eri taajuudella toimivien solujen välillä. Tämän lisäksi hard handover tapahtuu siirryttäessä solusta toiseen, jossa ei ole olemassa olevalla kanavalla ole kapasiteettia.

Kuvassa 6 on esitetty eri kanavanvaihtomenetelmät (hard, soft ja softer).



Kuva 6. Hard, soft ja softer handover [55].

Pääsynhallinnalla (admission control) estetään radiorajapinnan ylikuormittuminen. RNC valvoo pääsyä ja joko myöntää tai estää matkapuhelimen pääsyn verkkoon. Pääsynhallinta perustuu matkapuhelimen aiheuttamaan häiriöön tukiaseman solun alueella tai sen aiheuttamaan kuormaan tulo- ja lähtösuunnassa. Molemmissa tapauksissa verkossa on asetettu raja-arvo, jonka ylittäminen estää pääsyn verkkoon. Raja-arvot ovat laskennallisia arvoja, joilla pyritään takaamaan verkon palvelun laatu. [53.]

Kuormanhallinnalla (load control) myös estetään radiorajapinnan ylikuormittuminen. Kun pääsynhallinta pyrkii estämään ylikuormittumisen, kuormanhallinta taas vastaa toimenpiteistä ylikuormittumisen sattuessa. Kuormanhallintaan ja -alentamiseen on useita eri menetelmiä. Tukiasema Node B vastaa nopeasta kuormanhallinnasta kieltämällä matkapuhelimilta tulleet tehonnostopyynnöt sekä tulo- että lähtösuunnassa. Muut menetelmät ovat hitaampia ja niistä vastaa radioverkko-ohjain RNC. Verkon suorituskykyä (pakettidatan liikennettä) voidaan pienentää, kanavanvaihto (hard handover) eri järjestelmien välillä voidaan suorittaa tai jopa alemman prioriteetin puhelut voidaan katkaista. [53.]

Pakettiajoitus (packet scheduling) vastaa pakettikytkentäisen liikenteen allokoinnista tarkoituksenaan käytettävissä olevien resurssien jakaminen, käytettävien datasiirtonopeuksien määrittäminen, käytettävän siirtokanavan valinta ja järjestelmän kuormituksen valvonta. Pakettiajoituksesta vastaa RNC, ja se voidaan toteuttaa kahdella tavalla, aikajakoisesti tai koodijakoisesti. Aikajakoisessa pakettiajoituksessa siirtokanavalle sijoitetaan yksi käyttäjä kerrallaan, jolloin lyhyellä aikavälillä kaikki käytettävissä oleva kapasiteetti on käytössä. Etuna on suuri datasiirtonopeus ja pieni viive, mutta haittana resurssien hyödyntäminen. Lyhyellä aikavälillä koko kapasiteettia ei välttämättä hyödynnetä. Koodijakoisessa pakettiajoituksessa käyttäjät sijoitetaan siirtokanavalle samaan aikaan. Käytettävissä oleva kapasiteetti jaetaan käyttäjien kesken. Etuna on resurssien hyödyntäminen, koko kapasiteetti voidaan allokoida käyttäjille. Haittana on pieni datasiirtonopeus ja pidemmät viiveet. [53.]

4.5 CDMA2000-standardit

IS-95 oli ensimmäinen toisen sukupolven CDMA-pohjainen digitaalinen matkapuhelinstandardi ja laajalti käytössä Pohjois-Amerikassa. Se esiteltiin vuonna 1995 ja tunnetaan paremmin sen tuotenimellä cdmaOne. Ensimmäisenä koodijakoisena kanavanvaraukseen perustuvana standardina IS-95 on ollut tiennäyttäjänä tuleville CDMA-pohjaisille standardeille. IS-95:stä on kaksi versiota, IS-95A ja IS-95B. IS-95A:n datasiirtonopeus oli 14,4 kbit/s ja IS-95B:n 115 kbit/s. Vuonna 1999 julkaistiin IS-95:stä (cdmaOne) kehitetty kolmannen sukupolven standardi CDMA2000. Sen ensimmäinen versio tunnetaan nimellä CDMA2000 1x, jonka datasiirtonopeus oli 153 kbit/s. [56; 57.]

IS-95 (cdmaOne) ja CDMA2000 1x olivat piirikytkentäisiin matkapuhelinverkkoihin suunniteltuja standardeja, ja vuonna 1999 Qualcomm esitteli pakettikytkentäisiä verkkoja varten suunnitellun standardin CDMA2000 1x EV-DO. Standardista on sen jälkeen tullut muutama laajennus, viimeisimpänä EV-DO Revision C, joka tunnetaan myös nimellä UMB. Vuonna 2008 Qualcomm kuitenkin ilmoitti lopettavansa CDMA2000-standardin kehityksen ja keskittyvänsä LTE:n käyttöönottoon. Samalla monet CDMA2000-pohjaisia matkapuhelinverkkoja tarjoavat operaattorit ympäri maailmaa ilmoittivat suunnitelmistaan hyödyntää joko LTE- tai WiMAX-teknologiaa tulevissa 4G-matkapuhelinverkoissaan. [58; 59.]

Kuten GSM-standardeissa, myös CDMA2000-standardien kehityksen tavoitteena ovat olleet suhteellisen yksinkertainen siirtymä aiemmasta standardista uudempaan sekä aiempaa nopeammat ja suorituskykyisemmät matkapuhelinverkot, mikä näkyikin standardin kehityksessä. Taulukossa 12 on esitelty eri CDMA2000 1x EV-DO-laajennusten datasiirtonopeudet.

Taulukko 12. CDMA2000 1x EV-DO tiedonsiirtonopeudet [58; 59].

Laajennus	Downlink nopeus Mbit/s	Uplink nopeus Mbit/s
Release 0	2,4	0,153
Revision A	3,1	1,8
Revision B (software upgrade)	9,3	5,4
Revision B (hardware upgrade)	14,7	5,4
Advanced	19,6	7,2
Revision C (UMB)	275	75

5 LTE-teknologia

LTE on syksyllä 2004 alkanut projekti, jonka tarkoitus on edelleen kasvattaa matkapuhelinverkkojen kapasiteettia ja tiedonsiirtonopeutta sekä parantaa ja optimoida kolmannen sukupolven verkkoarkkitehtuuria. LTE on projektinimi ja viittaa 3G-teknologian radorajapinnan UTRAN parantamiseen ja optimointiin. Vuonna 2007 hyväksyttiin ensimmäinen versio uudesta radorajapinnasta ja se sai nimekseen E-UTRAN (Evolved UTRAN). Vuoden 2008 loppuun mennessä määrittelyt olivat riittävän valmiit ja 3GPP julkaisi LTE:n Release 8:n yhteydessä joulukuussa 2008. Jotta LTE:n mukanaan tuoma kapasiteetin ja tiedonsiirtonopeuden kasvu on hyödynnettävissä, myös runkoverkkoarkkitehtuuria on parannettu ja optimoitu. Tästä projektista käytetään nimeä System Architecture Evolution (SAE) ja samalla runkoverkko sai nimen Evolved Packet Core (EPC). Radorajapinnan E-UTRAN ja runkoverkon EPC muodostamasta LTE:n kokonaisuudesta käytetään nimeä Evolved Packet System (EPS). Vaikka Evolved Packet System on standardin virallinen nimi, projektinimi LTE jäi yleisesti käyttöön ja sillä tällöin viitataan koko teknologiaan, kattaen LTE/E-UTRAN ja SAE/EPC osuudet. [60.]

LTE usein mainitaan neljännen sukupolven matkapuhelinverkkojen yhteydessä, mutta se on vasta esiversio 4G-standardista. Kaikkia IMT-Advanced 4G-standardin vaatimuk-

sia ei vielä LTE:ssä ole mukana, mistä johtuen joissain yhteyksissä LTE:stä käytetään lyhennettä 3.9G. Joulukuussa 2009 julkaistu 3GPP Release 9 sisälsi muutamia, vähäisiä parannuksia LTE-teknologiaan. Maaliskuussa 2011 valmistunut 3GPP Release 10, LTE-Advanced, täyttää kaikki IMT-Advanced vaatimukset ja on näin ollen ensimmäinen aito 4G-teknologia.

5.1 Vaatimukset ja ominaisuudet

LTE:n tavoitteita, vaatimuksia ja ominaisuuksia määriteltäessä standardin kehittämiseen ovat vaikuttaneet monet liiketoimintaa ja tehokkuutta tukevat ominaisuudet. Kiinteiden yhteyksien kapasiteetin ja tiedonsiirtonopeuden kasvu asettaa LTE:lle vaatimuksen yhä nopeammasta tiedonsiirrosta. Langattoman tiedonsiirron lisääntyminen vaatii enemmän kapasiteettia sekä radiorajapinnassa että runkoverkossa. Kiinteähintaiset matkapuhelinliittymät vaativat liiketoiminnalta tehokkuutta ja edullisuutta. Myös muiden teknologoiden (WiMAX, HSPA+) kehittyminen asettaa LTE-standardin kehittämislle vaatimuksia ja ominaisuuksia.

Käyttäjän kannalta merkittävin ja näkyvin parannus on suorituskyky. LTE:n pitää tarjota huomattavasti parempi suorituskyky kuin 3GPP:n Release 6 (HSPA). LTE:n suorituskyky tavoitteet verrattuna HSPA:han ovatkin

- kymmenkertainen maksimikapasiteetti
- 2–3 kertaa pienempi viive
- 2–4 kertaa tehokkaampi spektrin käyttö. [61, s. 4-5.]

Käyttäjillä on myös vaikutus liiketoimintaan, siihen miten palveluntarjoajat voivat tuottaa yhä parempaa palvelua entistä halvemmalla. Asiakkailla on taipumus seurata erilaisia suuntauksia, jotka vaikuttavat heidän käyttäytymiseen langattomassa verkossa [62]:

- tarve olla kytkeytyneenä verkkoon kasvaa
- kollektiivinen voima
- ekologinen käyttö

- helppokäyttöisyys
- edullisuus
- vapaus olla vuorovaikutuksessa muiden kanssa milloin vain.

Suorituskykytarpeisiin ja asiakkaiden käyttäytymiseen langattomassa verkossa vaikuttavat erilaiset matkapuhelimessa ajettavat sovellukset, jotka vaativat yhä enemmän kapasiteettia sekä itse matkapuhelimelta mutta myös matkapuhelinverkolta. Sähköpostia, internetiä, sosiaalisen median sovelluksia sekä erilaisia paikkatietoon perustuvia palveluita käytetään yhä useammin, vuorokauden ajasta tai viikonpäivästä riippumatta.

Näitä tavoitteita ja vaatimuksia täyttämään 3GPP julkaisi Release 8:n myötä LTE:n ominaisuudet, joista alla lueteltu muutama [63]:

- suuri spektrin tehokkuus
- erittäin pieni viive (10 millisekuntia, roundtrip)
- skaalautuva kaistanleveys (1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ja 20 MHz)
- yksinkertainen verkkoarkkitehtuuri
- 200 aktiivista käyttäjää per solu (5 MHz:n kaistanleveydellä)
- liikkuvuus; optimoitu 0–15 km/h nopeuksille, tuki 350 km/h asti
- täysi tuki 5 km:n kokoisille soluille, pienin heikennyksin 30 km:n kokoisille soluille
- yhteensopivuus aiempien 3GPP-julkaisujen kanssa
- toiminta muiden järjestelmien, esimerkiksi CDMA2000-pohjaisten järjestelmien kanssa
- IP-pohjainen arkkitehtuuri (optimoitu pakettikytkentäisiin verkkoihin)
- Self Organizing Networks (SON).

Taulukossa 13 on esitetty yhteenveto LTE:n ominaisuuksista sekä LTE:n tiedonsiirtonopeudet eri matkapuhelinkategorioiden kanssa. Kategorian 3 tiedonsiirtonopeuksia pidetään LTE:n perusnopeuksina, jotka yleensä mainitaan LTE:n ominaisuuksien yhteydessä.

Taulukko 13. LTE:n ominaisuudet ja tiedonsiirtonopeudet eri matkapuhelinkategorioilla [63].

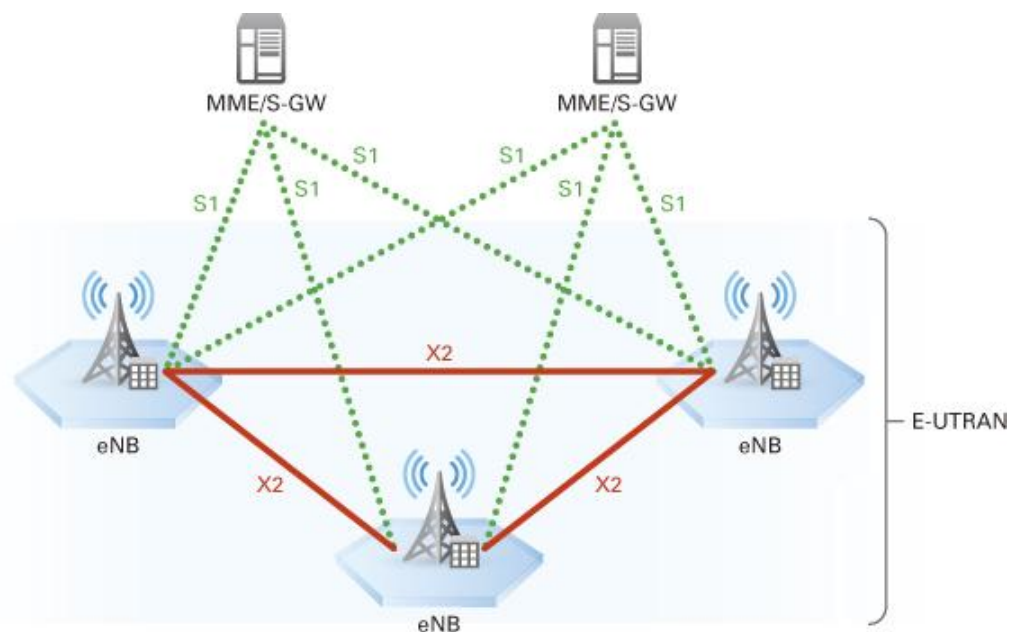
Kategoria		1	2	3	4	5
Nopeus Mbit/s	downlink	10	50	100	150	300
	uplink	5	25	50	50	75
Kaistanleveys		20 MHz				
Modulaatio	downlink	QPSK, 16-QAM, 64-QAM				
	uplink	QPSK, 16-QAM				QPSK, 16-QAM, 64-QAM
2 x 2 MIMO		Ei tuettu	Pakollinen			
4 x 4 MIMO		Ei tuettu				Pakollinen

5.2 Radiorajapinta E-UTRAN

LTE:n vaatimuksia ja ominaisuuksia täyttämään radiorajapinnan tulosuunnan kanavointitekniikaksi valittiin OFDMA. Lähtösuunnassa käytetään SC-FDMA:ta (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), josta käytetään myös nimeä DFTS OFDM (Discrete Fourier Transform Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Lähtösuunnan kanavointitekniikaksi valittiin SC-FDMA alhaisen PAPR-arvon (Peak to Average Power Ratio) vuoksi. OFDMA:ta vähemmän virtaa kuluttavana SC-FDMA soveltuu paremmin tekniikkaan, jossa lähetin on varustettu akulla (kuten matkapuhelimessa). OFDMA:lla on suuri PAPR, jonka energiatehokkuus on huono, ja PAPR:n pienentäminen johtaisi monimutkaiseen lähetinratkaisuun. OFDMA:n ja SC-FDMA:n lisäksi LTE:ssä käytetään moniantennitekniikkaa MIMO (Multiple Input Multiple Output) suorituskykyä parantamaan. Moniantennitekniikalla (MIMO) tarkoitetaan useammalla lähettimellä ja vastaanottimella toteutettua tekniikkaa (esimerkiksi 2 x 2 tarkoittaa kahta lähetintä ja kahta vastaanotinta). Tulosuunnassa on tuettu 2 x 2 MIMO tai 4 x 4 MIMO (tukiasemassa 2 tai 4 lähetintä ja matkapuhelimessa 2 tai 4 vastaanotinta). Jotta matkapuhelimen antenniratkaisusta ei tulisi liian monimutkainen ja kallis, lähtösuunnassa on käytössä MU-MIMO (Multi User MIMO), joka vaatii matkapuhelimessa vain yhden lähettimen. Moniantennitekniikan tuomaa etua voidaan kuitenkin hyödyntää myös lähtösuunnassa, jolloin matkapuhelimiin asennetaan kaksi lähetintä, mutta käytetään vain yhtä lähetysjonoa ja vahvistinta. Lähetystilanteessa valitaan paremman yhteyden tarjoava antenni. [64.]

LTE:ssä matkapuhelinverkkoarkkitehtuuria on yksinkertaistettu huomattavasti. Radioverkko-ohjainta (RNC) ei enää ole ja radiorajapinnassa käytössä on vain älykäs tukiasema eNodeB (Evolved NodeB), joka hoitaa vastaavia tehtäviä kuin 3G-verkkojen tukiasema NodeB ja radioverkko-ohjain RNC. Rajapinnan liittymien määrä on vähentynyt kahteen eikä piirikytkentäistä toiminta-aluetta enää ole.

Kuvassa 7 on esitetty LTE:n radiorajapinnan arkkitehtuuri.



Kuva 7. LTE E-UTRAN arkkitehtuuri [65].

Tukiasema eNodeB vastaa radioresurssien hallinnasta (RRM), johon kuuluvat seuraavat osa-alueet [66]:

- radiokanavien hallinta (radio bearer control)
- radioverkkoon pääsynhallinta (radio admission control)
- liikkuvuuden hallinta (connection mobility control)
- dynaaminen resurssien hallinta (dynamic resource allocation; scheduling).

Tämän lisäksi eNodeB hoitaa muun muassa seuraavia tehtäviä:

- käyttäjätason pakkaus ja koodaus
- käyttäjätason (user plane) datan reititys S-GW:lle (Serving Gateway)

- MME:n (Mobile Management Entity) valinta matkapuhelimen liittyessä verkkoon
- yhteydenpito- (paging message) ja yleislähetysviestien (broadcast message) ajastus ja lähetys
- liikkuvuuteen ja ajastukseen liittyvät mittaukset.

Verkossa on kaksi liityntää, S1 ja X2. S1-liityntää yhdistää tukiaseman eNodeB runko-verkkoon EPC sekä MME:hen että S-GW:hen. Korkean käytettävyyden saavuttamiseksi tukiasema voi liittyä kahteen MME:hen ja S-GW:hen. S1 on jaettu kahdeksi liitynnäksi, toinen käyttäjätasoa (user plane) ja toinen kontrollitasoa (control plane) varten. S1-U-liityntä (user plane) yhdistää tukiaseman eNodeB S-GW:hen ja S1-C (control plane) tukiaseman eNodeB MME:hen. S1-liitynnän kautta kulkee muun muassa seuraavaa tietoa:

- yhteydenhallinta (context management)
- tiedon välityspalveluiden hallinta (bearer management)
- yhteydenpidon hallinta (paging)
- kanavanvaihto (inter E-UTRAN handover), jolloin MME ja/tai S-GW muuttuu
- kanavanvaihto eri teknologioiden välillä (UMTS, LTE)
- kuormanhallinta (load balancing) MME:iden välillä.

X2-liityntä yhdistää tukiasemat toisiinsa ja välittää niiden välillä muun muassa signaaliin ja liikkuvuuteen liittyviä tietoja, joita ovat

- kuormanhallinta (load balancing) naapurisolujen välillä
- radioresurssien hallintaan vaikuttavien liityntöjen hallinta
- kanavanvaihto (intra E-UTRAN handover) kahden tukiaseman välillä, jolloin MME ja S-GW eivät muutu.

LTE:n radorajapinta tukee tiedonsiirrossa sekä FDD- että TDD-menetelmiä. FDD tarjoaa sujuvan siirtymisen 3G-pohjaisista verkkoratkaisuista LTE:hen ja TDD:tä voidaan käyttää siirryttäessä TD-SCDMA-verkoista LTE-verkkoihin. Vaikka FDD on yleisesti käytössä 3G-verkoissa, on ennakoitu, että LTE:n myötä TDD:n käyttö tulee lisääntymään. TDD:llä on FDD:hen verrattuna hyvät ja huonot puolensa. TDD:n huono puoli on, että sitä ei voida käyttää kuin lyhyellä etäisyydellä. TDD:n hyviä puolia ovat parempi spek-

trin tehokkuus lyhyellä etäisyydellä, edullisempi päätelaitteen antenniratkaisu sekä parempi soveltuvuus asymmetriseen dataliikenteeseen (datakeskeinen tiedonsiirto). [67; 68.]

LTE:ssä radorajapinnan fyysistä kerrosta ja siirtoyhteyserrosta on yksinkertaistettu. Protokollapinoa on kevennetty, eikä dedikoituja kanavia enää ole. Fyysinen kerros tarjoaa tiedonsiirtoon liittyvät palvelut ylemmille kerroksille. LTE:n siirtoyhteyserroksella on kolme protokollaa, Media Access Control (MAC), Radio Link Control (RLC) ja Packet Data Convergence Protocol (PDCP), joista jokaisella on omat tehtävänsä. [69.]

MAC vastaa muun muassa [69]:

- loogisten (logical channel) ja siirtokanavien (transport channel) yhteensovittamisesta
- virreehavainnoinnista ja -korjauksesta sekä uudelleenlähetyksestä HARQ-metelmää käyttäen
- päätelaitteen käyttämien loogisten kanavien priorisoinnista
- tiedonsiirron priorisoinnista päätelaitteiden välillä dynaamisen ajoituksen avulla (vain tukiasemassa eNodeB).

RLC vastaa muun muassa [69]:

- ylempien kerrosten PDU-viestien (Protocol Data Unit) siirrosta
- SDU-viestien (Service Data Unit) ketjutuksesta, segmentoinnista ja uudelleen kokoamisesta
- PDU-viestien uudelleenjärjestämisestä, jos ne saapuvat epäjärjestyksessä.

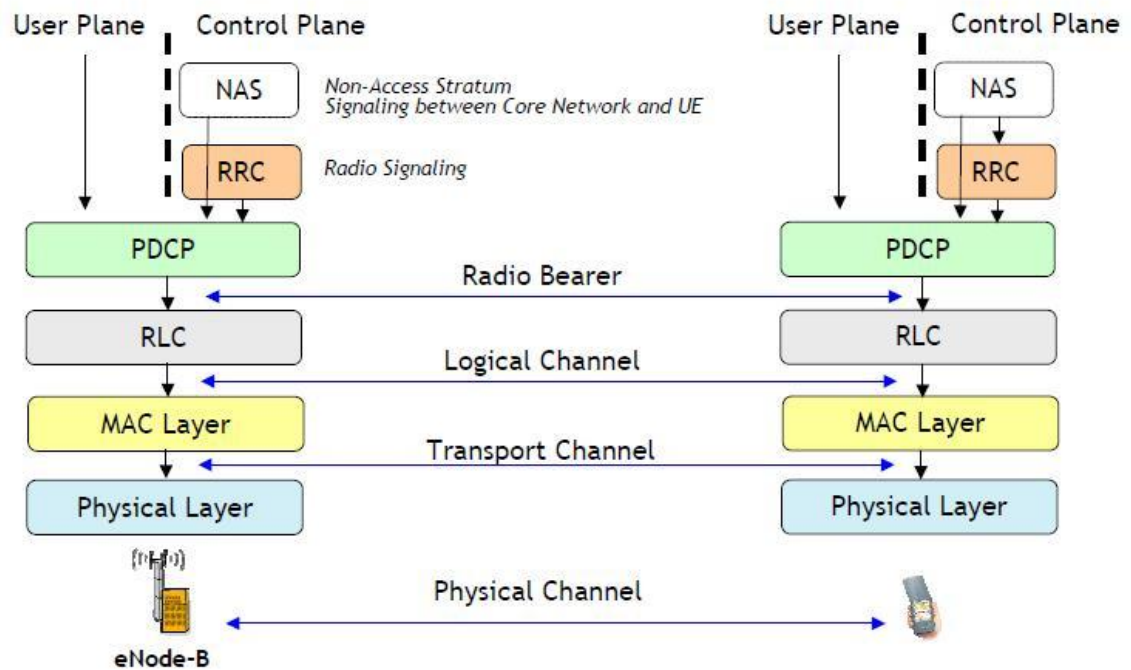
PDCP vastaa muun muassa [69]:

- IP-pakettien otsikkotietojen pakkauksesta ja purusta
- tiedon salauksesta ja avauksesta
- ylempien kerrosten SDU-viestin siirrosta
- käyttäjätiedon siirrosta.

LTE:n verkkokerroksella on yksi protokolla, Radio Resource Control (RRC). RRC vastaa muun muassa [69]:

- päätelaitteen ja radioverkon välisen RRC-yhteyden muodostamisesta, ylläpidosta ja vapautuksesta
- tietoturvaominaisuuksista
- palvelun laatuun liittyvistä toiminnoista
- liikkuvuuteen liittyvistä toiminnoista.

Kuvassa 8 on esitetty LTE:n käyttäjätason ja kontrollitasen protokollapino.



Kuva 8. LTE:n protokollapino [70].

MAC, RLC, PDCP ja RRC muodostavat LTE:n radorajapinnan yhteyskerroksen AS (Access Stratum), joka kattaa toiminnot radioverkkoon pääsyä varten sekä matkapuhelimen ja tukiaseman välisten aktiivisten yhteyksien hallintaa varten. AS koostuu käyttäjätasosta ja kontrollitasosta. Käyttäjätasolla kulkee käyttäjädata ja kontrollitasoa käytetään matkapuhelimen ja tukiaseman välisen yhteyden hallintaan. LTE:ssä AS on kokonaan tukiaseman eNodeB sisällä arkkitehtuurin yksinkertaistamiseksi, mutta myös kontrollisignaloinnin nopeuttamiseksi.

Yhteyskerroksen AS yläpuolella on NAS (Non-Access Stratum), joka sisältää toiminnot sekä protokollat matkapuhelimen ja runkoverkon EPC välistä suoraa yhteyttä varten. Tätä yhteyttä käytetään liikkuvuuden- ja istunnonhallintakäsittelyä varten. Istunnonhallintakäsittely vastaa IP-yhteyden muodostamisesta ja ylläpidosta matkapuhelimen ja PDN GW:n (Packet Data Network Gateway) välillä.

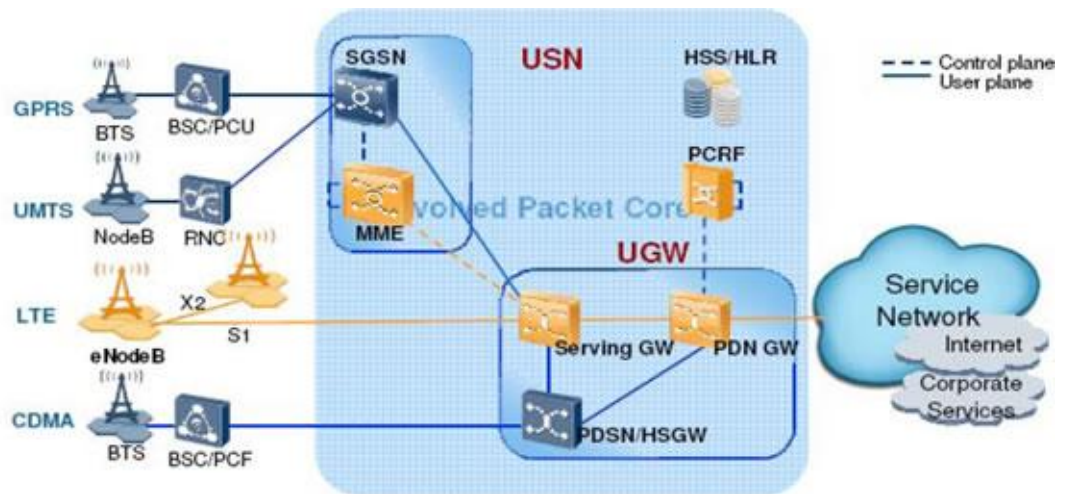
5.3 Runkoverkko EPC

LTE:n runkoverkon Evolved Packet Core (EPC) kehittämisestä vastaa System Architecture Evolution (SAE) -projekti. Aiempiin teknologioihin (GPRS, UMTS, CDMA2000) verrattuna SAE tarjoaa monia etuja, mistä syystä voidaankin olettaa, että monet operaattorit ympäri maailmaa ovat ottamassa LTE:tä käyttöön. SAE:n tarjoamia etuja ovat [71]

- parantunut kapasiteetti (tulosuunnassa 100 Mbit/s, lähtösuunnassa 50 Mbit/s)
- kokonaan IP-pohjainen arkkitehtuuri
- pienentynyt viive (10 millisekuntia, roundtrip)
- pienemmät kustannukset, sekä operatiiviset että investointikustannukset.

LTE SAE perustuu GSM:n ja WCDMA:n runkoverkkoihin operoinnin ja SAE-arkkitehtuurin levittämisen helpottamiseksi. LTE:n vaatimuksina olivat yhteensopivuus aiempien 3GPP-julkaisujen kanssa sekä toiminta muiden järjestelmien kanssa, esimerkiksi CDMA2000-pohjaisten järjestelmien kanssa, mikä onkin otettu huomioon LTE:n runkoverkon EPC-arkkitehtuurissa.

Kuvassa 9 on esitetty Evolved Packet Core sekä siihen liittyvät GPRS-, UMTS- ja CDMA-verkot.



Source: 3GPP.org

Kuva 9. Evolved Packet Core [72].

Evolved Packet Core EPC koostuu neljästä osasta:

- Mobile Management Entity (MME)
- Serving Gateway (SGW)
- PDN Gateway (Packet Data Network Gateway, PDN GW)
- Policy and Charging Rules Function (PCRF).

MME vastaa liikkuvuuteen liittyvistä toiminnoista, matkapuhelimien identiteetistä sekä tietoturvaparametreista muun muassa seuraavilla toiminnoilla:

- NAS-signaointi ja siihen liittyvä tietoturva
- valmiustilassa olevien päätelaitteiden jäljitys ja tavoitettavuus
- SGSN:n valinta GPRS- tai UMTS-verkkoon siirryttäessä (handover)
- MME:n valinta kun kanavanvaihtoon (handover) liittyy MME:n vaihto
- yhdyskäytävän (gateway) valinta (SGW, PDN GW)
- verkkopalveluiden (bearer) hallinta ja dedikoidun palvelun muodostaminen
- verkkovierailu (roaming).

SGW toimii rajapintana pakettidata verkon ja radorajapinnan välissä hoitaen käyttäjä-tason pakettidatan reitityksen ja eteenpäin lähettämisen. Lisäksi SGW toimii ankkurina kanavanvaihdossa jolloin MME vaihtuu tai kanavanvaihdossa LTE:n ja GPRS:n tai WCDMA:n välillä.

PDN GW tarjoaa matkapuhelimelle yhteyden ulkoisiin pakettidata verkkoihin, kuten internettiin ja toimii ankkurina LTE:n ja muiden järjestelmien, kuten WiMAX:in ja CDMA2000:n, välillä. PDN GW hoitaa myös seuraavia tehtäviä [73]:

- menettelytapojen täytäntöönpano (policy enforcement)
- käyttäjäkohtainen pakettien filteröinti
- laskutustoimintojen tukeminen
- lainmukainen salakuuntelu
- IP-osoitteiden jakaminen matkapuhemille.

PCRF:ssä on toiminnot käyttäjän lähettämien ja vastaanottamien datapakettien seuraamiseen ja QoS-parametrien sekä laskutusmenettelyn määrittämiseen. PCRF:n määrittämä QoS-arvo tai -arvot sekä laskutusmenettely tieto lähetetään PDN GW:lle, SGW:lle ja tukiasemalle eNodeB, joista jokainen asettaa kyseessä olevan arvon tai laskutusmenettelytiedon käyttäjän datapaketteihin.

5.4 Self Organizing Networks SON

LTE:n tarjoamat ominaisuudet mahdollistavat joukon uusia sovelluksia kuten HD-tasoi-sen (High Definition) videokuvan ja online-pelit. Tämä asettaa LTE-operaattoreille haasteen tuottaa nämä palvelut kustannustehokkaasti. Investointikustannusten enna-koiminen ja hallinta on operaattoreille tärkeää, mutta operatiivisten kustannusten osuus operaattoreiden kustannusrakenteesta on noussut tärkeämmäksi. Niitä halutaan pienentää. [74.]

Tähän haasteeseen vastatakseen 3GPP ja NGNM (Next Generation Mobile Networks) Alliance ovat standardoineet joukon ominaisuuksia, joita kutsutaan nimellä Self

Organizing Networks (SON). Radioverkon elinkaaren mukaan SON voidaan jakaa neljään osaan [74]:

- verkon suunnittelu (network planning)
- verkon käyttöönotto (network deployment)
- verkon käyttö (network operations)
- verkon optimointi (network optimization).

SON tarjoaa suunnitteluun, käyttöönottoon, operointiin ja ylläpitoon suuren joukon automaattisia toimintoja, pienentäen niihin liittyviä kustannuksia. Verkon suunnittelun ja käyttöönoton helpottamiseksi SON tarjoaa ominaisuuksia, joilla voidaan vähentää ennalta tapahtuvaa konfigurointia sekä lyhentää käyttöönotto aikaa. Verkon käyttöön ja optimointiin SON tarjoaa ominaisuuksia, joilla voidaan pienentää operatiivisia kustannuksia ja vähentää ylläpitohenkilöstön tarvetta osallistua käyttöön ja optimointiin liittyviin tehtäviin. Näitä automaattisia ominaisuuksia muun muassa ovat [74]

- automaattinen konfigurointi (Self-Configuring)
- automaattinen vikatilanteesta toipuminen (Self-Healing)
- automaattinen optimointi (Self-Optimization).

Automaattinen konfigurointi tukee plug and play -laitteistoa, automaattista naapurillisuutta, automaattista radiotaajuuden ja siirto-ominaisuuksien asetusta ja säätöä sekä automaattista hallintajärjestelmään liittymistä.

Automaattinen vikatilanteesta toipuminen tarjoaa mekanismit erilaisiin vikatilanteisiin pyrkien vähentämään vikatilanteen aiheuttamaa vaikutusta sekä mahdollisesti eliminoidaan vikatilanteen. Tukiaseman vikatilanteessa viereinen tukiasema voi säätää parametrisa ja algoritminsa niin, että vikaantuneen tukiaseman alueella olevia käyttäjiä voidaan palvella. Lämpötilan noustessa liian korkeaksi voidaan lähtötehoa alentaa tai ohjelmistovian ilmetessä voidaan palata takaisin aiempaan versioon.

Operatiivisten kustannusten pienentämiseen automaattisella optimoinnilla on merkittävä vaikutus. Automaattinen optimointi perustuu jatkuvaan tukiaseman ja päätelaitteen valvontaan ja tämän perusteella tehtävään automaattiseen tukiaseman toimintojen ja

parametrien säätöön. Näitä automaattisia toimintoja ja säädettäviä parametreja ovat [74]

- optimaalisen naapurilistan ylläpito tarvittaessa lisäämällä tai poistamalla soluja
- häiriöiden vähentäminen yhteensovittamalla tukiasemien apukantoaalloit ja tehotasot
- kanavanvaihdon optimointi KPI-arvojen (Key Performance Indicator) perusteella tapahtuvan toistuvan C/I- (Carrier-to-Interference) ja RSSI-parametrien (Received Signal Strength Indicator) säädön avulla
- palvelun laadun (QoS) optimointi KQI-arvojen (Key Quality Indicator) perusteella tapahtuvan toistuvan QoS-parametrien säädön avulla
- sähkönkulutuksen optimointi seuraamalla kulutuksen kehityssuuntaa ja tarvittaessa sammuttamalla verkkolaitteita.

5.5 LTE-Advanced

Maaliskuussa 2011 3GPP julkaisi Release 10:n, jonka yhteydessä myös LTE:n seuraaja LTE-Advanced esiteltiin. LTE-Advanced täyttää ITU:n määrittämät IMT-Advanced -vaatimukset, joten se on aito 4G-teknologia. ITU määrittä termin IMT-Advanced järjestelmiä varten, jotka ylittävät IMT-2000 (3G) määrittäykset. Tästä syystä 3GPP lisäsi vastuualueelleen 3G-teknologian seuraajat ja niiden kehittämisen. [75.]

Vaikka LTE-Advanced julkaistiin vuonna 2011 on kehitystyö vielä kesken. LTE:n ominaisuudet melkein jo täyttävät IMT-Advanced -vaatimukset, lukuun ottamatta tiedonsiirtonopeutta ja lähtösuunnan spektrinkäytön tehokkuutta. LTE-Advancedin ominaisuuksia määritettäessä ja kehitystyötä jatkettaessa, nämä kaksi vaatimusta ovatkin avainasemassa. Seuraavassa on lueteltu muutama LTE-Advancedin ominaisuus [76; 77]:

- suuri tiedonsiirtonopeus (tulosuunnassa 1 Gbit/s, lähtösuunnassa 300 Mbit/s)
- kolme kertaa parempi spektrin tehokkuus kuin LTE:ssä
- suurempi kaistanleveys (jopa 100 MHz)
- parannettu lähtösuunnan kanavointitekniikka (klusteroitu SC-FDMA)
- laajennettu moniantennitekniikka (jopa 8 x 8 MIMO).

Jotta päästäisiin suurin tiedonsiirtonopeuksiin, joita LTE-Advanced tarjoaa, siirtotekniikoiden (OFDMA, SC-FDMA) parantaminen ja moniantennitekniikan (MIMO) laajentaminen yksin eivät riitä. LTE-Advancedissa käytetään kantoaallon yhdistämistä (carrier aggregation), jolla saavutetaan suurempi kaistanleveys. Tekniikan avulla voidaan yhdistää kaksi tai useampia kantoaaltoja, jolloin saavutetaan suurempi tiedonsiirtonopeus. IMT-Advanced on kuitenkin asettanut ylärajaksi 100 MHz:n kaistanleveyden taajuusalueiden rajallisen määrän vuoksi.

LTE-Advancedin yhteydessä usein mainitaan monipistetekniikka CoMP (Coordinated Multipoint), välitukiasema (LTE Relay) sekä LTE D2D (Device to Device). Vaikka CoMP on kehitetty LTE-Advancedia varten, se ei vielä ole mukana 3GPP Release 10:ssä. LTE Relay sekä LTE D2D -järjestelmiä vasta tutkitaan, mutta niitä ollaan ehdottamassa mukaan LTE-Advancedin ominaisuuksiin.

6 WiMAX:in ja LTE:n teknologiavertailu

Mobile WiMAX Release 1.0 (IEEE 802.16e-2005) julkaistiin vuonna 2005 ja suorituskykyisempi Mobile WiMAX Release 1.5 (IEEE 802.16-2009) vuonna 2009. Vuonna 2009 julkaistiin myös LTE (3GPP Release 8). Kesäkuussa 2006 avattiin Etelä-Koreassa maailman ensimmäinen kaupallinen Mobile WiMAX -verkko ja joulukuussa 2009 Ruotsissa ja Norjassa maailman ensimmäiset kaupalliset LTE-verkot. WiMAX:illa on muutaman vuoden etumatka, mikä näkyy tämän päivän markkinatilanteessa ja liittymien määrässä. On kuitenkin ennustettu, että jo vuonna 2012 LTE-liittymien määrä maailmassa ohittaa WiMAX-liittymien määrän [78].

Paljon käydään keskustelua näiden kahden teknologian välisestä kilpailusta ja siitä, kumpi näistä kahdesta voittaa kilpailun 4G-markkinoilla. Tällä kilpailuasetelmalla ei välttämättä saavuteta mitään, ja sillä saattaa olla negatiivinen vaikutus kummankin teknologian kehittymiseen. Lisäksi 3G-teknologia HSPA+ tarjoaa haasteen näille kahdelle 4G-teknologialle. Siirtyminen HSPA-verkoista HSPA+:aan on yksinkertaisempaa ja edullisempaa, ja HSPA+:n suorituskyky on lähellä WiMAX:ia ja LTE:tä.

Lähtökohdat WiMAX:in ja LTE:n kehittämiseen ovat olleet erilaiset. WiMAX:in juuret ovat kiinteissä, langattomissa laajakaistayhteyksissä, kun taas LTE:n matkapuhelinverkoissa. WiMAX soveltuukin paremmin sinne, missä tarvitaan uusia, kiinteitä laajakaistayhteyksiä tai mobiililaajakaistayhteyksiä, kun taas LTE:n käyttöönotto paremmin matkapuhelinjärjestelmiin, joissa tarvitaan yhteistoimintaa muiden järjestelmien kanssa (GPRS, UMTS ja CDMA2000). [79.]

6.1 Tekniset ominaisuudet

Vuonna 2005 julkaistu Mobile WiMAX Release 1.0 tarjoaa jo kohtuullisen suorituskyvyn. Tiedonsiirtonopeudet ovat verrattavissa HSPA:han ja HSPA+:aan. Release 1.0 kuitenkin tukee vain TDD:tä ja maksimikaistanleveys on 10 MHz. Vuonna 2009 julkaistuun Mobile WiMAX Release 1.5:een lisättiin tuki FDD:lle, maksimikaistanleveys kasvoi 20 MHz:iin ja ja suoritukyky kasvoi LTE:n tasolle, noin 70 Mbit:iin/s (20 MHz kaistanleveys) ja 140 Mbit:iin/s (2 x 20 MHz kaistanleveys) [80].

Ominaisuuksia verrattaessa suurin ero näiden kahden teknologian välillä näkyy viiveessä. WiMAX:issa kehyksen (frame) kesto on 5 millisekuntia, kun taas LTE:ssä 10 millisekuntia, mutta se on jaettu 10:een alikehykseen, jotka ajoitetaan 1 millisekunnin välein. Lyhyempikestoisella kehyksellä (lähetyisaikajaksolla TTI) saavutetaan pienempi viive. Tässä suhteessa LTE on edellä. Pienellä viiveellä on merkitystä varsinkin IP-puheluissa (VoIP), online-pelejä pelattaessa sekä videopuheluissa.

LTE:llä on etu myös akulla varustettujen päätelaitteiden (lähinnä matkapuhelimet ja tabletit) kannalta. WiMAX:in lähtösuunnan OFDMA kuluttaa akkua enemmän kuin LTE:n käyttämä SC-FDMA.

Tänä päivänä Mobile WiMAX Release 1.5 ja LTE ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvin lähellä toisiaan. Sekä WiMAX että LTE käyttävät tulosuunnassa OFDMA:ta, lähtösuunnassa WiMAX käyttää OFDMA:ta ja LTE SC-FDMA:ta. Molemmat tukevat sekä FDD- että TDD-menetelmiä, moniantennitekniikka MIMO:a, samoja modulaatiomenetelmiä sekä erilaisia QoS-menetelmiä palvelun laadun varmistamiseksi. Molemmat ovat kokonaan IP-pohjaisia teknologioita, hyödyntävät skaalautuvaa kaistanleveyttä ja Self Organizing Networks (SON) -konseptia.

Taulukossa 14 on esitelty WiMAX:in ja LTE:n tärkeimmät tekniset ominaisuudet. Suurin osa Mobile WiMAX -verkoista on vielä Release 1.0:n tasolla, siksi vertailussa on mukana Release 1.0.

Taulukko 14. WiMAX:in ja LTE:n tekniset ominaisuudet [81].

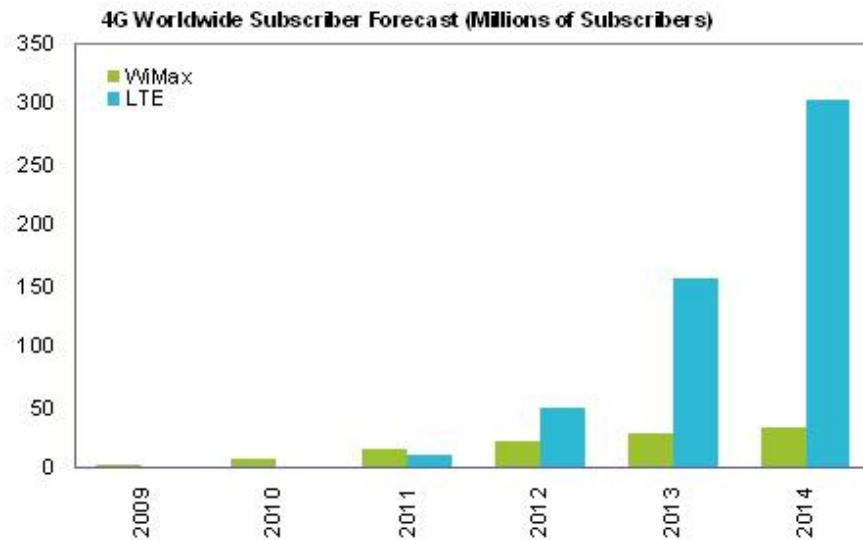
	WiMAX 802.16e Release 1.0	WiMAX 802.16m Release 2.0	LTE Release 8	LTE-Advanced Release 10
Physical layer, downlink (DL)	OFDMA	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Physical layer, uplink (UL)	OFDMA	OFDMA	SC-FDMA	SC-FDMA
Duplex mode	TDD	FDD/TDD	FDD/TDD	FDD/TDD
Channel bandwidth	3,5, 5, 7, 8,75, 10 MHz	5, 10, 20, 40 MHz	1,4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	< 100 MHz
DL peak data rate	46 Mbit/s (10 MHz)	> 350 Mbit/s (20 MHz)	300 Mbit/s (20 MHz)	1 Gbit/s (> 70 MHz)
UL peak data rate	4 Mbit/s (10 MHz)	> 200 Mbit/s (20 MHz)	75 Mbit/s (20 MHz)	300 Mbit/s (> 70 MHz)
Modulation scheme	QPSK, 16-QAM, 64-QAM (downlink)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM (downlink)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM (downlink)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM (downlink)
Mobility	< 120 km/h	< 350 km/h	< 350 km/h	< 350 km/h
Coverage	50 km	50 km	100 km	100 km
Latency	20 ms	10 ms	5 ms	5 ms

Kilpailutilannetta WiMAX:in ja LTE:n välillä teknisten ominaisuuksien tai suorituskyvyn paremmuudesta ei ole, eikä kummankaan teknologian kehityksen pääpaino olekaan ollut olla toistaan suorituskykyisempi, vaan täyttääkseen IMT-Advanced vaatimukset. Molempien teknologioiden kehityksessä ollaankin keskitytty kannattavuuteen, pysyvyyteen, kokonaisuuteen ja ekologisuuteen. [82.]

6.2 Markkinatilanne

4G-markkinoilla WiMAX:illa on muutaman vuoden etumatka, ja tämä näkyy tämän päivän markkinatilanteessa. Kesäkuun 2011 lopussa maailmassa oli 20 miljoonaa WiMAX-liittymää ja vuoden 2011 loppuun mennessä määrän ennustetaan kasvavan 25 miljoonaan [83]. Vuoden 2015 loppuun mennessä WiMAX Forum ennustaa määrän kasvavan yli 100 miljoonan, mutta LTE:n vahva alku markkinoilla saattaa muuttaa WiMAX:in en-

nustetta. Vuoden 2010 lopussa maailmassa oli 300 000 LTE-liittymää, mutta ennusteen mukaan vuoden 2011 lopussa jo 11,6 miljoonaa [84]. Kuvassa 10 on esitetty nykytilanne ja ennusteet WiMAX- ja LTE-liittymien kasvusta.



Kuva 10. WiMAX- ja LTE-liittymät nyt ja tulevaisuudessa [85].

LTE:n kasvulukuihin on selvä syy. GSM-standardi hallitsee markkinoita noin 90 %:n markkinaosuudella, ja monet operaattorit ovat ilmoittaneet siirtyvänsä GSM-, UMTS-, HSPA- ja CDMA-pohjaisista verkoista LTE:hen. LTE tarjoaa näille verkoille luonnollisemman jatkon kuin WiMAX. LTE:llä onkin operaattoreiden tuki, kun taas WiMAX:ia tukevat lähinnä elektroniikkateollisuuden yritykset kuten Cisco ja Intel.

WiMAX:in etumatka pienenee myös verkkopuolella. Toukokuussa 2011 oli 583 WiMAX-verkkoa 150:ssä eri maassa, mutta operaattoreiden kiinnostus LTE:tä kohtaan näkyy myös investoinneissa. Tammikuussa 2012 oli 49 kaupallista LTE-verkkoa 29:ssä eri maassa, Suomessa Soneralla, Elisalla ja DNA:lla. Samaan aikaan 226 operaattoria 76:ssa maassa ovat sitoutuneet siirtymään LTE:hen, ja vuoden 2012 lopussa ennustetaan maailmanlaajuisesti olevan 119 kaupallista LTE-verkkoa. Mukana on myös WiMAX-operaattoreita WiMAX:in vahvalta markkina-alueelta Yhdysvalloista. Keväällä 2011 Clearwire ilmoitti tutkivansa mahdollisuutta hyödyntää LTE-teknologiaa, tosin Clearwire aikoo jatkaa myös WiMAX-teknologian käyttöä. Syksyllä 2011 Sprint ilmoitti siirtyvänsä WiMAX-teknologiasta LTE-teknologiaan.

Vaikka WiMAX-liittymiä ja -verkkoja on markkinoilla kykyisin enemmän, päätelaitemarkkinoilla, varsinkin älypuhelin- ja tablet-puolella, LTE on jo edellä. Tammikuussa 2012 LTE-päätelaitteita oli 269, joista 48 älypuhelinta ja 18 tablettia. Joulukuussa 2011 WiMAX-sertifioituja päätelaitteita oli yli 340, joista 13 älypuhelinta ja 9 tablettia. [86; 87.]

6.3 Tulevaisuus

WiMAX:in muutaman vuoden etumatka kohti 4G-markkinoita on kääntymässä LTE:n eduksi. Jo tänä vuonna maailmassa tulee olemaan enemmän LTE-liittymiä ja mobiilikäyttöön tarkoitettuja LTE-päätelaitteita. LTE-liittymien määrää tulee kasvattamaan LTE-teknologian käyttöönotto matkapuhelinjärjestelmissä. Myös mobiililaajakaista puolella kilpailu on kääntymässä LTE:n eduksi. WiMAX on alun perin kehitetty kiinteitä yhteyksiä varten, ja se tulee olemaan vahvoilla kiinteiden laajakaistayhteyksien sekä backhaul- ja hotspot-yhteyksien tarjonnassa.

LTE:n tulevaisuus 4G-markkinoilla näyttää vahvalta. Monet UMTS/WCDMA-operaattorit ympäri maailmaa ovat ilmoittaneet siirtyvänsä toisen ja kolmannen sukupolven teknologioista neljännen sukupolven LTE:hen. Lisäksi China Mobile (TD-SCDMA), Yhdysvaltojen kaksi suurinta CDMA2000-operaattoria Verizon Wireless ja AT&T sekä monet WiMAX-operaattorit ovat siirtymässä tai tutkivat mahdollisuutta siirtyä LTE:hen. Kesäkuussa 2011 Ericsson järjesti LTE-Advanced -esittelyn (8 x 8 MIMO ja 3 x 20 MHz kaista) ja tulokset vastasivat odotuksia. Tulosuunnassa tiedonsiirtonopeus oli noin 900 Mbit/s, mikä on lähellä IMT-Advanced vaatimusta 1 Gbit/s [88]. Ensimmäiset kaupalliset LTE-Advanced -verkot ovat näillä näkymin tulossa keväällä 2013, kun Sprint ja AT&T ilmoittivat suunnitelmistaan loppuvuodesta 2011 [89; 90].

WiMAX:in tulevaisuus 4G-mobiililaajakaistamarkkinoilla riippuu paljon siitä, miten Mobile WiMAX Release 2.0:n markkinoinnissa onnistutaan ja kuinka nopeasti se saadaan markkinoille. Koska monet operaattorit ovat siirtyneet tai siirtymässä LTE:hen, WiMAX-teollisuus on muuttanut Release 2.0:n markkinastrategiaa. Mobile WiMAX Release 2.0:n markkinoinnissa tullaan keskittymään vertikaaliseen markkinointiin ja kaipa-alaiseen liiketoimintaan. Tällä strategiavalinnalla toivotaan tulevaisuutta Mobile

WiMAX:ille, mutta samalla liiketoiminta vaihtoehdot jäävät rajallisiksi. WiMAX-ratkaisuja markkinoidaan LTE:tä täydentävänä eikä kilpailevana teknologiana. Vertikaalisessa markkinoinnissa keskitytään yrityksiin, kaupunkeihin ja ilmailualaan, lähinnä lentokenttiin. Yrityspuolella edistystä onkin tapahtunut, mikä näkyi 15 %:n kasvuna vuonna 2011 WiMAX-teollisuuden myyntiluvuissa. Suurin haaste kuitenkin on saada operaattoreiden tuki Mobile WiMAX Release 2.0:lle. Muutama operaattori on osoittanut kiinnostusta ja onnistuneen käyttöönoton myötä WiMAX-teollisuus toivoo, että kiinnostus Mobile WiMAX Release 2.0:aa kohtaan kasvaisi. [91.]

7 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tutkittiin ja vertailtiin kahta neljännen sukupolven langatonta laajakaista- ja matkapuhelinteknologiaa, WiMAX:ia ja LTE:tä, ja niiden välistä kilpailuasetelmaa ja tulevaisuutta neljännen sukupolven laajakaista- ja matkapuhelinmarkkinoilla. Työn alussa selvitettiin kummankin teknologian ominaisuudet ja standardien kehityshistoria tähän päivään asti. Työn lopussa näitä teknologioita vertailtiin sekä selvitettiin markkinatilannetta ja tulevaisuutta.

WiMAX:in ja LTE:n historia on erilainen. WiMAX:in juuret ovat kiinteissä, langattomissa laajakaistayhteyksissä, kun taas LTE:n matkapuhelinverkoissa. Molemmat kuitenkin tähtäävät 4G-markkinoille ja molemmilta on markkinoille tulossa IMT-Advanced 4G-vaatimukset täyttävä standardi, WiMAX:illa Mobile WiMAX Release 2.0 ja LTE:llä LTE-Advanced. ITU:n kevennettyä 4G-vaatimuksiaan, voidaan tämän päivän WiMAX:ia ja LTE:tä pitää neljännen sukupolven standardeina.

WiMAX perustuu IEEE-järjestön 802.16-standardiin. Vuonna 2004 valmistui 802.16-2004-standardi (Fixed WiMAX), vuonna 2005 802.16e-2005-standardi (Mobile WiMAX Release 1.0) ja vuonna 2009 802.16-2009-standardi (Mobile WiMAX Release 1.5). Fixed WiMAX kehitettiin kiinteitä laajakaista-, backhaul- ja hotspot-yhteyksiä varten ja Mobile WiMAX mobiililaajakaistayhteyksiä varten. LTE on vuonna 2009 valmistunut 3GPP-yhteistyöorganisaation standardi, joka kehitettiin parantamaan 3G-verkkojen tukiasemajärjestelmää (UTRA) ja optimoimaan 3G-verkkojen radioverkkoarkkitehtuuria.

Teknisiltä ominaisuuksiltaan WiMAX ja LTE ovat hyvin lähellä toisiaan. Sekä WiMAX että LTE käyttävät tulosuunnassa OFDMA:ta. Molemmat tukevat sekä FDD- että TDD-menetelmiä, moniantennitekniikka MIMO:a, samoja modulaatiomenetelmiä sekä erilaisia QoS-menetelmiä palvelun laadun varmistamiseksi. Molemmat ovat kokonaan IP-pohjaisia teknologioita, hyödyntävät skaalautuvaa kaistanleveyttä ja Self Organizing Networks (SON) -konseptia. Suorituskykyjä verrattaessa LTE on vähän edellä. LTE:n tiedonsiirtonopeudet ovat suuremmat ja viive pienempi. Kilpailuasetelmaa teknisten ominaisuuksien tai suorituskyvyn paremmuudesta ei kuitenkaan ole. Molempien standardien kehitys tähtää täyttämään IMT-Advancedin 4G-vaatimukset.

WiMAX:in muutaman vuoden etumatka näkyy tämän päivän markkinatilanteessa. WiMAX-liittymiä ja -verkkoja on maailmalla enemmän kuin LTE-liittymiä tai -verkkoja. Monet operaattorit ympäri maailmaa, myös WiMAX-operaattorit, ovat kuitenkin ilmoittaneet aikeistaan siirtyä neljännen sukupolven myötä nykyisistä GSM-, UMTS-, HSPA-, CDMA- ja WiMAX-pohjaisista verkoista LTE-teknologiaan. Vuoden 2012 lopussa ennustetaan olevan enemmän LTE-liittymiä kuin WiMAX-liittymiä. Kilpailu 4G-mobiililaaja-kaistamarkkinoista on kääntymässä LTE:n eduksi. Kiinteissä laajakaistayhteyksissä, backhaul- ja hotspot-yhteyksissä WiMAX on kuitenkin edelleen vahvoilla.

LTE:n tulevaisuus 4G-markkinoilla näyttää vahvalta mutta WiMAX näyttää menettäneen operaattoreiden tuen. WiMAX:in tulevaisuuteen tulee vaikuttamaan se, kuinka hyvin Mobile WiMAX Release 2.0:n markkinoinnissa onnistutaan, miten löydetään oikeat liiketoiminta-alat, kuinka nopeasti Mobile WiMAX Release 2.0 saadaan käyttöön ja minkälaisia käyttäjäkokemuksia Mobile WiMAX Release 2.0 tarjoaa.

Lähteet

- 1 WiMAX: The Critical Wireless Standard. Verkkodokumentti. University of Aalborg. <kom.aau.dk/~rlo/lectures/wirelessNetworksII08/mm2/wimax_report.pdf> Luettu 30.8.2011
- 2 Propagation effects in WiMAX systems. Verkkodokumentti. University of Glamorgan. <www.comp.glam.ac.uk/NGMAST08/NGMAST2008_presentations/CA204_NGMAST_C/NGMAST_C1/NGMAST_2008_presentation.ppt> Luettu 30.8.2011
- 3 Mobile WiMAX. Verkkodokumentti. Aperto Networks. <www.apertonet.com/docs/Mobile_WiMAX_FAQ.pdf> Luettu 30.8.2011

- 4 Clearwire to reach 120 million people by 2010. Verkkodokumentti. The Inquirer. <www.theinquirer.net/inquirer/news/1051294/clearwire-reach-120-million-people-2010> Luettu 14.2.2012
- 5 Fixed and Mobile WiMAX Overview. Verkkodokumentti. Fujitsu. <www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/pdf/esc_wimax06.pdf> Luettu 2.9.2011
- 6 Quality of Service. Verkkodokumentti. WiMAX.com. <www.wimax.com/education/wimax/qos> Luettu 2.9.2011
- 7 Langattomat laajakaistaratkaisut. Verkkodokumentti. Viestintävirasto. <www.ficora.fi/attachments/suomiry/1158858938123/TRaportti082005.pdf> Luettu 2.9.2011
- 8 Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation. Verkkodokumentti. WiMAX Forum. <www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf> Luettu 8.3.2012
- 9 IEEE WirelessMAN. Verkkodokumentti. IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards. <grouper.ieee.org/groups/802/16/> Luettu 2.9.2011
- 10 IEEE 802.16m Update, Raj Jain. Verkkodokumentti. Washington University. <www.cse.wustl.edu/~jain/wimax/ftp/16m0706.pdf> Luettu 2.9.2011
- 11 WiMAX Forum. Verkkodokumentti. <www.wimaxforum.org> Luettu 2.9.2011
- 12 WiMAX Maps. Verkkodokumentti. <www.wimaxmaps.org> Luettu 2.9.2011
- 13 WiMAX. Verkkodokumentti. Wikipedia. <fi.wikipedia.org/wiki/Wimax> Luettu 2.9.2011
- 14 Laajakaistaliittymien hintavertailu - langattomat laajakaistaliittymät 07/2011. Verkkodokumentti. Viestintävirasto. <www.ficora.fi/attachments/suomial/60AUZrxfJ/Langattomien_laajakaistaliittymien_hinnat_07_2011.pdf> Luettu 2.9.2011
- 15 Isot operaattorit lähtivät 4G-verkkokisaan. Verkkodokumentti. Tietokonelehti. <www.tietokone.fi/uutiset/isot_operaattorit_lahtivat_4g_verkkokisaan> Luettu 2.9.2011
- 16 Suomen 4G-kisa ei houkutellut ulkomaisia haastajia. Verkkodokumentti. Tietokonelehti. <www.tietokone.fi/uutiset/vain_yksi_yritys_osallistui_huutokauppaan_suomen_ulkopuolelta> Luettu 2.9.2011
- 17 0G. Verkkodokumentti. Wikipedia. <fi.wikipedia.org/wiki/0G> Luettu 3.9.2011
- 18 NMT. Verkkodokumentti. Wikipedia. <fi.wikipedia.org/wiki/NMT> Luettu 3.9.2011
- 19 Development from 2G to 3G. Verkkodokumentti. Digital Consulting Inc. <www.dciexpo.com/3g/development-from-2g-to-3g.php> Luettu 3.9.2011

- 20 From GSM to IMT-2000 – A comparative Analysis. Verkkodokumentti. International Telecommunications Union. <www.itu.int/osg/spu/ni/3G/casestudies/GSM-FINAL.pdf> Luettu 3.9.2011
- 21 GSM/3G Market Update. Verkkodokumentti. Global mobile Suppliers Association. <www.gsacom.com/gsm_3g/market_update.php4> Luettu 3.9.2011
- 22 About mobile technology and IMT-2000. Verkkodokumentti. International Telecommunications Union. <www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html> Luettu 3.9.2011
- 23 WiMAX and IMT-2000. Verkkodokumentti. WiMAX Forum. <www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX_and_IMT_2000.pdf> Luettu 3.9.2011
- 24 Rolling out 3G. Verkkodokumentti. International Telecommunications Union. <www.itu.int/itu-news/issue/2001/07/commentary.html> Luettu 3.9.2011
- 25 Third Generation (3G) Mobile. Verkkodokumentti. International Telecommunications Union. <www.itu.int/itu-news/issue/2003/06/thirdgeneration.html> Luettu 3.9.2011
- 26 The Mobile Internet Report. Verkkodokumentti. Morgan Stanley. <www.morganstanley.com/institutional/techresearch/pdfs/2SETUP_12142009_RI.pdf> Luettu 3.9.2011
- 27 Qualcomm Abandons UMB, Future of CDMA Ended. Verkkodokumentti. China Communication Network. <www.cn-c114.net/583/a361645.html> Luettu 3.9.2011
- 28 1G. Verkkodokumentti. Wikipedia. <en.wikipedia.org/wiki/1G> Luettu 3.9.2011
- 29 Mobile telephony history. Verkkodokumentti. Farley, Tom. <www.privateline.com/archive/TelenorPage_022-034.pdf> Luettu 3.9.2011
- 30 GSM images. Verkkodokumentti. <images.yourdictionary.com/gsm > Luettu 14.2.2012
- 31 Mobile technologies GSM. Verkkodokumentti. European Telecommunications Standards Institute. <www.etsi.org/WebSite/Technologies/gsm.aspx> Luettu 3.9.2011
- 32 General Packet Radio Service (GPRS). Verkkodokumentti. 2G 3G Wireless Technology. <wirelessworld.weebly.com/gprs-amp-edge.html> Luettu 3.9.2011
- 33 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Verkkodokumentti. 2G 3G Wireless Technology. <wirelessworld.weebly.com/3g-umts.html> Luettu 3.9.2011
- 34 Android Device and Network compatibility Guide. Verkkodokumentti. Android Bugle. <www.androidbugle.com/p/android-device-and-network.html> Luettu 3.9.2011

- 35 GPRS technology tutorial. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/gprs/gprs_tutorial.php>
Luettu 3.9.2011
- 36 GSM EDGE cellular evolution technology. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/gsm-edge/basics-tutorial-technology.php> Luettu 3.9.2011
- 37 Evolved EDGE. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/gsm-edge/evolved-edge.php>
Luettu 3.9.2011
- 38 UMTS 3G History. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/3g-history.php>
Luettu 4.9.2011
- 39 UMTS/WCDMA basics tutorial & Overview. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com. <www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/umts_wcdma_tutorial.php> Luettu 4.9.2011
- 40 3G TD-SCDMA Tutorial. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/3g-tdscdma-tutorial-basics.php> Luettu 16.12.2012
- 41 3G UMTS HSPA - High Speed Packet Access Tutorial. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com. <www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3g-hspa/umts-high-speed-packet-access-tutorial.php> Luettu 13.9.2011
- 42 HSPA. Verkkodokumentti. Third Generation Partnership Project.
<www.3gpp.org/HSPA> Luettu 24.9.2011
- 43 HSDPA UE categories and data rates. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3g-hspa/hsdpa-ue-categories-data-rates.php> Luettu 24.9.2011
- 44 HSUPA Category Definitions and Data Rates. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com. <www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3g-hspa/hsupa-category-categories-data-rates.php> Luettu 24.9.2011
- 45 Continued HSPA Evolution of mobile broadband. Verkkodokumentti. Ericsson.
<www1.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2009_01/files/HSPA.pdf> Luettu 24.9.2011
- 46 GSM Network Architecture. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/gsm_technical/gsm_architecture.php> Luettu 3.9.2011
- 47 Architecture of the GSM network. Verkkodokumentti.
<www.rj12.net/GSM2.html> Luettu 14.2.2012

- 48 The GSM Standard (An overview of its security). Verkkodokumentti. SANS
<www.sans.org/reading_room/whitepapers/telephone/gsm-standard-an-overview-security_317> Luettu 3.9.2011
- 49 GPRS Architecture: Interfaces and Protocols. Verkkodokumentti.
<www.roggework.net/uploads/media/Student_-_GPRS_Architecture.pdf>
Luettu 3.9.2011
- 50 EDGE System. Verkkodokumentti. <gus-hid.blogspot.com/2010_11_01_archive.html> Luettu 14.2.2012
- 51 UMTS/WCDMA Network Architecture. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/umts-wcdma-network-architecture.php> Luettu 24.9.2011
- 52 Evolution of UMTS and motivations for LTE. Verkkodokumentti. Bougdal, Hicham.
<hbougdal.blogspot.com/2011/05/evolution-of-umts-networks-and.html>
Luettu 14.2.2012
- 53 Tehonsäätö WCDMA-tekniikassa. Verkkodokumentti. Kuokkanen, Toni.
<publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/10204/Kuokkanen.Toni.pdf?sequence=2> Luettu 28.9.2011
- 54 UMTS WCDMA handover or handoff. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/umts-wcdma-handover-handoff.php> Luettu 15.1.2012
- 55 UMTS handover. Verkkodokumentti. <www.umts.wz.cz/Mob_radio_site_3G/RNC.htm> Luettu 14.2.2012
- 56 IS-95, cdmaOne. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3gpp2/is95-cdmaone.php>
Luettu 28.9.2011
- 57 CDMA2000 1X/1XRTT basics tutorial. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3gpp2/cdma2000-1xrtt-basics-tutorial.php> Luettu 28.9.2011
- 58 CDMA2000 1xEV-DO Basics. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3gpp2/cdma2000-1xevdo-basics-tutorial.php> Luettu 28.9.2011
- 59 UMB Ultra-Mobile Broadband. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com.
<www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/3gpp2/umb-ultra-mobile-broadband.php> Luettu 28.9.2011
- 60 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges. Verkkodokumentti. Agilent Technologies.
<cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf> Luettu 16.1.2012

- 61 Holma, Harri ja Toskala, Antti. 2011. LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- 62 LTE Real Life. Bal, Mirac, Ericsson. LTE 4G Technology course, Metropolia 2011.
- 63 LTE. Verkkodokumentti. Third Generation Partnership Project. <www.3gpp.org/LTE> Luettu 17.2.2012
- 64 UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction. Verkkodokumentti. 3G4G Wireless Resource Center. <www.3g4g.co.uk/Lte/LTE_WP_0703_RandS.pdf> Luettu 20.2.2012
- 65 E-UTRAN Architecture. Verkkodokumentti. Artiza Networks, LTE Resources. <www.artizanetworks.com/lte_tut_eut_arc.html> Luettu 19.2.2012
- 66 LTE RAN architecture aspects. Verkkodokumentti. Third Generation Partnership Project. <www.3gpp.org/ftp/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090005_LTE_RAN_Architecture_aspects.pdf> Luettu 29.2.2012
- 67 LTE FDD, TDD, TD-LTE Duplex Schemes. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com. <www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-fdd-tdd-duplex.php> Luettu 20.2.2012
- 68 TDD vs. FDD. Verkkodokumentti. Goosen, Mark, Spescom Telecommunications. <www.eepublishers.co.za/images/upload/33-34.pdf> Luettu 20.2.2012
- 69 LTE Protocols. Verkkodokumentti. LTE World. <lteworld.org/specification> Luettu 23.2.2012
- 70 Radio Protocol Stack Diagram of LTE. Verkkodokumentti. Teletopix. <teletopix.blogspot.com/2012/02/radio-protocol-stack-diagram-of-lte.html> Luettu 23.2.2012
- 71 LTE SAE System Architecture Evolution. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com. <www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/sae-system-architecture-evolution-network.php> Luettu 25.2.2012
- 72 Long Term Evolution (LTE). Verkkodokumentti. Menulis, Anton Belajar. <antondewantoro.wordpress.com/2010/04/16/teknologi-long-term-evolution-lte-selayang-pandang/> Luettu 23.2.2012
- 73 Spectrum Analysis for Future LTE Deployments. Verkkodokumentti. Motorola. <www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry_Solutions/Service_Providers/Wireless_Operators/LTE/_Document/Static_Files/LTE_Spectrum_Analysis_White_Paper_New.pdf> Luettu 25.2.2012
- 74 LTE Operations and Maintenance Strategy. Verkkodokumentti. Motorola. <business.motorola.com/experiencelte/pdf/LTEOperabilitySONWhitePaper.pdf> Luettu 25.2.2012

- 75 LTE-Advanced. Verkkodokumentti. Third Generation Partnership Project. <www.3gpp.org/LTE-Advanced> Luettu 26.2.2012
- 76 Introducing LTE-Advanced. Verkkodokumentti. EE Times. <www.eetimes.com/design/microwave-rf-design/4212869/Introducing-LTE-Advanced> Luettu 26.2.2012
- 77 4G LTE Advanced Tutorial. Verkkodokumentti. Radio-Electronics.com. <www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/3gpp-4g-int-lte-advanced-tutorial.php> Luettu 26.2.2012
- 78 Report: LTE to dominate WiMax in 4G market. Verkkodokumentti. CNET. <news.cnet.com/8301-1023_3-20030996-93.htm> Luettu 3.3.2012
- 79 What is the Difference Between WiMax and LTE?. Verkkodokumentti. Telecom Circle. <www.telecomcircle.com/2009/09/what-is-the-difference-between-wimax-and-lte> Luettu 3.3.2012
- 80 WiMAX, HSPA+, and LTE: A Comparative Analysis. Verkkodokumentti. WiMAX Forum. <www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_hspa+and_lte_111809_final.pdf> Luettu 10.3.2012
- 81 LTE vs. WiMAX: 4th generation telecommunication networks. Verkkodokumentti. Eberle, Dieter <www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1011/snet-project/lte-vs-wimax_eberle.pdf> Luettu 3.3.2012
- 82 WiMAX-LTE Technology Migration. Verkkodokumentti. Telesystem Innovations. <www.tsiwireless.com/docs/whitepapers/WiMAX_LTE_Technology_Migration.pdf> Luettu 3.3.2012
- 83 WiMAX Subscriptions Surpass 20 Million Globally. Verkkodokumentti. WiMAX Forum. <www.wimaxforum.org/news/2866> Luettu 4.3.2012
- 84 4G LTE to Enjoy Blistering 300 Percent Subscriber Growth in Next Two Years. Verkkodokumentti. IHS iSuppli Market Research. <www.isuppli.com/Mobile-and-Wireless-Communications/MarketWatch/Pages/4G-LTE-to-Enjoy-Blistering-300-Percent-Subscriber-Growth-in-Next-Two-Years.aspx> Luettu 4.3.2012
- 85 LTE to dominate WiMAX in 4G race by 2014?. Verkkodokumentti. Electricpig. <www.electricpig.co.uk/2011/02/09/lte-to-dominate-wimax-in-4g-race-by-2014> Luettu 3.3.2012
- 86 GSM/3G Stats. Verkkodokumentti. Global mobile Suppliers Association. <www.gsacom.com/news/statistics.php4> Luettu 10.3.2012
- 87 WiMAX Product Guide, December 2011. Verkkodokumentti. WiMAX Forum. <wimaxforum.org/files/wimax_product_brochure_12-2011.pdf> Luettu 10.3.2012
- 88 LTE Advanced: mobile broadband up to 10 times faster. Verkkodokumentti. Ericsson. <www.ericsson.com/news/1526485> Luettu 11.3.2012

- 89 Sprint will deploy LTE-Advanced in the first half of 2013. Verkkodokumentti. Fierce Wireless. <www.fiercewireless.com/story/sprint-will-deploy-lte-advanced-first-half-2013/2011-10-25> Luettu 11.3.2012
- 90 AT&T to deploy LTE-Advanced in 2013. Verkkodokumentti. Fierce Wireless. <www.fiercewireless.com/story/att-deploy-lte-advanced-2013/2011-11-08> Luettu 11.3.2012
- 91 Will WiMAX 2 revitalize the WiMAX industry? Verkkodokumentti. Fierce Broadband Wireless. <www.fiercebroadbandwireless.com/special-reports/will-wimax-2-revitalize-wimax-industry> Luettu 11.3.2012