



ELISAN 4G-VERKOT

Antti Impiö

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014
Tietotekniikka
Tietoliikennetekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikka
Tietoliikennetekniikka

ANTTI IMPIÖ:
Elisan 4G-verkot

Opinnäytetyö 36 sivua.
Toukokuu 2014

Elisa on suomalainen kansainvälisesti toimiva verkko-operaattori, joka toimii sekä matkapuhelin- että kiinteiden verkkojen parissa. Elisan juuret ulottuvat 1800-luvulle Helsingin Telefonyhdistyksen perustamiseen. Matkaviestintäverkkotoiminta tuli osaksi Elisaa, kun se hankki Radiolinjan omistukseensa. Elisa operoi Suomessa sekä toisen, kolmannen että neljännen sukupolven matkapuhelinverkkoja.

Ensimmäiset matkaviestintäverkot rakennettiin 1960-luvulla. Nykysin näitä jo suljettuja verkkoja kutsutaan nolanneksi sukupolveksi. 1980-luvulla avattiin ensimmäiset automatisoidut matkapuhelinverkot, joita nykyisin kutsutaan ensimmäisen sukupolven verkoiksi. Radiolinja avasi ensimmäisen toisen sukupolven GSM-verkon Suomessa vuonna 1991. Kolmannen sukupolven UMTS-verkot avattiin 2000-luvun alkupuolella.

Neljännen sukupolven verkoiksi lasketaan UMTS-verkoista kehitetyllä Dual Carrier -tekniikalla toimivat verkot ja puhtaalta pöydältä kehitetyllä LTE-tekniikalla toimivat verkot.

Dual Carrier -tekniikka on kolmannen sukupolven UMTS-tekniikan laajennos. Sen toiminta perustuu kahden rinnakkaisen kanta-aallon samanaikaiseen käyttämiseen. Teoriassa Dual Carrier -tekniikalla saavutetaan kaksinkertainen datansiirtonopeus HSPA-tekniikkaan verrattuna.

LTE-tekniikka on kehitetty puhtaalta pöydältä, mutta yhtäläisyyksiä aikaisempiin verkkoihin löytyy. LTE-tekniikka on kehitetty alusta alkaen nopeaa datansiirtoa varten ja toimii täysin pakettikytkentäisenä.

Neljännen sukupolven verkot ovat tällä hetkellä nopean maantieteellisen kasvun vaiheessa, koska vuoden 2014 alusta avattu 800 MHz:n taajuusalue mahdollistaa kustannustehokkaan verkonrakentamisen. Kolmannen sukupolven verkkojen peitto kasvoi vastaavasti erittäin voimakkaasti vuosina 2007 ja 2008, kun 900 MHz:n taajuusalue avattiin.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Information and Communication Technologies
Telecommunications and Networks

ANTTI IMPIÖ:
Elisas 4G Networks

Bachelor's thesis 36 pages.
May 2014

Elisa is a Finnish international network operator that operates both mobile and fixed line networks in Finland. Elisa's roots go back to the founding of Helsingin Telefoniyhdistys in the late 19th century. Mobile network operations became a part of Elisa when it bought the controlling stake of Radiolinja. Elisa operates second, third and fourth generation networks.

The first mobile communication networks were built in the 1960's. Nowadays these networks are called zero generation networks. In the 1980's the first generation networks were opened. Radiolinja opened the first ever second generation GSM-network on Finland in 1991. Third generation UMTS-networks were opened at the beginning of the 21st century.

Fourth generation networks are considered to be the Dual Carrier -networks that were developed from the UMTS technologies, as well as the networks using LTE technology which was developed from a clean slate.

Dual Carrier is an upgrade to the third generation UMTS technology. It is based on the usage of two basebands simultaneously. In theory data transfer rates can be doubled with Dual Carrier compared to HSPA technology.

LTE technology has been developed from a clean slate, but some similarities to previous generations do exist. From the beginning LTE technology was developed for fast data transfer rates and is a completely packet switched system.

Fourth generation coverage is growing quickly at the moment. Opening of the 800 MHz frequency range for the LTE networks at the beginning of 2014 has enabled cost effective network deployment. The third generation networks went through similar rapid expansion after the 900 MHz band was opened in 2007.

Key words: lte, dual carrier, hspa, umts, elisa

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	ELISA YRITYKSENÄ	9
3	MATKAVIESTINTÄVERKKOJEN SUKUPOLVET	10
	3.1 Nollas sukupolvi	10
	3.2 Ensimmäinen sukupolvi.....	10
	3.3 Toinen sukupolvi	10
	3.4 Kolmas sukupolvi	11
	3.5 Neljäs sukupolvi	11
4	ELISAN VERKOT.....	13
	4.1 2G-tekniikka	13
	4.2 3G-tekniikka	13
	4.3 4G-tekniikka	13
5	HSPA+ DC	16
	5.1 UMTS	16
	5.1.1 W-CDMA.....	17
	5.1.2 UTRAN.....	18
	5.1.3 HSDPA ja HSUPA.....	18
	5.1.4 HSPA+	19
	5.1.5 Käytettävät taajuudet.....	19
	5.2 Dual Carrier	19
6	LONG TERM EVOLUTION.....	22
	6.1 E-UTRAN.....	22
	6.2 EPC	22
	6.3 Radioliikenne	23
	6.3.1 Downlink.....	24
	6.4 MIMO	24
	6.5 Äänipuhelut.....	25
	6.5.1 VoLTE (Voice over LTE).....	25
	6.5.2 CSFB (Circuit Switched Fallback)	25
	6.5.3 SVLTE (Simultaneous voice and LTE)	25
	6.6 Käytettävät taajuudet	25
7	ANTENNIT.....	27
	7.1 SISO.....	27
	7.2 SIMO	27
	7.3 MISO	28
	7.4 MIMO	28

8	MODULAATIO.....	29
8.1	BPSK	29
8.2	QPSK ja 4-QAM.....	30
8.3	8-QAM.....	30
8.4	OFDM.....	31
9	POHDINTA.....	32
	LÄHTEET.....	33

LYHENTEET JA TERMIT

3GPP	3rd Generation Partnership Project, standardointijärjestöjen yhteistyöorganisaatio
ARP	Autoradiopuhelin, ensimmäinen matkapuhelinverkko Suomessa
NMT	Nordisk Mobiltelefon, ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkko Pohjoismaissa
GSM	Global System for Mobile Communications, maailmanlaajuinen toisen sukupolven matkapuheliverkko
GPRS	General Packet Radio Service, GSM-tekniikan laajennus
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution, GPRS-tekniikan laajennus
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, maailmanlaajuinen kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko
ITU	International Telecommunications Union, Kansainvälinen televiestintäliitto
FDD	Frequency division duplexing, taajuusjakoinen duplexointi
TDD	Time division duplexing, aikajakoinen duplexointi
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access, UMTS:n radiorajapinta
TD-CDMA	Time Division - Code Division Multiple Access, UMTS:n radiorajapinta
TD-SCDMA	Time Division - Synchronous Code Division Multiple Access, UMTS:n radiorajapinta
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network, termi, jolla kuvataan UMTS:n radioverkkoa eli NodeB:itä ja RNC:tä
NodeB	UMTS verkon tukiasema
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access, UMTS-tekniikan laajennos
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access, UMTS-tekniikan laajennos
DC-HSDPA	Dual Cell – HSDPA. Kahdella kanta-aallolla toimiva HSDPA
DC-HSUPA	Dual Cell – HSUPA. Kahdella kanta-aallolla toimiva HSUPA
HSPA	High-Speed Packet Access, UMTS-tekniikan laajennos
LTE	Long Term Evolution, neljännen sukupolven tekniikka
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access, LTE:n radiorajapinta
eNodeB	LTE:n tukiasema
MIMO	Multiple Input Multiple Output, Moniantennitekniikka
EPC	Evolved Packet Core, LTE:n runkoverkko
VoLTE	Voice over LTE, äänipuheluiden välitystekniikka

RNC	Radio Network Controller, UMTS:n tukiasemaohjain
HLR	Home Location Registry, UMTS:n tilaajatietokanta
HSS	Home Subscriber Server, LTE:n tilaajatietokanta
IMS	IP Multimedia Core Network Subsystem, mutimediasisällön välitysjärjestelmä

1 JOHDANTO

Tässä työssä perehdytään Elisan neljännen sukupolven matkapuhelinverkkoihin. ITU:n määritelmän mukaan sekä LTE- että DC-HSDPA-tekniikoita käyttävät verkot lasketaan neljänteen sukupolveen kuuluviksi.

Toisessa luvussa tutustutaan hieman Elisaan yrityksenä.

Kolmannessa luvussa perehdytään neljännen sukupolven matkapuhelinverkkojen määritelmään. Luvussa esitellään myös edeltävät sukupolvet.

Neljännessä luvussa tarkastellaan millaisia verkkoja Elisalla on käytössä.

Viidennessä luvussa perehdytään DC-HSDPA-tekniikkaan ja sen toimintaan.

Kuudennessa luvussa käsitellään LTE-tekniikkaa.

Seitsemännessä luvussa tarkastellaan antennitekniikoita ja kahdeksannessa luvussa modulaatioita.

2 ELISA YRITYKSENÄ

Elisa on yksi Suomen kolmesta omaa verkkoa ylläpitävistä ja verkkotoimiluvan omaavista operaattoreista. Elisan historia juontaa yli 100 vuoden taakse Helsingin Telefoniyhdistyksen perustamiseen vuonna 1882. Konserniin kuuluu myös tytäryhtiö Elisa Eesti. [1]

Vuonna 1988 perustettiin Radiolinja, jonka verkossa soitettiin ensimmäinen GSM-puhelu vuonna 1991. GSM-tekniikkaa edeltäneet järjestelmät olivat posti- ja teleliikelaitoksen monopolijärjestelmiä. Elisa hankki enemmistön Radiolinjasta omistukseensa 1990-luvulla. Ensimmäinen 1800 MHz:n taajuusalueella toimiva GSM-verkko avattiin vuonna 1997. Kolmannen sukupolven verkon toimilupa myönnettiin Elisalle vuonna 1999 ja UMTS-verkko avattiin tammikuussa 2002 2100 MHz:n taajuusalueelle. [2]

Vuonna 2004 Radiolinja-nimen käytöstä luovuttiin matkapuhelinliiketoiminnassa ja nimeksi tuli Elisa, joka oli otettu yhtiön nimeksi vuonna 2000. [2]

Vuonna 2005 Elisa osti virtuaalioperaattorina toimineen Saunalahden. Saunalahti on Elisalla edelleen käytössä brändinä, jolla myydään kuluttajille mobiiliverkon puhe- ja dataliittymiä sekä kiinteitä laajakaistayhteyksiä. [3]

Viimeisimpänä Elisaan ovat sulautuneet yritysostojen kautta PPO, KYMP ja Telekarelia vuonna 2013. Aikaisemmin Elisaan on liitetty muun muassa varsinais-suomalainen Lounet, Joensuun Puhelin, keskisuomalainen Yomi Group ja Riihimäen Puhelin. [4]

Elisa hankki lokakuussa 2013 päättyneessä taajuushuutokaupassa itselleen käyttöoikeuden kahteen taajuuskaistapariin 800 MHz:n LTE-tekniikalle. Yhden taajuuskaistan kaistanleveys on 5 MHz. Aiemmin yhtiöllä oli jo toimilupa sekä 1800 että 2600 MHz:n taajuusalueille LTE-tekniikalle, 900 ja 2100 MHz:n UMTS 3G:lle ja 900 ja 1800 MHz:n GSM:lle. [5],[6]

3 MATKAVIESTINTÄVERKKOJEN SUKUPOLVET

4G:llä tarkoitetaan neljännen sukupolven matkapuhelinverkkoja. Matkapuhelinverkkojen sukupolvet eivät ole niinkään määritelty teknologioiden mukaan vaan niitä yhdistävien tekijöiden mukaan.

Taulukko 1. Verkkotekniikat

	UMTS (WCDMA)	HSPA (HSDPA + HSUPA)	HSPA+	LTE
3GPP-julkaisu	Rel 99 (Rel 4)	Rel 5 ja Rel 6	Rel 7	Rel 8
Julkaisu vuosi	2003	2005 ja 2007	2008	2009
Maksimilatausnopeus	384 kbps	14 Mbps	28 Mbps	100 Mbps
Maksimilähetyksenopeus	128 kbps	5,7 Mbps	11 Mbps	50 Mbps
Keskimääräinen viiveaika	150 ms	100 ms	50 ms	10 ms

3.1 Nollas sukupolvi

Nollatta sukupolvea (0G) edustaneen autoradiopuhelinverkon (ARP) ja samaan aikaan käytössä olleiden muiden teknologioiden yhteisenä piirteenä voidaan pitää soluttomuutta, yksisuuntaisuutta ja manuaalisuutta. Näistä verkoista ei voinut soittaa ilman välittäjää tavallisiin puhelimiin eikä niissä voinut puhelun aikana siirtyä solusta toiseen. Ensimmäisen sukupolven verkot avattiin pääasiassa 1960- ja 1970-luvuilla. Verkot olivat myös maakohtaisesti rajattuja. [9],[10]

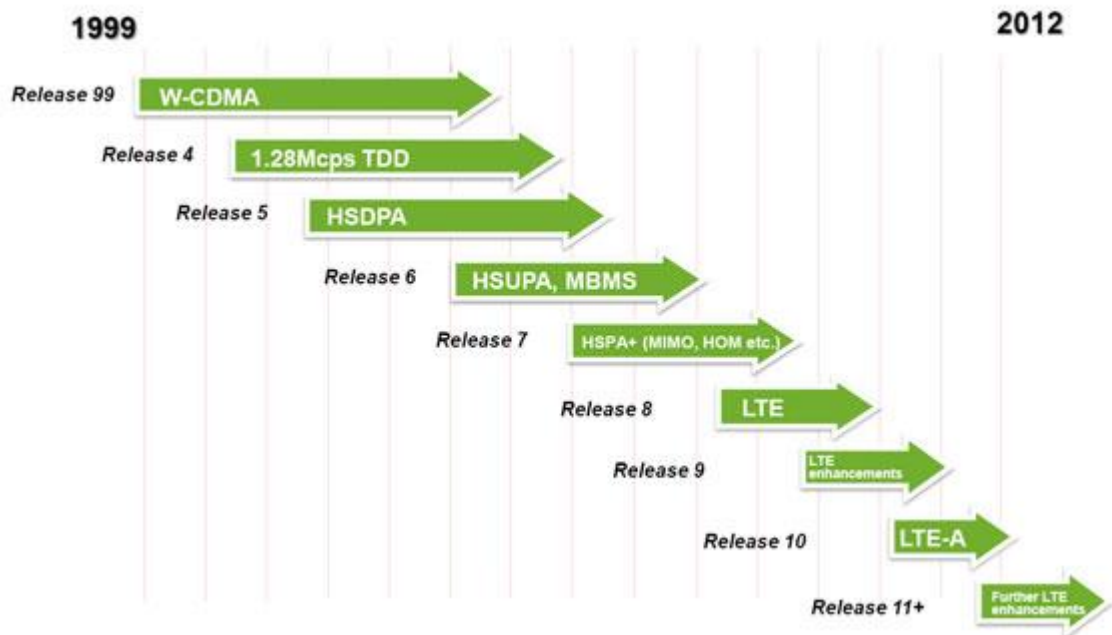
3.2 Ensimmäinen sukupolvi

Ensimmäisen sukupolven verkkoja (1G) yhdisti kansainvälisyys, analogisuus ja automaattisuus. Suomessa ja pohjoismaissa ensimmäisen sukupolven teknologiaa edusti Nordisk Mobiltelefon -verkko (NMT). NMT-verkko avattiin muissa Pohjoismaissa vuonna 1981 ja Suomessa 1982. [11]

3.3 Toinen sukupolvi

Toista sukupolvea (2G) yhdistävänä tekijänä voidaan pitää globaalisuutta ja digitaalisuutta. 2G-verkoista suurin osa toimii GSM-tekniikalla, ja tämä mahdollisti

ensimmäistä kertaa päätelaitteen käyttämisen oman operaattorin verkon ulkopuolella. 2G-tekniikoiden digitaalisuuden myötä päätelaitteiden hinta, akunkesto ja koko saatiin sellaiselle tasolle, että laitteet tulivat kaikkien kuluttajien ulottuville. Ensimmäinen GSM-tekniikan puhelu soitettiin Suomessa silloisen Radiolinjan verkossa, josta sittemmin tuli osa Elisaa. [12]



Kuva 1. Kolmannen ja neljännen sukupolven tekniikoiden kehityskaari [8]

3.4 Kolmas sukupolvi

Kolmatta sukupolvea (3G) edustavien tekniikoiden tarve ilmeni, kun huomattiin, että 2G tekniikoiden datansiirtokapasiteetti ei ollut riittävä eikä sitä voida kasvattaa päivityksillä tarpeeksi. GSM:stä kehitetyn UMTS-järjestelmän kehityksen taustalla toimii 3GPP (3rd Generation Partnership Project), jossa on mukana sekä operaattoreita että laitetoimittajia. [13]

3.5 Neljäs sukupolvi

Kansainvälinen televiestintäliitto ITU julkaisi vuonna 2008 neljännen sukupolven määrittelyn. Määritelmän vaatimuksissa tiedonsiirtonopeuden päätelaitteeseen tuli olla hitaassa liikkeessä 1 Gbit/s ja 100 Mbit/s nopeassa liikkeessä. Vuonna 2010 ITU muutti 4G:n määritelmää. Uuden määritelmän mukaan sekä LTE- että DC-HSDPA-tekniikat

voidaan laskea 4G-tekniikoiksi, koska niillä "saadaan merkittävä parannus kolmannen sukupolven tekniikoihin verrattuna". [14],[15]

4 ELISAN VERKOT

Elisa on yksi kolmesta Suomessa toimivista matkapuhelinverkko-operaattoreista. Elisalla on sekä 2G-, 3G- että 4G -verkkoa. Elisän määritelmä 4G-verkosta kattaa sekä DC-HSDPA- että LTE-verkkotekniikat. Tässä työssä esitellään nämä tekniikat. Elisän määritelmä vastaa ITU:n joulukuussa 2010 tekemää 4G:n uudelleenmäärittelyä, jossa DC-HSDPA- ja LTE-tekniikat ovat mukana. [15]

4.1 2G-tekniikka

GSM on toisen sukupolven perusverkko ja GPRS-pakettidatatekniikka on käytössä koko Elisän verkossa. GSM-verkko toimii sekä 900 MHz:n sekä 1800 MHz:n taajuusalueilla.

EDGE on toisen sukupolven verkkotekniikka, joka parantaa datansiirtonopeuksia.

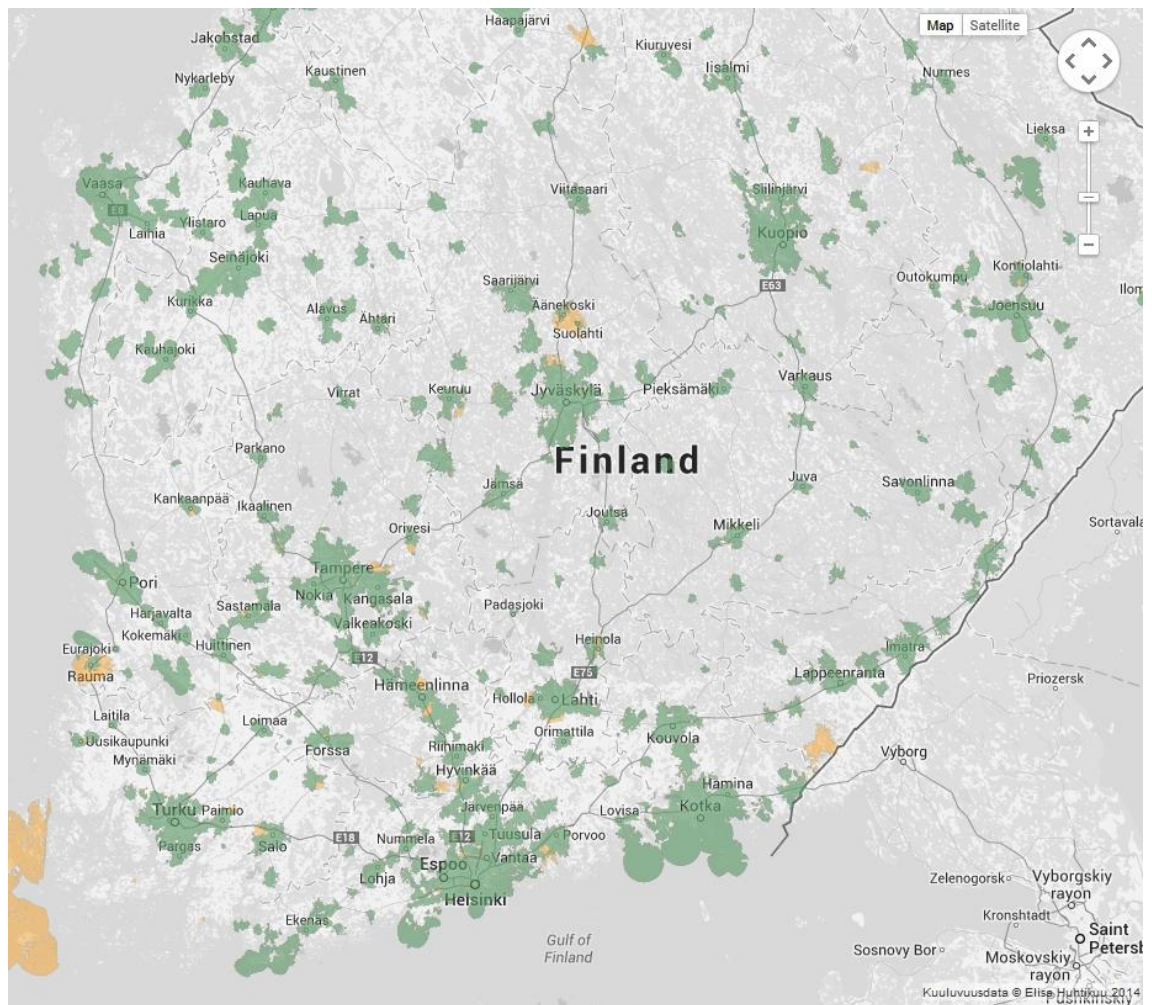
4.2 3G-tekniikka

UMTS 900 on 900 MHz:n ja UMTS 2100 on 2100 MHz:n taajuudella toimiva UMTS-verkko. Sekä 900 MHz:n että 2100 MHz:n verkoissa on käytössä datansiirtonopeuksia parantava HSPA-tekniikka.

4.3 4G-tekniikka

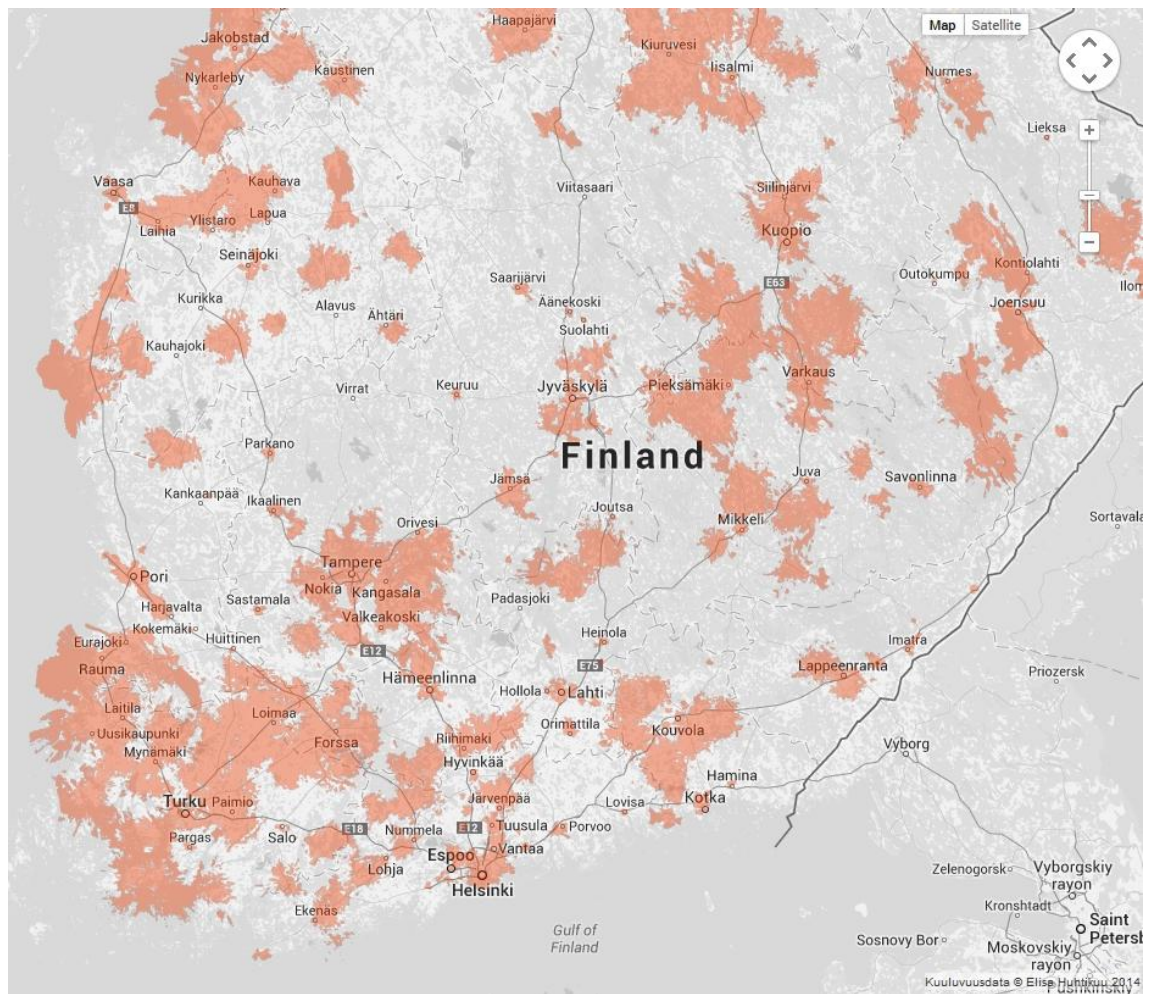
UMTS Dual Carrier verkossa käytetään kahta UMTS 2100 -verkon mobiilidatakanavaa yhtä aikaa.

HSPA+ DC eli dual carrier tekniikka on lyhyesti sanottuna tekniikka, jossa yhdelle laitteelle annetaan kahden laitteen verran kaistaa 3G-verkossa.



Kuva 2. UMTS 2100 (oranssi) ja DC (vihreä) peittoalueet Elisan verkossa [7]

LTE-verkko on uusi Elisan verkkotekniikoista. Sen rakentaminen alkoi 2010 ja se on saatavilla yli 70 paikkakunnalla. LTE-tekniikalla voidaan teoriassa saavuttaa 100 Mbps tiedonsiirtonopeus. LTE-verkko toimii vuoden 2014 alusta kolmella eri taajuudella, jotka ovat 800, 1800 ja 2600 MHz. [16]



Kuva 3. LTE-verkon peittoalue Elisan verkossa [7]

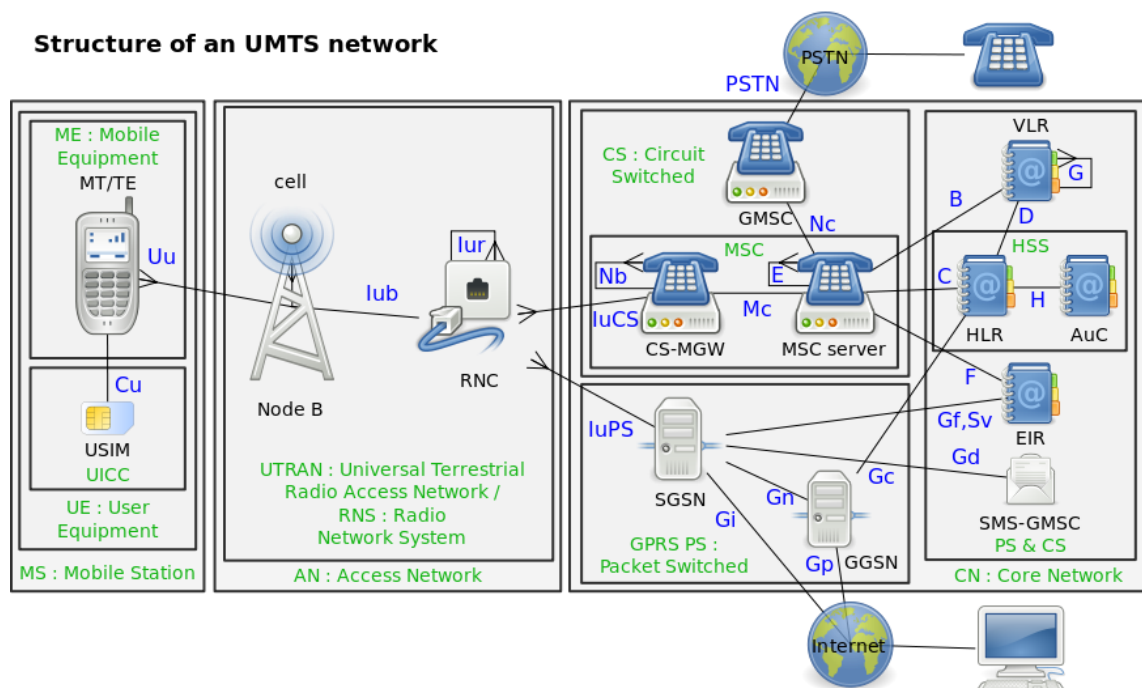
5 HSPA+ DC

Dual Cell- tai Dual Carrier -tekniikka on kolmannen sukupolven UMTS-tekniikan laajennus, jolla kaksinkertaistetaan päätelaitteelle käytössä oleva kaista. Sekä tukiasemassa että päätelaitteessa on oltava tuki DC:lle, jotta sitä voidaan käyttää. Koska DC-tekniikka on UMTS-tekniikan laajennus, tarkastellaan ensin UMTS-tekniikan toiminnan perusteet. [17]

5.1 UMTS

UMTS on 3GPP:n yhteistyössä syntynyt kolmannen sukupolven verkkojärjestelmä. UMTS itsessään ei ole mikään yksittäinen teknologia vaan useiden eri teknisten määritysten kokonaisuus. Ensimmäisen kerran se määriteltiin 3GPP:n Release 99 -julkaisussa. [17]

UMTS-verkko on sekä paketti- että piirikytkentäinen. Äänipuheluiden välitys UMTS-verkossa on aina piirikytkentäistä, ja näin ollen äänipuhelu voidaan siirtää GSM- ja UMTS-verkkojen välillä katkeamatta. [18]



Kuva 4. UMTS-verkko [32]

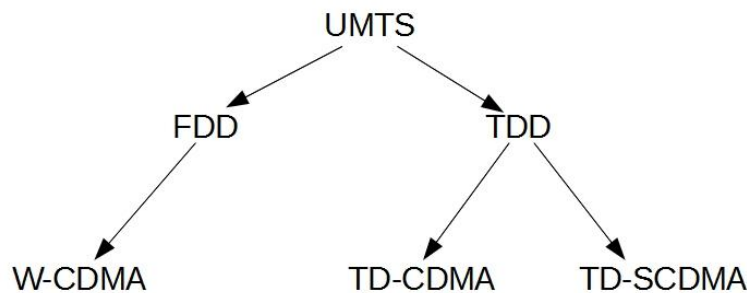
Datansiirto on pääasiassa pakettikytkentäistä, mutta UMTS-määritelmään sisältyy myös piirikytkentäisen datasiirron mahdollisuus. Alkuperäisen UMTS-määrittelyn mukaan

suurimmat saavutettavat datansiirtonopeudet ovat 64 kbps piirikytkentäisenä ja 384 kbps pakettikytkentäisenä. [18]

UMTS-verkossa käytettävät kanavat voidaan jakaa kolmeen ryhmään hierarkisesti. Alimpana ovat fyysiset kanavat, joilla kuvataan datan välitystä radiotiellä. Keskimmaisella tasolla eli MAC-tasolla (Media Access Control) kuvataan, missä muodossa ja miten dataa siirretään. Ylimpänä ovat siirrettävää dataa kuvaavat loogiset kanavat. [25]

5.1.1 W-CDMA

Radorajapinnassa UMTS:ään kuuluu kolme vaihtoehtoista teknologiaa. Nämä ovat W-CDMA, TD-CDMA ja TD-SCDMA. Suomessa ja Euroopassa pääasiassa käytetty W-CDMA on koodijakoinen hajaspektrijärjestelmä toisin kuin TD-CDMA ja TD-SCDMA, jotka ovat aikajakaisia. [25],[29]



Kuva 5. UMTS hierarkia

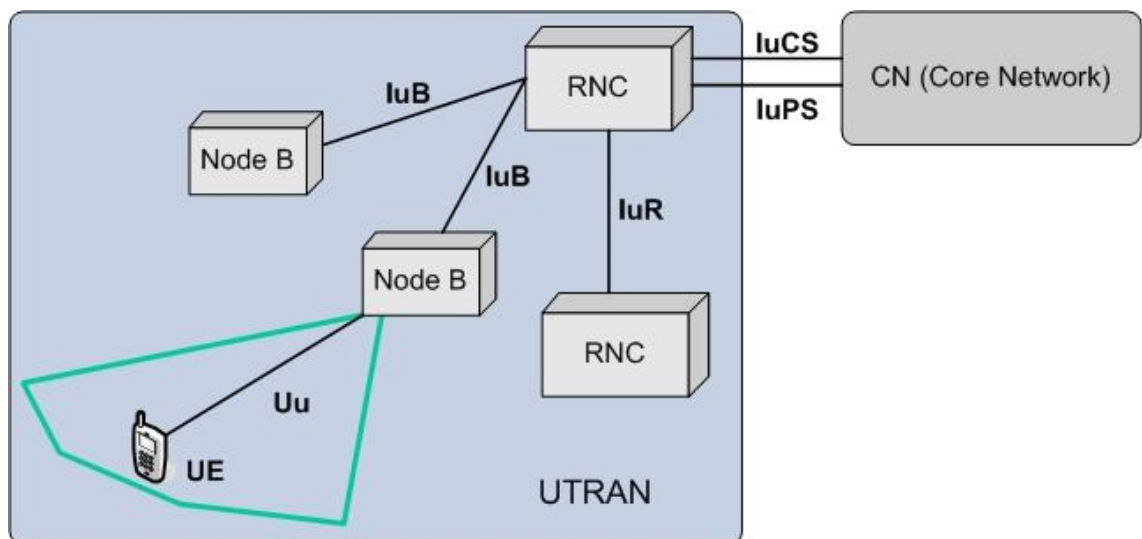
W-CDMA toimii kahdella 5 MHz:n levyisellä taajuuskaistalla käytettävästä taajuusalueesta riippumatta. Toisella kaistalla data siirtyy verkosta päätelaitteeseen ja toisella päätelaitteesta verkkoon.

Hajaspektrisessä järjestelmässä käyttäjälle tarkoitettu signaali levitetään koko 5 MHz:n taajuuskaistalle. W-CDMA:ssa käytettävän suorasekvenssilevityksen pääperiaate on, että hyötysignaali kerrotaan ennen lähetystä ennalta sovitulla pseudosatunnaisella signaalilla koko kaistan levyiseksi. Hajaspektrilevityksellä saadaan aikaan hyvä häiriönsietokyky käytettävillä taajuuksilla esiintyviä sähkömagneettisia häiriöitä vastaan.

Koodijakoisessa järjestelmässä kaikki päätelaitteet lähettävät signaaliaan samaan aikaan koko ajan toisin kuin aikajakoisessa järjestelmässä, jossa jokainen laite lähettää signaalia vuorollaan.

5.1.2 UTRAN

UMTS:in radioverkko-osan nimi on UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network). UTRAN:issa yhdistyvät useat tukiasemat, jotka voivat toimia toisistaan poikkeavilla taajuualueilla. UTRAN:in komponentteja ovat tukiasemaohjaimet eli RNC:t (Radio Network Controller) ja tukiasemat, joista käytetään nimeä Node B. Tyypillisesti yksi RNC ohjaa useaa tukiasemaa. Kaikki RNC:t on kytketty yhteen ydinverkkoon, jota kutsutaan nimellä CN (Core Network). Päätelaitetta kuvataan UTRAN-verkossa nimellä UE (User Equipment). Ilmarajapinta merkitään nimellä Uu, kuten kuva 6 osoittaa. [19]



Kuva 6. UTRAN-verkko [33]

5.1.3 HSDPA ja HSUPA

3GPP:n Release 5:ssä vuonna 2002 määriteltiin HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access), jonka myötä suurin saavutettava latausnopeus verkosta päätelaitteeseen nousi 14,0 megabittiin sekunnissa. Latausnopeuden parannus saadaan aikaan vain, jos sekä tukiasema että päätelaite tukevat tekniikkaa. Käytännössä nopeus ei koskaan saavuta ilmoitettuja huippunopeuksia. [20]

Release 6:ssa määriteltiin HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access), joka nimensä mukaan parantaa päätelaitteesta verkkoonpäin tapahtuvaa tiedonsiirtonopeutta. Suuremmat nopeudet on saatu aikaan käyttämällä parempaa modulaatiota. HSDPA pienentää myös vasteaikaa, joka on huippunopeutta tärkeämpi monissa verkkopalveluissa kuten peleissä. [21]

Yhdessä HSDPA:ta ja HSUPA:ta kutsutaan HSPA:ksi (High Speed Packet Access), eikä täten ole mikään parannus nopeuksiin tai muihin verkon ominaisuuksiin. [22]

5.1.4 HSPA+

Evolved High-Speed Packet Access eli HSPA+ on 3GPP:n Release 7:ssä määritelty tekniikka, jolla edelleen nopeutetaan tiedonsiirtoa W-CDMA-verkoissa. HSPA+ mahdollistaa 64-QAM-modulaatiotason ja MIMO-antennitekniikan käytön. Kuitenkin vasta Release 8:n myötä tuli mahdolliseksi käyttää 64-QAM-modulaatiota ja MIMO:a samaan aikaan. [23]

5.1.5 Käytettävät taajuudet

UMTS-järjestelmät toimivat Suomessa kahdella taajuusalueella. Alkuperäisellä 2100 MHz:n taajuusalueella toimivat päätelaitteet vastaanottavat signaalia 2110 - 2170 MHz:n taajuuksilla ja lähettävät signaalia 1920 - 1980 MHz:n taajuuksilla. Näistä taajuuksista Elisan käytössä on 2110,3 - 2130,1 MHz:n downlink-kaista ja 1920,3 - 1940,1 MHz:n uplink-kaista. [6],[34]

Uudemmallalla 900 Mhz:n taajuusalueella päätelaitteet vastaanottavat signaalia 925 - 960 MHz:n taajuuksilla ja lähettävät 880 - 915 MHz:n taajuuksilla. Elisalla tästä taajuusalueesta on on käytössä 948,5 - 959,9 MHz:n downlink-kaista ja 903,5 - 914,9 MHz:n uplink-kaista. 900 MHz:n taajuusalue on sekä GSM- että UMTS-verkkojen käytössä. [6],[34]

5.2 Dual Carrier

Dual Carrier määriteltiin ensimmäisen kerran 3GPP:n Release 8 -julkaisussa lataussuunnan eli downlinkin osalta ja Release 9 -julkaisussa lähetyssuunnan eli



Kuva 8. Dual Carrier kanavat [24]

Dual Carrier -tekniikassa päätelaite arvioi kanavan laadun CQI:n (Channel Quality Indicator) avulla molemmille kantaalloille erikseen. Jos käytetään MIMO:a vaaditaan CQI-arvoja yhtä monta kuin on käytettäviä kanavia. Kanavien määrä saadaan kertomalla antennien määrä kantataajuuksien määrällä.

6 LONG TERM EVOLUTION

LTE-teknologia määriteltiin ensimmäisen kerran 3GPP:n Release 8:ssa vuonna 2008. LTE:n kehittämisen päämääränä oli lisätä verkkojen kapasiteettia ja nopeutta käyttämällä uusia tekniikoita sekä yksinkertaistaa verkkoarkkitehtuuria. [17]

6.1 E-UTRAN

E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) on LTE-verkon radiorajapinta ja nimensä mukaisesti se on jatkokehitetty UMTS-teknologian perustalta. Koska LTE-verkko on täysin pakettikytkentäinen, on verkkorakenne yksinkertaisempi kuin UMTS:ssa. [28]

Tukiasema LTE-verkossa on E-UTRAN Node B (eNode b). Osa toiminnoista, joista UMTS-verkossa vastasi tukiasemaohjain, on siirretty LTE-verkossa suoraan tukiaseman hoidettavaksi. Täten LTE-verkossa ei ole varsinaisesti vastinetta GSM- ja UMTS-verkoissa käytetyille tukiasemaohjaimille, vaan kaikki tukiasemat ovat kiinni suoraan ydinverkossa EPC (Evolved Packet Core), jota kutsutaan myös SAE:ksi (System Architecture Evolution). [28]

6.2 EPC

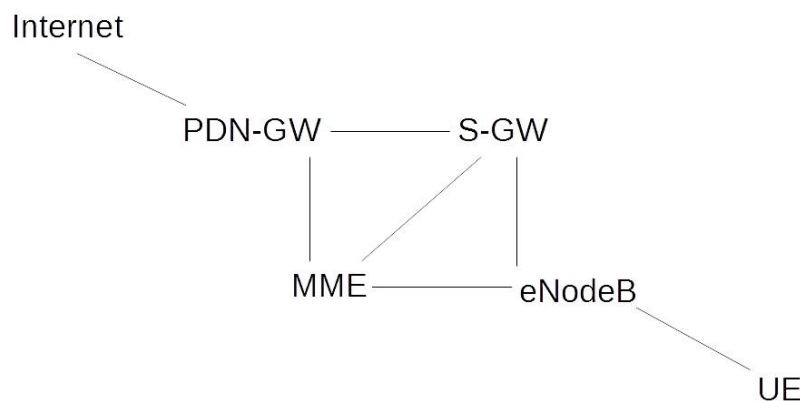
Evolved Packet Coressa on kolme keskeistä osaa: liikkuvuudenhallintaelementti MME (Mobility Management Entity), palveluyhdyskäytävä S-GW (Servicing Gateway) ja pakettidatayhdyskäytävä PDN-GW (Packet Data Network Gateway). Palveluyhdyskäytävä reitittää ja siirtää datan pakettidatayhdyskäytävälle, joka siirtää ne Internetiin. Pakettidatayhdyskäytävän tehtäviin kuuluu IP-osoitteiden antaminen päätelaitteille. UMTS:n kotirekisteriä (Home Location Registry, HLR) E-UTRAN:ssa vastaa tilaajien tietokantapalvelin HSS (Home Subscriber Server). HSS korvaa aikaisemmat rekisterit, koska se pystyy käsittelemään tiedot sekä GSM-, UMTS- ja LTE-verkoista. [24],[28]

Liikkuvuudenhallintaelementti on yleensä serveri operaattorin tiloissa, jonka toimintoihin kuuluu käyttäjän todentaminen, turvallisesta yhteydestä huolehtiminen ja

päätelaitteen sijainnin seuranta. Kun päätelaite rekisteröityy verkkoon liikkuvuudenhallintaelementti selvittää sen identiteetin. Tämän jälkeen HSS-palvelimelta selvitetään päätelaitteen todentamistiedot. Päätelaitteen kirjautuessa vieraaseen verkkoon liikkuvuudenhallintaelementti vastaa oikean profiilin noutamisesta oman operaattorin kotiverkosta. Liikkuvuudenhallintaelementti vastaa myös päätelaitteen siirtymisestä LTE- ja UMTS- tai GSM-verkkojen välillä. [24]

Palvelevan yhdyskäytävän tehtävä radorajapinnan ja EPC:n välissä on hallita päätelaitteen liikkuvuutta, huolehtia datayhteyksistä tukiasemiin ja pakettidatayhdyskäytävälle. Tukiasemalta toiselle siirryttäessä liikkuvuudenhallintaelementti ilmoittaa palvelevalle yhdyskäytävälle seuraavan tukiaseman tiedot. [24]

Pakettidatayhdyskäytävä on oletusreititin päätelaitteen ja ulkoisen verkon, kuten Internetin, välillä. Sen tehtäviin kuuluu antaa päätelaitteelle IP-osoite. Myös liikenteen priorisointi QOS-luokituksen (Quality of Service) mukaan tapahtuu pakettidatayhdyskäytävällä. [24]



Kuva 9. LTE-verkon elementit

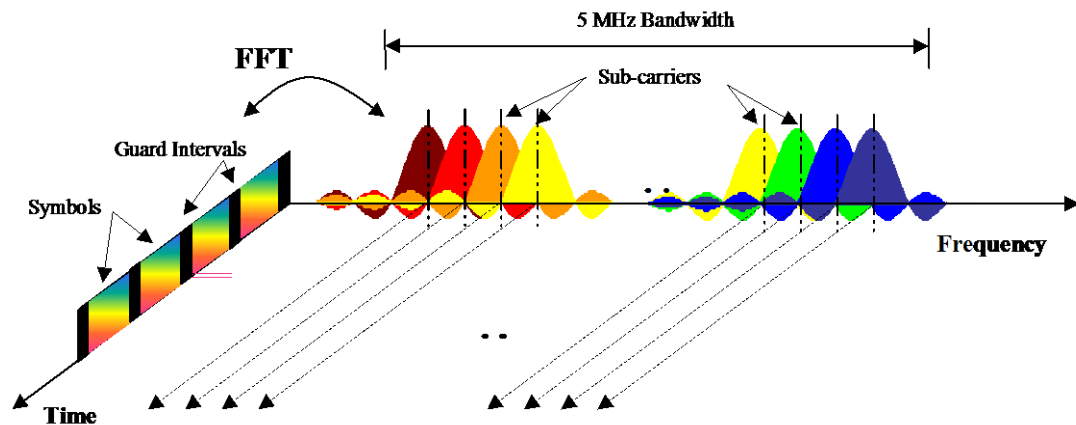
6.3 Radioliikenne

LTE-tekniikassa käytetään lataus- eli downlink -suuntaan OFDMA-tekniikkaa (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ja lähetys- eli uplink -suuntaan SC-FDMA-tekniikkaa (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). OFDMA:ta käytetään downlinkin osalta sen paremman tehokkuuden vuoksi. SC-FDMA:ta käytetään uplinkin osalta yksinkertaisemman vahvistinrakenteen vuoksi. [30]

LTE-tekniikka tukee sekä aikajakoista TDD-menetelmää että taajuusjakoista FDD-menetelmää. TDD:tä käytettäessä tapahtuu liikennöinti molempiin suuntiin samalla taajuuskaistalla erillisillä aikaväleillä. FDD:tä käytettäessä liikennöidään jatkuvasti molempiin suuntiin erillisillä taajuuskaistoilla. [31]

6.3.1 Downlink

OFDMA:ssa lataus- eli downlink-kaistan taajuusalue jaetaan tasaisin välein alikantoaaltoihin, joita on mahdollista moduloida yksitellen. Kuvassa 10 on esitetty miten alikantoaaltojen ortogonaalisuus on saavutettu. Alikantoaaltojen (Sub-Carriers) nollakohdat osuvat viereisten alikantoaaltojen keskitaajuksille. LTE-tekniikassa apukantoaallot on jaoteltu 15 kHz välein. [35]



Kuva 10. OFDMA:n toimintaperiaate [35]

Aikatasolla käytetään suojavälejä erottamaan lähtettävät OFDM-symbolit toisistaan. Suojavälit suojaavat symboleita keskinäisiltä häiriöiltä. [35]

6.4 MIMO

MIMO-antennitekniikka (Multiple Input Multiple Output) käytetään LTE-tekniikassa lataus- eli downlink-suunnassa. Ilman MIMO:a ei ole mahdollista saavuttaa LTE:lle asetettuja datansiirtonopeustavoitteita. Peruskonfiguraatiossa LTE:ssä on käytössä kahden antennin MIMO, eli tukiasemassa on kaksi lähettävää antennia ja päätelaitteessa kaksi vastaanottavaa antennia. LTE-standardissa on myös määritelty tuki neljän antennin MIMO:lle. [30]

6.5 Äänipuhelut

LTE-verkko on täysin pakettikytkentäinen IP-osoitteisiin perustuva verkko. Koska vanhemmissa verkkotekniikoissa puhelut toimivat piirikytkentäisesti on LTE-verkossa olevan päätelaitteesta muodostuva äänipuhelu muutettava jotenkin, jotta se voidaan ohjata edelleen vastaanottajalle.

6.5.1 VoLTE (Voice over LTE)

Nimensä mukaisesti äänipuhelu siirretään LTE-verkossa tavallisena datasiirtona. IMS-palvelun (IP Multimedia Subsystem) kautta äänipuhelu ohjataan eteenpäin datana toiselle LTE-verkossa olevalle laitteelle tai muunnetaan piirikytkentäiseksi, jos toinen osapuoli ei ole LTE-verkossa. [36]

6.5.2 CSFB (Circuit Switched Fallback)

CSFB-ratkaisussa päätelaite siirtyy äänipuhelun ajaksi LTE-verkosta piirikytkentäiseen verkkoon. Ratkaisun huonona puolena on verrattain pitkät puhelujen yhdistämisaajat. [36]

6.5.3 SVLTE (Simultaneous voice and LTE)

SVLTE-ratkaisussa päätelaite on samanaikaisesti yhteydessä sekä LTE-verkkoon että piirikytkentäiseen verkkoon. Ongelmaksi tässä ratkaisussa tulee korkea energiankulutus päätelaitteessa. [36]

6.6 Käytettävät taajuudet

Suomessa LTE-verkot toimivat kolmella taajuusalueella. Nämä ovat 800 MHz:n, 1800 MHz:n ja 2600 MHz:n taajuusalueet. 800 MHz:n taajuusalueella päätelaitteet vastaanottavat signaalia 791 - 821 MHz:n taajuuksilla ja lähettävät signaalia 832 - 862 MHz:n taajuuksilla. Elisalla näistä taajuuksista on käytössä 811 - 821 MHz:n downlink-kaista ja 852 - 862 MHz:n uplink-kaista. [6],[37]

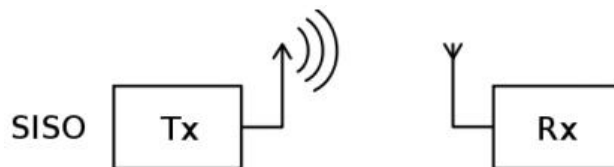
1800 MHz:n taajuusalueella päätelaitteet vastaanottavat signaalia 1805 - 1880 MHz:n taajuuksilla ja lähtettävät signaalia 1710 - 1785 MHz:n taajuuksilla. Elisalla näistä taajuuksista on käytössä käytössä 1855,100 - 1879,900 MHz:n downlink-kaista ja 1760,1 - 1784,9 MHz:n uplink-kaista. Tämä taajuusalue on yhteiskäyttöinen sekä GSM-että UMTS-tekniikan kanssa. [6],[37]

2600 MHz:n taajuusalueella päätelaitteet vastaanottavat signaalia 2620 - 2690 MHz:n taajuuksilla ja lähettävät signaalia 2500 - 2570 MHz:n taajuuksilla. Elisalla näistä taajuuksista on käytössä 2665 - 2690 MHz:n downlink-kaista ja 2545 - 2570 MHz:n uplink-kaista. [6],[37]

7 ANTENNIT

Langattomassa tiedonsiirrossa on aina kaksi osapuolta, lähettäjä Tx (eng. transmitter) ja vastaanottaja Rx (eng. receiver). Lähetin-vastaanotin (eng. transceiver) on tällainen laite jolla sekä lähetetään että vastaanotetaan signaalia. Matkaviestintäverkoissa sekä tukiasemassa että päätelaitteissa on oltava lähetin-vastaanotinyksikkö. Vanhemmissa verkkotekniikoissa käytetään SISO-antennitekniikka ja uudemmissa MIMO-antennitekniikkaa. Soluksi sanotaan lähettävän antennin kantaman peittämää aluetta, joka määräytyy lähetystehon ja käytettävän taajuusalueen perusteella.

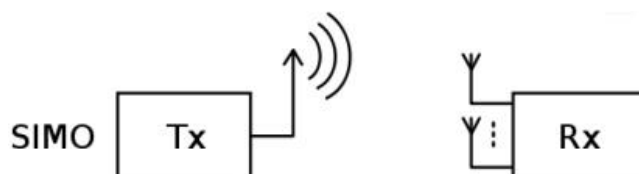
7.1 SISO



Kuva 11. SISO [38]

Single input and single output eli järjestelmä, jossa sekä lähetys- että vastaanottopäässä on yksi antenni. SISO-antennitekniikkaa käytetään GSM-verkoissa. Suljetut ARP- ja NMT-verkot käyttivät SISO-antennitekniikkaa.

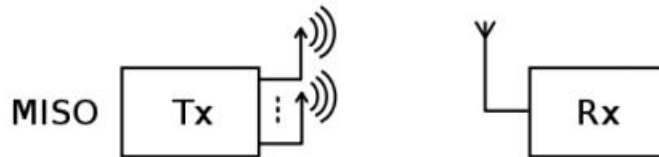
7.2 SIMO



Kuva 12. SIMO [38]

Single input and multiple output eli järjestelmä, jossa on yksi lähetysantenni ja vähintään kaksi vastaanottoantennia.

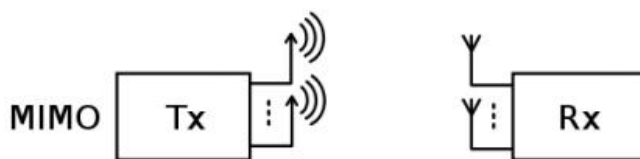
7.3 MISO



Kuva 13. MISO [38]

Multiple input and single output eli järjestelmä, jossa on yksi vastaanottoantenni ja vähintään kaksi lähetysantennia.

7.4 MIMO



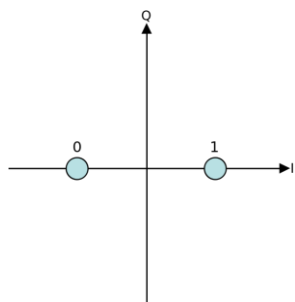
Kuva 14. MIMO [38]

Multiple input and multiple output eli järjestelmä, jossa on vähintään kaksi sekä lähetys- että vastaanottopään antennia. MIMO-antennitekniikkaa käytetään sekä Dual Carrier-että LTE-teknikoissa.

8 MODULAATIO

Kaikki radioaalloilla lähetetty informaatio on jollain tavalla moduloitua signaalia. Yleisesti tunnetuimpia modulaatiomenetelmiä ovat analogiset taajuusmodulaatiot: AM eli amplitudimodulaatio sekä FM eli taajuusmodulaatio. PM eli vaihemodulaatiossa lähetetään yksi kanta-aallon pulssi kerrallaan. NMT-verkossa puhetta siirrettiin FM-moduloituna signaalina ja signaali tapahtui FFSK-moduloidulla (Fast Frequency-shift keying) signaalilla. GSM-verkossa kaikkeen tiedonsiirtoon käytetään GMSK-modulaatiota (Gaussian Minimum Shift Keying). UMTS:in alkuperäisessä määrittelyssä modulaatio on QPSK. HSDPA ja HSPA+ laajennoksissa käytettävät modulaatiot ovat 16-QAM ja 64-QAM. LTE-verkoissa käytetään OFDM-modulaatiota.

8.1 BPSK

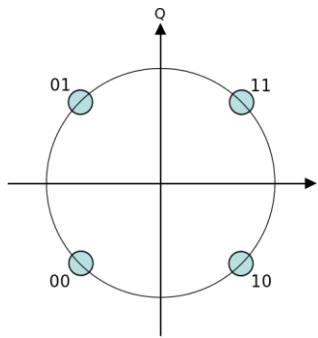


Kuva 15. BPSK-konstellaatio [39]

Binäärisessä vaiheavainnuksessa (Binary Phase Shift Keying) on vain kaksi vaihe-eroa ja täten se on yksinkertaisin eksponentiaalisista modulaatiomenetelmistä. Menetelmässä yhdellä symbolilla käsitellään yhden bitin informaatiomäärä.

Kuvassa 14 konstellaatiopisteet on asetettu I-akselille, mutta pisteet voisivat hyvin olla myös Q-akselilla.

8.2 QPSK ja 4-QAM

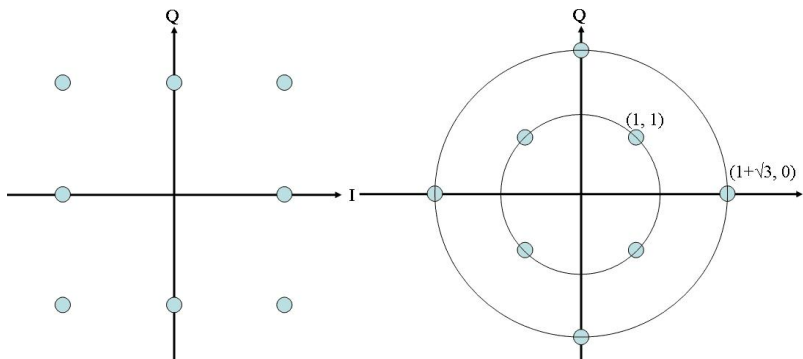


Kuva 16. QPSK-konstellaatio [40]

Nelivaiheisessa vaiheavainnuksessa (QPSK) sekä 4-QAM modulaatiossa siirretään kahden bitin informaatio yhdellä symbolilla. Lähtökohtaisesti erilaiset järjestelmät tuottavat kuitenkin samanlaisen konstellaation ja radio-aallon.

Kuvassa 15 esitetty konstellaatiopisteiden asettelu muodostaa neliön, mutta pisteet voisivat hyvin olla myös vinoneliön muodostelmassa.

8.3 8-QAM

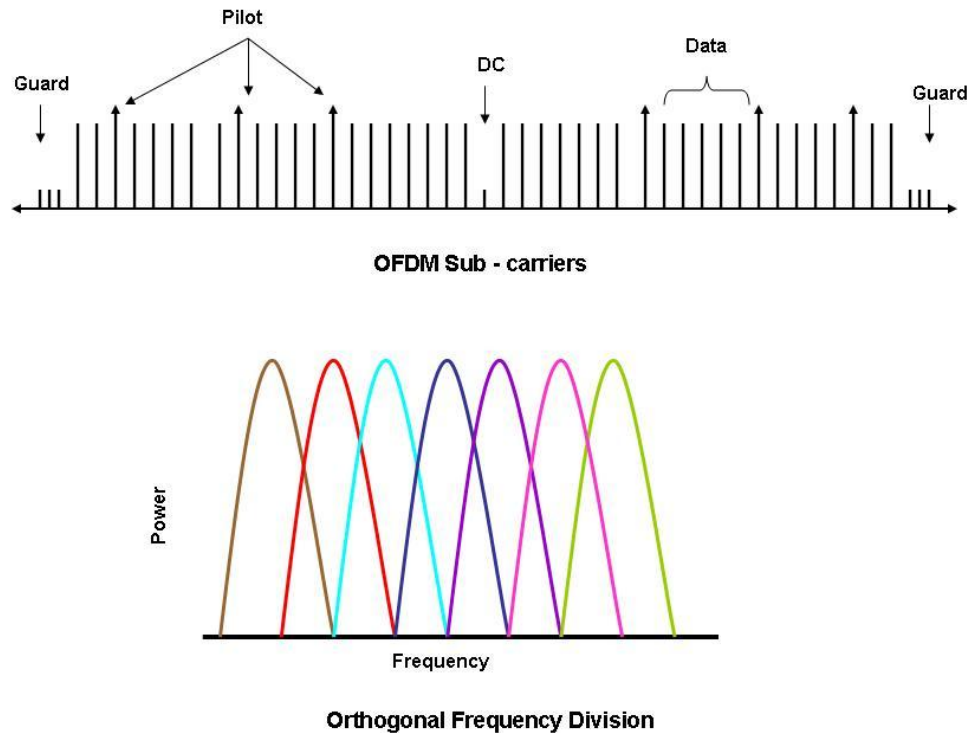


Kuva 17. Suorakulmainen ja pyöreä 8-QAM konstellaatio [41],[42]

QAM-modulaation konstellaatiopisteiden määrää kasvattamalla voidaan yhdellä symbolilla lähettää enemmän informaatiota. Täten kahdeksan pisteen konstellaatiolla voidaan lähettää yhdellä symbolilla kolme bittiä informaatiota ja 16 pisteen konstellaatiolla vastaavasti neljä bittiä. Teoriassa konstellaatiopisteiden määrä on rajaton mutta käytännössä signaali-kohinasuhde rajoittaa määrää.

8.4 OFDM

OFDM- (Orthogonal frequency-division multiplexing) eli DMT-modulointia (Discrete Multitone) käytettäessä taajuuskaista jaetaan lukuisiin apukantaaltoihin. Häipyminen vaikuttaa kerrallaan vain harvoihin apukantaaltoihin, joten OFDM:n etu on hyvä häiriönsieto monitie-etenemisestä aiheutuville häiriöille.



Kuva 18. OFDM modulaatio [43]

Kuvassa 17 on esitetty, kuinka OFDM:n taajuusalue on jaettu useisiin apukantaaltoihin.

9 POHDINTA

Matkapuhelinverkot ja niiden päätelaitteet ovat kehittyneet huimasti viimeisten viiden vuosikymmenen aikana. Verkkojen puolella on siirrytty pelkän äänen siirrosta kaikenkattavaan datansiirtoon. Päätelaitteet ovat muuttuneet autoihin kiinteästi asennettavista laitteista taskuun sulahtaviin multimediapäätteihin.

Neljännän sukupolven verkot edustavat kahta toisistaan merkittävästi eroavaa näkemystä. LTE-tekniikka on kehitetty puhtaalta pöydältä selkeästi uuden sukupolven ratkaisuksi ja LTE-Advanced -tekniikan pohjaksi. Dual Carrier- ja Multi Carrier -tekniikoissa taas pyritään tarjoamaan operaattoreille kustannustehokas tapa tarjota nopeampia yhteyksiä. Toisin sanoen DC-tekniikka on kolmannen sukupolven tekniikoiden kehityskaaren pää, kun taas LTE-tekniikka on viidennen sukupolven tekniikoiden pohja.

Operaattorit ovat rakentaneet neljännän sukupolven verkkoja Suomessa melko tasaisesti sekä LTE- että Dual Carrier -tekniikalla. Vuoden 2014 alussa käyttöön otettu 800 MHz:n taajuusalue on siirtänyt rakentamisen painopistettä LTE-tekniikan puolelle, koska valtion taholta on asetettu vaatimuksia tietyn maantieteellisen peiton saavuttamiseksi.

LÄHTEET

- [1] Historia. Elisa Oyj. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <http://corporate.elisa.fi/elisa-oyj/elisa-oyj/historia/>
- [2] Historia vuosikymmenittäin. Elisa Oyj. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <http://corporate.elisa.fi/elisa-oyj/elisa-oyj/historia/historia-vuosikymmenittain/>
- [3] Elisa petraa kilpalukykyään Saunalahdella. Tietokone. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavilla: http://www.tietokone.fi/artikkeli/arkisto/2005/elisa_petraa_kilpailukykyaan_saunalahdella
- [4] Elisa ostaa PPO:n kiinteän verkon liiketoiminnat. Elisa Oyj. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <https://newsclient.omxgroup.com/cdsPublic/viewDisclosure.action?disclosureId=535071&messageId=658724>
- [5] Elisa sai 800 MHz:n LTE-huutokaupassa tavoittelemansa taajuudet. Elisa Oyj. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <https://newsclient.omxgroup.com/cdsPublic/viewDisclosure.action?disclosureId=579088&messageId=715825>
- [6] Radiolupapäätökset. Viestintävirasto. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/lupapaatokset/radiolupapaatokset.html>
- [7] Kuuluvuus. Elisa Oyj. [Verkkodokumentti, viitattu 10.04.2014] Saatavissa: <http://www.elisa.fi/kuuluvuus/>
- [8] Milestones. 3GPP. [Verkkodokumentti, viitattu 23.04.2014] Saatavissa: http://www.3gpp.org/IMG/jpg/about_rat_milestones-2.jpg
- [9] Autoradiopuhelin. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Autoradiopuhelin>
- [10] Mobile radio telephone. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_radio_telephone
- [11] Nordic Mobile Telephone. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Nordic_Mobile_Telephone
- [12] GSM. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/GSM>
- [13] 3G. Wikipedia [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/3G>

- [14] Circular Letter 5/LCCE/2. International Telecommunication Union. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavilla: http://wirelessman.org/liaison/docs/L80216-08_008.pdf
- [15] ITU World Radiocommunication Seminar highlights future communication technologies. International Telecommunication Union. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/48.aspx
- [16] Elisa 4G LTE-nopeudet Hollolaan ja Nastolaan. Elisa Oyj. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavissa: <http://corporate.elisa.fi/elisa-oyj/tiedotteet/tiedote/?otsikko=elisan-4g-lte--nopeudet-hollolaan-ja-nastolaan&id=73267053284630&tag=all>
- [17] 3GPP. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 14.04.2014] Saatavilla: <https://en.wikipedia.org/wiki/3GPP>
- [18] Universal Mobile Telecommunications System. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System
- [19] UTRAN. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.04.2014] Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/UTRAN>
- [20] High-Speed Downlink Packet Access. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed_Downlink_Packet_Access
- [21] High-Speed Uplink Packet Access. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed_Uplink_Packet_Access
- [22] High-Speed Packet Access. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_Packet_Access
- [23] Evolved HSPA. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 15.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Evolved_HSPA
- [24] Holma, Harri, Toskala, Antti. WCDMA for UMTS - HSPA Evolution and LTE. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. 2007
- [25] Holma, Harri, Toskala, Antti. WCDMA for UMTS - Radio Access for Third Generation Mobile Communications. United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd. 2004
- [26] Dual-Cell HSPA and its Future Evolution. Nomor Research. [Verkkodokumentti, viitattu 18.04.2014] Saatavissa: http://www.nomor.de/root/downloads/white-paper/whitepaper_dc-hsdpa_2009-01.pdf

- [27] 3GPP TS 25.306 V11.3.0 (2012-09). 3GPP. [Verkkodokumentti, viitattu 18.04.2014] Saatavissa: <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/25306-b30.pdf>
- [28] E-UTRA. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 18.04.2014] Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>
- [29] W-CDMA (UMTS). Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 18.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/W-CDMA_%28UMTS%29
- [30] Gessner, Christina. Long Term Evolution. Germany. Rohde & Schwarz. 2011
- [31] Penttinen, Jyrki. LTE-Radiotekniikat ja protokollat. Prossessori 4/2011.
- [32] UMTS structures. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu: 19.04.2014] Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/File:UMTS_structures.svg
- [33] UTRAN. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/File:UTRAN_en.png]
- [34] UMTS frequency bands. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 08.05.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/UMTS_frequency_bands
- [35] 3GPP TR 25.892. 3GPP. [Verkkodokumentti, viitattu 07.05.2014] Saatavissa: http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/25_series/25.892/25892-020.zip
- [36] LTE Voice Calls. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu: 05.05.2014] Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_%28telecommunication%29#Voice_calls
- [37] E-UTRA Frequency bands and channel bandwidths. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 05.05.2014] Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA#Frequency_bands_and_channel_bandwidths
- [38] Prinzipp MIMO. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 04.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Prinzip_MIMO.svg
- [39] BPSK Gray coded. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 04.04.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/File:BPSK_Gray_Coded.svg
- [40] QPSK Gray coded. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 05.05.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/File:QPSK_Gray_Coded.svg
- [41] Rectangular 8QAM. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 05.05.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rectangular_8QAM.png
- [42] Circular 8QAM. Wikipedia. [Verkkodokumentti, viitattu 05.05.2014] Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Circular_8QAM.svg

- [43] OFDM. Subharthi Paul. [Verkkodokumentti, viitattu 25.04.2014]
Saatavissa: <http://www.cs.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/lte/figure3.jpg>