

Mika Summanen

LTE-verkon mittaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

18.11.1013

Tekijä(t) Otsikko	Etunimi Sukunimi LTE-verkon mittaus
Sivumäärä Aika	29 sivua + 1 liite 18.11.1013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaaja(t)	Lehtori Seppo Lehtimäki
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli esitellä LTE-verkon rakennetta ja radorajapinnassa käytettäviä parametreja, sekä suorittaa muutamia nopeusmittauksia verkossa. Parametrien mittaukseen käytettiin Ascomin TEMS Investigation -ohjelmiston versiota 14.4. Nopeustestit puolestaan suoritettiin matkapuhelimeen asennetun Ookla speedtest -sovelluksen avulla.</p> <p>Työssä käydään läpi LTE-verkon arkkitehtuuria ja siinä sijaitsevia elementtejä, sekä esitellään radiotien standardoinnissa valittuja tekniikoita ja radiotien resurssienjakoa.</p> <p>Käytössäolevaa verkkotekniikkaa tutkittiin mittaustuloksin. Mittaukset tehtiin TEMS Investigation-ohjelmalla, jonka päätelaitteena käytettiin Huawei E392 LTE -modeemia. Tuloksissa esitellään kuvakaappauksia käytetystä TEMS-sovelluksesta ja sen esittämistä verkossa käytetyistä parametreista, sekä käydään läpi TEMS-ohjelmiston tuottamaa raporttia tehdystä mittauksesta.</p> <p>TEMS-mittauksilla määritettiin käytetyn verkon tärkeimmät parametrit. Nopeusmittauksilla puolestaan selvitettiin verkossa käytännössä saavutettavat latausnopeudet sekä viiveet.</p>	
Avainsanat	4G, LTE, TEMS

Author(s) Title	Mika Summanen LTE measurement
Number of Pages Date	29 pages + 1 appendices 18 November 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Telecommunication
Instructor(s)	Seppo Lehtimäki, Senior Lecturer
<p>The object of this thesis was to look into the architecture of a LTE network and present some parameters on the network using Ascom TEMS Investigation 14.4 software. Speed tests were conducted with a speed test application produced by Ookla and performed with a mobile phone.</p> <p>First, the architecture of a LTE network and some of the network elements are presented. The standards chosen for the radio links are presented next. Also, the method how the radio link resources are shared among users is explained.</p> <p>The user equipment used in the TEMS program measurements was Huawei E392 LTE modem. The findings are presented in screenshots and in the report produced by the reporting tool of the TEMS investigation program.</p> <p>The measurements were successful and the main parameters of the network were defined. The speed tests revealed the true performance of the network that is accessible by users.</p>	
Keywords	4G, LTE, TEMS

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Arkkitehtuuri	2
3	Radion tie	3
3.1	OFDMA	4
3.2	SC-FDMA	6
3.3	Moniantennitekniikat	7
3.4	Resurssien jako	9
4	Mittaukset	10
5	Tulokset	12
5.1	TEMS	12
5.2	Raportin tutkiminen	19
5.3	LTE-verkon nopeusmittauksia	27
6	Yhteenveto	28
	Lähteet	29

Liitteet

Liite 1. MCS-taulukko

Lyhenteet

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> . Standardijärjestöjen yhteistyöorganisaatio.
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> . Kiinteissä laajakaistayhteyksissä käytetty epäsymmetrinen tiedonsiirtotekniikka.
BLER	<i>Block Error Rate</i> . Virheellisesti vastaanotettujen resurssilohkojen määrä.
CP	<i>Cyclic Prefix</i> . Tiedonsiirron häiriöitä vähentävä tekniikka.
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i> . Kanavan laatua kuvaava arvo.
CSD	<i>Circuit Switched Data</i> . Piirikytkentäinen datayhteys.
DC-HSPA+	<i>Dual-carrier Evolved High-Speed Packet Access</i> . Kahden kantaallon HSPA+ -tekniikka.
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> . Diskreetti Fourier-muunnos.
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting, Terrestrial</i> . Tiedonsiirtostandardi TV-kuvan digitaaliseen siirtoon.
EARFCN	<i>E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number</i> . LTE-verkoissa käytettävä kanavanumerointi.
eNB	<i>evolved NodeB</i> . LTE-verkon tukiasema.
EPS	<i>Evolved Packet System</i> . E-UTRA:n ja SAE:n muodostama kokonaisuus.
EQ	<i>Equalisator</i> , Taasjuuskorjain.
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Access Network</i> . LTE-verkon radorajapinta.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> . Nopea Fourier-muunnos.

HSPA+	<i>Evolved High-Speed Packet Access.</i> UMTS-verkon päivitys nopeampaan tiedonsiirtoon.
HSS	<i>Home Subscriber Server.</i> Mobiiliverkon käyttäjätietokanta.
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform.</i> Käänteinen diskreetti Fourier-muunnos.
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform.</i> Käänteinen nopea HSPA+ -tekniikka.
IMS	<i>IP Multimedia System.</i> Arkkitehtuuri, jonka avulla operaattorit voivat tuoda IP palveluja verkkoihinsa.
LTE	<i>Long Term Evolution.</i> Neljännen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
MCC	<i>Mobile Country Code.</i> Mobiili maakoodi.
MCSx	<i>Modulation Coding Scheme index for downlink Transport Block x.</i> Moduloinnin valintaan vaikuttava arvo.
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output.</i> Moniantennitekniikkaan liittyvä tiedonsiirto-tekniikka.
MME	<i>Mobility Management Entity.</i> LTE-verkon ohjaukseen liittyvä osa.
MNC	<i>Mobile Network Code.</i> Mobiili verkkokoodi.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing.</i> Modulointitekniikka, jossa lähetetään tietoa useilla taajuuskanavilla yhtä aikaa.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access.</i> Modulointitekniikka, jossa lähetetään tietoa useilla taajuuskanavilla yhtä aikaa.

PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio.</i> Huippu- ja keskimääräisntehon vaihtelua merkitsevä arvo.
PDCP	<i>Packed Data Convergence Protocol.</i> LTE-verkon radorajapinnan siirtotaso.
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel.</i> DL-suunnan jaettu datakanava.
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway.</i> SAE-verkossa sijaitseva yhdyskäytävä
PMI	<i>Precoded Matrix Indicator.</i> LTE-verkossa käytettävä signaali verkon parametrien ohjaukseen.
PSD	<i>Packet Switched Data.</i> Pakettikytkentäinen datayhteys.
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel.</i> UL-suunnan ohjauskanava.
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel.</i> UL-suunnan datakanava.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation.</i> Modulointitekniikka
QoS	<i>Quality of Service.</i> Datasiirron priorisointiin liittyvä tekniikka.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying.</i> Modulointitekniikka.
RB	<i>Resource Block.</i> Resurssilohko. LTE-tekniikan pienin lähetettävä elementti.
RE	<i>Resource Element.</i> Resurssielementti. LTE-tekniikan pienin määritelty dataelementti.
RI	<i>Rank Indicator.</i> Tukiasemaan liittyvä signaali.
RLC	<i>Radio Link Control.</i> LTE-verkon ohjaustaso.
RRC	<i>Radio Resource Control.</i> Radioresurssiohjaukseen liittyvä taso.

RRM	<i>Radio Resource Management</i> . Radioresurssiohjain.
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i> . Vastaanotetun signaalin tehotasoa ilmaiseva suure.
SAE	<i>System Architecture Evolution</i> . LTE-verkon runkoverkko.
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> . Moduloointitekniikka
S-GW	<i>Serving Gateway</i> . SAE-verkon ohjausyhdykäytävä.
SIMO	<i>Single Input/Multiple Output</i> . Moniantennitekniikkaan liittyvä tiedonsiirto- tekniikka.
SISO	<i>Single Input/Single Output</i> . Moniantennitekniikkaan liittyvä tiedonsiirtotek- niikka.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> . Signaali-kohinasuhde.
TAC	<i>Tracking Area Code</i> . Tukiasemaan liittyvä seurantakoodi.
UE	<i>User Equipment</i> . Päätelaitte.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> . Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i> . UMTS-verkkojen radorajapin- ta.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> . Langaton lähiverkkotekniikka.
VoIP	<i>Voice over IP</i> . Termi tekniikoille, joilla siirretään puhetta pakettidataver- koissa.
VoLTE	<i>Voice over LTE</i> . Pakettikytkentäinen standardi puheluiden välittämiseen LTE-verkoissa.

1 Johdanto

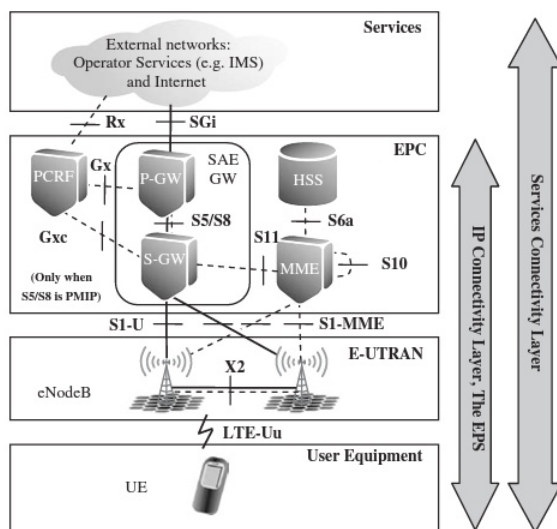
Tämän insinööriyön tarkoitus oli tutkia LTE-verkon toimintaan ja selvittää mittauksien avulla tuotantokäytössä olevan verkon parametreja. Lisäksi suoritetaan muutamia nopeusmittauksia, jotta verkon suorituskyvystä saadaan tietoa.

Toisessa luvussa käydään läpi LTE-verkon arkkitehtuuria ja siihen liittyviä elementtejä sekä selvitetään verkon yleistä toimintaa. Kolmannessa luvussa esitetään radiotien toimintaa ja siirtotekniikoita, kuten OFDMA ja SC-FDMA sekä moniantennitekniikoita. Lisäksi käydään läpi niissä esiintyviä parametreja. Neljännessä luvussa esitellään mittaukseen käytetty laitteisto ja olosuhteet mittausten aikana. Viidennessä luvussa esitellään tehtyjä mittaustuloksia sekä analysoidaan niiden sisältöä.

2 Arkkitehtuuri

Long Term Evolution (LTE) on viimeisin kehitysaskel Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) -verkkoihin, ja se sisältyy 3rd Generation Partnership Project -järjestön (3GPP) Release 8 -määrittelyyn, joka valmistui joulukuussa 2008 [1]. LTE-verkot eroavat suurelta osin sitä edeltäneistä toisen sukupolven 2G- (Global System for Mobile Communications, GSM) ja kolmannen sukupolven 3G- (UMTS) verkoista. Siinä missä GSM- ja UMTS-verkoissa puhelut siirretään piirikytkentäisenä (Circuit Switched Data, CSD) päätelaitteen (User Equipment, UE) ja verkon välillä, niin LTE-verkko on kokonaan pakettikytkentäinen (Packet Switched Data, PSD). Piirikytkentäisessä avataan kanava lähetys- ja vastaanottopäiden välille koko yhteyden ajaksi, mutta pakettikytkentäisessä peräkkäiset paketit voivat kulkeutua vastaanottajalle eri reittejä pitkin.

Ensimmäiset kuluttajien saatavilla olevat päätelaitteet eivät tue puheluita LTE-verkoissa vaan puheluiden ajaksi päätelaitteet siirtyvät käyttämään joko 3G- tai 2G-verkkoa. Jatkossa operaattoreiden on mahdollista tarjota puheluita myös LTE-verkoissa Voice over LTE eli VoLTE-standardin mukaisesti, mutta operaattoreiden täytyy silloin implementoida IP Multimedia -järjestelmä (IMS) verkkoonsa vastaamaan Internet Protocol (IP) -pohjaisista puheluista [2, s.29].



Kuva 1 Arkkitehtuuri EPS [4, s.25]

LTE-verkon rakenne koostuu radioverkko-osasta Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN) ja runkoverkon osuudesta nimeltään System Architecture Evoluti-

on (SAE). Yhdessä nämä muodostavat käsitteen Evolved Packet System (EPS), jonka tehtävänä on välittää pakettidatan kiinteän verkon yhdyskäytävästä (Gateway) päätelaitteeseen (UE). Kuvassa 1 on esitetty verkon arkkitehtuuri sekä verkon eri tasot. Kuvassa katkoviivalla esitetään verkon ohjaukseen käytettävät linkit ja yhtenäisellä viivalla on merkattu käyttäjän datan käyttämät linkit. Data kulkee suoraviivaisesti UE:sta tukiaseman (evolved NodeB, eNB) sekä yhdyskäytävien (Serving Gateway, S-GW; Packet Data Network Gateway, P-GW) kautta ja siitä eteenpäin tarvittavaan palveluun tai haluttuun verkkoon. S-GW vastaa käyttäjän datapakettien välittämisestä tukiaseman ja P-GW:n välillä. Se on vastuussa käyttäjän datasta tukiaseman vaihtojen välillä sekä toimii välittäjänä käyttäjän vaihtaessa 3G/2G -verkkoon ja takaisin. P-GW tarjoaa yhteydet toisiin pakettidataverkkoihin (mm. Internet, IMS). Ohjaustason liikenteestä verkossa vastaa Mobility Management Entity (MME), joka on yhteydessä niin Home Subscriber Server (HSS) -palvelimeen kuin myös 2G/3G-verkon ohjaimiin. MME myös seuraa käyttäjän sijaintia, kun käyttäjä liikkuu eri tukiasemien välillä.

Päätelaitteen ja yhdyskäytävän välillä voi kulkea useita eri datavirtoja, joilla on eri laatu-kriteerit (Quality of Service, QoS). Esimerkkinä käyttäjällä voi olla samanaikaisesti käynnissä Voice over IP –puhelu (VoIP), internetin selaaminen ja pikaviestisovellus, vaikka kaikilla näistä on erityyppiset vaatimukset tiedonsiirron parametreille. VoIP vaatii pientä viivettä ja viiveen vaihtelua, mutta kuluttaa vain vähän tiedonsiirtokaistaa. Internetin selaamisessa ei viiveellä ole niin suurta merkitystä, mutta suuri kaistanleveys parantaa käyttökokemusta merkittävästi. Verkoarkkitehtuurin yksinkertaistamista on myös jatkettu, kun LTE:ssä tukiasemaan (eNodeB) on tuotu lisää ominaisuuksia, jotka olivat aikaisemmin sijoitettuna runkoverkon puolella erillisinä palveluina. Verkoarkkitehtuurin madaltamisella saavutetaan pienemmät viiveet sekä saadaan säästöjä verkon rakentamiskustannuksista.

3 Radiotie

Radiotien standardoinnissa tehtiin LTE:n tapauksessa muutos aikaisempiin sukupolviin nähden ja uplink-/downlink-suuntiin (UL/DL) käytetään nyt eri tekniikoita. Downlink-tekniikaksi valittiin Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) ja Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) puolestaan uplink-tekniikaksi. OFDMA on laajennus Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) -tekniikkaan, jota käytetään monessa muussakin tiedonsiirtotekniikassa mm.

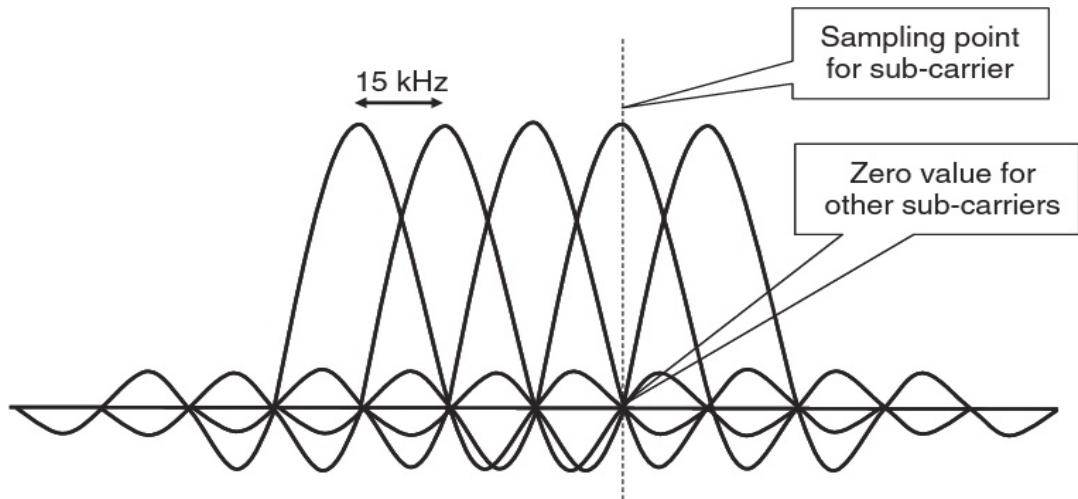
ADSL, DVB-T, WLAN, vain muutamia mainitakseni. SC-FDMA -tekniikka sen sijaan on ensimmäistä kertaa käytössä laajemmassa mittakaavassa. Eri tekniikat valittiin erilaisien vaatimusten johdosta: OFDMA sopii hyvin downlink-suuntaan, sillä sen vastaanottimet ovat suhteellisen yksinkertaisia ja tekniikalla päästään hyvään hyötysuhteeseen. Se ei kuitenkaan sovellu niin hyvin käytettäväksi uplink-suuntaan akkukäyttöisissä mobiililaitteissa sen lähettimen suuremman tehonkulutuksen vuoksi. SC-FDMA-tekniikalla päästään pienempään tehonkulutukseen lähetyksessä, mutta se vaatii vastaanottiin equalisaattorin, joka lisää vastaanottimen tehonkulutusta [6, s.474]. Siirtotekniikat on siis valittu niin, että molemmat osat, jotka vaativat enemmän tehoa, on sijoitettu tukiaseman päähän, ja näin päätelaitteiden tehonkulutus saadaan pidettyä paremmin hallinnassa.

LTE:ssä käyttäjille jaetaan kaistaa sekä taajuus- että aikatasossa, mikä mahdollistaa hyvän spektritehokkuuden sekä korkeat datanopeudet verkon käyttäjille. LTE-verkoissa on valittavana kolme eri modulaatiotekniikkaa riippuen radio-olosuhteista. Hyvissä olosuhteissa voidaan käyttää 64-bittistä Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM) -modulaatiota. Signaalitason laskiessa seuraavana vaihtoehtona tulee 16-bittinen QAM (16-QAM) ja verkon reuna-alueilla tai muuten huonoissa olosuhteissa siirrytään Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) -modulaatioon. Nämä samat modulaatiovaihtoehdot ovat olleet käytössä jo Evolved High-Speed Packet Access (HSPA+) -verkoissa release 7 lähtien. Käytännössä valitut tekniikat hyödyntävät taajuusresurssit mahdollisimman tehokkaasti pitäen akkukäyttöisen päätelaitteen tehonkulutuksen mahdollisimman pienenä.

3.1 OFDMA

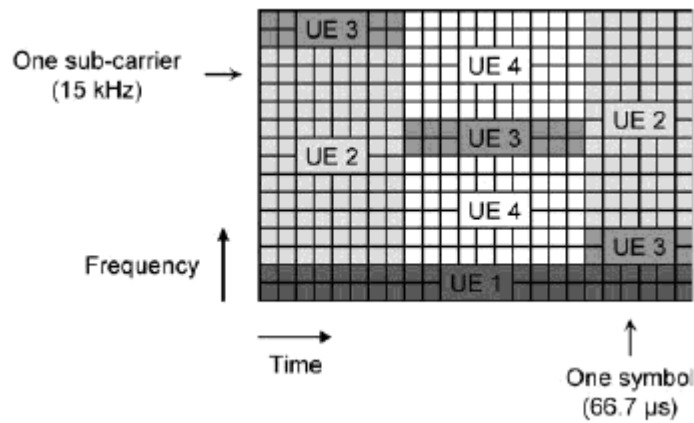
Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) perustuu tiedonsiirtokaistan jakamiseen useaan pienempään rinnakkaiseen kanavaan, joilla sitten lähetetään siirrettävä data. LTE:ssä alikanavien (sub-carrier) leveys on 15 kHz, ja nämä kanavat on sijoitettu niin, että ne eivät häiritse toisiaan ja että jokaisen kanavan keskikohdalla kaikkien muiden kanavien tehot ovat nollassa. Periaate on esitetty kuvassa 2. Tämä leveämmän kaistan jakaminen useaan pienempään osaan tuo monia etuja verrattuna että siirto tehtäisiin leveämmässä kanavassa. Selkeä etu tulee mahdollisuudesta käyttää useita eri kaistanleveyksiä, ja LTE onkin standardisoitu kuudelle eri kaistanleveydelle: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ja 20 MHz. Tämä tuo tarvittavaa joustavuut-

ta verkkojen rakentamiseen, sillä varsinkin leveämpiä taajuuskaistoja on hyvin rajallisesti saatavilla eripuolilla maapalloa. Toisaalta samainen joustavuus tuo haasteita päätelaitteiden valmistajille, sillä ympäri maailmaa toimivia LTE-laitteita ei ole vielä markkinoilla montakaan kappaletta. Kyseisten laitteiden täytyy toimia hyvin erilaisilla taajuuksilla, mikä tämä tuo suuria haasteita antenni- ja vahvistinsuunnitteluun.



Kuva 2 OFDM [4, s.69]

Toinen merkittävä etu OFDM tekniikasta saadaan siitä, että tekniikka on hyvin sopeutuvainen taajuusselektiiviseen vaimenemiseen kanavassa. Kapeat kanavat on helpompi kompensoida vastaanotossa verrattuna yhteen leveään kanavaan, jossa vain osa kanavasta on merkittävästi vaimentunut muuhun kanavaan nähden. Tekniikka yksinkertaistaa vastaanottimen rakennetta, koska verrattuna Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) -tekniikkaan vastaanottimessa ei tarvita ekvalisaattoria (EQ). Lisäksi tekniikan etuihin kuuluvat vähentyneet monitie-etenemisen häiriöt, jotka johtuvat pidentyneestä lähetysymbolin pituudesta. Tämä vähentää huomattavasti monitie-etenemisen häiriöitä ja siten kokonaiskaistan tarvetta, kun alikanavat saadaan sijoitettua mahdollisimman lähelle toisiaan. OFDMA tuo myös mahdollisuuden jakaa eri alikanavat eri käyttäjille, kun OFDM olettaa, että yksi käyttäjä saa koko kaistan käyttöönsä hetkellisesti. Kuvassa 3 on esitetty resurssielementtien jako eri käyttäjien kesken niin aika- ja taajuustasossa.

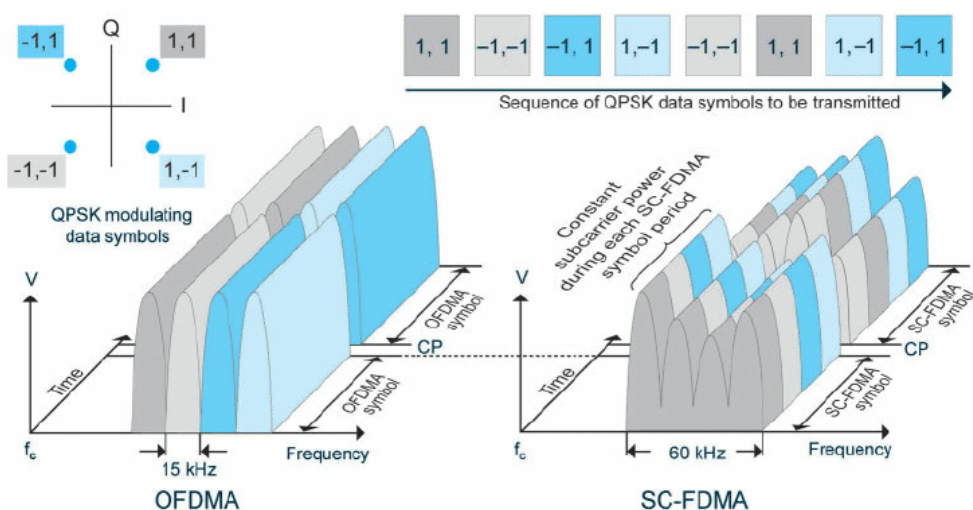


Kuva 3 OFDMA resurssienjako [5, s.66]

3.2 SC-FDMA

OFDMA ja SC-FDMA ovat sukua toisilleen ja teknisesti molemmat perustuvat FFT/IFFT -tekniikkaan, mutta SC-FDMA lisää vielä DFT/IDFT -muunnoksen koko lohkolle [4, s.76]. Tekniikalla saavutetaan yksinkertainen radiolähetin, jossa yhdistyvät OFDM-tekniikan hyvä resistanssi monitie-etenemiseen ja selkeästi pienempi tehonkulutus lähettimessä verrattuna OFDMA-tekniikkaan.

Lähetystehon pieneminen saavutetaan nimenomaan DFT-muunnoksella, joka hajauttaa symbolin energian useammalle kanta-aallolle ja pienentää siirrettävän signaalin tehonvaihtelua. Kuvasta 4 ilmenee OFDMA ja SC-FDMA tekniikoiden eroja. Oikeanpuoleinen SC-FDMA näyttää enemmän yhden kanta-aallon tekniikalta. Vasen OFDMA puolestaan lähettää selvästi useampaa kanta-aaltoa rinnakkain, ja juuri tämä aiheuttaa lähettimessä suuren Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) -arvon. SC-FDMA-tekniikan PAPR-arvo on sama kuin alkuperäisen datasymbolin, joka on siis merkittävästi pienempi.



Kuva 4 OFDMA ja SC-FDMA esitettynä aika ja taajuustasossa [8, s.63]

3.3 Moniantennitekniikat

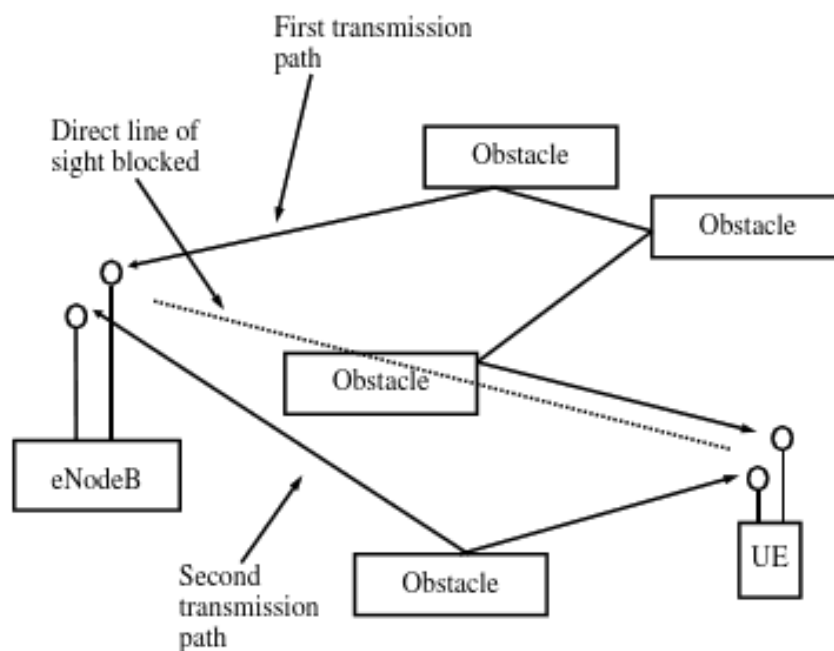
LTE-määrittely sisältää useita eri antennitekniikoita, joita voidaan hyödyntää eri tilanteissa. Standardoituja siirtotekniikoita on kokonaisuudessaan seitsemän tässä Release 8 versiossa, ja ne on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1 Siirtotasot

Siirtotaso (TM)		Tehostus	Liikkuvuus
1	Single Input/Single Output, Single Input/Multiple Output (SI-SO / SIMO): Yksi taso lähetetty ja vastaanotetaan joko kahdella tai useammalla antennilla. SIMO:n tapauksessa parantaa Signal To Noise Ratio (SNR) -arvoa.	-	Nopea
2	Sama data kaikilla kanavilla. Parantaa kantavuutta, mutta ei lisää nopeutta. (rank1)	Kantama	Nopea
3	Eri data lähetetään useampaa antennia pitkin eri koodauksella. Sopii nopeasti liikkuvalla käyttäjälle. (rank2)	Kapasiteetti	Nopea
4	Käytetään useita kanavia datan siirtoon ja hyödynnetään Precoding Matrix Indication (PMI) -kanavaa. Ei sovi nopeasti liikkuvalla käyttäjälle (yli.15 km/h)	Kapasiteetti	Hidas
5	Lähetetään samalla kanavalla dataa eri käyttäjille erottaen käyttäjät eri koodeilla. Lisää kapasiteettia verkossa	Kapasiteetti	Nopea
6	Sama data eri kanavia pitkin hyödyntäen PMI-kanavaa eli ei sovellu nopeasti liikkuvalla kohteelle. (rank1)	Kantama	Hidas
7	Hyödyntää useampaa lähettävää antennia niin että parannetaan eri antenneista lähtevää signaalia yhdistämällä eri signaaleja. Sopii nopeasti liikkuvalla käyttäjälle ja parantaa signaalin kantomatkaa. (rank1)	Kantama	Nopea

LTE-verkoissa tuotiin Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) -tekniikka laajemmin käyttöön, sillä se on käytännössä pakollinen ominaisuus LTE-laitteissa. Ainoastaan luokan 1 laitteilta ei vaadita MIMO-tekniikkaa. Kuitenkin kaikki markkinoille tulleet laitteet ovat olleet vähintään luokan 3 laitteita, joissa on käytössä 2x2 MIMO -tekniikka. 3GPP toi MIMO-tekniikan jo Release 7 HSPA+ -verkkoihin, mutta se ei ole yleistynyt niin nopeasti kuin Release 8:n mukana tuoma Dual-carrier Evolved High-Speed Packet Access (DC-HSPA+). Tämä sen vuoksi, että MIMO-toteutus on helpompi tuoda OFDMA-tekniikkaan kuin CDMA-tekniikkaan, johon UMTS-standardi perustuu [6, s.469].

Kuten jo nimestä saattaa arvata, hyödynnetään MIMO-tekniikassa useampaa antennia



Kuva 5. Periaatekuva MIMO siirrosta [9, s.266]

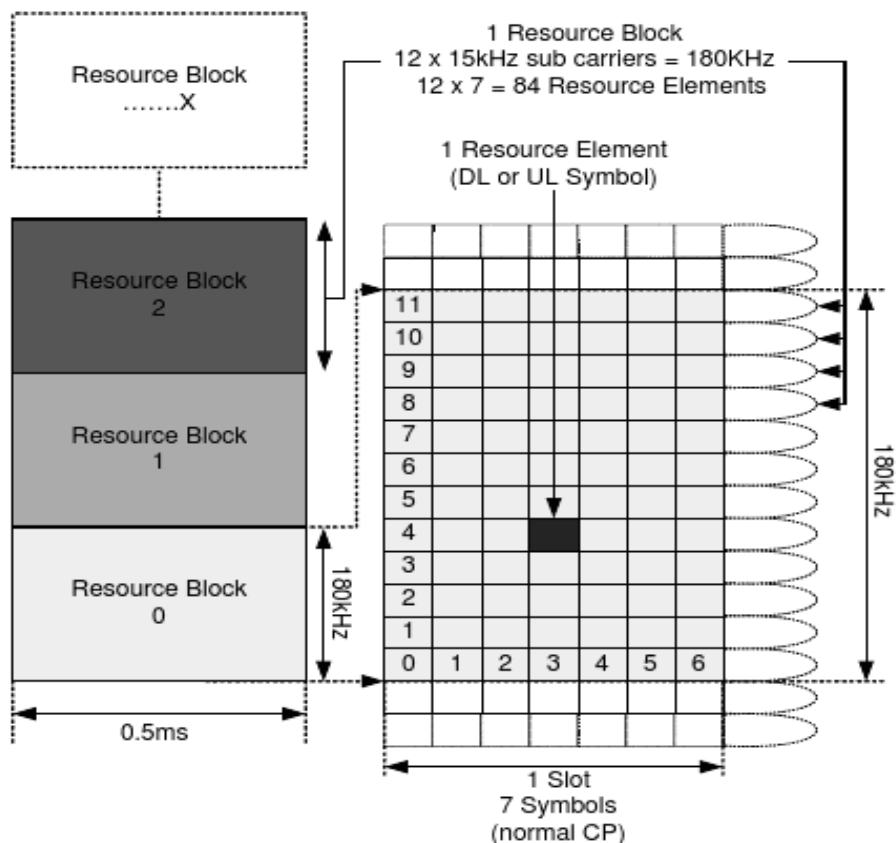
sekä tiedon lähettämiseen että vastaanottamiseen. Tekniikan ansiosta pystytään siirtämään useampaa rinnakkaista datavirtaa antennien välillä. Käytännössä MIMO:ssa hyödynnetään monitie-etenemistä, jossa radiosignaali kimpoaa esineistä/maastosta ja kulkee hiukan eripituisen matkan saapuen näin ollen vastaanottimeen hieman eri aikaan. Vastaanottimessa saapuneet signaalit yhdistetään. Kuvassa 5 on esitetty, kuinka signaalit heijastuvat eri esteistä ja näin kulkevat eri matkan antennien välillä.

Korkealla signaalitasolla hyvissä olosuhteissa MIMO-tekniikan avulla voidaan nostaa siirtonopeuksia merkittävästi. Solun reunoilla ja huonommilla signaalitasoilla MIMO parantaa kantamaa, sillä useista kanavista saadaan muodostettua parempi signaali

kohinaan verrattuna [7, s.4]. Release 8 -määrittelyn korkeimman 5-kategorian päätelaitteissa vaaditaan 4x4 MIMO -tekniikan käyttöä ja tulevaisuudessa onkin mielenkiintoista nähdä, kuinka päätelaittevalmistajat saavat implementoitua yhä kasvavan määrän antenneja mobiililaitteisiin.

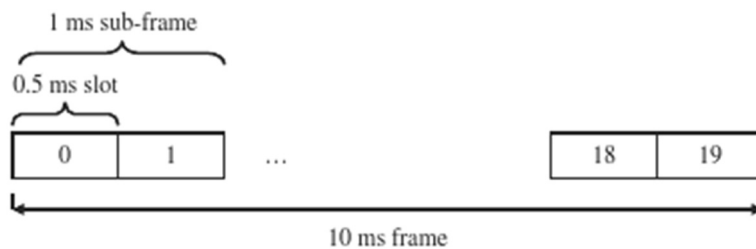
3.4 Resurssien jako

Radiokaistan jakamisesta LTE-verkossa vastaa eNB-tukiasema. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, tuodaan eri palvelut käyttäjälle EPS-datavirtojen avulla. Näiden eri datavirtojen hallinnasta vastaa Radio Resource Management (RRM) ja sen tehtävänä on vastata, että rajalliset radioresurssit ovat jatkuvasti mahdollisimman tehokkaassa käytössä sekä turvata käyttäjien tarvitsemien palveluiden laatutaso. Kuvassa 6 on esitetty verkon resurssimatriisi.



Kuva 6 Kaavio resurssimatriisista. [10, s.92]

Resurssielementti (Resource Element, RE) on pienin osoitettavissa oleva osa, ja se vastaa aikatasossa yhtä OFDMA/SC-FDMA -symbolia ja yhtä alikanavaa tajuustasossa. Pienintä lähetettävissä olevaa yksikköä kutsutaan resurssilohkoksi (Resource Block). Tämän lohkon leveys aikatasossa on 0.5 ms sekä tajuustasossa 180 kHz (12x15 kHz). Data lähetetään LTE:n radorajapinnassa 10 ms pituisina radiokehyksinä. Jokaisessa radiokehyksessä on siis 20 alikehystä, joihin sijoitetaan 0.5 ms:n pituiset lohkot. Kehysrakenne on esitetty kuvassa 7. Käyttäjille jaettavat resurssit jaetaan sekä aika- että taajuustasossa, ja käyttäjien saavuttamat datanopeudet riippuvat operaattorin verkon kaistanleveydestä sekä tietysti käyttäjän päätelaitteen signaalitasosta ja verkon muusta kuormituksesta.



Kuva 7 Kehysrakenne [4, p.87]

4 Mittaukset

Mittaus suoritettiin Metropolian Bulevardin toimipisteessä uuden kemian luokassa U205. Ohjelmistona käytettiin Ascomin TEMS Investigation 14.4 -versiota, joka oli asennettu luokan koneelle. Tutkimukset suoritettiin Saunalahden 4G-verkossa ja päätelaitteena käytössä oli Huawei E392 -modeemi, joka oli pakotettuna LTE-tilaan mittauksien ajaksi. Tarkoituksena oli selvittää verkossa käytetyt parametrit sekä tehdä muutamia nopeusmittauksia. Taulukossa 2 on esitetty käytetyn päätelaitteen tukemat verkotekniikat ja -taajuudet.

Taulukko 2 Huawei E392 -modeemin tukemat taajuudet.

Standardit ja taajuudet				
LTE <ul style="list-style-type: none"> • 2600MHz • 2100MHz • 1800MHz • 900MHz • 800MHz 	DC-HSPA+ <ul style="list-style-type: none"> • 2100MHz • 1800MHz • 900MHz 	HSPA+ <ul style="list-style-type: none"> • 2100MHz • 1800MHz • 900MHz 	UMTS <ul style="list-style-type: none"> • 2100MHz • 1800MHz • 900MHz 	GPRS/EDGE <ul style="list-style-type: none"> • 850MHz • 900MHz • 1800MHz • 1900MHz

Käytetty modeemi perustuu Qualcomm-yhtiön valmistamaan MDM9200-piirisarjaan, joka on ollut yksi suosituimmista modeemipiirisarjoista LTE-laitteissa. Piirisarja tulee Release 8 -määrittelyä ja on kategorian 3 päätelaite. Päätelaitekategorioiden tarkemmat ominaisuudet ja vaatimukset on esitetty taulukossa 3

Taulukko 3 Päätelaitekategoriat [4, s.260]

	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Peak rate downlink (approximately)	10Mbps	50 Mbps	100 Mbps	150 Mbps	300 Mbps
Peak rate uplink (approximately)	5 Mbps	25 Mbps	50 Mbps	50 Mbps	75 Mbps
Max bits received within TTI	10296	51024	102048	149776	299552
Max bits transmitted within TTI	5160	25456	51024	51024	75376
RF bandwidth	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz
Modulation downlink	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Modulation uplink	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM	64QAM
Receiver diversity	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
eNodeB diversity	1–4 tx	1–4 tx	1–4 tx	1–4 tx	1–4 tx
MIMO downlink	Optional	2 × 2	2 × 2	2 × 2	4 × 4

Testikoneen käyttöjärjestelmänä oli Windows 7 Enterprise 64-bittinen versio Service Pack 1 -päivityksellä. Modeemin mukana tullutta Mobile Partner -sovellusta käytettiin yhteyden avaamiseen koneessa. Nopeusmittauksia ajettiin verkkopohjaisen speedtest.net -palvelun avulla. Tiedonsiirtonopeuksia seurattiin myös lataamalla funetin ftp-palvelimelta Cent-OS Linuxin levykuvaa. TEMS Investigation -sovellus oli samanaikaisesti käynnissä koneella, ja se tarkkaili modeemin sekä verkon välistä sanomaliikennettä. Koska mittaus suoritettiin TEMS Investigation -ohjelman testiversiolla, oli mittauksiin käytettävissä oleva aika todella rajallinen eikä mittauksia pystytty suorittamaan eri paikoissa. Mittauksia tehtiin modeemin ollessa luokan sisätilassa sekä pitämällä modeemia USB-jatkojohdon avulla tuuletusikkunasta rakennuksen ulkopuolella muovipussilla suojattuna. Mittaustuloksia käydään läpi seuraavassa luvussa.

Speedtest.net -palvelua käyttäen suoritettiin myös nopeusmittauksia muutamissa eri sijainneissa. Nopeusmittaukset suoritettiin ilman TEMS-ohjelmistoa, joten niistä ei saa-

tu tarkkoja verkon parametrejä selvitettyä. Mittausten tarkoituksena oli selvittää minkälaisia nopeuksia tekniikalla on saavutettavissa.

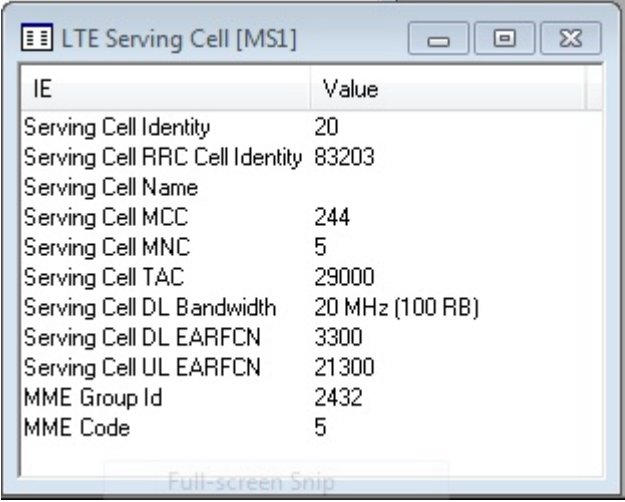
Päätelaitteena nopeustesteissä käytettiin HTC ONE -matkapuhelinta ja testattu operaattori tässäkin testissä oli Saunalahti. Puhelimessa käytetty modeemi on sekin Qualcomm-yhtiön valmistama. MDM9x15, joka on yhtiön toisen sukupolven integroitu LTE-modeemi. Kyseessä on myös 3 kategorian laite, ja suurin ero ensimmäisen ja toisen sukupolven välillä on pienentynyt valmistusprosessi. Siinä missä ensimmäisen sukupolven modeemit valmistettiin 45 nm tekniikalla on toisessa sukupolvessa siirrytty pienempään 28 nm valmistustekniikkaan. Valmistustekniikan pieneneminen näkyy piirin vähentyneenä virrankulutuksena ja täten parantuneina akunkestoina päätelaitteissa.

5 Tulokset

Mittauspisteessä signaalitasot eivät olleet mairittelevan korkeita ja käytännössä modeemi vaihtoi ajoittain yhteyden automaattisesti 3G-verkkoon, ellei sitä pakotettu käyttämään vain LTE-verkkoa. Kuvien ja kaavioiden tulkintaan on käytetty ohjelmiston mukana tullutta ohjetta [12] sekä kirjallisuudesta löytyviä lähteitä. Lopuksi esitetään muutamia erikseen ajettuja nopeusmittauksia, jotka on tehty ilman TEMS-ohjelmistoa.

5.1 TEMS

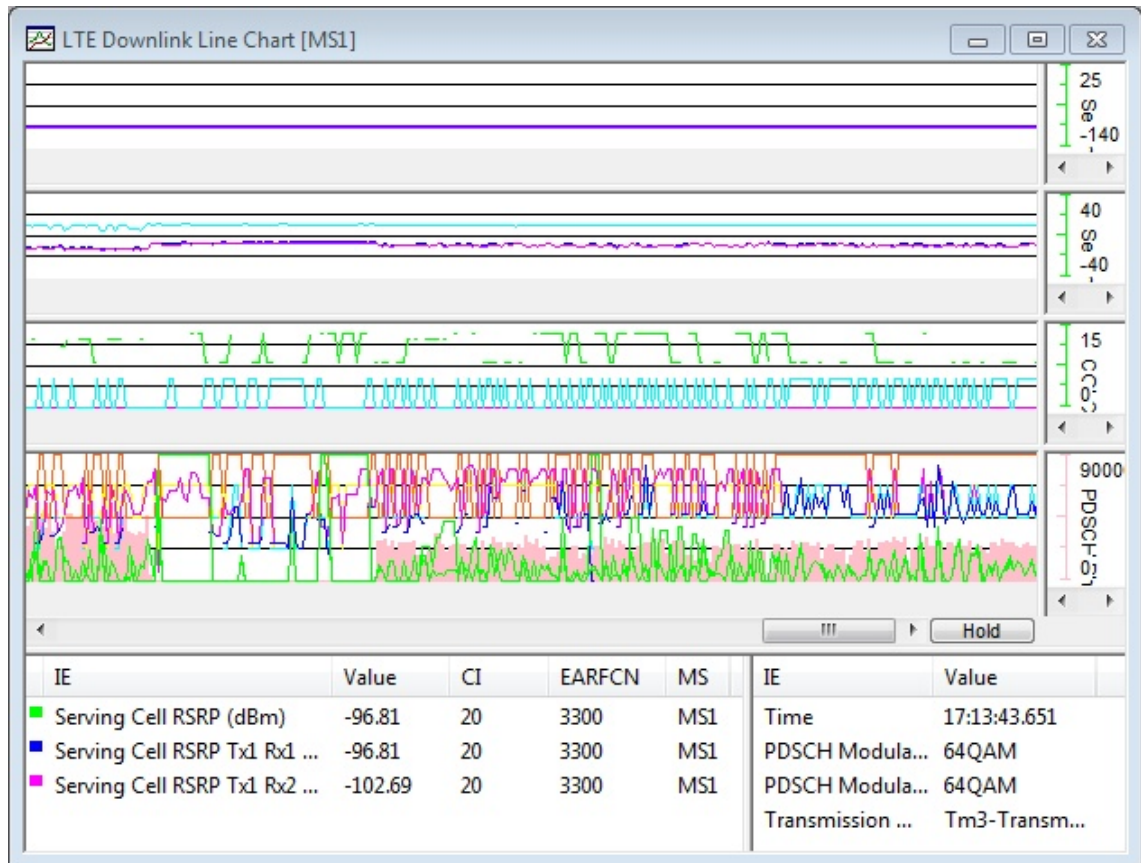
Kuvasta 8 näemme TEMS-ohjelmiston näyttämää tietoa tukiasemasta ja verkon parametreistä. Kuvassa ensimmäisen rivin arvo Serving Cell Identity kertoo tukiaseman numeron ja toinen arvo sen alapuolella tukiaseman Radio Resource Control (RRC) numeron. Serving Cell MCC (Mobile Country Code) -numerosta 244 näemme, että kyseessä on suomalainen operaattori. Seuraavalla rivillä oleva Serving Cell MNC (Mobile Network Code) kertoo, että kyseessä on Elisan verkko [13].



IE	Value
Serving Cell Identity	20
Serving Cell RRC Cell Identity	83203
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	244
Serving Cell MNC	5
Serving Cell TAC	29000
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	3300
Serving Cell UL EARFCN	21300
MME Group Id	2432
MME Code	5

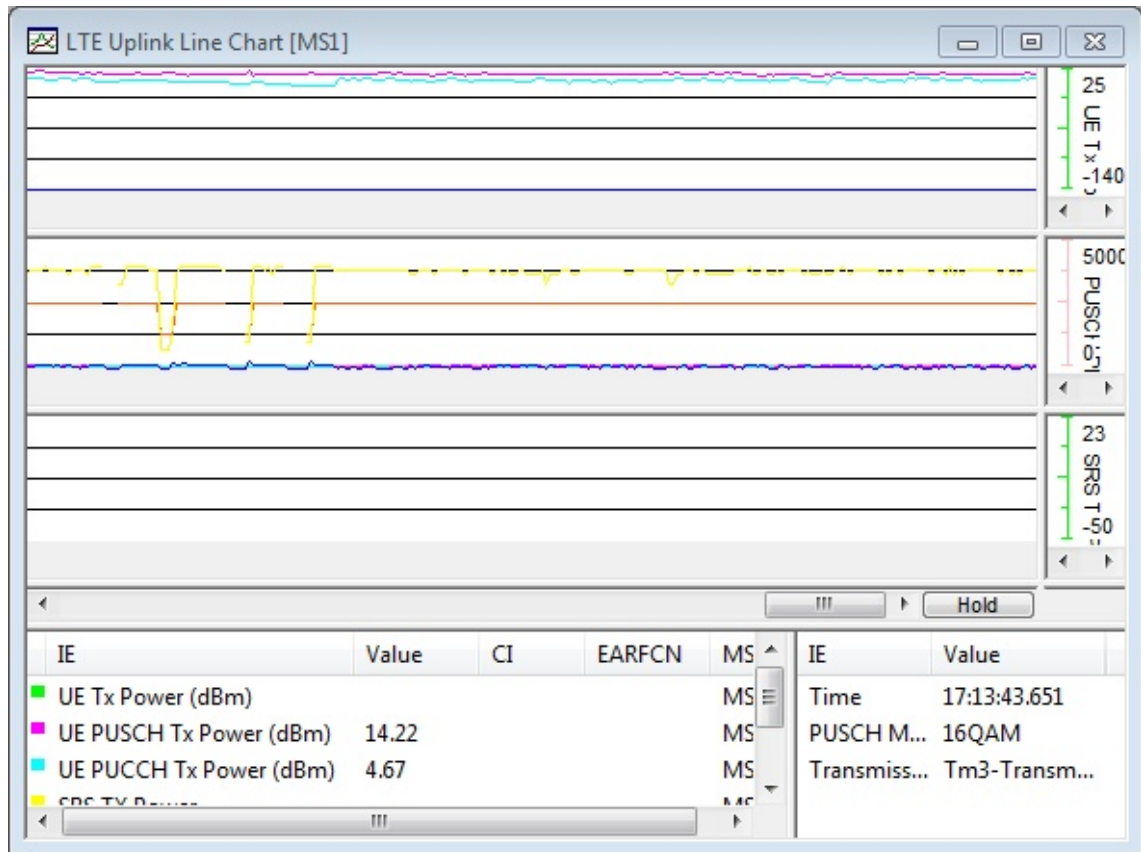
Kuva 8 TEMS-ohjelman näyttämä info tukiasemasta

Serving Cell TAC (Tracking Area Code) on kyseisen tukiaseman käyttämä paikanusaluekoodi. Verkko käyttää tätä koodia päätelaitteen hakuun saapuvien yhteyksien varalta. Yhdellä tai useammalla tukiasemalla voi olla sama koodi. Serving Cell DL Bandwidth kertoo, että käytössä on release 8 -määrittelyn maksimikaistanleveys 20 MHz ja näin käytössä on 100:n resurssilohkon levyinen kaista tiedonsiirrolle. Seuraavat EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number) -arvot kertovat mitä taajuukaistaa verkko käyttää lähetykseen ja vastaanottoon. Kuvassa näkyvät arvot DL 3300 ja UL 21300 sijoittavat taajuuskaistan kanavalle 7. Kyseinen taajuuskaista on korkein taajuuskaista, joka suomalaisille operaattoreille on jaettu, ja se toimii 2600 MHz:n taajuudella. Tämä korkeampi taajuuskaista saattaa osittain selittää suhteellisen heikkoja signaalitasoja mittausalueella, sillä näin korkea taajuus ei enää läpäise esteitä tehokkaasti, ja tukiaseman kantosäde on pienempi kuin pienemmillä taajuuksilla toimittaessa. Viimeisinä arvoina kuvasta voi nähdä MME-palvelimien tunnus-



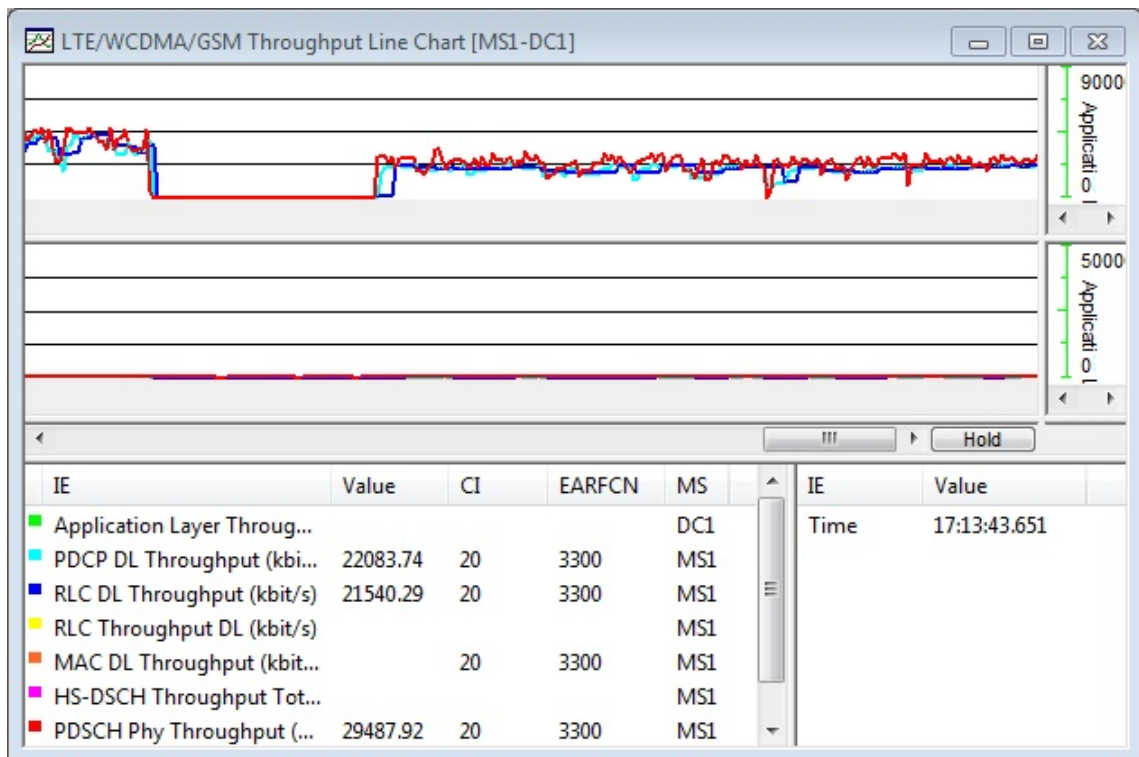
Kuva 9 Lataussuunnan kaavio

Kuvassa 9 on kuvakaappaus ohjelmiston piirtämästä latauskuvaajasta, josta selviää tukiasemasta vastaanotettuja referenssisignaalin tasoja dBm-arvoina. Vihreällä täplällä merkitty Serving Cell RSRP (Reference Signal Received Power) ilmoittaa vastaanotetun kokonaistehon, joka tässä tapauksessa oli -96.81 dBm. Seuraavana rivillä on Serving Cell RSRP Tx1 Rx1, millä ilmoitetaan RSRP-signaalin arvo lähetysantennista 1, joka on vastaanotettu antennilla 1. Viimeisellä rivillä nähdään, että sama lähetys on otettu vastaan heikompana päätelaitteen antennilla 2. Lisäksi kuvasta nähdään, että käytössä on sama tukiasema kuin edellisen sivun kuvan 8 tapauksessa. Kuvan oikeasta alakulmasta näkyy mittauksen kellonaika sekä käytetty modulointimenetelmä 64-QAM. Kuvaajan alin arvo näyttää käytetyn moniantennitekniikan siirtotason, joka kuvan tapauksessa oli Transmission Mode 3. Käytössä on siis kaksi eri kanavaa, joilla molemmilla lähetetään oma datavirta.



Kuva 10 Lähetyssuunnan kaavio

Tässä seuraavassa kuvassa numero 10 esitetään lähetyssuunnan kuvaaja samasta hetkestä kuin edellisen sivun kuvassa 9. PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) on moduloitu 16-QAM. Päätelaitteen keskimääräinen lähetysteho datakanavalle on 14.22 dBm. Ohjauskavanan PUCCH (Physical Uplink Control Channel) keskimääräinen teho on selkeästi pienempi 4.67 dBm.



Kuva 11 Väliytiskyvyn kaavio

Kuvan 11 LTE/WCDMA/GSM -väliytiskyvukaavioikkuna esittää LTE-verkon väliytiskyvyn eri protokollatasoilla. PDCP (Packed Data Convergence Protocol) näyttää kaikkien datavirtojen yhteenlasketun PDCP-protokollan vastaanottonopeuden. Sinisellä merkityn RLC (Radio Link Control) -kanavan vastaanottonopeus näkyy vastaavasti omalla rivillään. Viimeisenä arvona kuvassa on koko PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) -kanavan hetkellinen siirtonopeus, joka kuvankaappaushetkellä oli reilut 29 Mb/s.

IE	Value
Time	17:06:15.322
PDSCH Resource Block (%)	97.093750
PDSCH BLER (%)	34.210526
PDSCH MCS0	27
PDSCH MCS1	21

IE	Value
Serving Cell Identity	20
Serving Cell RRC Cell Identity	83203
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	244
Serving Cell MNC	5
Serving Cell TAC	29000
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	3300
Serving Cell UL EARFCN	21300
MME Group Id	2432
MME Code	5

Kuva 12 Resurssilohkot

Kuvasta 12 nähdään mielenkiintoinen mittaustulos verkon toiminnasta: PDSCH Resource Block (%) -rivin arvo näyttää, kuinka monta prosenttia PDSCH-kanavan resurssilohkoista päätelaitteelle oli allokoitu hetkellisesti. Käytännössä lähes koko 20 MHz:n levyinen kanava oli päätelaitteen käytössä. Seuraavan rivin PDSCH BLER % (Block Error Rate) kertoo prosentuaalisen osuuden virheellisesti vastaanotetuista resurssilohkoista. Ylemmän ikkunan kaksi alinta arvoa PDSCH MCS0 (Modulation Coding Scheme index for downlink Transport Block 0) ja PDSCH MCS1 -arvot kertovat, mikä modulaatio on käytössä. Molemmat arvot riittävät 6 bittiä/symboli eli käytössä on 64-QAM-modulaatio [14, s. 27]. Taulukko MCS-arvoista on esitetty liitteessä 1.

	17:07:47.072
	73.624062
	7.142857
PDSCH MCS0	23
PDSCH MCS1	9

Kuva 13 Resurssilohkot toinen esimerkki

Toinen esimerkki eri ajankohdan arvoista on esitetty kuvassa 13. Resurssilohkoja on nyt käytössä vähemmän, kun edellisen esimerkin yli 97 %:sta on tiputtu hiukan alemmas reiluun 73 %:iin. Lisäksi modulaatiotaso on tippunut MCS1-kanavalla 2 bittiin/symboli eli QPSK-modulaatioon. Toisen antennin vastaanotossa on selkeästi het-

kellinen häiriö. Virheellisesti vastaanotettujen resurssilohkojen määrä on myös merkittävästi pienempi tässä toisessa esimerkissä.

PDCP DL Throughput (kbit/s)	47352.99	20	3300	MS1	
RLC DL Throughput (kbit/s)	46755.05	20	3300	MS1	
RLC Throughput DL (kbit/s)				MS1	
MAC DL Throughput (kbit/s)		20	3300	MS1	
HS-DSCH Throughput Total (kbit/s)				MS1	
PDSCH Phy Throughput (kbit/s)	54164.63	20	3300	MS1	

Value	
17:08:08.929	
94.593750	
4.000000	
PDSCH MCS0	16
PDSCH MCS1	16

Kuva 14 Latausnopeuksia

Kuva 14 näyttää esimerkin hetken, jossa testattiin siirtonopeuksia verkosta lataamalla Cent-OS Linux -levykuvaa Funetin FTP-palvelimelta. Suurimmat saavutetut nopeudet vaihtelivat 50-66 Mb/s välillä ja kuvakaappauksen hetkellä PDSCH-kanavan siirtonopeus oli 54.16 Mb/s. Kuten kuvan oikeasta alareunasta näemme, 94,59 % kaikista resurssilohkoista oli allokoitu testilaitteelle. Virheellisesti vastaanotettujen resurssilohkojen BLER-arvo 4 %, joka oli tässä selkeästi pienempi verrattuna aiemmassa kuvassa 12 olleeseen 34,2 %:iin. Parempaa vastaanottoa selittää käytetty 16-QAM-modulointi, mikä nähdään MCS0/MCS1-arvoista. [14, s.27].

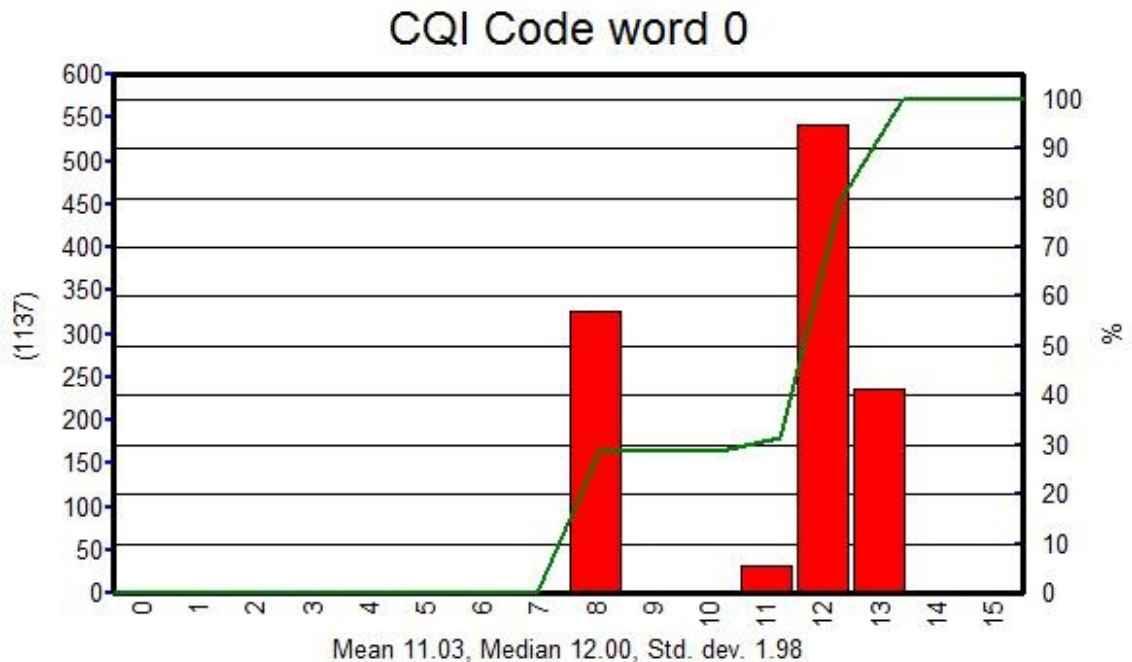
Time	Eq.	Event	Info
17:04:51.408	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm2-Transmit Div.
17:04:51.408	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm3-Transmit Div / Large Delay CDD.
17:04:51.408	MS1	EUTRAN RRC Establis...	Cause: mt-Access
17:04:51.629	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm2-Transmit Div.
17:04:54.313	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm3-Transmit Div / Large Delay CDD.
17:04:54.879	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm2-Transmit Div.
17:04:56.150	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm3-Transmit Div / Large Delay CDD.
17:04:56.529	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm2-Transmit Div.
17:05:05.328	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm3-Transmit Div / Large Delay CDD.
17:05:05.496	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm2-Transmit Div.
17:05:06.316	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm3-Transmit Div / Large Delay CDD.
17:05:06.707	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm2-Transmit Div.
17:05:11.421	MS1	EPS Transmission Mod...	Transmission mode changed to Tm3-Transmit Div / Large Delay CDD.

Kuva 15 Siirtotasojen vaihteluita

Kuvan 15 tapahtumalogi-ikkunasta näkyy, kuinka siirtotaso vaihtelee jatkuvasti TM2- ja TM3-tasojen välillä RRC-yhteyden avauksen jälkeen. Mitään muita siirtotasoja ei havaittu tehdyn mittauksen aikana. Luultavasti paremmissa olosuhteissa olisi nähty myös muita siirtotasoja.

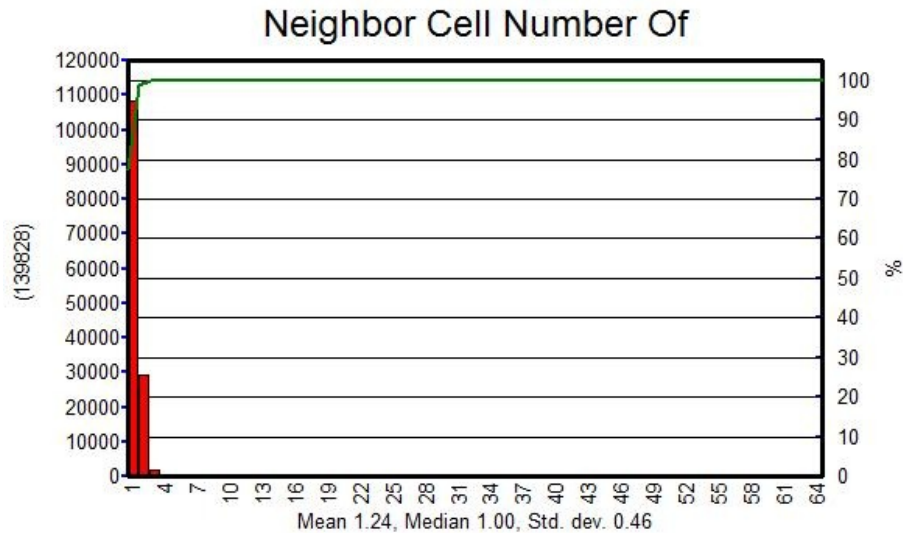
5.2 Raportin tutkiminen

Seuraavissa kuvissa tarkastellaan pientä osaa TEMS Investigation -sovelluksesta saatuja kaavioita. Kaaviot on luotu ohjelmaan rakennetulla raportointiominaisuudella, joka luo tallennetusta logitiedostosta HTML-pohjaisen raportin kuvineen. Mittauksen ajallinen kesto oli tässä tapauksessa 9 min 57 s.



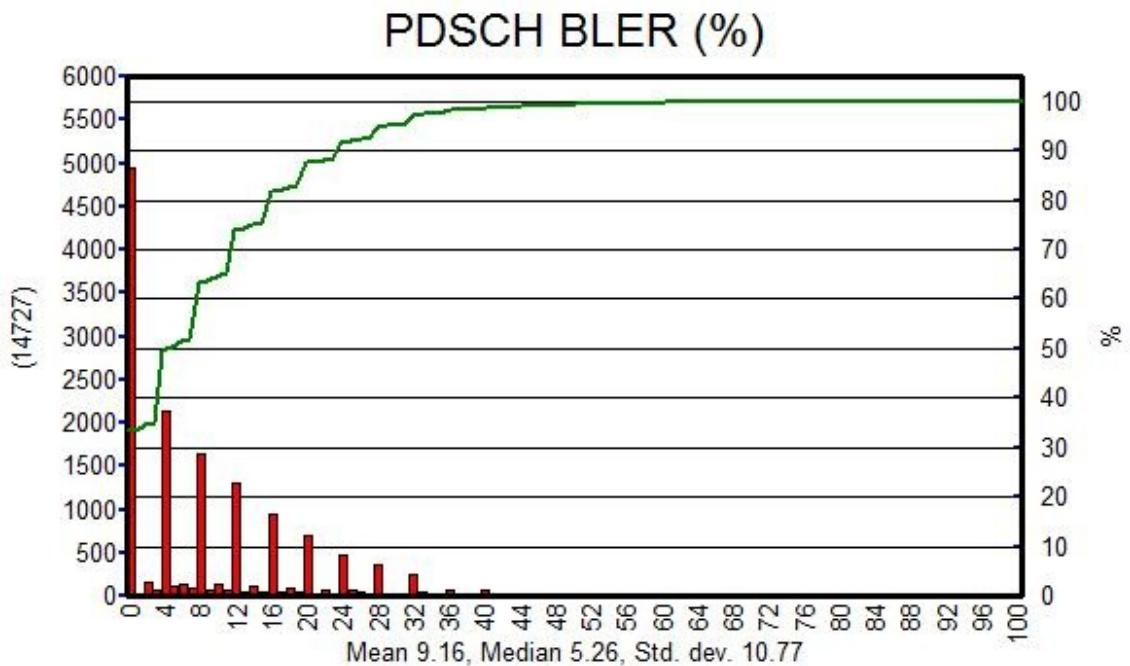
Kuva 16 CQI-arvot

Kuvan 16 kaavio esittää Channel Quality Indicator (CQI) -arvon vaihteluita antenniporissa 1. Arvon perusteella pystymme selvittämään käytetyn modulaatiomenetelmän mittauksen aikana. QPSK-modulaatiota ei tämän mittauksen aikana käytetty ollenkaan sillä sen raja-arvo on välillä 1-6. 16-QAM -modulaatiota käytettiin 30 % ajan ja se sijoittuu arvoille 7-9. Loput 70 % ajasta käytössä oli 64-QAM, joka on käytössä CQI-arvoilla 10-15 [14, s.50]



Kuva 17 Naapuritukiasemien määrä

Mittauspaikalla sijainnut verkko näyttää raportin mukaan vielä erittäin hajanaiselta. Tukiaseman ilmoittamien naapurisolujen määrä ei osoita verkon olevan kovinkaan tiheästi peitetty tukiasemilla, kuten kuvan 17 kaaviosta näkee. Yli 90 % mittausajasta tukiaseman näkyvillä oli vain yksi naapurisolu.

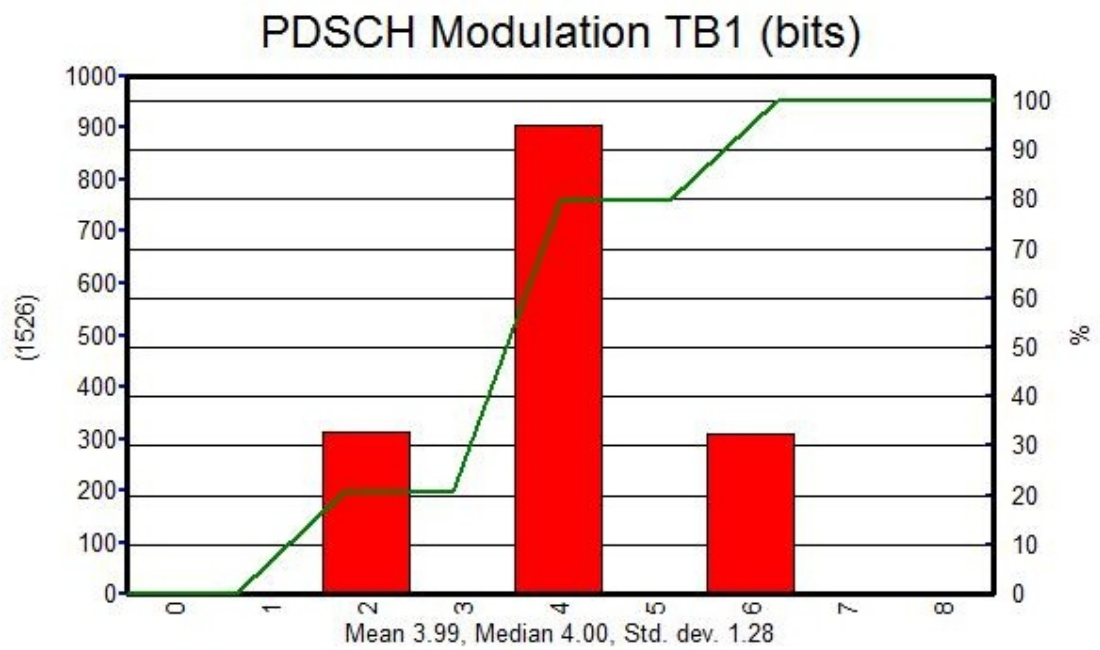
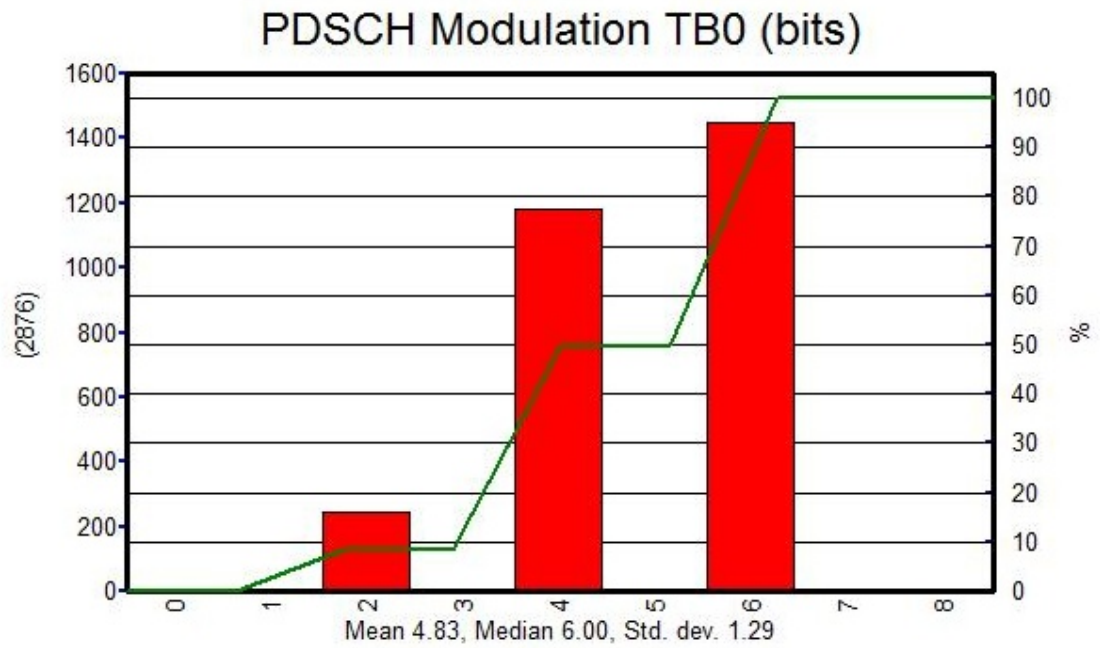


Kuva 18 Virheellisesti vastaanotettujen resurssilohkojen määrä

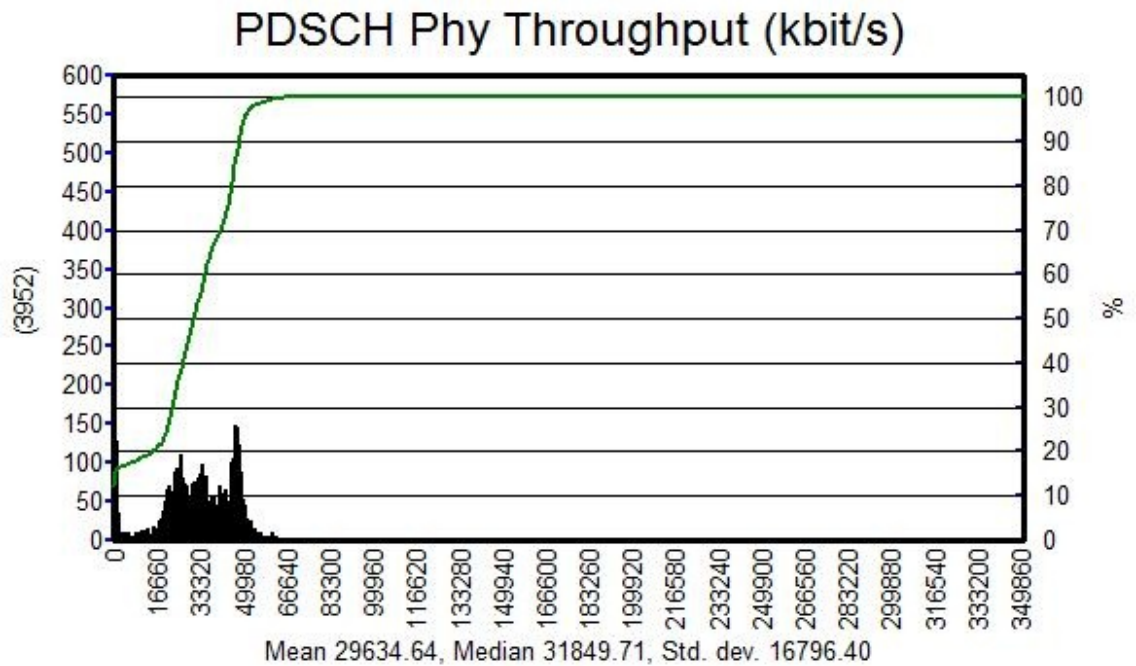
Vastaanottimeen virheellisinä tulleet resurssilohkot on kuvattu yllä olevassa kuvassa 18. Kaaviosta voi nähdä, että aikaisemmassa kuvassa 12 on esitetty tilanne, missä BLER-arvo oli yli 34 %, on todellisuudessa harvinainen tapaus, sillä yli 95 % ajasta

virheellisesti vastaanotettuja lohkoja tulee vähemmän. Mittauksen mukaan noin 65 % ajasta BLER-arvo on alle 10 %, ja täysin virheettömästi vastaanotettujen määrä oli yli 33 %.

Kuvassa 19 on esitetty PDSCH-kanavissa käytetyt modulointitekniikat molemmille kanaville. Kuvasta on huomattava, että siirtokanavien aktiivisuusajat ovat eri pituisia. Tämä ilmenee kuvan vasemmassa laidassa näkyvästä näytteiden määrästä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ensimmäinen siirtolohko on pidempään aktiivisena verrattuna toiseen rinnakkaiseen siirtolohkoon. Ero selittyy jo aiemmin kuvassa 15 esitetystä moniantennitekniikan ominaisuudesta. Radiokaistalla ilmenneen häiriön johdosta järjestelmä pudottaa siirtotasoa automaattisesti alemmas, mikä tässä tapauksessa näkyy toisen kanavan sammumisena ja siirtotason tippumisella TM2-tasolle eli käytössä on vastaanottodiversiteetti. Ensimmäinen siirtokanava on onnistunut pitämään 64-QAM-moduloinnin aktiivisena 50 % ajasta, kun toisen siirtokanavan kohdalla vastaava tilanne on vain 20 % ajasta. Vastaavat tilanteen voidaan nähdä pienimmällä QPSK-modulaatiolla, jota ensimmäisellä kanavalla on käytetty alle 10 % ajasta, mutta toisella kanavalla yli 20 %.

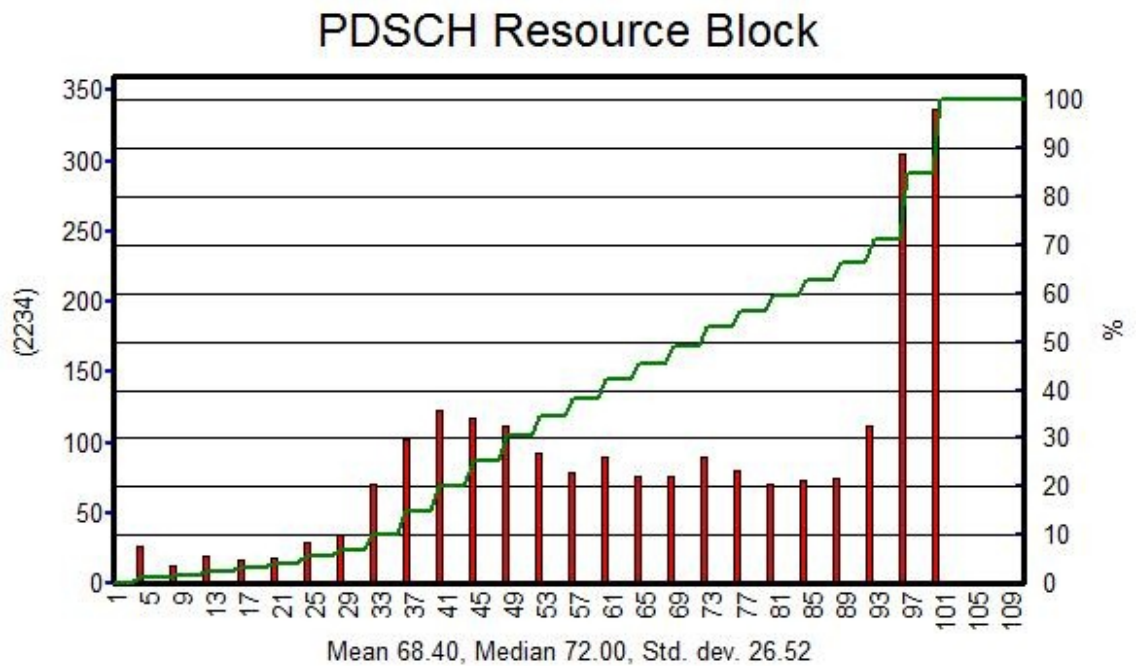


Kuva 19 Vastaanottokanavan moduloidut bitit



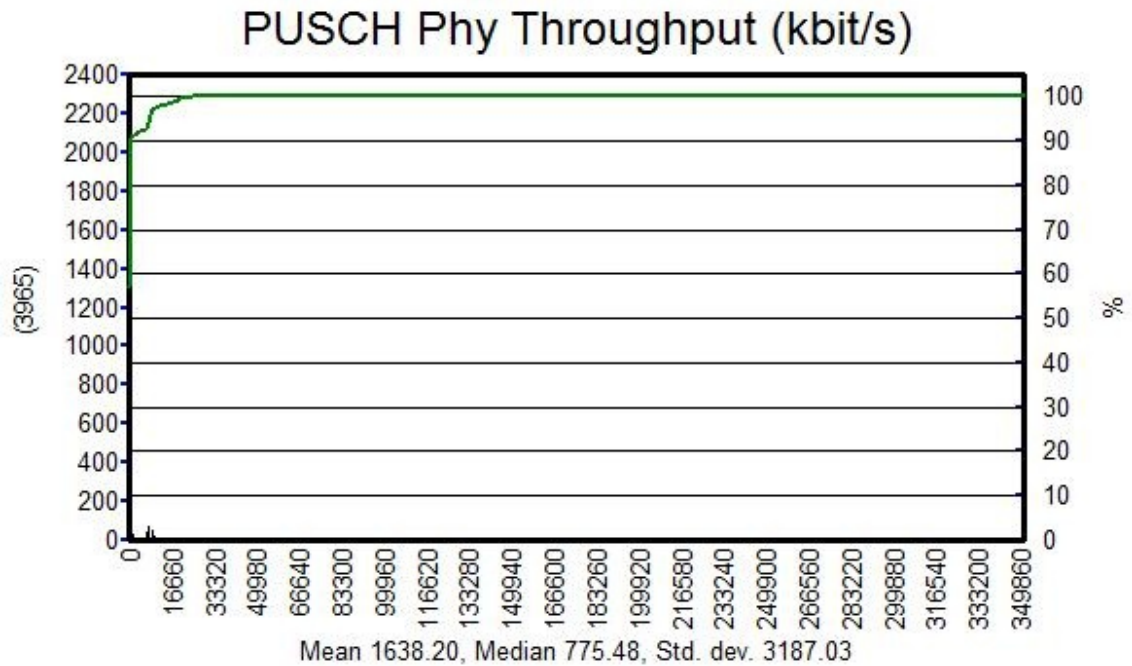
Kuva 20 PDSCH-välityskykykuvaaja

Mittauksen aikana keskimääräinen siirtonopeus oli hiukan alle 30 Mb/s ja saavutettu maksimiarvo oli 66 Mb/s. Käytetyssä liittymässä oli mittaustulosten perusteella rajoitettu maksiminopeus tasoon 50 Mb/s. Juuri rajoituksen kohdalla näkyy olevan maksimihuippu, kuten kuvasta 20 nähdään.



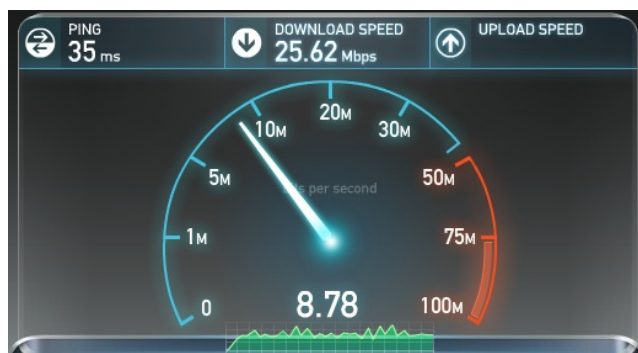
Kuva 21 Käytössä olleet resurssilohkot vastaanottokanavassa

Tukiaseman varaamien resurssilohkojen jakauma näkyy kuvassa 21. Mielenkiintoisena yksityiskohtana voidaan nähdä, että jopa 30 % ajasta tukiasema oli varannut 95 % kaikista resurssilohkoista käytetylle päätelaitteelle. Keskiarvo koko mittauksen ajalta oli 68,4 lohkoa. Mittaus olisi varmasti näyttänyt erilaiselta, jos verkossa olisi enemmän käyttäjiä. Myös tämä kuvaaja tukee edellisen kohdan havaintoa siitä, että liittymällä oli nopeusrajoitus päällä eikä täten maksimaalista verkon suorituskykyä saatu mitattua.

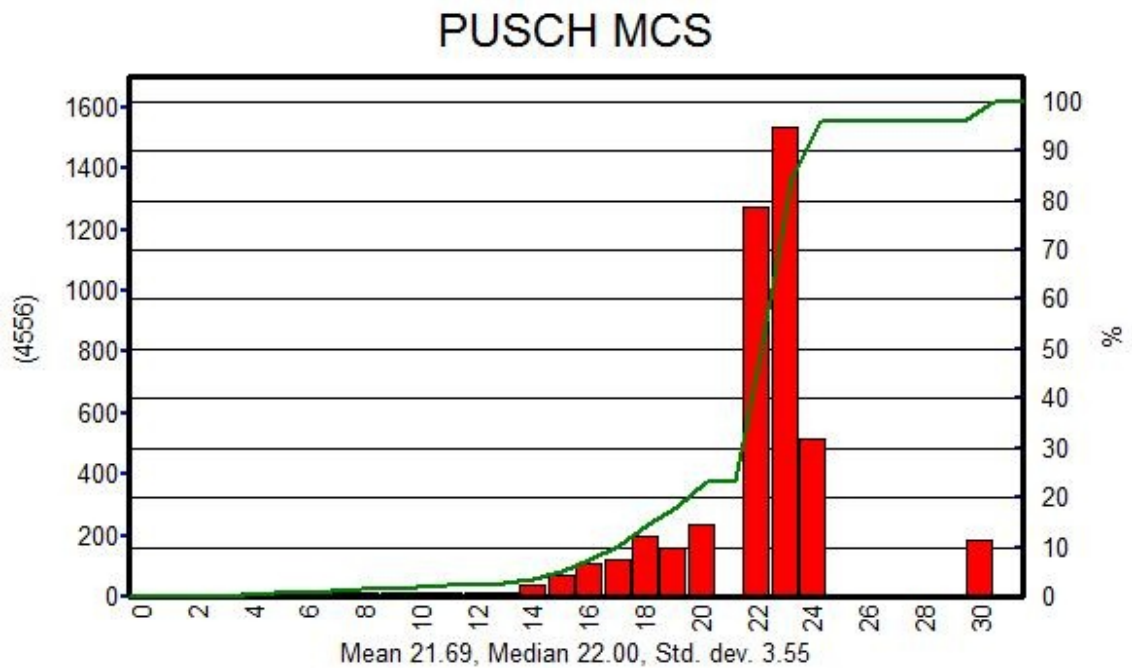


Kuva 22 Lähetyiskanavan välityskyky

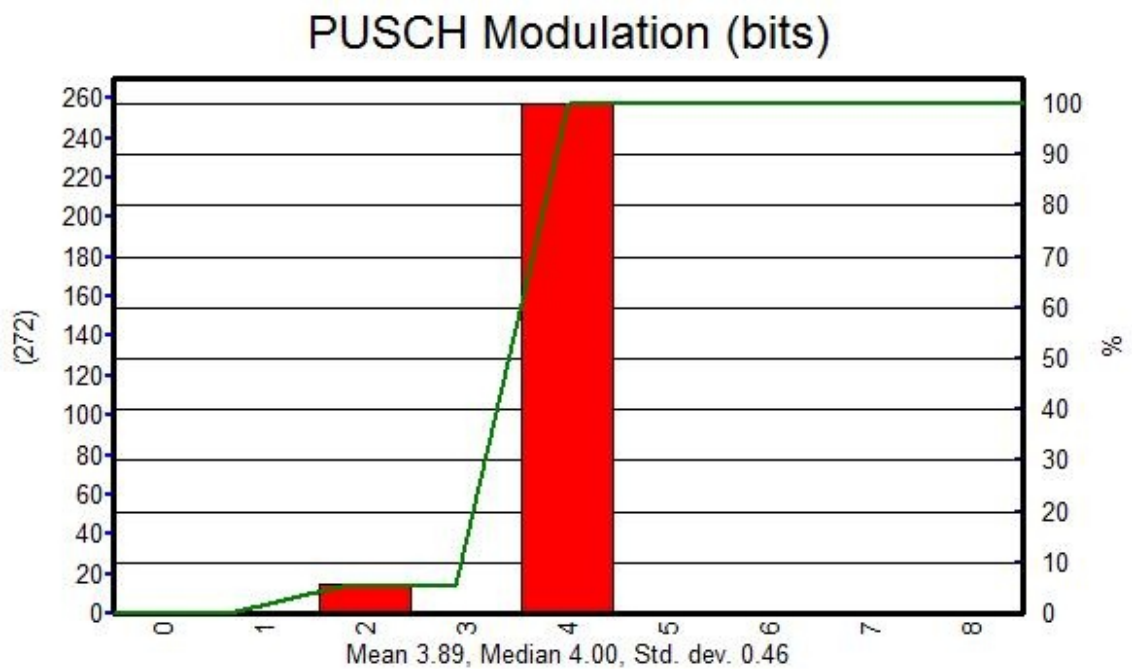
Mitatut lähetyksenopeudet päätelaitteesta verkkoon olivat pääsääntöisesti alle 10 Mb/s, kuten kuvista 22 ja 23 ilmenee. Raportin antamat keskiarvokuvaajat eivät tässä tapauksessa kerro koko totuutta, sillä lähetyksestä kestää vain pienen ajan koko mittauksen pituudesta. Latauksen nopeustestin lukemat ovat lähempänä totuutta, sillä Linux-levykuvan lataus oli taustalla käynnissä samalla, kun nopeusmittaus oli käynnissä.



Kuva 23 Speedtest.net -nopeustestaus käynnissä



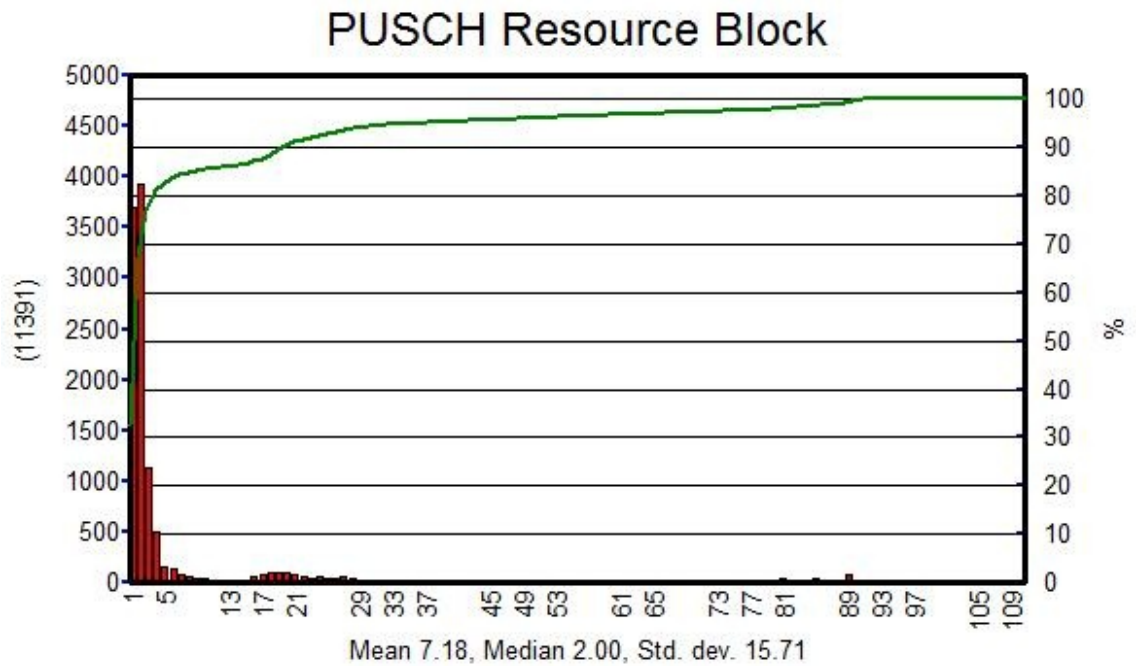
Kuva 24 Lähetyiskanavan MCS



Kuva 25 Lähetyiskanavan modulaatio

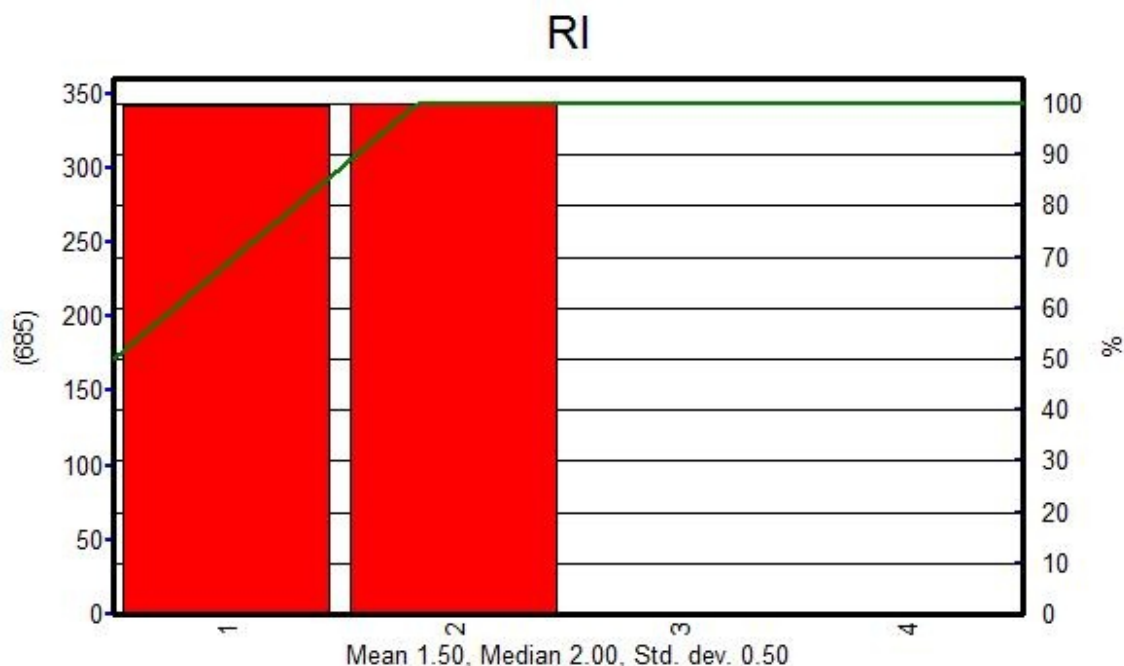
Lähetyiskanavan modulointina käytettiin yli 90 % ajan 16-QAM-modulaatiota, kuten kuvien 24 ja 25 kaaviosta ilmenee. Lähetyiskanavan MCS-arvot näyttävät, että jos päätelaitte tukisi 64-QAM-modulointia lähetyiskanavalle, olisi sitä käytetty, koska raja-arvo

tälle moduloinnille menee arvossa 21 [14, s.63]. MCS-arvot on listattu liitteessä 1. Kategoria 5:n päätelaitteilla on siis mahdollista päästä parempiin lähetysopeuksiin, koska niissä on oltava tuki 64-QAM -modulaatioon UL-suunnassa.



Kuva 26 Lähetyiskanvan resurssilohkot

Resurssilohkojen allokointi lähetyssuuntaan näyttää hyvin erilaiselta latauskanavaan nähden, kun katsotaan kuvaa 26. Yli 80 % ajasta resurssilohkoja oli allokoituna vain 5 tai vähemmän. Tämäkin johtuu tehdyn mittauksen pitkästä kestoista itse lähetysopeuden testiin käytettyyn aikaan nähden.



Kuva 27 Rank Indicator

Siirtokanavaindikaattorin arvot näkyvät kuvasta 27. Arvot ovat jakautuneet tasan puoleksi eli aivan kuten aiemmassa kuvassa 15 näimme, vaihteli päätelaite jatkuvasti siirtotasojen TM2 ja TM3 välillä. Päätelaite ilmaisee tukiasemalle Rank Indicator (RI) -arvolla sen vastaanottaman signaalin laatutasoa. Näin tukiasema osaa tehdä päätöksen lähettääkö päätelaitteelle yhtä vai useampaa eri kanavaa.

5.3 LTE-verkon nopeusmittauksia

Tuloksissa esitettyihin nopeusmittauksia kerättiin yhteensä 46kpl LTE-verkossa tehtyä nopeustestiä. Mittaukset oli suoritettu 10.08.2013 – 27.11.2013 välisenä ajanjaksona. Mittauksen ajankohdat on pyritty valitsemaan niin, että on saatu mukaan hiljaisimpia sekä ruuhkaisempia ajankohtia. Ruuhkaisimpia mittauksia suoritettiin Kampin kauppakeskuksessa iltaruuhkan aikaan kello 16 jälkeen. Parhaimpia nopeuksia saavutettiin tekemällä mittauksia aamuyöstä tuusulalaisessa lähiössä noin parinsadan metrin päässä tukiasemasta. Kaikista 46:n mittauksen arvoista laskettiin keskiarvot ja haettiin maksimi- ja minimi-arvot taulukkoon 4. Kaikkien mittausten keskimääräiseksi latausnopeudeksi saatiin 51 Mb/s ja hitainkin siirtonopeuden arvo oli lähes 15 Mb/s. Lähetyksen nopeuden keskiarvokin oli lähes 20 Mb/s, mutta lähetyksenopeudessa oli selkeästi suu-

rempaa vaihtelua ja minimi arvo olikin vain 300 kb/s. Viiveiden osalta LTE-tekniikka näyttää selkeältä parannukselta aiempiin 3G verkkoihin nähden. Suurin mitattu viive oli vain 50 ms ja keskiarvo testeistä oli 35,5 ms. 3G verkoissa yleisesti viiveiden vaihtelut ovat huomattavasti suurempia.

Taulukko 4 Nopeustestien tulokset

	Keskiarvo	MAX	MIN
DL (Mb/s)	51.06	102.40	14.67
UL (Mb/s)	19.83	45.12	0.32
Ping (ms)	35.5	50	21

6 Yhteenveto

Tavoitteena olleita mittauksia saatiin suoritettua hyvin. Verkon toimintaa ja sen parametrejä saatiin selvitettyä mittauksen ja ohjelmistosta saatavan raportin avulla. TEMS Investigation -ohjelman ominaisuuksista en tässä työssä saanut selvitettyä kuin pelkän pintaraapaisun verran. Ohjelman sekä mitatun LTE-verkon monikerroksisuus teki työstä ajoittain haasteellista. Osaan ilmoitetuista arvoista oli vaikea löytää kunnollista selitystä, ja huomasin itse sen kuinka monesti luulin arvon tarkoittavan jotain muuta kuin mitä se lopulta olikaan. Loppujen lopuksi sain kuitenkin selvitettyä verkon toimintaa sekä sille ominaisia suorituskykyarvoja.

Nopeusmittauksien esittämät suorituskykyarvot ovat mielestäni erittäin hyviä, ja LTE näyttää tuovan apua jatkuvasti nouseviin mobiilidatasiirron määriin. 3G-verkon uusimilla versioilla päästään lähelle samoja siirtonopeuksia, mutta LTE:n ominaisuus – hyvä sopeutuminen erilevyisiin taajuuskaistoihin helpottaa jatkossa kapasiteetin lisäämistä verkkoon.

Jatkossa työstä voisi helposti tehdä jatkotutkimuksen, jossa vertailtaisiin useamman eri operaattorin verkkoja ja niiden suorituskykyä keskenään. Tulevaisuudessa olisi erittäin mielenkiintoista toistaa suorituskykymittaukset, kun LTE-verkossa on selkeästi enemmän käyttäjiä. Tällöin käytössä olevia resursseja on varmasti rajallisemmin kuin mitä mittauksissani nyt sain huomata.

Lähteet

- 1 3GPP - LTE." 2008. 5 Nov. 2012 <<http://www.3gpp.org/LTE.>>. (Viitattu 18.11.2013).
- 2 Poikselkä, Miikka; Holma, Harri; Hongisto, Jukka. Voice over LTE (VoLTE). Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- 3 3GPP - IMS." 2008. 5 Nov. 2013 <<http://www.3gpp.org/IMS.>> (Viitattu 18.11.2013).
- 4 Holma, Harri; Toskala, Antti. LTE for UMTS : Evolution to LTE-Advanced (2nd Edition). Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- 5 Cox, Christopher. Introduction to LTE : LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications (2nd Edition). Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- 6 Holma, Harri; Toskala, Antti. WCDMA for UMTS : HSPA Evolution and LTE (5th Edition). Location: Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- 7 Le, Khoa N. (Editor). Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Diversity for Future Wireless Systems. UAE: Bentham Science Publishers, 2012.
- 8 Rumney, Moray (Editor). LTE and the Evolution to 4G Wireless : Design and Measurement Challenges (2nd Edition). Somerset, NJ, USA: Wiley, 2013.
- 9 Sauter, Martin. From GSM to LTE : An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- 10 Tolstrup, Morten. Indoor Radio Planning : A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE (2nd Edition). Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- 11 Lecture 8 – Radio Resource Management in LTE System. Aalto Yliopisto https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-72.3260/luennot/S-72_3260_lecture_8.3260_2012_l8.pdf (Viitattu: 18.11.2013).
- 12 TEMS Investigation 14.1 IEs and Events. Ohjelmiston ohjetiedosto Ascom 2012 (Versio 1.0).
- 13 Mobile Country Codes (MCC) and Mobile Network Codes (MNC) Verkkosivusto: <http://www.mcc-mnc.com/> (Viitattu 18.11.2013).
- 14 3GPP Specification 36.213. V9.2.0 (Viitattu 18.11.2013) <[http://www.3gpp.org/DynaReport/36213.htm.](http://www.3gpp.org/DynaReport/36213.htm)>

MCS-taulukko

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	TBS Index I_{TBS}
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	reserved
30	4	
31	6	