



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO KESKIKASTARI

Matkapuhelinverkkojen kuuluvuusmittaukset energiatehokkaissa rakennuksissa
Diplomityö

Tarkastajat: professori
Mikko Valkama, TkT Jarno Niemelä
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa
9. tammikuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

KESKIKASTARI, MIKKO: Matkapuhelinverkkojen kuuluvuusmittaukset energiatehokkaissa rakennuksissa

Diplomityö, 71 sivua, 32 liitesivua

Syyskuu 2014

Pääaine: Langaton tietoliikenne

Tarkastajat: professori Mikko Valkama, TkT Jarno Niemelä

Avainsanat: Kuuluvuus, kuuluvuusongelmat, kuuluvuusmittaukset, energiatehokas rakentaminen, passiivienergiatalot, uudet talot, vanhat talot, kerrostalot, rivitalot

Tiukentuneiden energiansäästötavoitteiden vuoksi Suomessa rakennetaan entistä energiatehokkaampia taloja. Tämä tarkoittaa käytännössä eristepaksuuden kasvattamista eli entistä paksumpia seinärakenteita sekä selektiivikalvojen asentamista rakennusten ikkunoihin. Samalla mobiiliverkoissa uusien verkkotekniikoiden myötä on siirrytty käyttämään entistä korkeampia taajuusalueita, joiden kyky läpäistä rakenteita on entistä heikompi. Näiden seikkojen yhteisvaikutuksena mobiiliverkkojen kuuluvuus uusissa rakennuksissa on paikoin romahtanut. Asian vakavuuteen on kiinnitetty huomiota vasta kun asukkaat ovat alkaneet huomata ongelmia puhelin- ja tiedonsiirtoyhteisyyksissään.

Tässä diplomityössä tutkitaan kuuluvuusongelmia kirjallisuuskatsauksen muodossa, kartoitetaan ratkaisuvaihtoehtoja sekä esitellään uusia mittaustuloksia uusien ja vanhojen talojen signaalitasoista. Mittaussarjassa mitattiin kymmenien kohteiden sisä- ja ulkosignaalitasoa lähinnä GSM900- ja UMTS2100-tekniikoilla. Mittaustulosten perusteella uusien kerrostalojen sisäsignaalitaso on keskimäärin noin 13 dB alhaisempi kuin vanhoissa kerrostaloissa. Samansuuntaisia tuloksia saatiin rivitalojen kohdalla. Tämän lisäksi uusissa julkisissa rakennuksissa ja ostoskeskuksissa on mittaustulosten perusteella suuria kuuluvuusongelmia, jos sisätukiasemia ei ole käytössä tai ulkotukiasema ei ole rakennuksen välittömässä läheisyydessä.

Sisäkuuluvuutta rakennuksissa voidaan paikallisesti parantaa monin eri tavoin kuten poistamalla selektiivikalvo ikkunoista tai käyttämällä taajuusselektiivistä pintaa selektiivikalvossa, sekä passiivisia antenniratkaisuja hyödyntämällä. Koko talon kuuluvuuden parantamiseksi tarvitaan rakennukseen sisäverkko tai voidaan hyödyntää esimerkiksi kotitukiasemia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Signal Processing and Communications Engineering

KESKIKASTARI, MIKKO: RF Attenuation Measurements for Energy Efficient Buildings

Master of Science Thesis, 71 pages, 32 Appendix pages

September 2014

Major: Wireless communication

Examiners: Professor Mikko Valkama, D.Sc. (Tech.) Jarno Niemelä

Keywords: coverage, coverage problems, signal level measurements, energy efficient buildings, passive energy buildings, new buildings, old buildings, apartment houses, row houses

New buildings in Finland are built more energy efficiently, because of tightened energy saving requirements. This means thicker insulation layer, thicker walls and also selective surfaces on top of window glasses. Simultaneously new network technologies utilize higher frequency bands, which have higher penetration losses. These two effects combined cause that indoor coverage in new buildings has dropped dramatically in some houses. This matter has come out when residents have started to notice problems in their phone and communication connections.

This master thesis presents literature study and research that have been done in this area. There is also done some research on what kind of solutions are available in this matter. The main research focuses on a large measurement set where indoor signal levels of new and old buildings have been compared. Mainly the GSM900 and UMTS2100 techniques were measured. According to the measurements signal levels in new apartment buildings are approximately 13 dB lower than in older apartment buildings. Similar results were achieved from row houses. Public buildings and shopping malls also suffer from same kind of problems if there is no indoor base station or outdoor base station is too far away.

Indoor coverage can be improved locally in several ways like removing the selective surface from a window glass, or using frequency selective surfaces on top of a window glass, or using passive antenna solutions. To provide good coverage to a whole building an indoor network is required to be built or home base stations need to be used.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön motivaationa toimivat uusissa taloissa todetut matkapuhelinten kuuluvuusongelmat, joita on tutkittu jo aikaisemmin Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) Ari Aspin ja Jarno Niemelän johdolla PassiiviTele-projektissa. Tämä diplomityö tehtiin osana TTY:n ja Rakennusteollisuuden yhteisprojektia, jossa tutkittiin ratkaisuja uusien talojen sisäkuuluvuusongelmiin.

Tämän projektin pääpaino oli suuressa mittaussarjassa, jossa tutkittiin uusien ja vanhojen talojen sisäkuuluvuuseroa. Mittaukset suoritettiin pääasiassa yhdessä Yaroslav Sydorovin kanssa. Tämän lisäksi tutkittiin kirjallisuusselvityksen avulla erityyppisiä tekniikoita sisäkuuluvuuden parantamiseen. Loppuraportin laadintaan ja tulosten analysointiin osallistuivat myös Ari Asp, Yaroslav Sydorov ja Jarno Niemelä. Kiitän heitä kaikkia työpanoksistaan, sillä ilman heidän apuaan ei projektin loppuraportti eikä tämä diplomityö olisi valmistunut. Tämän lisäksi haluan kiittää diplomityöni tarkastajia Mikko Valkamaa ja Jarno Niemelää kommentteista ja työni tarkistamisesta.

Projektin aikana minulle selvisi kuinka suuria ongelmia nykyisin matkapuhelinkuuluvuuden takaamiseen uusissa taloissa kohdistuu. Projektin päämääränä oli selvittää ratkaisuja kuuluvuusongelmiin. Tässä kuitenkin ei täysin onnistuttu, sillä yhtä kaikkiin tilanteisiin sopivaa ratkaisua ei löydetty. Kuitenkin löydettiin useita mahdollisia vaihtoehtoisia tekniikoita, joiden avulla kuuluvuutta sisätiloissa voidaan parantaa.

Kiitokset myös Joonas Säteelle, Harri Niemelälle, Ilona Koskimäelle ja Pekka Uotilalle työn oikoluvusta, vinkeistä sekä muusta avusta ja kannustuksesta työn loppuun saattamiseksi.

Tampereella 12.9.2014

Mikko Keskikastari

SISÄLLYS

Tiivistelmä.....	ii
Abstract	iii
Alkusanat.....	iv
Sisällys	v
1 Johdanto.....	1
2 Kuuluvuusongelmien taustatekijät	3
2.1 Ilmastonmuutos	3
2.2 Kioton sopimus	3
2.3 EU:n ilmasto- ja energiapaketti.....	4
2.4 Rakennettu ympäristö	4
2.5 EU:n energiatehokkuusdirektiivi.....	5
2.6 Muutokset rakennuksissa	6
2.7 Radiosignaalien ominaisuuksia	7
2.8 Matkapuhelinverkkojen kuuluvuus	8
3 Radiosignaalin etenemiseen ja energiansäätöön liittyviä tutkimustuloksia	9
3.1 Yleiset asiat	9
3.2 Signaalin etenemisen ja läpäisyn tutkimus	10
3.3 Materiaalit	10
3.4 Toistimet	11
3.5 Passiiviset antenniratkaisut	12
3.6 Taajuusselektiiviset pinnat.....	12
3.6.1 Tuottaminen ja valmistaminen	13
3.6.2 Seinät	13
3.6.3 Ikkunat	13
3.6.4 Ongelmakohtia	14
3.7 Mittaustiedon vähyys.....	14
4 Radiosignaalin etenemismittaukset rakennuksissa	15
4.1 Mittausmenetelmä	15
4.1.1 Mittaustulosten käsittely	15
4.1.2 Mittauspaikat	16
4.1.3 Mittausjärjestelyt	19
4.1.4 Ongelmia mittausmenetelmässä	19
4.2 Mittauskohteet.....	21
4.2.1 Uudet kerrostalot	22
4.2.2 Uudet rivitalot	32
4.2.3 Vanhat kerrostalot	39
4.2.4 Vanhat rivitalot.....	41
4.2.5 Uudistetut vanhat kerrostalot	43
4.2.6 Uudet liiketilat – kerrostalon ensimmäisessä kerroksessa	45
4.2.7 Uudet liiketilat – isot rakennukset.....	47

4.2.8	Julkiset rakennukset – Lukio	49
4.3	Uusien ja vanhojen talojen vertailu	51
4.3.1	Kerrostalojen vertailu.....	51
4.3.2	Uusien ja vanhojen kerrostalojen vertailu.....	52
4.3.3	Uusien ja vanhojen rivitalojen vertailu	54
4.3.4	Uusien kerros- ja rivitalojen vertailu – kerros 2 / kerros 1	56
4.3.5	Uusien kerrostalojen vertailu – liiketila/asunto katutasossa	58
4.4	Mittaustulosten yhteenveto	60
4.5	Linkkibudjettianalyysi	61
5	Yhteenveto	64
	Lähteet.....	67
	Liitteet	72

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

2G	Second generation. Toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmien yleinen nimitys. Euroopassa GSM.
3G	Third generation. Kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmien yleinen nimitys. Euroopassa UMTS.
3GPP	Third Generation Partnership Project. Matkaviestinjärjestelmien standardointi järjestö.
4G	Fourth generation. Neljännen sukupolven matkaviestinjärjestelmien yleinen nimitys. Euroopassa LTE.
BCCH	Broadcast Control Channel. Mobiiliverkkojen looginen ohjauskanava.
BDA	Bi-Directional Amplifier. Kaksisuuntainen vahvistin.
Bluetooth	Lähietäisyydellä toimiva verkkotekniikka.
CDF	Cumulative Distribution Function. Kumulataavinen jakaumafunktio.
CDMA	Code Division Multiple Access. Koodijakokanavointi.
CO ₂	Hiilidioksidi.
CPICH	Common Pilot Channel. UMTS-verkossa vakiotehotasolla lähetettävä signaali jokaiselta tukiasemalta.
dB	Desibeli. Tehojen suhde logaritmisella asteikolla.
dBm	Teho desibeleinä verrattuna yhden milliwatin tehoon.
dBi	Ympärisäteilevän antennin tehovahvistus.
DL	Down link. Alalinkki tukiasemalta päätelaitteeseen.
EU	Euroopan Unioni
FM	Frequency Modulation. Taajuusmodulaatio, käytetään esimerkiksi analogisessa radiossa.
FSL	Free Space Loss. Vapaan tilan vaimennus.
FSS	Frequency Selective Surface. Taajuusselektiivinen pinta, jonka tietyt taajuudet läpäisevät hyvin.
GSM	Global System for Mobile communications. Toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmä.
GSM900	Toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, joka toimii 900 MHz:n taajuusalueella.
GSM1800	Toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, joka toimii 1800 MHz:n taajuusalueella.
HSPA	High Speed Packet Access. UMTS-verkossa toimiva mobiililaajakaistapalvelu.
LTE	Long Term Evolution. 3GPP:n standardin mukainen järjestelmä (Release 8).
MHz	Megahertsi. Taajuuden mittayksikkö.

NF	Noise Figure. Kohinaluku desibeleissä.
NIST	National Institute of Science and Technology.
NMT450	Nordic Mobile Telephony. Pohjoismainen ensimmäisen sukupolven matkaviestinverkko, joka toimi 450 MHz:n taajuusalueella.
RF	Radio Frequency. Radiotaajuus tai radiotaajuinen.
RSCP	Received signal code power. CPICH-kanavan teho päätelaitteessa.
RSSI	Received Signal Strength Indication. Kanavateho.
Rx level	Received (Rx) level. GSM-verkossa yleislähetyskanavan vastaanotettu tehotaso.
SHO	Soft Handover. Pehmeä solunvaihto UMTS:ssä.
UHF	Ultra High Frequency. Taajuusalue.
UL	Up Link. Ylälinkki päätelaitteelta tukiasemalle.
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System. Kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä.
UMTS900	Kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, joka toimii 900 MHz:n taajuusalueella.
UMTS2100	Kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, joka toimii 2100 MHz:n taajuusalueella.
UWB	Ultra Wide Band. Erittäin laajalla taajuusalueella toimiva tekiikka.
VIRVE	Suomen viranomaisverkko.
Pikosolu	Pieni yksittäinen tukiasemasolu. Usein sisäkäytössä.
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output. Lähetykseen ja vastaanottoon käytetään useampia antennia.
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkko.

1 JOHDANTO

Nykyisin toimivat tietoliikenneyhteydet ovat keskeinen osa yhteiskuntaa, ja ne koetaan jokaisen ihmisen perustarpeiksi. Suomessa valtiovaltakin on antanut periaatepäätöksen siitä, että kaikille suomalaisille tulee tarjota yleispalveluvelvoitteen perusteella puhelinliittymä ja yhden Mbit/s laajakaistaliittymä [1]. Samalla tavoitteena on siirtyä entistä nopeampiin yhteyksiin, sillä jatkossa asiakkaille pitäisi pystyä tarjoamaan jopa 100 Mbit/s:n yhteyksiä [2]. Nykyinen tietoliikenneyhteiskuntamme on suunnannut jo vuosia kohti langattomuutta ja nykyisin valtaosa puheluliikenteestä tapahtuukin matkapuhelimiin eri matkapuhelinverkkojen välityksellä. Myös kotien verkkoyhteyksiä toteutetaan entistä enemmän langattomilla tekniikoilla. Perinteisistä lankapuhelinverkoista on siirrytty nopeasti matkapuhelinverkkoihin, ja viime vuosien aikana matkapuhelinverkot ovat niiden nopean kehityksen seurauksena muuttuneet entistä enemmän tietoliikenneverkoiksi, joissa puheen ohella kulkee myös dataliikennettä. Uusimpia neljännen sukupolven LTE (Long Term Evolution)-verkoja ei ole enää suunniteltu puheen vaan pakettimuotoisen datan välittämiseen, jonka vuoksi LTE-verkoissa joudutaan käyttämään muita tekniikoita puheliliikenteeseen.

Perinteisesti matkapuhelinverkoja on rakennettu niin, että signaalit tulevat rakennuksiin sisälle ikkunoiden ja seinien kautta. Tämä periaate on toiminut viime vuosiin saakka varsin hyvin, ja erityyppisiin sisäverkkoratkaisuihin on tarvinnut turvautua vain harvoin. Kuitenkin viime vuosina lähinnä uusissa ja energiatehokkaissa rakennuksissa on alkanut esiintyä ylitsepääsemättömiä ongelmia langattomien verkkojen käytössä. Tätä ongelmaa kasvattaa se, että nopeiden langattomien datayhteyksien käyttäminen edellyttää parempaa signaalitasoa kuin onnistuneen puhelun puhuminen.

Yksi ratkaisu näiden erittäin voimakkaasti vaimentavien rakennusten sisäkuuluvuuden parantamiseen on operaattoreiden tukiasemaverkon tiivistäminen, mutta tällöin jouduttaisiin operaattorien tukiasemaverkoston kasvattamaan alueellisesti moninkertaiseksi, eikä tämäkään välttämättä takaisi toimivia yhteyksiä rakennusten kaikissa tiloissa. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että näissä ongelmallisissa kohteissa ei voida rakennuksen sisällä hyödyntää olemassa olevaa ulkoverkkoa, vaan rakennuksiin tarvitaan jonkinlainen sisäverkkoratkaisu. Sisäverkkoratkaisu täytyy valita aina kohteen mukaan. Yleisimpiä ovat operaattorin sisätukiasema, toistin, hajautettu antenni-ratkaisu ja pienet tukiasemat. Yksittäinen henkilö voi hankkia kotiinsa passiivisen antennijärjestelmä ja mahdollisesti tulevaisuudessa ratkaisu saattaa löytyä kotikäyttöön tarkoitetuista kotitukiasemista.

Kuuluvuusongelmien määrän lisääntyminen osuu myös matkapuhelimien kehityksen vaiheeseen, jossa entistä kehittyneemmät älypuhelimet yleistyvät nopeasti. Puheli-

mien kehittyminen entisistä yhden tekniikan puhelimista monen tekniikan puhelimiksi saattaa tuoda joukon ongelmia. Ennen puhelimet olivat pääsääntöisesti yhden taajuusalueen puhelimia (esimerkiksi GSM900). Myöhemmin lähinnä kapasiteettisyyistä ja ”City-puhelinverkkojen” myötä otettiin käyttöön myös GSM1800 verkko, jolloin puhelimista tuli niin sanottuja kaksitaajuuspuhelimia. Tämän jälkeen puhelimiin on lisätty tuki myös muiden maiden taajuusalueille, jolloin ne toimivat myös matkustettaessa ulkomaille. UMTS:n yleistyessä puhelimiin tuli kahden eri tekniikan toiminnallisuudet ja samalla otettiin käyttöön uusi 2100 MHz:n taajuusalue. Viimeisen vuoden aikana LTE-verkkoja on rakennettu laajamittaisesti osittain vanhoilla 1800 MHz:n ja osittain uusilla 2600 MHz:n taajuusalueilla. Nykyiset puhelimet tukevat yleensä ainakin GSM-, UMTS- ja uusimmat myös LTE-tekniikkaa. Näiden lisäksi usein puhelimissa on myös tuki WLAN-verkoille ja Bluetoothille. Tämän seurauksena puhelimien käyttämä taajuuskirjo on iso aina GSM:n 850 MHz:stä LTE:n 2600 MHz:iin saakka. Tämän vuoksi myös puhelimien antennit tulee sovittaa eri taajuusalueille. Antennin rakentaminen suhteellisen pieneen laitteeseen matalille taajuuksille (esimerkiksi 900 MHz) on haastavaa, sillä tällöin aallonpituus on huomattavasti itse laitetta suurempi. Tällöin matkapuhelimen antennilla ei ole vahvistusominaisuuksia.

Rakennustekniseltä kannalta kuuluvuusongelmien lisääntymisen syitä ovat metallia sisältävät eristemateriaalit sekä muiden metallirakenteiden käyttö talojen rakenteissa, kuten teräsbetonissa tai metallipintaisissa julkisivuissa. Ikkunalasien pinnoille asennettujen selektiivikalvojen käyttö vaimentaa voimakkaasti ikkunoiden kautta tulevaa radio-signaalia.

Radiotekniseltä kannalta asiaan vaikuttaa suuresti entistä korkeampien taajuusalueiden (1800 MHz – GSM, LTE, 2100 MHz – UMTS/HSPA, ja 2600 MHz – LTE) käyttöönotto uusien langattomien 3G/UMTS/HSPA ja 4G/LTE tekniikoiden vaatimuksesta. Korkeampien taajuusalueiden haittapuolena on niiden heikompi rakenteiden läpäisykyky sekä lyhempi kantomatka. Tällä hetkellä langattomien verkkojen käyttämien taajuuksien pitkäaikainen kehityssuunta on edelleen ylöspäin, sillä laajojen taajuuskaistojen allokoiminen matalilla taajuuksilla ei ole yksinkertaista, vaan tarvitaan esimerkiksi Euroopan laajuista taajuussuunnittelua [3]. Viime aikoina poikkeuksia tähän suuntaukseen on ollut, sillä perinteisen UMTS2100:n rinnalle on tullut UMTS900, joka on mahdollistanut UMTS-verkkojen laajentamisen myös taajamien ulkopuolelle. Tämän lisäksi entisten analogisten TV-lähetysten matalia taajuusalueita (700 MHz ja 800 MHz) suunnitellaan siirrettäväksi matkaviestinverkkojen käyttöön, joista 800 MHz:n taajuusalueen taajuudet on vastikään huutokaupattu Suomessa DNA:lle, Elisalle ja TeliaSoneralle. Tämän lisäksi Suomessa entistä NMT450 verkon 450 MHz:n taajuusaluetta ollaan jälleen ottamassa käyttöön LTE-tekniikalla. Matalista taajuusalueista ei kuitenkaan ole pitkän aikavälin ratkaisuksi, sillä uusia leveitä taajuuskaistoja tarvitaan lisää jatkuvasti. Tällä hetkellä kiinnostuksen kohteena on muun muassa 3500 MHz:n taajuuskaista.

2 KUULUVUUSONGELMIEN TAUSTATEKIJÄT

Tässä luvussa käsitellään taustoja sille, miksi kuuluvuusongelmat ovat nousseet esiin viime vuosina. Luvussa taustoitetaan ilmastonmuutosta, energiatehokkuutta ja muita radiokuuluvuuteen vaikuttavia muutoksia, joita on tapahtunut viimeisten vuosina.

2.1 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos on ollut puheenaiheena Suomessa ja maailmalla jo vuosia, ja siihen kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Ilmastonmuutoksen suurimpana syynä pidetään ihmisten aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen, erityisesti hiilidioksidin (CO₂), määrän kasvua ilmakehässä. Arvioidaankin, että maapallon keskilämpötila tulee nousemaan noin kahdesta kuuteen celsiusastetta, jos kasvihuonekaasupäästöjen määrän kasvu säilyy nykyisellään. Tästä voi seurata hyvin merkittäviä muutoksia maapallolla.

Ilmastonmuutoksessa ihmisten tuottamat kasvihuonekaasupäästöt muuttavat ilmakehän kaasukoostumusta, jolloin ilmakehä päästää hyvin auringon lämpösäteilyä maapallolle, mutta estää lämpösäteilyn poistumisen, josta seuraa ilmaston lämpeneminen. Kasvihuoneilmiö on luonnollinen ilmiö, mutta sen voimistuminen on haitallista.[4]

Ilmaston muutosta pyritään hillitsemään kansainvälisillä sopimuksilla. Yksi tunnetuimmista on Kioton ilmastosopimus. Viime aikoina on pidetty myös useita ilmastokokouksia, joissa on pyritty luomaan jatkoa Kioton sopimukselle. Euroopan unioni (EU) on ollut ilmastoasioissa edelläkävijänä ja luonut oman ilmasto- ja energiapakettinsa, jota myös Suomi EU:n jäsenenä noudattaa.

2.2 Kioton sopimus

Suomi on ratifioinut YK:n ilmastosopimuksen vuonna 1994 ja Kioton ilmastosopimuksen vuonna 2002 yhdessä muiden EU-maiden kanssa. Kioton sopimuksen mukaisesti mukana olevien maiden tulee vähentää kuuden eri kasvihuonekaasun päästöjä 5,2 % ja Euroopan unionin (EU15) on vähennettävä päästöjä 8 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2012 mennessä. Sopimuksen velvoitteet on jaettu eri maille siten, että osan maista täytyy vähentää päästöjään, mutta osa maista voi lisätä päästöjään. Suomen velvollisuus on pitää päästönsä vuoden 1990 tasolla. Kioton sopimukselle on neuvoteltu jatko Dohan ilmastokokouksessa joulukuussa 2012. Uuden sopimuksen mukaisesti toisen kauden aikana päästöjä pitäisi vähentää yhteensä 18 % ja EU:n tavoitteeksi on asetettu 20 % vuoden 1990 tasosta. [5]

Kioton sopimus sisältää useita joustomekanismeja, joiden avulla päästövähennystavoitteisiin on mahdollista päästä. Yhteistoteutuksen avulla voidaan rahoittaa päästöjä

vähentäviä toimia toisessa teollisuusmaassa. Puhtaan kehityksen mekanismin avulla teollisuusmaa voi rahoittaa kehitysmaiden päästövähennys Hankkeita tai nieluja. Edellä mainituissa mekanismeissa rahoittajamaa saa käyttöönsä kohdemaan päästöjen vähennyksen suuruisen määrän päästövähennysyksiköitä. Kansainvälisessä päästökaupassa on mahdollista ostaa päästöyksiköitä maalta, joka ei ole käyttänyt kaikkia päästöyksiköitään. [5]

YK on jatkanut ilmastoneuvotteluita, ja viimeisin ilmastokokous pidettiin Puolan Varsovassa loppuvuodesta 2013. Kokouksessa sovittiin joistakin ilmasto- ja päästövähennyslinjauksista, mutta sitovia päätöksiä ei kokouksessa saatu aikaan. Keskustelua on käyty runsaasti siitä, miten ilmastopimukset koskevat kehitysmaita ja miten hankkeita rahoitetaan. EU on ajanut tiukempaa ja nopeampaa aikataulua eri maiden päästövähennystavoitteiden ilmoittamiselle. Kokouksessa kuitenkin sovittiin, että maiden tulee antaa tietoa asiasta alkuvuonna 2015 ennen Pariisissa järjestettävää kokousta. [6]

2.3 EU:n ilmasto- ja energiapaketti

Euroopan unioni hyväksyi vuonna 2008 käännteentekevän ilmasto- ja energiapaketinsä. Sen myötä EU on ainut teollisuusmaa-alue, jolla on sitovia päästöjen vähennystavoitteita myös Kioton sopimuksen jälkeen. Paketin keskeinen sisältö on, että kasvihuonekaasupäästöjä tulee leikata vuoteen 2020 mennessä 20 % vuoden 1990 tasosta. Tavoitteeksi on myös asetettu uusiutuvien energianlähteiden käytön lisääminen 20 %:iin, energiatehokkuuden parantaminen 20 %:lla sekä biopolttoaineiden osuuden nostaminen 10 %:iin. Samalla myös päästökaupan piiriin kuuluvia päästokiintiöitä leikataan asteittain 21 %:lla vuoden 2005 tasosta. Kuitenkin kaikista päästöistä noin 60 % tuotetaan muuten, kuin päästökauppaan kuuluvissa toiminnoissa. Tähän muuhun osaan kuuluu muun muassa juuri rakentaminen, lämmitys ja asuminen. Näihin päästöihin kohdistuu paketissa 10 %:n vähennystavoite vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Näihin vähennyksiin pyritään pääsemään EU-tason säädöksillä sekä tiukentamalla energiatehokkuussäädöksiä. Suomelle on osoitettu 16 %:n päästövähennystavoite päästökaupan ulkopuolisista päästöistä vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä. [7]

Suomessa energiatehokkuuden lisäämisvaatimus vaikuttaa erityisesti rakennuksiin ja rakentamiseen, sillä Suomen ilmastolliset olosuhteet aiheuttavat suuria paineita rakennusten energiatehokkuudelle. Energiatehokkuuden parantamisen lähtökohtana pidetään 20 %:n parannusta perusrakennusmallin kehitykseen verrattuna. [8]

2.4 Rakennettu ympäristö

Rakennetulla ympäristöllä ja yhdyskuntarakenteella on suuri vaikutus ilmastomuutokseen ja energiankulutukseen. Yhdyskuntarakenne määrittelee pitkälle asumiseen ja liikumiseen kuluvan energian määrän. Rakennettu ympäristö sisältää muun muassa liikennejärjestelmät, kaiken rakennetun infrastruktuurin sekä erityyppisiä energiaratkaisuja.

Rakennetussa ympäristössä tärkeimpänä ovat asuinrakennukset, kesämökit sekä suuri kirjo erityyppisiä liike- ja toimitilarakennuksia. Rakennuskanta on yhteiskuntamme perusrakenteita ja se uudistuu hitaasti, sillä rakennusten elinkaari on pitkä. Energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta on tehokkaampaa rakentaa uusia energiatehokkaita rakennuksia kuin parantaa olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuutta. Rakennusten energian kulutukseen vaikuttavat hyvin monet seikat, eivätkä ne ole suoraan verrattavissa toisiinsa. Rakennuksen energiatehokkuuteen vaikuttaa suuresti se, kuinka paljon energiaa rakennuksessa kuluu lämmittämiseen ja viilentämiseen, mutta myös muut ylläpitokustannukset ja asukkaiden kulutustottumukset vaikuttavat oleellisesti.

Rakennukset ovat suuressa roolissa, koska Suomessa valtaosa energian käytöstä tapahtuu juuri rakennuksissa. Keskimääräisenä vuonna Suomen energian loppukäytöstä yli 40 % menee rakennuksien energiankäyttöön, mistä suurin osa kuluu rakennusten lämmittämiseen. Tämän lämmitysenergian tuottaminen aiheuttaa noin 32 % Suomen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä. Päästöt aiheutuvat joko sähkön tai lämmön tuotannossa. Rakennuksissa energiaa kuluu laitteistosähköön, kiinteistösähköön, valaistukseen, ilmanvaihtoon, lämmitykseen sekä lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Rakennusten energiatehokkuutta voidaan parantaa vaikuttamalla näihin kaikkiin seikkoihin. [9] Päästöihin vaikuttavat paljon myös käytetyt energianlähteet. Esimerkiksi sähköä voidaan tuottaa päästöttömästi tuuli- tai vesivoimaloissa, mutta lämmön tuotanto tapahtuu pääsääntöisesti polttamalla jotain fossiilista tai uusiutuvaa polttoainetta, kuten kivihiiltä, öljyä, maakaasua, turvetta tai erityyppisiä biopolttoaineita. Käytetty polttoaine vaikuttaa siis ratkaisevasti aiheutettuihin päästöihin. Sähköllä lämmitetään pääasiassa omakotitaloja ja tuotantotiloja, kun taas asuinkerrostaloissa ja palvelurakennuksissa pääsääntöinen lämmönlähde on kaukolämpö. [9]

Energiantuotantomme nojaa pitkälti eri polttoaineiden polttamiseen, ja poltossa syntyy aina päästöjä. Suomen sähköntuotannossa tavanomaisena vuonna noin puolet tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla tai turpeella, neljännes uusiutuvilla energiamuodoilla ja loppu neljännes ydinvoimalla. Kaukolämmön tuotannosta ainoastaan noin 15 % on peräisin uusiutuvista energiamuodoista ja loput tuotetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita tai turvetta. [9]

Rakennusten energiankulutukseen tulee jatkossa kiinnittää entistä enemmän huomiota ja pyrkiä laskemaan sitä määrätietoisesti. Rakennusten energiankulutus on kääntymässä laskuun uusien tiukempien rakennusmääräysten sekä energiansäästöön tähtäävän korjausrakentamisen ansiosta. [9]

2.5 EU:n energiatehokkuusdirektiivi

EU on hyväksynyt myös rakennusten energiatehokkuusdirektiivin vuonna 2010. Sen perusteella EU:n jäsenvaltioiden on pitänyt laatia omat kansalliset säädöksensä vuoden 2012 kesään mennessä. Direktiivi velvoittaa jäsenvaltiot edistämään rakennusten energiatehokkuutta sekä korjaus-, että uudisrakentamisessa. Uudisrakennuksien tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia viimeistään vuonna 2020, mutta myös korjausrakentami-

selle tulee olla selvät vähimmäisvaatimukset. Suomessa siirryttiin kohti matalaenergiarakentamista jo vuoden 2010 tiukentuneiden rakennusmääräysten myötä, ja määräykset ovat tiukentuneet edelleen vuoden 2012 rakennusmääräyksissä. Samalla myös rakennusten energiatodistusten käyttöä laajennettiin. [10]

2.6 Muutokset rakennuksissa

Viime aikoina energian hinta on vaihdellut voimakkaasti, mutta trendinä on kuitenkin ollut energian hinnan kohoaminen. Osittain tämän seurauksena rakentamisen energiatehokkuusmääräykset ovat tiukentuneet oleellisesti. Myös valtiovallan tahtotila on vähentää päästöjä energiankulutusta vähentämällä. Tämän suuntauksen taustalla on pyrkimys päästöjen vähentämiseen kansainvälisellä tasolla. Energian ja kustannusten säästämiseksi rakennukset rakennetaan entistä energiatehokkaammiksi. [11]

Pääasiassa rakennusten energiatehokkuutta on pyritty parantamaan muun muassa lisäämällä lämmöneristystä ja käyttämällä entistä monikerroksisempia ikkunoita. Kokonaisuudessaan rakennusten eristepaksuudet ovat kasvaneet ja eristeissä on siirrytty osittain villasta erityyppisiin eristelevyihin. Eristemateriaalien pinnoilla käytetään usein metallipintoja. Myös ikkunoiden lämmöneristävyyttä ja samalla asumismukavuutta on parannettu ottamalla käyttöön ikkunalasien pinnoilla selektiivikalvoja, joiden ansiosta lämpöhäviö ikkunoiden kautta pienenee merkittävästi. Samalla kun taloja eristetään tehokkaammin, tehdään niistä myös radiosignaalien näkökulmasta entistä tiiviimpiä. [11]

Varsinaisissa talojen rakenteissa tai rakennustavassa ei ole tapahtunut suuria muutoksia viimeisten vuosikymmenten aikana. Kerros- ja rivitalot sekä useimmat julkiset rakennukset rakennetaan edelleen pääosin betonisia elementtiratkaisuja käyttäen, joita-kin poikkeuksia lukuun ottamatta. Kansainvälisessä tarkastelussa betonielementtirakentaminen ei ole esimerkiksi Euroopassa niin yleistä kuin se on Suomessa. Euroopassa rakennetaan useammin paikalla muuraamalla. Paikalla muuratuissa taloissa metallin määrä rakenteissa voi olla pienempi kuin teräsbetonielementtitaloissa, jolloin myös radiosignaalit voivat edetä paremmin myös seinien läpi. [11]

Rakennusten energiatehokkuuden lisääntymisen myötä muuttuneiden rakennusmateriaalien vuoksi myös radioaaltojen eteneminen rakennusten sisäosiin on heikentynyt. Tämän seurauksena matkapuhelinverkkojen toimivuus rakennusten sisällä on heikentynyt paikoin merkittävästi. Ongelmaa on lisännyt myös entistä nopeampien verkkoyhteyksien tarjoaminen mobiiliverkkojen välityksellä, joka on tuonut markkinoille uusia tekniikoita, jotka käyttävät entistä korkeampia taajuusalueita. Ne läpäisevät heikommin rakenteita ja etenevät lyhemmälle. Näiden seikkojen seurauksena varsinkin nopeiden datayhteyksien tarjoaminen voimakkaasti vaimentavan rakennuksen sisään on varsin ongelmallista, ja joissakin tilanteissa mahdotonta ilman rakennuksen sisälle asennettavia laitteistoja.

Ongelmia seuraa erityisesti silloin, kun rakennuksen seinissä tai muissa rakenteissa käytetään yhtenäisiä metallipintoja. Tässä tapauksessa rakennus muistuttaa Faradayn

häksiä, joka ei päästä radioaaltoja sisään tai sisältä ulos. Metallia voidaan käyttää talojen rakenteissa muun muassa eristeiden pinnoilla seinissä, mutta myös pintamateriaalina julkisivussa. Perinteisesti betonielementeissä on tukirakenteena teräsraudoitus.

Yleensä ikkunat ovat olleet rakennusten parhaiten radiosignaaleja läpäisevä osa, sillä pelkän ikkunalasin vaimennus on kohtuullisen pieni. Tämä tilanne kuitenkin muuttuu, kun lasien pinnalle asennetaan selektiivikalvo tai useampia selektiivikalvoja. Selektiivikalvolla saadaan ikkunan energiatehokkuutta parannettua oleellisesti. Selektiivikalvo estää tehokkaasti lämpösäteilyn kulkemista lasin läpi, mutta sen huonona puolena on se, että radiosignaalit vaimenevat myös voimakkaasti. [11]

2.7 Radiosignaalien ominaisuuksia

Radiosignaalit etenevät hyvin vapaassa tilassa. Tällöin niihin kohdistuu ainoastaan vapaan tilan vaimennusta (Free Space Loss, FSL). Radiosignaalien signaalin sähkömagneettisten ominaisuuksien ansiosta ne pystyvät läpäisemään myös erityyppisiä esteitä, kuten seiniä, ikkunoita ja lattioita. Tällöin radiosignaali vaimentuu voimakkaammin. Eri materiaaleille voidaan määrittää erityyppisiä vaimennuskertoimia. [12][13] Signaalin vaimeneminen on voimakkaasti riippuvaista materiaalin paksuudesta ja sen muista läpäisyominaisuuksista. Eri materiaalien läpäisyä ja muita ominaisuuksia on tutkittu laajasti ja ne tunnetaan varsin hyvin. [14][15][16] Tutkimuksien perusteella eri materiaaleille on määritelty taulukossa (Taulukko 1) esitettyjä läpäisyvaimennuksen arvoja, jotka on todettu National Institute of Standards and Technology (NIST) tutkimuksissa [14]. Koska tutkimukset on suoritettu 1990-luvulla Yhdysvalloissa, niiden joukosta puuttuvat nykyisin yleisesti käytettävät uudentyyppiset materiaalit, kuten (metallipintaiset) polyuretaanilevyt tai selektiivikalvoilla varustetut ikkunalasit. Niistä ei ole kattavaa tutkimustietoa saatavilla. Tutkimustuloksista ei myöskään löydy Suomessa tyyppillisesti käytettäviä rakenteita. Esimerkiksi Suomessa rakenteiden paksuudet ovat erilaisia.

Yleisesti voidaan sanoa, että radiosignaalin vaimeneminen kasvaa käytettävän taajuuden kasvaessa. Taulukon (Taulukko 1) perusteella voidaan sanoa, että pelkällä tiilellä, selektiivikalvottomalla lasilla ja puulla eli niin sanotuilla perinteisillä materiaaleilla vaimennukset ovat pieniä. Esimerkiksi (raudoitetuilla) betonielementeillä vaimennus on hyvinkin suurta. [14] Voidaan todeta, että perinteisesti radiosignaalit ovat kulkeutuneet sisälle rakennuksiin pääsääntöisesti juuri ikkunoiden kautta, sillä ne eivät ole vaimentaneet signaalia oleellisesti.

Kuitenkaan pelkkä yksittäisten materiaalien vaimennusten tunteminen ei vielä käytännössä riitä selittämään signaalin käyttäytymistä rakennuksissa, vaan tarvitaan tietoa kokonaisvaimennuksista oikeissa rakennuksissa. Radiosignaaleilla on hyvin monia erityyppisiä keinoja edetä väliaineessa, kuten heijastus, läpäisy, sironta ja taittuminen. Näiden keinojen avulla signaalin on mahdollista kulkea myös rakennusten sisätiloihin tai tiloihin, joista ei ole suoraa näköyhteyttä tukiaseman antenneihin. Tämän seurauksena radiosignaaliin vaikuttaa suuresti myös tukiaseman sijoittuminen, signaalin tulokulma sekä rakennuksen itsensä aiheuttamat esteet. Näitä ovat esimerkiksi rakennuksessa

olevat väliseinät sekä kerrosten väliset välipohjat ja ennen kaikkea niiden rakennusmateriaalit. [17]

Taulukko 1. Eri materiaalien läpäisyvaimennuksia [dB] NIST:n mittausten perusteella eri taajuuksille. Koostettu lähteen [14] mittaustulosten perusteella.

Taajuus [MHz]/ Läpäisyvaimennus [dB]	500	1000	2000	3500	5000
Tiili (180 mm)	4	5,5	8	20	32
Tiili (180 mm) ja betonielementti (203 mm)	21	25	33	60	67
Tiili (180 mm) ja kevytlekaharkko	8	11	10	29	33
Kevytlekaharkko (2 x 203 mm)	13	17	18	25	28
Betonielementti (208 mm)	20	23	29	47	49
Raudoitettu betonielementti (203mm) 140 x 140 mm	22	28	31	50	53
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 70 x 70 mm	26	30	37	53	58
Ikkunalasi (13 mm)	1	2	3	0,5	0,5
Kuiva puu (38 mm)	2	3	3	3	3
Kuiva puu (152 mm)	5	6	9	19	20

2.8 Matkapuhelinverkkojen kuuluvuus

Matkapuhelinverkkoja suunniteltaessa pyritään jokaisella alueella sopivaan kuuluvuustodennäköisyyteen eli siihen kuinka todennäköisesti kuuluvuus on hyvä. Kuuluvuuden todennäköisyys riippuu hyvin paljon alueen rakennuskannasta, ja lähinnä siitä kuinka paljon rakennukset vaimentavat signaalia. Saman kuuluvuustodennäköisyyden saavuttamiseksi alueella, jossa on voimakkaasti vaimentavia rakennuksia tai yleensäkin runsaasti rakennuksia, tarvitaan enemmän tukiasemia. Tästä syntyy uusia ongelmia, sillä erittäin tiheän tukiasemaverkon rakentaminen ja ylläpito ei ole taloudellisesti kannattavaa. Tämän lisäksi se on radioteknisesti haastavaa ja tietyissä tilanteissa mahdotonta. [18][19]

Puhuttaessa radioverkkojen suorituskyvystä määritellään kolme olennaista ominaisuutta: peitto, kapasiteetti ja toimintakyky. Peittoa voidaan parantaa kasvattamalla tukiasematiheyttä tai käyttämällä matalampaa taajuusaluetta. Kuitenkin kapasiteetin kasvattamiseksi joudutaan sekä kasvattamaan tukiasematiheyttä, että käyttämään korkeampia taajuuksia. Periaatteena voidaankin pitää, että taajuuden kaksinkertaistaminen edellyttää tukiasematiheyden nelinkertaistamista. [18][19]

Matkapuhelinverkoissa käytettävät taajuudet ovat Suomessa GSM:ssä 900 tai 1800 MHz, 3G/HSPA-verkoissa 2100 tai 900 MHz ja LTE/WiMAX-verkoissa 1800 tai 2600 MHz. Tulevaisuudessa otetaan uusia matalampia ja korkeampia taajuusalueita käyttöön (700, 800 ja 3500 MHz). Tämän lisäksi tulee huomioida, että näiden verkkojen lisäksi on olemassa myös muita eri taajuusalueilla toimivia verkkoja, joiden kuuluvuuteen tulisi kiinnittää huomiota, kuten viranomaisverkko (VIRVE) 400 MHz:n taajuudella, sekä erityyppiset WLAN ja sensoriverkot, jotka toimivat niin sanotuilla lisensoimattomilla taajuusalueilla (muun muassa 2400 ja 5000 MHz).

3 RADIOSIGNAALIN ETENEMISEEN JA ENERGIANSÄÄSTÖÖN LIITTYVIÄ TUTKIMUSTULOKSIA

Radiosignaalien käyttäytyminen on tieteellisen tutkimuksen perusteella hyvin tiedossa, ja sitä on tutkittu hyvin paljon. Tähän liittyen on projektin puitteissa tehty kirjallisuusselvitystä. Selvityksen perusteella radiosignaalin käyttäytymistä on tutkittu pääsääntöisesti laboratorio-olosuhteissa sekä taloissa, joissa on käytetty perinteisiä rakennusmateriaaleja ja hyvin signaalia läpäiseviä ikkunoita. Näiden tutkimusten perusteella voidaankin useimmat radiosignaalin etenemisen yksityiskohdat selvittää, mutta tieteellistä tutkimusta uusista rakennuksista, joissa eristeiden pinnalla on metallikalvo ja ikkunoissa selektiivikalvo, ei ole saatavilla.

3.1 Yleiset asiat

Suomessa rakennuksissa aikaansaattava energiansäästö on erittäin kiinnostava ja ajan-kohtainen aihe, sillä suurin osa Suomen kokonaisenergian kulutuksesta kuluu juuri rakennusten lämmittämiseen. Suomessa ja EU:ssa kiinnitetäänkin entistä enemmän huomiota rakennusten energiankulutukseen, ja rakennusmääräykset ovat tiukentuneet ja tiukkenevat myös jatkossa entisestään. Tiukentuviin rakennusmääräyksiin vastaaminen edellyttää uusien ja energiatehokkaampien rakennusmateriaalien ja -tapojen omaksumista tulevaisuudessa. Suomessa muun muassa entinen Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) on osallistunut energiatehokkaiden rakennusten kehittämiseen ja tutkimukseen. [9][21][22] Tutkimuksissa uudet, metallikerroksia sisältävät rakennusmateriaalit on todettu ongelmallisiksi radiosignaaleiden etenemiselle muuallakin kuin Suomessa. Tämän pohjalta on tehty tutkimusta siitä, miten rakentaa rakennukset energiatehokkaiksi niin, että myös langattomat ratkaisut toimisivat niissä ongelmitta. Ongelman suuruutta lisää se, että rakennuksissa on alettu käyttää uusia, voimakkaasti radiosignaalia vaimentavia materiaaleja sekä samaan aikaan radiotekniikassa on siirrytty uusiin entistä korkeampaa taajuusaluetta hyödyntäviin tekniikoihin. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksena kuuluvuusongelmat ovat kasvaneet voimakkaasti. [23]

Uusien rakennuksien radioverkkojen kuuluvuusongelmat on huomattu myös pelastustoimessa. Tämä saattaa aiheuttaa hengenvaarallisia tilanteita muun muassa palomiehille, jotka eivät välttämättä saa yhteyttä radiopuhelimilla rakennuksen ulkopuolelle. Yhtenä ratkaisuna tähän ongelmaan ehdotetaan toistimia, joiden avulla kuuluvuusaluetta saataisiin laajennettua myös näihin kohteisiin. [24] Toisaalta edellä mainittu toistin ei välttämättä auttaisi muiden langattomien verkkojen kuuluvuuteen, sillä esimerkiksi

Suomessa käytettävä viranomaisverkko toimii eri taajuusalueella kuin perinteiset matkapuhelinverkot. Suomessa VIRVE-verkko käyttää taajuusaluetta 380 – 399,9 MHz [3] Tämä johtaa tilanteeseen, jossa mahdollisten toistimien tulisi kattaa hyvin laajoja taajuusalueita. Tulevaisuutta varten tarvitaan ainakin seuraavat taajuusalueet: 400 MHz, 450 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz ja 3500 MHz.

3.2 Signaalin etenemisen ja läpäisyn tutkimus

Radiosignaalien käyttäytymistä on tutkittu paljon ja niiden käyttäytymismallit tunnetaan hyvin. Tutkimustuloksia on saatavilla hyvin erityyppisistä kohteista ja eri mittausmenetelmillä tehdyistä tutkimuksista.

Radiosignaalien ominaisuuksia voidaan mallintaa monilla erityyppisillä etenemismalleilla. Niiden avulla on mahdollista laatia tarkkojakin ennusteita siitä millainen peitto milläkin konfiguraatiolla voidaan saavuttaa. Tämä kuitenkin edellyttää tarkkoja tietoja muun muassa rakennuksen materiaaleista, maastonmuodoista ja rakennuksien korkeuksista. Mallinnusmenetelmät voidaan jakaa peruseräiteidensä perusteella empiirisiin (kokemusperäisiin), semiempiirisiin (osittain kokemusperäisiin) ja deterministisiin malleihin, joita kaikkia käytetään yleisesti. Malleja on kehitetty sekä ulkotiloihin että sisätiloihin sopiviksi. Etenemismalleja voidaan säätää erityyppisten parametrien avulla eri käyttötarkoituksiin sopiviksi. [25][26]

3.3 Materiaalit

Eri materiaalien läpäisyä ja muita radiosignaaleihin vaikuttavia tekijöitä on tutkittu runsaasti. Kuitenkin tutkimukset on pääsääntöisesti tehty perinteisiä rakennusmateriaaleja käyttäen, joten uusista voimakkaasti radiosignaalia vaimentavista materiaaleista ei ole kattavaa tutkimustietoa saatavilla.

Alan kirjallisuus esittää eri materiaaleille parametriarvoja, joita voidaan käyttää peittoalue-ennusteita tehdessä. Yleisesti niissä materiaalit on jaoteltu kolmeen ryhmään ominaisuuksiensa perusteella: seinämateriaaleihin (betoni, tiili), ikkunamateriaaleihin (lasi) ja puuperäisiin materiaaleihin [14]. Rakennusten vaimennusarvot myös vaihtelevat suuresti eri tilanteissa. Vaimennuksiin vaikuttavat muuan muassa käytettävä taajuusalue ja signaalin tulokulma [27]. Perinteisten materiaalien ominaisuuksia ja vaimennuksia on tutkittu varsin laajasti myös kirjallisuudessa ja siitä on saatavilla runsaasti materiaalia [28].

Myös signaalin etenemistä sisätiloissa on tutkittu toimistorakennuksissa UHF-taajuuksilla. Tutkimuksen perusteella avoimella tilalla, kalustuksella, kulmista tapahtuvalla signaalin taipumisella ja ulkoseinillä on suuri vaikutus signaalin etenemiseen. [29]

Rakennusten läpäisyvaimennusta on tutkittu muuan muassa Chicagon alueella Yhdysvalloissa. Tutkimuksessa todettiin vaimennuksen olevan noin 14 dB ensimmäisessä kerroksessa sekä sen pienenevän noin 1,9 dB per kerros ylöspäin mentäessä. Samalla

todettiin, että vanhantyyppisillä ikkunoilla läpäisyvaimennus on noin 6 dB pienempi kuin ikkunattomassa tilassa [30]. Myös Isossa-Britanniassa tehdyissä tutkimuksissa todettiin läpäisyvaimennuksen muutoksen kerrosten välillä olevan noin 2 dB, joka on samaa luokkaa kuin yhdysvaltalais tutkimuksessa [29][30]. Toisessa tutkimuksessa rakennusten läpäisyvaimennusta tutkittiin 912, 1920 ja 5990 MHz:n taajuuksilla. Tutkimuksessa todettiin, että läpäisyvaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa [31][32] ja mediaaniläpäisyvaimennusarvoiksi edellä mainituille taajuuksille saatiin 7,7 dB, 11,6 dB ja 16,1 dB. [32]

Suurten rakennusten signaalinvaimentumiskäyttäytymistä on tutkittu runsaasti. Asiaa on tutkittu muuan muassa langattomien hälytyslaitteiden kannalta. Missä lähetin on rakennuksen sisällä ja vastaanotin rakennuksen ulkopuolella. Niiden toimivuutta on tutkittu useilla taajuusalueilla useissa rakennuksissa. Tutkimusten tuloksena ero keskimääräisten mitattujen signaalitasojen ja referenssitason välillä eri mittauspisteissä oli 10–40 dB [33]. Tutkimuksissa on mitattu suurien rakennusten vaimennukseksi keskimäärin 5,7 dB GSM900:lla. Vaimennus pienenee ylöspäin mentäessä ja kasvaa mentäessä syvemmälle rakennukseen [34]. Tutkimuksessa suuressa rakennuksessa Meksikossa todettiin, että betoniseinät aiheuttavat suuren vaimennuksen ja tällaisessa kohteessa tarvittaisiin toistimia tai sisäpikosoluja kuuluvuuden takaamiseksi. [35]

Modernien pinnoitettujen ikkunoiden vaikutusta on tutkittu rakennuksessa, jossa tarvitaan tehokasta lämmönsäätelyä. Saksalaistutkimuksessa tutkittiin langattomien UWB (Ultra Wideband)-sensorien toimintaa pinnoitetun ja tavallisen ikkunan tapauksissa. Tutkimus osoittaa, että pinnoitus heikentää signaalia noin 20–30dB koko taajuuskaistalla. Pinnoitetuissa ikkunoissa on vähintään neljä rajapintaa, missä heijastuvia aaltoja voi syntyä. Näiden heijastuneiden aaltojen superpositiolla on vaikutusta koko tiedonsiirtoon. Tämän seurauksena saattaa energiansäästöikkunoista aiheutua oskillaatiota tiedonsiirtoon. [36][37] Myös korjausrakentamisesta on havaittu, että useimmiten korjaamisella on negatiivinen vaikutus radiosignaaleihin. [38]

3.4 Toistimet

Toistimet ovat kaksisuuntaisia vahvistimia (Bi-Directional Amplifier, BDA), joiden avulla pystytään vahvistamaan signaalia. Toistimeen kuuluu vastaanottoantenni, jolla signaali vastaanotetaan esimerkiksi ulkotiloissa, vahvistin jolla vastaanottoantennilta saatu signaali vahvistetaan, lähetysantenni, jolla signaali lähetetään esimerkiksi sisätiloihin. Toistimia hyödynnetään muun muassa alueilla, missä operaattorin verkon peitto on heikkoa, tai sellaisissa rakennuksissa, joiden rakenteet ovat voimakkaasti vaimentavia, jolloin voidaan toistimella saada rakennuksen sisälle hyvä peitto.

Toistimia on kahdenlaisia. Perinteiset toistimet ovat analogisia ja toistavat pääasiassa ennaltamäärättyä taajuusaluetta toistaen kaiken vastaanotetun signaalin. Analogiset toistimet eivät juuri aiheuta viivettä signaalille, mutta ne toistavat myös kaiken kohinan ja häiriön, jota saapuvassa signaalissa on. Tämän lisäksi niiden hallinta on kohtuullisen hankalaa. Nykyisin yleistymässä ovat digitaaliset toistimet, joiden ominaisuuksia voi-

daan säätää paremmin. Digitaaliset toistimet voivat myös olla niin sanotusti regeneroivia, eli ne purkavat vastaanottamansa signaalin ja luovat sen lähetettäessä uudelleen. Tällöin voi signaaliin aiheutua muun muassa viiveitä.

Toistimia on saatavilla monenlaisiin käyttötarkoituksiin yhden taajuusalueen toistimista usean taajuusalueen toistimiin. Toistimia on saatavilla vain yhtä tekniikkaa toistavina tai vaihtoehtoisesti useaa tekniikkaa toistavina. Toistimien haittapuolia ovat lähinnä digitaalisten toistimien aiheuttama viive signaaliin, sekä toistimien mahdollisesti aiheuttamat häiriöt muulle verkolle. Vastaavasti analogiset toistimet ainoastaan toistavat vastaanotetun signaalin ja jos se on valmiiksi häiriöistä, siinä on vähintään toistimen kohinaluvun (NF) verran enemmän kohinaa vahvistamisen jälkeen. [39] Aktiivisten laitteiden käyttö on Suomessa luvanvaraista ja mahdollista ainoastaan operaattoreille. [40]

Toistimia on ehdotettu ratkaisuiksi rakennusten kuuluvuusongelmiin hyvin monessa tutkimuksessa [23][35][38]. Toistimien käyttö on mahdollista, mutta toistimien asentaminen ei ole aina mahdollista. Toistimet vaativat toimiakseen sopivat antennipaikat rakennusten ulko- ja sisäpuolelle sekä tarvittavat kaapelireitit. Niiden järjestäminen vanhassa rakennuksessa saattaa olla haastavaa.

3.5 Passiiviset antenniratkaisut

Signaalin parantamiseksi voidaan käyttää hyväksi myös passiivisia antenniratkaisuja. Ne ovat edullisempia ja yksinkertaisempia kuin toistimet. Niitä voidaan myös rakentaa ilman operaattorin tai muun viranomaisen lupaa. Niiden etu on se, että ne toimivat operaattoririippumattomasti. Ratkaisun toteuttamiseen tarvitaan vastaanotto- ja lähetysantennien lisäksi vain sopivat kaapelit niiden välille. Kuitenkin passiivisen järjestelmän heikkoutena on, että sillä saadaan melko vaatimaton parannus signaalitasoon. Käyttö edellyttääkin erinomaista ulkosignaalitasoa, jotta sisälle saataisiin parannusta signaalitasoon. Silti sisäantennin peittoalue jää vaatimattomaksi. Ratkaisu soveltuu parhaiten yksittäisten huoneiden kuuluvuuden parantamiseen. Passiivisten antenniratkaisujen heikon suorituskyvyn lisäksi myös antennin koko on ongelmallinen. Perinteisten matkapuhelinverkkojen taajuuksien antennien koot ovat varsin suuria, ja koska yksittäisellä antennilla saadaan apua vain yhteen kohteeseen, saattaisivat esimerkiksi kerrostalossa seinät täyttyä antenneista, jos jokaisessa asunnossa käytettäisiin tätä ratkaisua.

Tutkimusta passiivisia antenniratkaisuja kohtaan on tehty muun muassa monitieolosuhteissa käyttäen MIMO:a. Tutkimustuloksia löytyi myös liuskatyypisistä antenneista, joiden koko oli ainoastaan 5×5 cm $4,5$ GHz:n alueella. Niillä saavutettiin 5 dBi:n vahvistus, mutta niiden kantomatka oli alle metrin [41].

3.6 Taajuusselektiiviset pinnat

Taajuusselektiivisillä pinnoilla (Frequency Selective Surface, FSS) voidaan hallita radiosignaalin kulkua. Jatkossa taajuusselektiivisyydestä käytetään englanninkielistä

termiä FSS. Niiden avulla voidaan luoda signaalille kulkureittejä, joiden kautta radio-signaalit voivat kulkea helpommin rakennuksiin tai niistä ulos. Vastaavasti niiden avulla voidaan myös estää signaalien kulkeutumista. FSS-pinta toimii suodattimena tasoaliloille. Se voidaan valmistaa eri taajuuskaistoille, jolloin pinta toimii tarpeen mukaan joko kaistanpäästö- tai kaistanestosuodattimena. FSS-pinnan suorituskykyyn vaikuttaa suuresti saapuvan signaalin tulosuunta. Tutkimuksissa on selvitetty myös muun muassa sitä, miten FSS-pinta käyttäytyy erilaisilla lasirakenteilla ja eri signaalin tulokulmilla, sekä todettu, että säädettävät FSS-pinnat helpottaisivat tiedonsiirron ominaisuuksien optimoinnissa. [42][43]

3.6.1 Tuottaminen ja valmistaminen

FSS-tekniikan käyttö tunnetaan jo melko hyvin, mutta sitä ei ole vielä teollisuudessa laajamittaisessa käytössä. FSS-pintojen tuottamiseen tarvitaan oikeanlaista osaamista ja sopivat välineet. Niiden suunnittelu on ensisijaisen tärkeää, jotta saadaan aikaan sellaisia kuviota, jotka sopivat käyttötarkoitukseensa mahdollisimman hyvin.

FSS-pintoja voidaan suunnitella ja analysoida valmiilla kaupallisilla ohjelmistoilla. Niiden avulla pystyy suunnittelemaan FSS-pintoja useisiin eri käyttötarkoituksiin. [44] FSS-pinnat laaditaan pääosin tasokuvioiksi, joita voidaan tuottaa esimerkiksi tulostamalla tai käyttämällä lasereita. Tasomaisten FSS-pintojen lisäksi on olemassa myös eitasomaisia sekä kolmiulotteisia FSS-pintoja. [45] Tutkimuksessa on esitetty myös FSS-pintojen valmistamista nanoteknologian avulla valmistetulle kalvolle [46].

3.6.2 Seinät

FSS-pintoja voidaan hyödyntää myös seinissä. FSS-pinnoilla on mahdollista luoda taajuusselektiivisiä seiniä, joilla voidaan eristää esimerkiksi talon sisäverkko ulkona vallitsevasta verkosta. [46][47][48][49] Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää esimerkiksi silloin, kun rakennukseen rakennetaan sisäverkko, jonka ei haluta häiritsevän ulkoverkkoa tai toisin päin.

3.6.3 Ikkunat

Ikkunat ovat otollinen paikka FSS-pinnoille, sillä ikkunat toimivat perinteisenä signaali-reittinä ulkoa sisälle rakennuksiin. Nykyisin ikkunoiden pinnoille asennettavat selektiivikalvot vaikeuttavat signaalin kulkua ikkunoiden kautta, mutta niihin on mahdollista integroida FSS-pinta, jolloin niiden signaalia vaimentavat ominaisuudet vähenevät. FSS-pinnoilla onkin mahdollista parantaa signaalin kulkua ikkunoiden kautta oleellisesti.

Tutkimuksen perusteella voidaan esimerkiksi ikkunoiden selektiivikalvoissa käyttää ohuita viiltoja ($190 \times 1 \text{ mm}^2$), jolloin saavutetaan hyviä tuloksia yleisimmin käytetyillä taajuusalueilla. Ikkunoissa tuloksiin vaikuttavat myös signaalin saapumiskulma, lasin permittiivisyys ja kuinka monilasin ikkuna on kyseessä. FSS-pinnan käytöllä ikkunoissa voidaan saavuttaa noin 10 dB:n parannus signaalitasoon. [50][51]

3.6.4 Ongelmakohtia

Taajuusselektiivisten pintojen valmistaminen on periaatteessa yksinkertaista, mutta käytännössä se voi olla haastavaa ja suuressa mittakaavassa vielä kallista, sillä teollista valmistusmenetelmää ei ole vielä olemassa. FSS-pinnaksi sopivien kuvioiden tuottaminen saattaa myös olla hankalaa.

Tutkimuksissa käytetyt FSS-pinnat ovat olleet vielä suhteellisen pieniä, ja tutkimuksissa on tehty yksittäisiä uniikkeja FSS-ratkaisuja. Vielä ei ole olemassa teollisuutta, joka hyödyntäisi FSS-tekniikkaa esimerkiksi ikkunateollisuuden tarvitsemassa mittakaavassa, joten tällä hetkellä FSS-pinnat ovat uniikkikappaleita ja siksi kalliita. Myös ikkunalasien suuri koko ja käsittelyn vaikeus hankaloittaa esimerkiksi laserien käyttöä pinnoituksessa. Teollisuudella ei ole myöskään suurta kiinnostusta FSS-pintoja kohtaan, koska niillä saavutettu signaalitason parannus ei ole niin suuri kuin olisi toivottu. Näistä seikoista johtuen FSS-pintojen laajamittainen käyttö ei tule olemaan lähitulevaisuudessa todennäköistä, elleivät suuret valmistajat ala niitä tuottamaan. [52]

FSS-rakenteiden ongelma on myös niiden tarjoama kapea kaista. Rakenne voidaan tehdä ainoastaan tietyille taajuuskaistoille, esimerkiksi GSM900- tai UMTS2100-kaistoille. Tänä päivänä laadittu FSS-rakenne saattaakin olla väärällä taajuusalueella muutaman vuoden kuluttua, sillä mobiiliverkkojen käyttämät taajuusalueet muuttuvat jatkuvasti. Esimerkiksi kymmenen vuoden syklillä todennäköisesti otetaan käyttöön uusia taajuusalueita. Toisaalta ikkunoiden tekninen käyttöaika on huomattavasti pidempi, jopa kymmeniä vuosia. Myös useiden eri taajuuskaistojen toteuttaminen FSS-pinnoilla tuottaa hankaluuksia. Jotta FSS-pinnan käyttö olisi järkevää, sen tulisi kattaa jo nykyään käytössä olevat taajuusalueet. Niiden lisäksi FSS-pinnan tulisi kattaa tulevaisuudessa käyttöönotettavat taajuuskaistat, jolloin tarvittaisiin FSS-pinta, joka päästäisi läpi kaistan 100 MHz:stä aina 3500 MHz:iin asti. Tällöin pystyttäisiin kattamaan kaikki tarpeet perinteisen FM-radion taajuusalueilta aina tulevaisuuden korkeita taajuuksia hyödyntäviin mobiiliverkkoihin.

3.7 Mittaustiedon vähyyys

Kirjallisuusselvityksen myötä selvisi, että mitattua tietoa ei ole saatavilla nykyisillä materiaaleilla rakennetuista kohteista. Saatavilla olevat tutkimusaineistot perustuvat vanhentuneisiin rakennusmateriaaleihin ja vanhoihin olettamuksiin.

Tästä syystä päätettiin toteuttaa suuri mittaussarja, jossa tutkittaisiin ja vertailtaisiin uusia rakennuksia hieman vanhempaan rakennuskantaan. Mittauskohteeksi valittiin kerros- ja rivitalot sekä niiden lisäksi muutamia muitakin kohteita.

4 RADIOSIGNAALIN ETENEMISMITTAUKSET RAKENNUKSISSA

Tässä osiossa tutustaan laajaan mittaussarjaan, jonka avulla selvitettiin uusien ja vanhojen rakennusten eroja radiosignaalin etenemisen näkökulmasta. Siinä on esitelty tarkemmin mittausmenetelmä sekä analysoidut mittaustulokset. Tulokset on jaettu erityyppisten kohteiden mukaisesti. Tuloksia on esitetty sekä histogrammina että kumulatiivisena jakaumana (Cumulative Distribution Function, CDF). Lopuksi tuloksia on vielä vertailtu toisiinsa.

4.1 Mittausmenetelmä

Mittaussarjan mittaukset tehtiin Nokia C5-3 -mittauspuhelimella, johon oli asennettuna Aniten Nemo Handy -ohjelmisto. Ohjelmiston avulla pystyttiin mittaamaan laitteiston mittaustarkkuuden rajoissa kulloinkin vallitsevaa signaalitasoa ja lataamaan mittaustulokset tietokoneelle. Mittaukset suoritettiin sekä GSM900- että UMTS2100-verkoille, sekä joissakin kohteissa myös GSM1800-verkolle. Mittauksissa mitattiin kaikkien kolmen Suomen mobiilioperaattorin (DNA, Elisa ja TeliaSonera) signaalitasot, jotta mittaustulosten tilastollisten ominaisuuksien perusteella saadaan luotettavia tuloksia, vaikka yhden operaattorin signaalin tulosuunta olisikin väärä mitattavaan kohteeseen nähden.

GSM-verkossa mitattiin BCCH (Broadcast Control Channel)-kanavan Rx-leveltasoa, joka kertoo kyseisen GSM-kanavan vastaanotetusta tehosta. UMTS-verkoissa mitattiin P-CPICH (Primary Common Pilot Channel) -kanavan RSCP-tasoa. P-CPICH-kanava on pääasiallinen moduloimaton pilottikanava, jota lähetetään kiinteällä tasolla ja se kuljettaa ainoastaan ennalta määrättyä sekoitettua symbolijonoa. Sitä lähetetään jokaisessa solussa koko solun alueelle ja se toimii vaiheen referenssinä usealle muulle kanavalle. Sen avulla tehdään muun muassa solunvaihtopäätöksiä. CPICH kanavan tyyppillinen lähetysteho on 1–2 W eli 30–33 dBm. RSCP kertoo P-CPICH-kanavan päälaitteen mittaaman vastaanotetun koodin tehon uudelleen hajottamisen jälkeen. Sen avulla voidaan arvioida etenemisvaimennuksen suuruutta. Mitattavaksi arvoksi valittiin RSCP, sillä siihen ei vaikuta verkon kuormitus, toisin kuin RSSI (Received Signal Strength Indicator)-arvoon, joka huomioi koko kanavan tehon. [19][53]

4.1.1 Mittaustulosten käsittely

Mittausten avulla saatiin runsaasti dataa, jota analysoitiin eri tavoilla. Mittaustulokset päätettiin esittää sekä histogrammimuodossa että kumulatiivisena jakaumana (CDF). Histogrammit esitetään sekä erikseen GSM:lle ja UMTS:lle että päällekkäin piirrettyinä.

Yhden tekniikan histogrammista selviää paremmin juuri kyseisen tekniikan jakauma, mutta päällekkäin piirrettynä kahden tekniikan vertailu on helpompaa. Kumulatiivinen jakauma (CDF) on tieteellinen esitystapa, josta nähdään tulosten käyttäytyminen helposti yhdellä silmäyksellä.

Mittaustuloksien jakaumia on sovitettu myös eri jakaumiin. Mittaustuloksia verrataan useasti normaalijakaumaan. Normaalijakaumaan vertaamista käytetään muun muassa siihen, että onko tuloksia riittävästi, sillä tarpeeksi suuri näytteiden määrä noudattaa yleensä normaalijakauman Gaussin kellokäyrän muotoa, jos data oletetaan normaalijakautuneeksi. Normaalijakauma voidaan määrittellä seuraavasti:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \quad (1)$$

Tämän lisäksi sovitusta on tehty myös Gamma-jakaumaan. Gamma-jakauma voidaan esittää kaavamuodossa seuraavasti:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}, & \text{kun } x > 0 \\ 0, & \text{kun } x \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Jossa

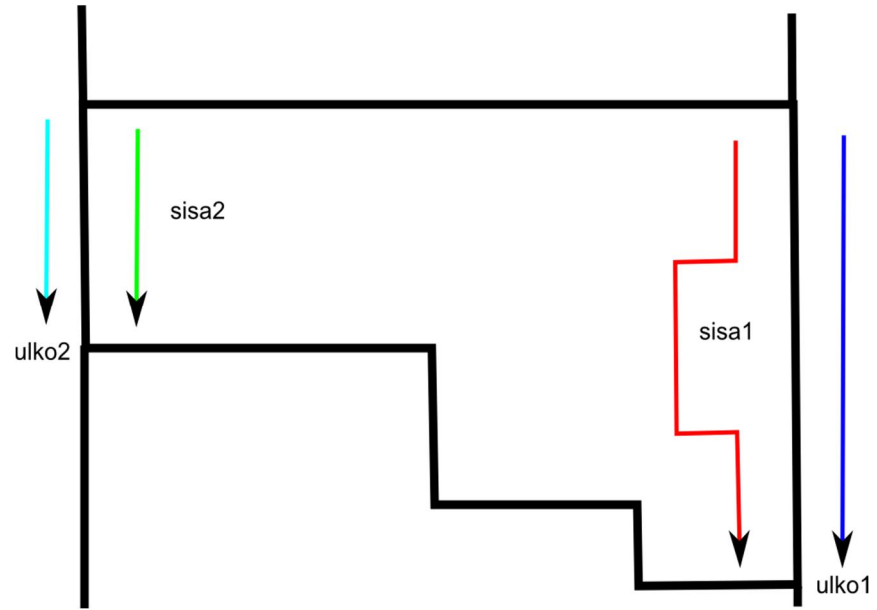
$$\Gamma(y) = \int_0^\infty t^{y-1} e^{-t} dt \quad (3)$$

Histogrammijakaumia on myös vertailtu samassa kuvassa uusien ja vanhojen talojen tilanteissa, joista nähdään helposti kuinka suuri muutos on havaittavissa niiden välillä. Vastaavaa vertailua on tehty myös CDF-kuvaajilla.

4.1.2 Mittauspaikat

Mittauspaikkoina oli suuri määrä erityyppisiä kerros- ja rivitaloja lähinnä Tampereen seudulta, mutta mittauksia tehtiin myös pääkaupunkiseudulla ja Turun alueella. Uusien valmistuvien talojen kohdalla tehtiin yhteistyötä rakennusyhtiöiden kanssa. Vanhemmat kohteet saatiin lähinnä oman ryhmän aktiivisuuden avulla. Taloissa pyrittiin löytämään mahdollisimman monia mittauspaikkoja, jotta saatiin erilaisia signaalinsuuntia mitattua. Tämä myös aiheutti ongelmia. Signaalin tulosuunnan ollessa epäedullinen mittaustulosten vertailu toisiinsa on haastavaa, sillä signaali ei näissä tapauksissa käyttäydy oletetusti.

Mittaukset suoritettiin kulkemalla mahdollisimman samanlainen reitti rakennuksen sisällä ja sen ulkopuolella. Yleensä mitattiin noin yhden huoneen tai seinän mittainen matka, joka oli tyypillisesti 2–5 metriä. Yleisesti valittiin sopivat seinät rakennuksen molemmin puolin. Sisämittaus suoritettiin noin metrin päässä ulkoseinästä. Tällä kuvattiin tavallista matkapuhelin käyttöä asunnoissa. Ulkomittaukset suoritettiin joko parvekkeelta, terassilta tai vaihtoehtoisesti maanpinnan tasosta. Kuva 1 esittää yleisen tavan, jolla mittaukset suoritettiin. Kuvasta näkee, että mittausreitit eivät ole aina täysin samoja sisällä ja ulkona. Esimerkiksi sisäseinien ja oviaukkojen sijaintien vuoksi saattaa mittausreiteissä olla mutkia. Jatkossa mittauspaikasta puhuttaessa tarkoitetaan yhtä sisä-ulko mittausparia. Esimerkiksi kuvassa (Kuva 1) sisä1-ulko1 on yksi mittauspaikka.



Kuva 1. *Yhden asunnon mittausreitit.*

Myös erityyppisiä reittejä mitattiin asunnoissa. Tällöin sisäsignaalitasoa verrattiin ulkona pidempään matkaan, kuten rakennuksen ympäri tehtyyn mittaukseen. Tällaista mittaustapausta kuvaa Kuva 2.



Kuva 2. Mittausreitit huoneistossa ja ulkopuolella.

Uusien talojen mittauksien yhteydessä tehtiin runsaasti mittauksia, jossa avattiin asunnossa ikkuna tai parvekkeen ovi. Tällä mittauksella pyrittiin kuvaamaan tilannetta, jossa yhdestä huoneiston ikkunasta olisi poistettu selektiivikalvo, eli talon rakenteisiin luotiin radiosignaaleja läpäisevä aukko.

Mittaus suoritettiin aluksi asunnon kaikki ikkunat suljettuina, ja tämän jälkeen avattiin pääasiassa parvekkeen ovi. Tämän jälkeen toistettiin edellä kuvatut mittaukset mahdollisimman tarkasti uudelleen. Parvekkeen ovenavausmittauksia vääristää se seikka, että myös parvekkeen lasitus heikentää signaalitasoa hieman. Signaalitason parantuminen olisi ollut hieman suurempaa, jos parvekkeen oven sijasta olisi avattukin jokin ikkuna.

Mittaustulosten perusteella ikkunan tai oven avaamisella on paikallisesti hyvinkin voimakas vaikutus asunnon signaalitasoon, jos signaalin tulosuunta on ikkunan tai oven suunnasta. Tällöin voidaan saada kyseiseen huoneeseen hyvä kuuluvuus. Toisaalta mitaustulokset osoittavat sen, että ikkunan tai oven avaamisella ei ole juuri vaikutusta muiden huoneiden kuuluvuuteen.

Selektiivikalvon poistamisella voidaanakin saavuttaa parannusta kuuluvuuteen asunnoissa, mutta samalla heikennetään asunnon energiatehokkuutta. Keinoa voidaan käyttää tarvittaessa osana kuuluvuuden parannuksen kokonaisratkaisussa, mutta siitä pelkääntään ei ole ratkaisemaan ongelmaa.

Jokaisesta mittauskohteesta kirjoitettiin kaksi raporttia. Laajempi raportti laadittiin projektin sisäiseen käyttöön ja yksi suppeampi julkiseen käyttöön. Esimerkkejä suppeammasta raportista on esitetty diplomityön liitteinä.

4.1.3 Mittausjärjestelyt

Mittauksien alussa selvitettiin mittauspuhelimien avulla alueella ja asunnossa eri operaattorien käyttämät GSM- ja UMTS-kanavat sekä UMTS:n koodit. Tämä suoritettiin kulkemalla piha-alueella ja asunnossa mittauspuhelimien kanssa havainnoiden voimakkaimmat kanavat ja koodit. Mittauksen ajaksi puhelin lukittiin voimakkaimpaan kanavaan GSM:ssä tai koodiin UMTS:ssä. Talon eri mittauksissa valittiin aina kulloinkin voimakkain tukiasemasolu. Tästä mittaustavasta johtuen puhelin ei voinut vaihtaa tukiasemaa mittauksen aikana. Tällöin puhelin saatiin lukittua yhteen tukiasemasoluun ja sillä saatiin seurattua vain yhden signaalin voimakkuutta. Kuitenkin tästä mittaustavasta aiheutuu se, että puhelin ei voinut hyödyntää UMTS:n Soft Handover -toiminnallisuutta eli puhelin ei voinut kiinnittyä useaan tukiasemaan yhtäaikaaisesti. Tämä heikentää hie-man UMTS:n signaalitasoa. Mittauspuhelimella saatiin tallennettua mittaustieto jokaisesta mittauksesta Nemo Handyn nbl-tiedostomuodossa. Mittaustulokset siirrettiin mittauspuhelimesta tietokoneelle, jossa ne muokattiin Nemo File Manager -sovelluksella Nemo Outdoorin nmf-tiedostomuotoon. Nemo Outdoorin avulla tiedostosta tuotiin GSM:n Rx Level ja UMTS:n RCSP-arvot CSV-muotoiseen tiedostoon, jota voidaan käsitellä Matlabin funktioilla. Matlabin avulla CSV-muotoinen tieto vielä muutettiin Matlabin matriisimuotoon, jotta sitä oli helppo käsitellä Matlabilla. Tieto saatiin näin taulukkoon, jossa ovat peräkkäin mitatut signaalitasot. Tästä eteenpäin puhutaan tästä signaalitasotiedostosta mittausvektorina. Mittausvektorien varsinainen analysointityö tehtiin Matlabin avulla.

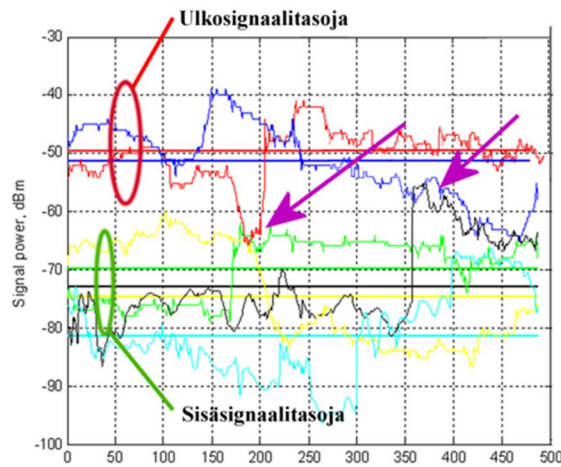
4.1.4 Ongelmia mittausmenetelmässä

Mittaustulosvektoreiden näytteiden määrän vaihtelu tuotti ongelmia tulosten analysoinnissa, sillä mittausvektoreiden pituudet vaihtelivat GSM:n muutamasta kymmenestä näytteestä UMTS:n useaan sataan näytteeseen. Analyysin tekemiseksi vektorien piti kuitenkin olla samanmittaisia. Tämän seurauksena vektoreiden pituutta päätettiin muokata. Muokkaus tehtiin Matlabin avulla interpoloimalla lyhyitä vektoreita ja desimoimalla pitkiä vektoreita. Tällä tavoin vektorien sisältämää tietoa ei kadotettu vaan mittausvektorien näytekieskiarvo ja muoto pysyivät hyvin samankaltaisina, mutta vektoreiden pituudet saatiin normalisoitua. Pääsääntöisesti vektorien pituuksiksi valittiin 100 pistettä GSM:lle ja 200 pistettä UMTS:lle.

Mittausvektoreiden avulla päätettiin laskea erityyppisiä signaalitasoeroja. Signaalitasoero saadaan vähentämällä pisteittäin esimerkiksi ulkosignaalin mittausvektorista sisäsignaalin mittausvektorin vastaava arvo. Näin saadaan vektori, jota kutsumme tästä eteenpäin erovektoriksi.

Valittu mittausmenetelmä osoittautui myös ongelmalliseksi siinä mielessä, että ulko- ja sisämittausvektorit eivät ole synkronoituja keskenään eli vektorit kulkevat osittain eri tahtia. Tämä johtuu siitä, että mittaukset on tehty käsivaraisesti ja mittaajaan liikkumisnopeutta on mahdotonta säädellä tarkasti, jolloin mittaajan liikkumisnopeus sisällä ja ulkona saattoi vaihdella. Myös ulko- ja sisäreitti saattoivat olla metrimäärältään erimit-

taisia, vaikka mittausvektorin pituus on vakioitu samaksi. Tällöin laskettaessa ulko- ja sisäsignaalitasoeroa pisteittäisellä vähennyslaskulla syntyy satunnaisesti myös negatiivisia vaimennusarvoja. Kuitenkin vain lähinnä silloin, kun signaalitasot vaihtelevat nopeasti ja paljon. Tämä tilanne tarkoittaisi sitä, että signaali olisi voimakkaampi sisätiloissa kuin ulkona. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa ole. Tämä virhe näkyy tuloskuvaajissa negatiivisina arvoina, mutta varsinaiseen analyysiin ja keskiarvotettuihin tuloksiin tällä seikalla ei ole merkittävää vaikutusta. Asiaa selventää alla oleva Kuva 3, jossa ylimmät sininen, punainen ja keltainen käyrä edustavat ulkosignaalisia ja alemmat vihreä, musta ja vaaleansininen käyrä taas sisäsignaalisia. Nuolien osoittamissa kohdissa käyrät risteävät ja tällöin syntyy hetkellinen tilanne, jossa sisäsignaalitaso nousee korkeammaksi kuin ulkosignaalisia.



Kuva 3. Tilanne, jossa sisäsignaalitaso on hetkellisesti ulkosignaalisia parempi.

Muita virhelähteitä mittauksissa ovat muun muassa käytetyn Nemo Handy -puhelimien mittauksen tarkkuus, jonka määrittelevät UMTS- ja GSM-verkkojen tekniset määrittelyt. Mittauksen tarkkuus voi vaihdella jopa useita desibelejä, mutta koska kyseessä on systemaattinen virhe ja kaikki mittaukset on tehty samalla puhelimella, voidaan mittauksien tuloksia pitää paikkaansa pitävänä.

4.2 Mittauskohteet

Mittauksissa painotuttiin asuinkerrostaloihin, sillä yli 40 % suomalaisista asuu kerrostaloissa [54], ja kerrostalojen rakentaminen on Suomessa keskittynyt rakennusyhtiöille. Kerrostalojen ominaispiirre on se, että yksittäinen asukas tai perhe ei voi paljonkaan vaikuttaa rakennusvaiheessa rakenne- tai materiaalivalintoihin, eikä taloon asennettaviin tiedonsiirtotekniikan järjestelmiin tai niiden varauksiin. Toisaalta kerrostaloasuntojen asukkaiden tekemät valitukset matkapuhelinten kuuluvuuden ongelmista ovat viime aikoina nousseet esille esimerkiksi lehtikirjoittelussa.

Liike- ja toimistorakennusten rakenne- ja materiaaliratkaisut ovat hyvin samantapaisia kuin asuinkerrostaloissa, mutta niihin tavallisesti rakennetaan sisäverkko yhteistyössä tietyn operaattorin kanssa. Yritykset ovat valmiita maksamaan tiedonsiirtotarpeensa mahdollistavista ratkaisuista laitteiston hankinta-, asennus- ja ylläpitokulut, jotka voivat olla huomattavan suuria.

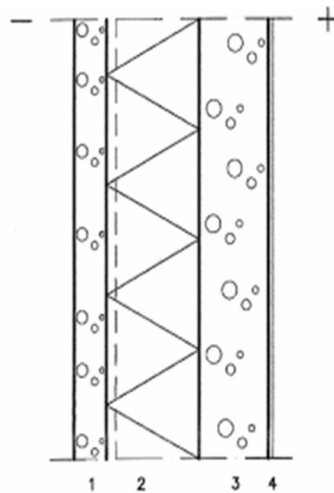
Mittaussarjan yhtenä keskeisenä tavoitteena oli selvittää uusien ja vanhojen kerrostalojen ulkoseinien matkapuhelinverkon vaimennusten ero. Tulokset valmistumisajan kohdan perusteella jaotelluista asuinkerrostaloista on esitetty seuraavana.

4.2.1 Uudet kerrostalot

Uusien asuinkerrostalojen ryhmään kuuluivat ne kerrostalot, joissa tyypilliset tilat olivat asuinkäyttöön tarkoitettuja, ja jotka olivat rakenteilla tai joiden valmistumisesta aikaa oli kulunut enimmillään yksi vuosi. Mitattuja rakennuksia oli 11 kappaletta. Niissä pyrittiin mahdollisuuksien mukaan mittamaan tilanne useammassa kuin yhdessä huoneistossa. Erityistä huomiota kiinnitettiin siihen, että mitatut huoneistot valittiin eri puolilta taloa. Näin pyrittiin saamaan mahdollisimman tasapuolinen kuva vallitsevasta tilanteesta. Yksittäisiä asuntoja mitattiin 18 kappaletta, ja mittauksia eri verkoilla ja operaatioilla kertyi noin 500 kappaletta. Uusissa taloissa ikkunat olivat selektiivikalvolla varustettuja ja pääsääntöisesti kolmikerrosikkunoita. Kuva 4 esittää erään ikkunan tyyppitarraa, josta selviävät muun muassa lasityypit ja mitä jalokaasua ikkunan välissä on käytetty. Vastaavasti Kuva 5 kertoo kerrostalojen seinien tyypillisen betonielementtirakenteen.

 		1
<small>Map: www.pilkington.com/na EN 12793</small>		26)
46 LAHTI	1164434 1/1	1 of 33 31 kg 271
ESKOPUU OY 16967_1o OVIEN LASILUETTELO 16967_1o WWW.PILKINGTON.COM 6013 33 8950 8375	Insulight Protect Triple 737 x1198 Optifloat Clear 4mm (I) 2 14mm TGI WE Spacer Optitherm S3 4mm 3 14mm TGI WE Spacer Optifloat Clear 6mm CS 5 Argon	

Kuva 4. Erään uuden ikkunan tyyppitarra.

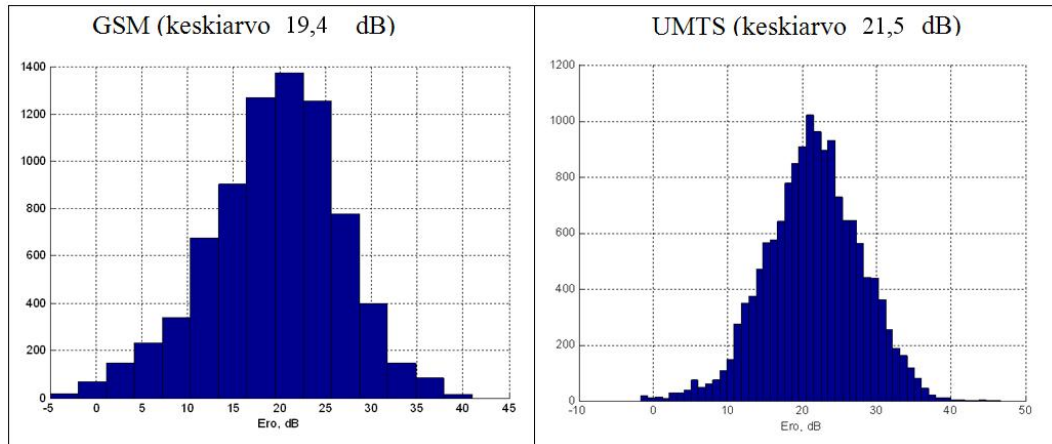


- 1 70 mm teräsbetoniulkokuori tyyppiirustuksen mukaan
 - 2 200 mm Paroc COS 5ggf, $\lambda_d=0.035$ W/mK
 - 3 150 mm teräsbetonisäkuori rakennesuunnitelmien mukaan
 - 4 pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan
- $U\text{-arvo} = 0.20$ W/m²K

Kuva 5. Tyypillinen uuden kerrostalon betonielementtirakenne.

Ulko-/sisäsignaalitasoero

Uusien kerrostalojen ulko- ja sisäsignaalitasoerojen mittaustulokset on esitetty histogrammimuodossa Kuva 6:ssa. Tulokset on myös esitetty päällekkäin Kuva 7:ssä. Histogrammien perusteella ulko-/sisäsignaalitasot eroavat toisistaan keskimäärin GSM-verkossa noin 19,4 dB ja vastaavasti UMTS-verkossa noin 21,5 dB. GSM:n ja UMTS:n histogrammikuvaajien jakauman samankaltaisuus selviää hyvin Kuva 7:stä, jossa jakaumat on esitetty samassa kuvassa. Vastaavasti tulokset on esitetty Kuva 8:ssa CDF-jakauman muodossa. GSM:lle keskihajonnaksi saatiin 7 dB ja UMTS:lle hieman pienempi 6,4 dB. Tulokset noudattavat jokseenkin normaalijakaumaa.

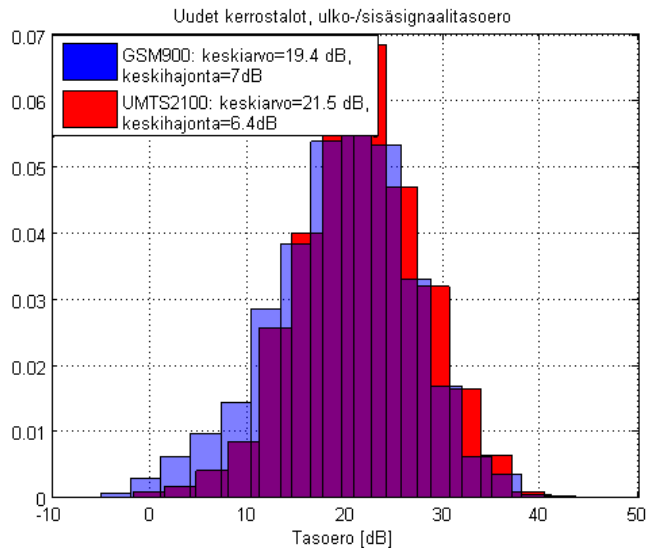


Kuva 6. Uusien kerrostalojen ulko- ja sisäsignaalitasoerojen histogrammina.

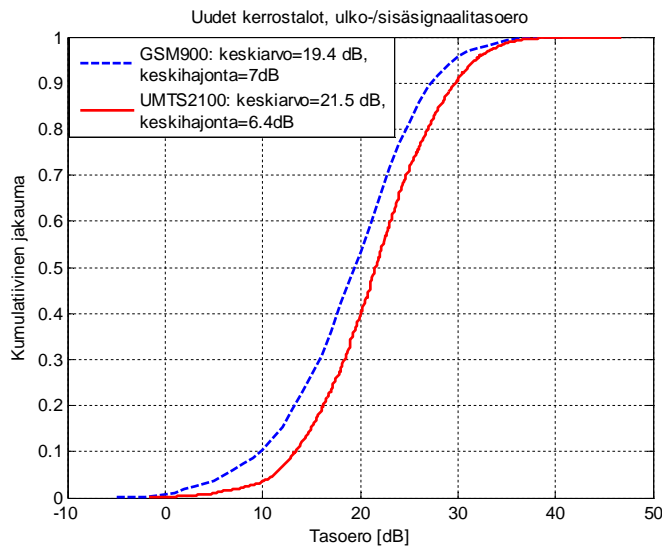
Kuvissa olevien histogrammien erilaiset viivanleveydet johtuvat mittausvektorien pituuksien eroista. UMTS:llä vektorin pituudet olivat yhdessä mittauksessa 300–500 ja GSM:llä 100–200 pistettä. Kuitenkin kaikki mittausvektorit sovitettiin samanmittaisiksi GSM:lle sataan näytepisteeseen ja UMTS:lle 200 näytepisteeseen. Histogrammeista on todettavissa jakaumien muodon lähestyminen normaalijakauman muotoa, joka kertoo osaltaan mittauksen määrän olevan riittävä luotettavaan tulkintaan.

Tarkasteltaessa GSM- ja UMTS-verkkojen vaimennuksia uusissa taloissa voidaan tulosten todeta olevan suuruusluokaltaan ennakoitua tasoa. Yllättävää sen sijaan on, että yksittäisten rakennusmateriaalien mittauksissa havaitusta voimakkaasta taajuusriippuvuudesta huolimatta eri verkkojen vaimennukset ovat melko lähellä toisiaan. Yhtenä syynä tähän on ilmeisesti se, että UMTS-verkko on kaupunkialueella huomattavasti tiheämpi kuin GSM-verkko.

Mittausdatasta piirrettyssä CDF-kuvaajasta (Kuva 7) selviää sisä- ja ulkosignaalitasojen eron kumulatiivinen jakauma. Kuvan perusteella GSM- ja UMTS-käyrät käyttäytyvät samalla tavalla, mutta UMTS taso on noin kaksi desibeliä matalampi.

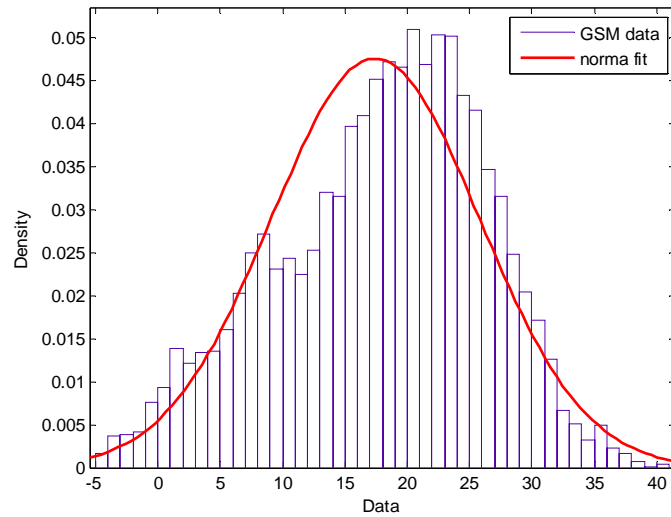


Kuva 7. Uusien kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.

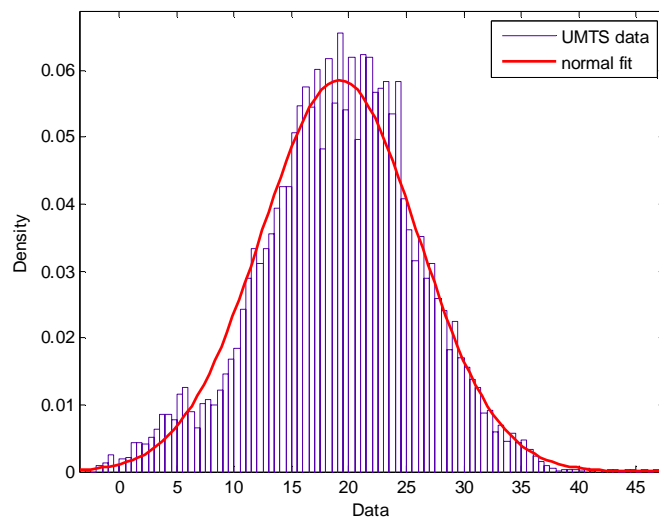


Kuva 8. Uusien kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

Jakaumaa voidaan sovittaa erityyppisiin jakaumiin esimerkiksi Matlabin dfittool-työkalun avulla. Kuvassa (Kuva 9) on uusien kerrostalojen GSM-histogrammi sovitettu normaalijakaumaan, johon se sopii melko hyvin, vaikka histogrammi on painottunut hieman oikealle. Sovitteen parametrit ovat μ : 17,4407 ja σ : 8,37482. Vastaavasti kuvassa (Kuva 10) esitetään UMTS-jakauma sovitettuna normaalijakaumaan, johon histogrammi sopii hyvin. Sovitteen parametrit ovat μ : 19,1733 ja σ : 6,82226.



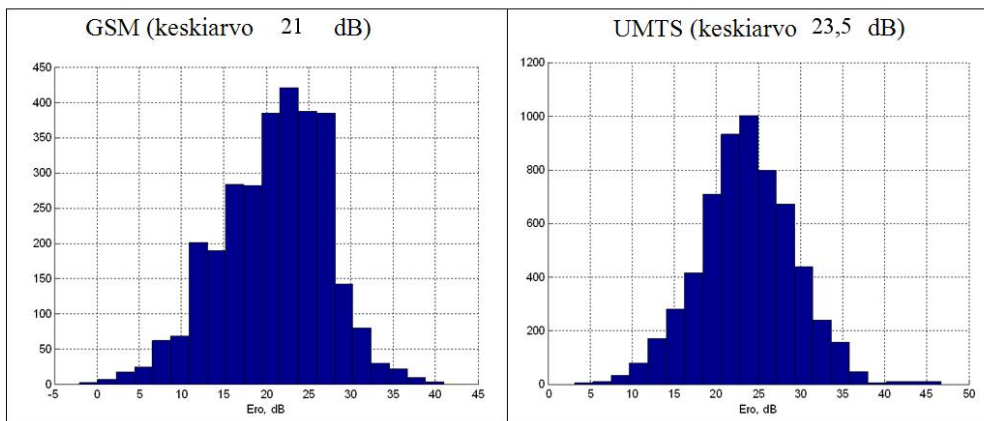
Kuva 9. Uusien kerrostalojen GSM ulko-/sisäsignaalitasoerohistogrammi sovitettuna normaalijakaumaan



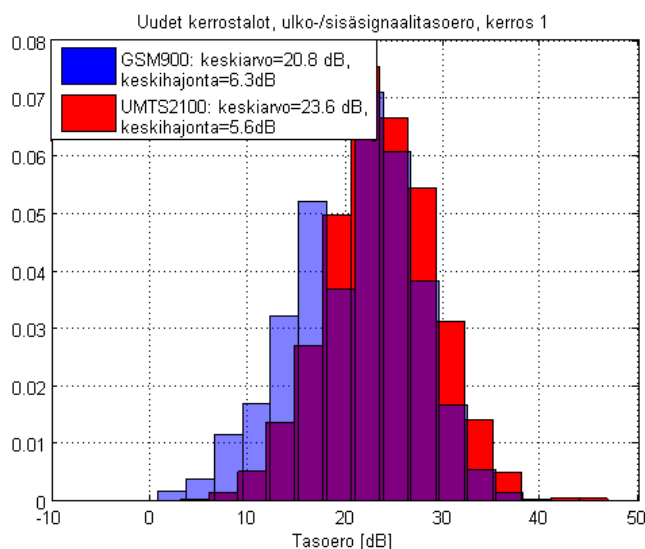
Kuva 10. Uusien kerrostalojen UMTS ulko-/sisäsignaalitasoerohistogrammi sovitettuna normaalijakaumaan.

Ulko-/sisäsignaalitasoero – ensimmäisessä kerroksessa

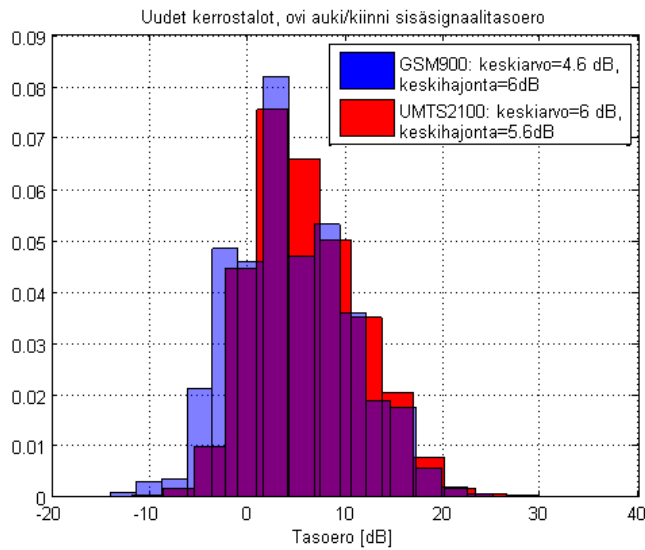
Seuraavissa kuvissa (Kuva 11 ja Kuva 12) on verrattu uusien kerrostalojen kuuluvuutta ensimmäisissä kerroksissa. Histogrammien perusteella ulko-/sisäsignaalitasoero ensimmäisen kerroksen osalta GSM:lle on noin 21 dB ja UMTS:lle 24 dB, jotka ovat vain hieman (1–2 dB) korkeampia kuin taloissa kokonaisuudessaan. Kuva 13 esittää ensimmäisen kerroksen signaalitasoeron kumulatiivisena jakaumana. Jakauma osoittaa jälleen, että GSM ja UMTS-tekniikat noudattelevat samaa jakauman muotoa, mutta UMTS on noin 3 dB heikompi. Keskihajonnat ovat GSM:lle 6,3 dB ja UMTS:lle 5,6 dB. GSM:ssä hajonta on hieman suurempaa kuin UMTS:ssa, mikä on todettavissa ei normaalijakautuneesta kuvaajasta. GSM:n jakauman sijoittumisen oikealle voi selittää esimerkiksi se, että ensimmäisessä kerroksessa on usein ollut aikaisemmin mainittuja kohtia joissa vaimennus on hyvin suurta ja tulosta ei ole saatu. Tämän lisäksi usein ensimmäisissä kerroksissa on hieman erityyppisiä rakenteita ja tiloja kuin ylemmissä kerroksissa.



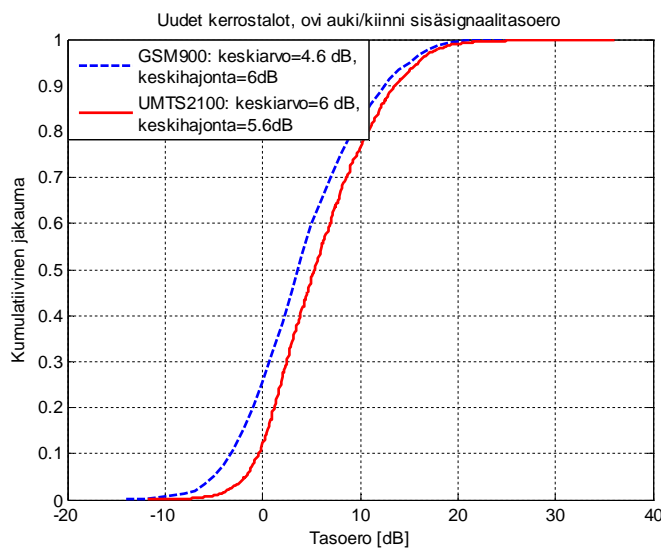
Kuva 11. Uusien kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoero ensimmäisessä kerroksessa histogrammina.



Kuva 12. Uusien kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoero ensimmäisessä kerroksessa vertailuhistogrammina.



Kuva 15. Uusien kerrostalojen ikkunan tai oven aukaisun aiheuttama parannus sisäsignaalitasoon vertailuhistogrammina.



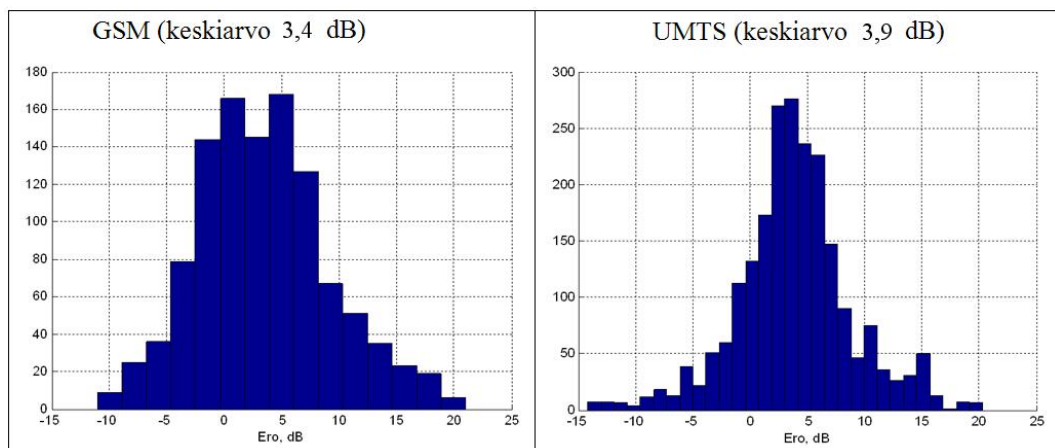
Kuva 16. Uusien kerrostalojen ikkunan tai oven aukaisun aiheuttama parannus sisäsignaalitasoon CDF-kuvaajana.

Edellä esiteltyjen tulosten mittaukset suoritettiin pääsääntöisesti huoneessa, jossa ikkuna tai ovi avattiin, jolloin mittausten antamat tulokset esittävät tilannetta vain siinä huoneessa, mutta ei koko asunnossa. Edellä olevien kuvien (Kuva 14, Kuva 15 ja Kuva 16) perusteella voidaan nähdä, että ikkunan tai oven avaaminen paransi asuntojen signaalitasoa kokonaisuudessaan noin 5–6 dB. Voidaankin todeta, että parannus on paikallisesti merkittävä, mutta asunnon kokonaissignaalitasoon vaikutus on kohtuullisen pieni. Mittauksilla tutkittiin myös ikkunan tai oven avaamisen vaikutusta signaalitasoon asunnon muissa huoneissa. Mittausten perusteella muiden huoneiden signaalitasoihin ikku-

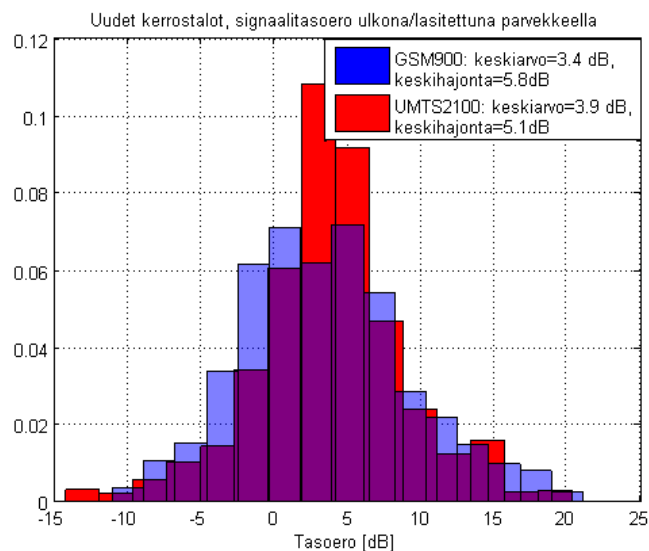
nan tai oven avaamisella ei ollut juuri vaikutusta. Tämän havainnon toteaminen tulisi varmistaa suuremmalla määrällä mittauksia.

Signaalitasoero – parvekkeella ja sen ulkopuolella

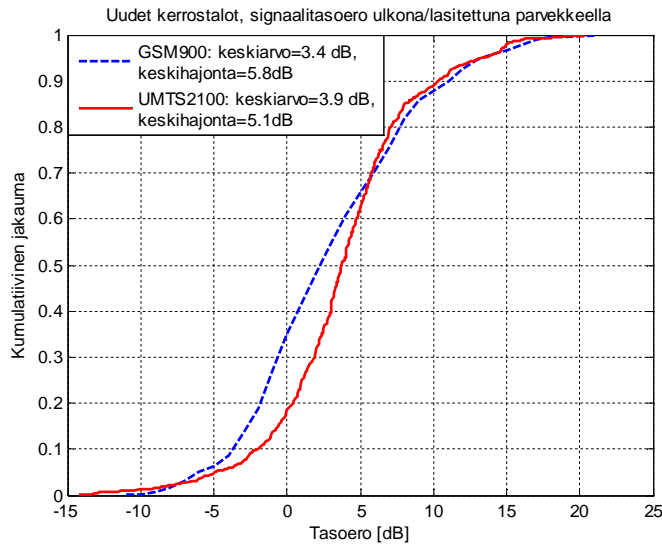
Uusissa taloissa tutkittiin myös parvekelasituksen vaikutusta signaalitasoon. Mittaukset suoritettiin lasitetulla parvekkeella ja toistettiin parvekkeen ulkopuolella. Parvekelasituksella todettiin olevan keskimäärin 3–4 dB:n heikentävä vaikutus signaalitasoon. Kuva 17 osoittaa, että GSM:llä hajonta on hieman suurempaa kuin UMTS:llä, kuitenkin Kuva 18:n ja Kuva 19:n lasketuissa keskihajonnoissa tämä näkyy vajaan 1 dB suurempana keskihajontana GSM:ssä. Jakaumat eivät noudata normaalijakaumaa, jota selittää se, että mitatut parvekkeet ovat olleet hyvin erityyppisiä sekä eri tavoin lasitettuja.



Kuva 17. Lasitetun parvekkeen vaikutus signaalitasoon histogrammina.



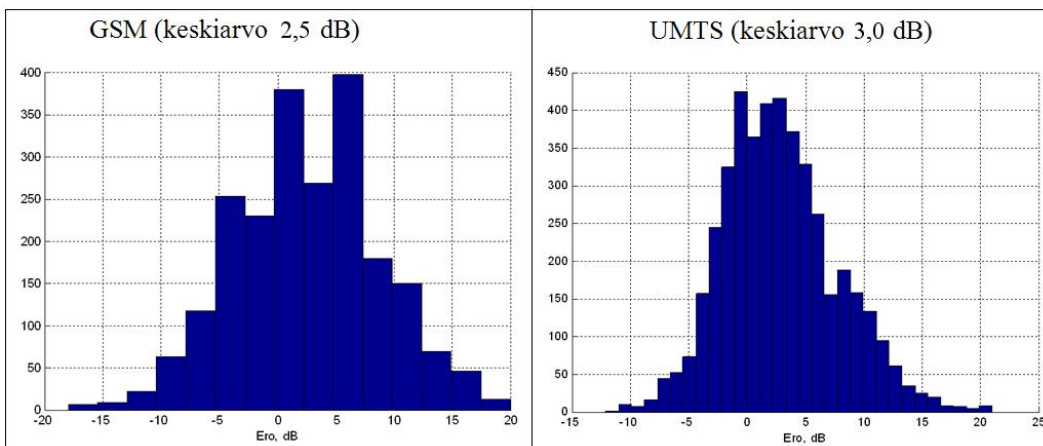
Kuva 18. Lasitetun parvekkeen vaikutus signaalitasoon vertailuhistogrammina.



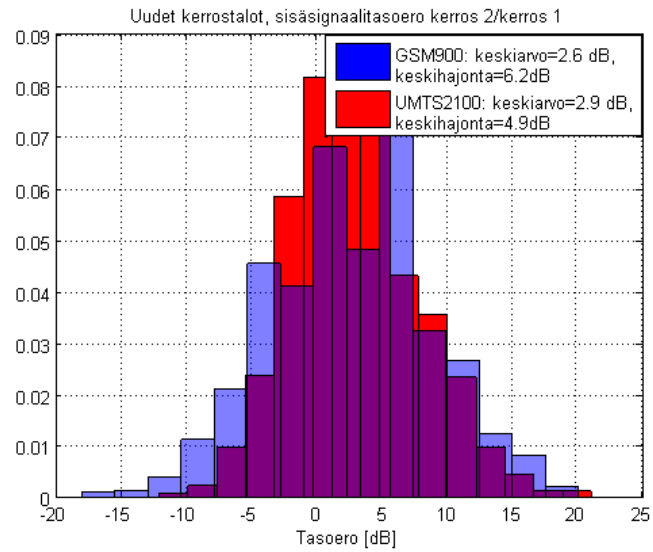
Kuva 19. Lasitetun parvekkeen vaikutus signaalitasoon CDF-kuvaajana.

Sisäsignaalitasoero – kerros 2 / kerros 1

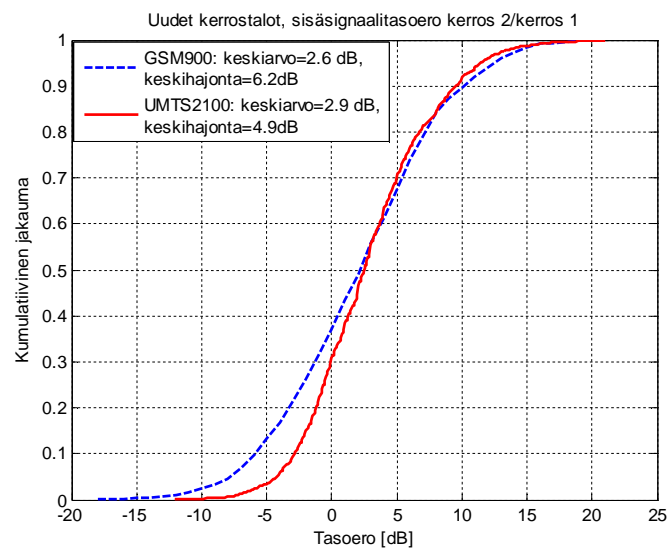
Uusissa kerrostaloissa selvitettiin myös kuinka paljon signaalitasoero poikkeaa ensimmäisen ja toisen kerroksen välillä. Mittaustulokset ensimmäisen ja toisen kerroksen välillä on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuva 20, Kuva 21 ja Kuva 22). Mittausten perusteella ensimmäisessä kerroksessa signaalitaso on noin 2,5 dB heikompi GSM:llä ja noin 3 dB heikompi UMTS:llä kuin toisessa kerroksessa. Keskihajontojen ollessa 6,2 dB ja 4,9 dB, joka voidaan hyvin todeta Kuva 20:ta GSM:n leveämmästä histogrammista. Tämän perusteella kerrostaloissa kerroksen vaikutus on melko pieni verrattuna rivitalojen tilanteeseen. Jakaumat eivät ole normaalijakautuneita, joka voi johtua muun muassa siitä, että ensimmäisen ja toisen kerroksen mittausreitit ovat voineet olla toisistaan poikkeavia ja eri kerrosten tilat erityyppisiä.



Kuva 20. Uusien kerrostalojen sisäsignaalitasoeron muutos kerros 2 / kerros 1 histogrammina.



Kuva 21. Uusien kerrostalojen sisäsignaalitasoeron muutos kerros 2 / kerros 1 vertailuhistogrammina.

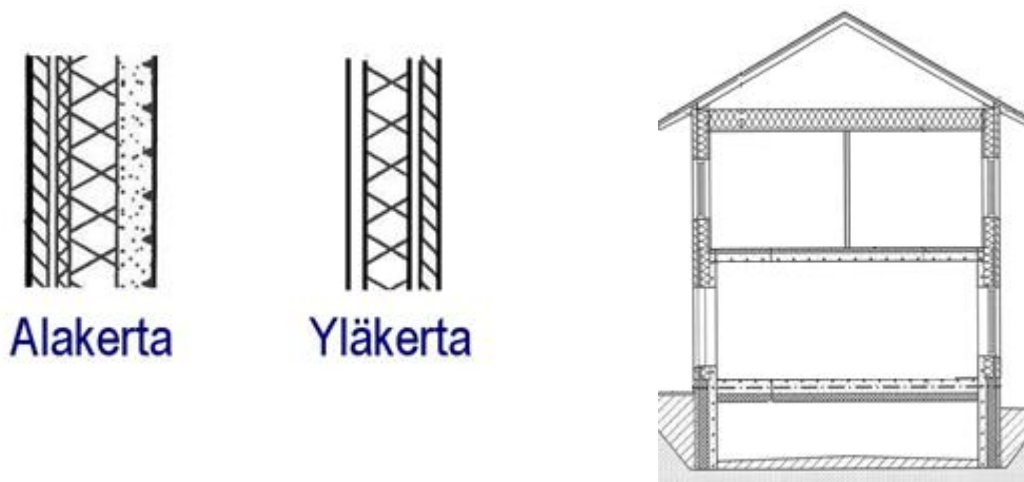


Kuva 22. Uusien kerrostalojen sisäsignaalitasoeron muutos kerros 2 / kerros 1 CDF-kuvaajana.

4.2.2 Uudet rivitalot

Uusien rivitalojen mittaustulokset on esitetty tässä. Uusille rivitaloille käytettiin samoja kriteereitä kuin kerrostaloille. Uusien rivitalojen mittauksia tehtiin yhteensä neljässä kohteessa, joissa mittauspaikkoja oli viisi.

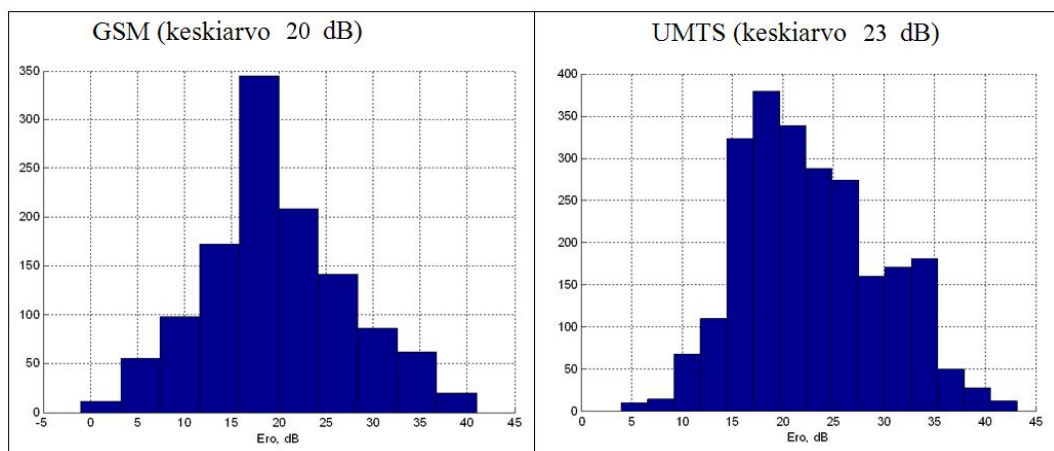
Kaikkineen mittausvektoreita kertyi noin sata. Rivitalojen rakenteet eroavat jonkin verran kerrostalojen rakenteista, mutta rakennusmateriaalit ovat pääosin samoja. Kuva 23 esittää rivitalojen yleisen rakenteen sekä ylä- ja alakerran seinärakenteiden eron. Kuvasta nähdään, että yläkerran seinärakenne on huomattavasti kevytrakenteisempi, kuin alakerroksen. Tästä seikasta seuraa myös ylä- ja alakerran suuri signaalitasoero. Tällaista rakenne-eroa ei esimerkiksi kerrostaloissa pääsääntöisesti ole.



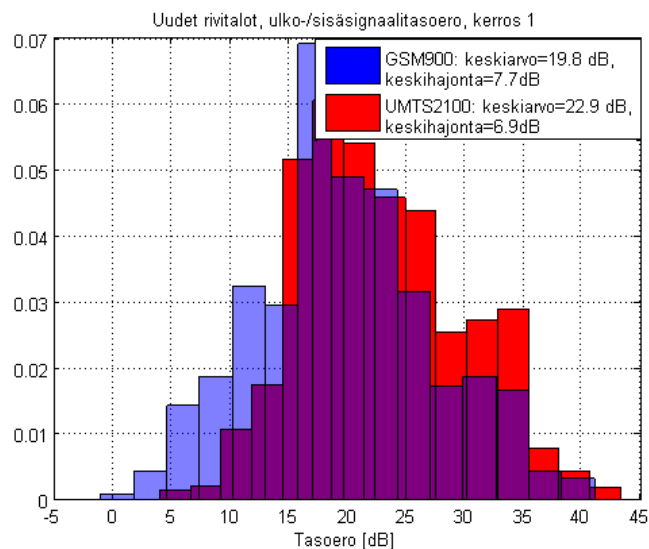
Kuva 23. Yleinen rivitalojen seinärakenne sekä periaatekuva.

Ulko-/sisäsignaalitasoero – alakerroksessa

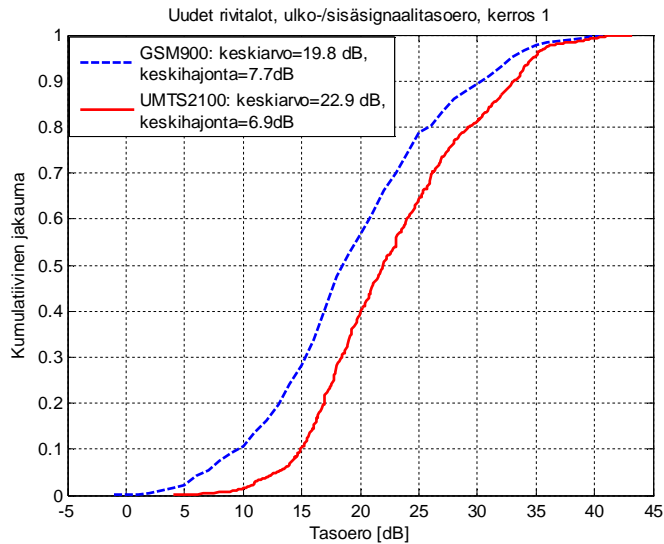
Uusissa rivitaloissa keskimääräinen ulko- ja sisäsignaalitason ero oli mittausten mukaan luokkaa 20 dB GSM:llä ja 23 dB UMTS:llä, joka on nähtävissä kuvasta (Kuva 24). Histogrammikuvaajan perusteella GSM:n mittaustulokset noudattavat jossain määrin normaalijakaumaa, mutta varsinkin UMTS:llä histogrammista ei ole enää havaittavissa normaalijakauman muotoa. Tämä johtuu osittain siitä, että rivitalojen mittaustuloksia on huomattavasti vähemmän kuin kerrostaloista. Tämän lisäksi rivitaloissa ensimmäisen kerroksen rakenteet vaihtelevat suuresti eri kohteiden välillä. Kuvien (Kuva 25 ja Kuva 26) perusteella nähdään hyvin, että GSM-verkoissa signaalitasoero on noin luokkaa 20 dB ja UMTS-verkoissa noin 23 dB ja niitä vastaavat keskihajonnat ovat 7,7 dB ja 6,9 dB.



Kuva 24. Uusien rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot histogrammina.

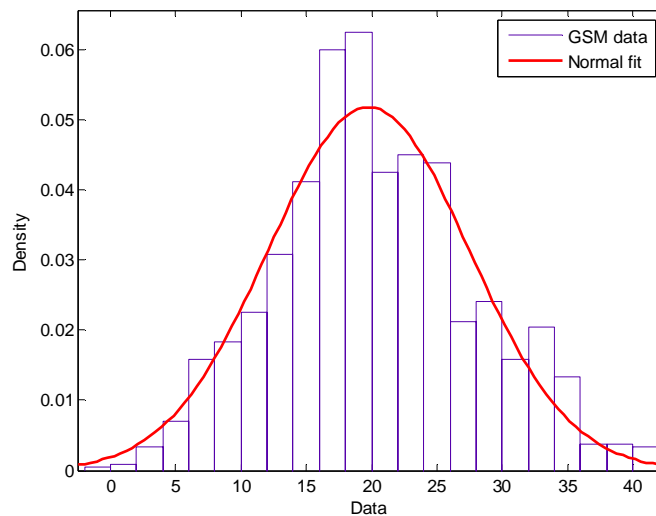


Kuva 25. Uusien rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.

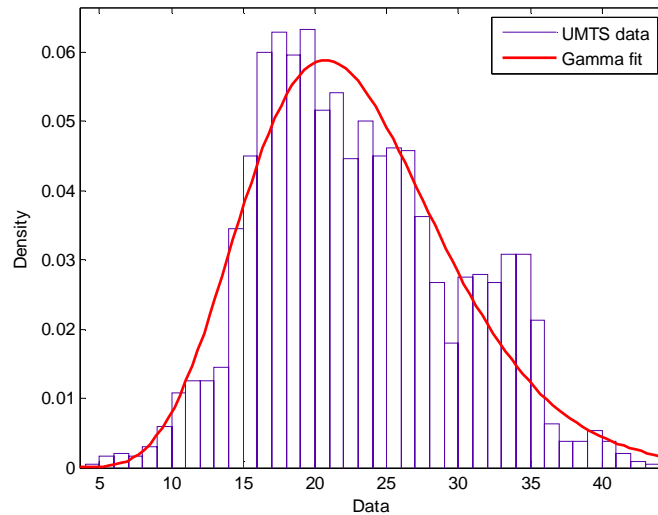


Kuva 26. Uusien rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

Jakaumat voidaan sovittaa erityyppisiin jakaumiin esimerkiksi Matlabin dfittool-työkalun avulla. Kuvassa (Kuva 27) on GSM-jakauma sovitettu normaalijakaumaan, johon se sopii melko hyvin. Sovitteen parametrit ovat μ : 19,785 ja σ : 7,70205. Vastavasti kuvassa (Kuva 28) esitetään UMTS-jakauma sovitettuna Gamma-jakaumaan, johon histogrammi jokseenkin sopii. Sovitteen parametrit ovat α : 10,5071 ja β : 2,17977.



Kuva 27. Uusien rivitalojen GSM ulko-/sisäsignaalitasoerohistogrammi sovitettuna normaalijakaumaan.

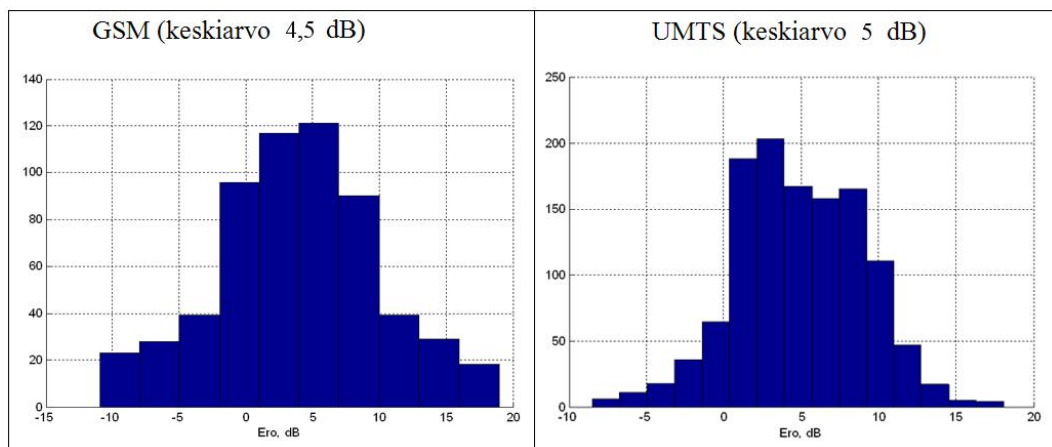


Kuva 28. Uusien rivitalojen UMTS ulko-/sisäsignaalitasoerohistogrammi sovitettuna Gamma-jakaumaan.

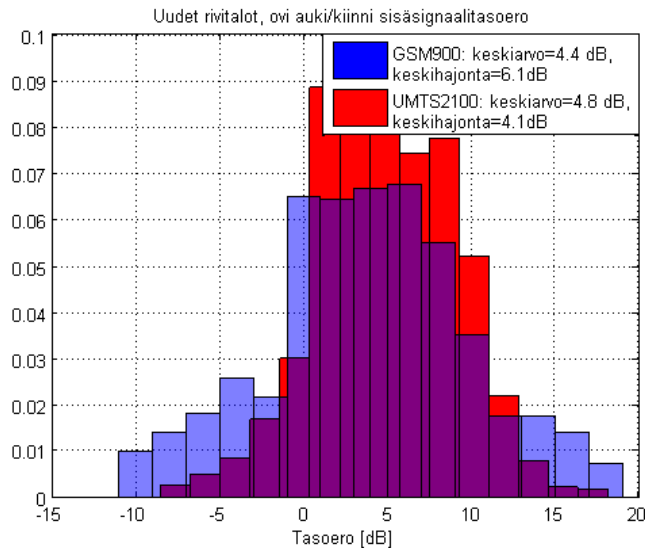
Sisäsignaalitasoero – ovi auki / ovi kiinni (alakerroksessa)

Uusien rivitalojen mittauksista selviää, että avaamalla asunnon ikkuna tai ovi saadaan keskimäärin 4–5 dB:n parannus signaalitasoon kyseisessä huoneessa. Tämä on paikallisesti merkittävä parannus, mutta ei riitä koko asunnon kuuluvuuden oleelliseen parantamiseen.

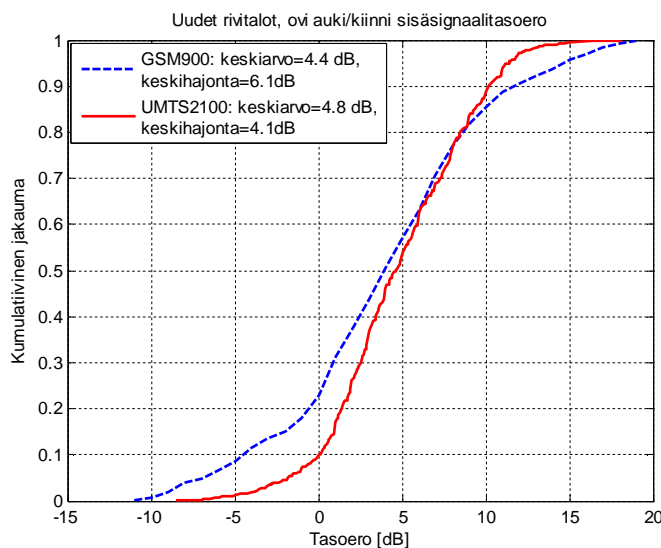
Uusissa rivitaloissa mitattu signaalitason muutos, kun asunnon ovi tai ikkuna on avattuna, on esitetty alla olevissa kuvissa (Kuva 29, Kuva 30 ja Kuva 31). Kuvaajista nähdään, että signaalitaso parantuu GSM:llä noin 4,5 dB ja UMTS:llä noin 5 dB, vastaavasti mittausten keskihajonnat olivat 4,4 dB ja 4,8 dB. Jakauma ei noudata normaalijakauman muotoa, mikä johtuu osittain siitä, että avatun oven lasi aiheuttaa heijastumia signaalille.



Kuva 29. Uusien rivitalojen ikkunan tai oven aukaisun aiheuttama parannus sisäsignaalitasoon histogrammina.



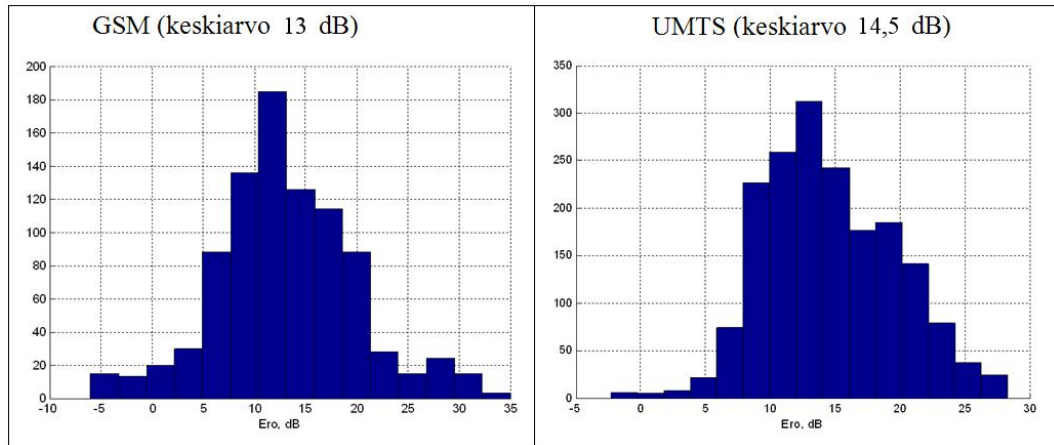
Kuva 30. Uusien rivitalojen ikkunan tai oven aukaisun aiheuttama parannus sisäsignaalitasoon vertailuhistogrammina.



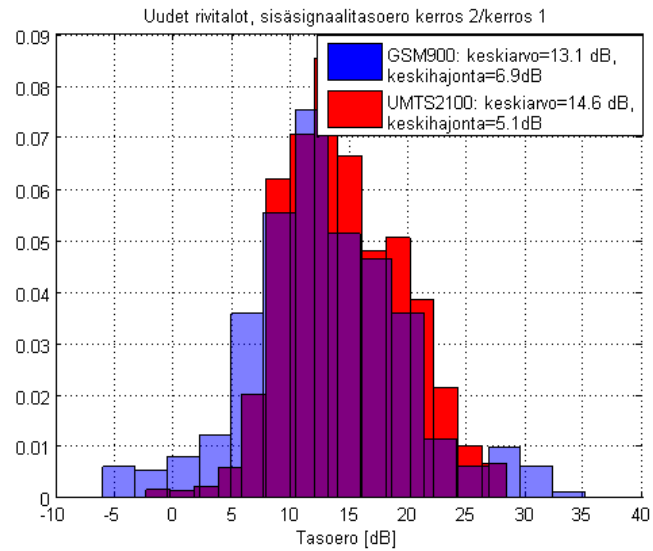
Kuva 31. Uusien rivitalojen ikkunan tai oven aukaisun aiheuttama parannus sisäsignaalitasoon CDF-kuvaajana.

Sisäsignaalitasoero – kerros 2 / kerros 1

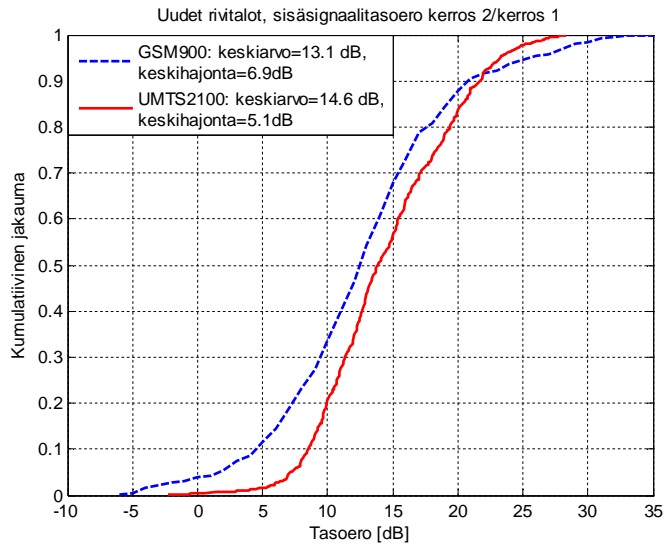
Tässä vertaillaan signaalitasoeroa uusien rivitalojen ensimmäisen ja toisen kerroksen välillä. Seuraavien kuvaajien (Kuva 32, Kuva 33 ja Kuva 34) perusteella rivitaloissa sisäsignaalitaso on GSM:llä noin 13 dB ja UMTS:llä noin 15 dB heikompi ensimmäisessä kerroksessa kuin toisessa kerroksessa. Keskihajonnat ovat GSM:lle 6,9 dB ja UMTS:lle 5,1 dB. Tämä on oleellisesti suurempi muutos kuin esimerkiksi kerrostaloissa. Jakaumien muoto ei noudata normaalijakaumaa, jota selittää se, että rivitalojen mitausreitit ja rakenteet olivat osittain erilaiset ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa.



Kuva 32. Uusien rivitalojen sisäsignaalitasoeron muutos kerros 2 / kerros 1 histogrammina.



Kuva 33. Uusien rivitalojen sisäsignaalitasoeron muutos kerros 2 / kerros 1 vertailu-histogrammina.



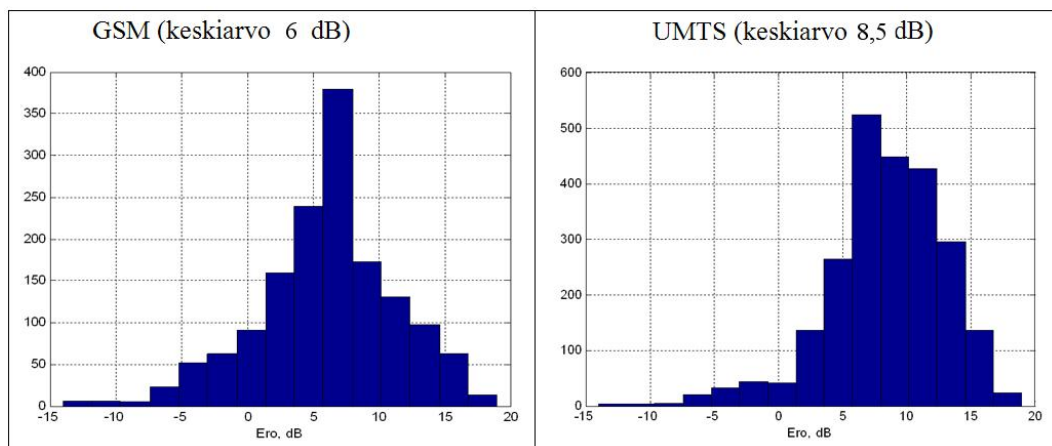
Kuva 34. Uusien rivitalojen sisäsignaalitasoeron muutos kerros 2 / kerros 1 CDF-kuvaajana.

4.2.3 Vanhat kerrostalot

Vastaavat mittaukset kuin uusissa kerrostaloissa suoritettiin myös vanhoissa kerrostaloissa. Vanhoiksi luokiteltiin rakennukset, joissa oli yli 20 vuotta vanhat alkuperäiset ulkoseinät ja sitä aikakautta vastaavat ikkunarakenteet. Radiosignaalien kannalta vanhoiksi luokiteltavia asuinkerrostaloja mitattiin projektin kuluessa 10 kappaletta, joissa signaalitasot tutkittiin yhteensä 18 mittauspaikassa.

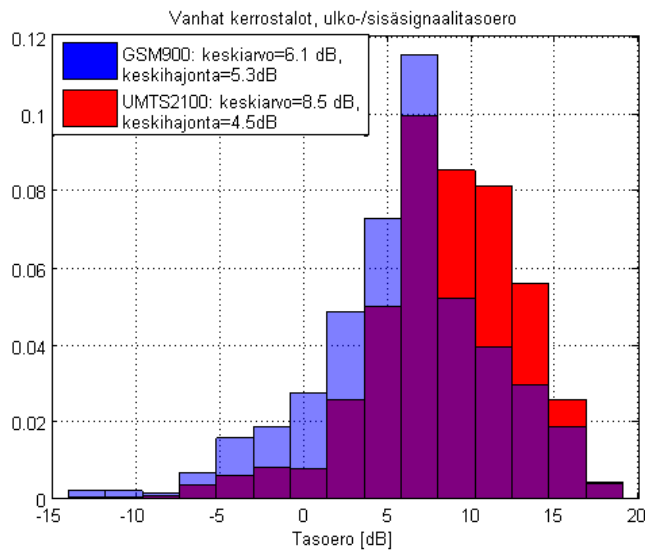
Ulko-/sisäsignaalitasoero

Vanhoissa kerrostaloissa keskimääräinen vaimennus vaihteli mittauksien perusteella GSM:n noin 6 dB:stä UMTS:n noin 8,5 dB:iin, jolloin niitä vastaavat keskihajonnat ovat 5,3 dB ja 4,5 dB. Tulokset on esitetty erikseen kuvassa (Kuva 35). Molemmat vaimenusarvot ovat huomattavasti alhaisempia kuin uusissa kerrostaloissa. Tuloksissa on nähtävissä hieman normaalijakauman muotoa, joka on keskittynyt GSM:ssä ja siirtynyt oikealle UMTS:ssä. Tämä johtuu osittain siitä, että mitattujen vanhojen kerrostalojen joukossa oli hyvin monen tyyppisiä rakenteita, jotka läpäisivät signaalia hyvin eri tavoin.

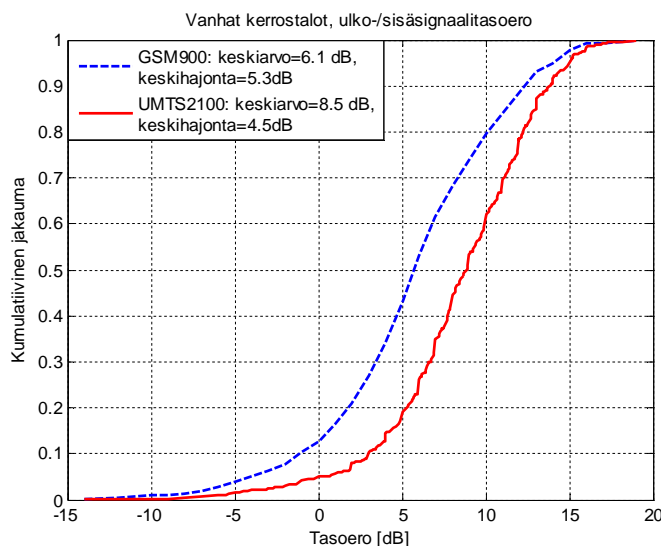


Kuva 35. Vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot histogrammina.

Seuraavissa kuvissa (Kuva 36 ja Kuva 37) eri taajuuksilla toimivien GSM- ja UMTS-verkkojen tulokset on yhdistetty ja kuvattu histogrammina ja CDF-muodossa.



Kuva 36. Vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.



Kuva 37. Vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

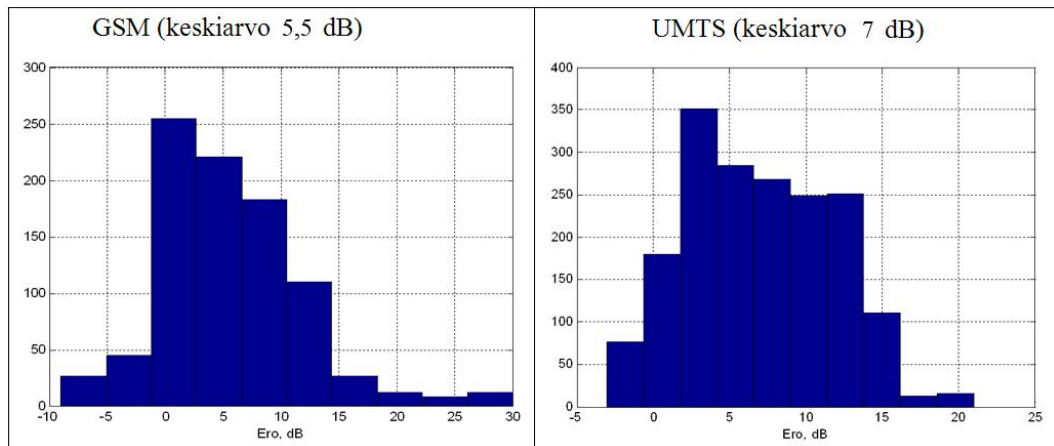
Vanhojen talojen mittauksista saadut tulokset eivät enää noudata täysin normaalijakaumaa, mikä tulee ottaa huomioon varsinkin CDF-kuvausta tulkittaessa. Tulosten keskihajonta on uusien talojen vastaavaa lukua pienempi, mutta suhteutettuna selvästi pienempiin vaimennusarvoihin hajontaa on enemmän. Jakaumat kuitenkin noudattavat siinä määrin normaalijakauman yleistä muotoa, että niiden pohjalta voidaan jatkossa arvioida talojen keskimääräisen vaimennuksen kehittymistä.

4.2.4 Vanhat rivitalot

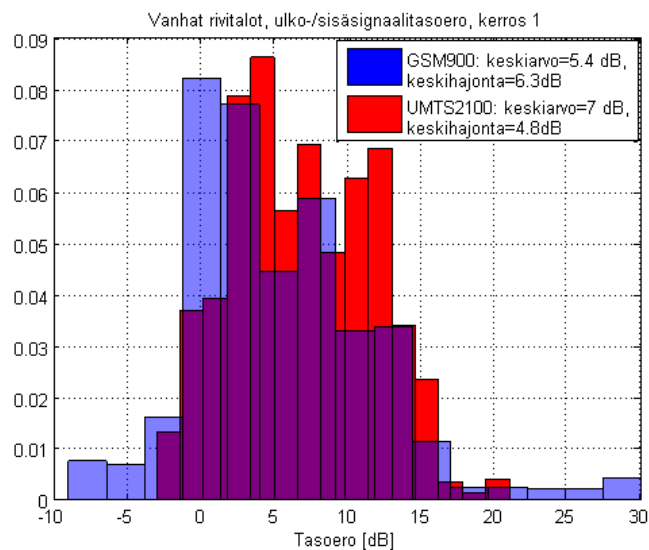
Tässä esitetään vanhojen rivitalojen mittaustulokset. Vanhoiksi rivitaloiksi luettiin rungoistaan pääasiallisesti yli 20 vuotta vanhat talot, joiden ikkunoissa ei ollut selektiivikalvoja.

Ulko-/sisäsignaalitasoero – alakerroksessa

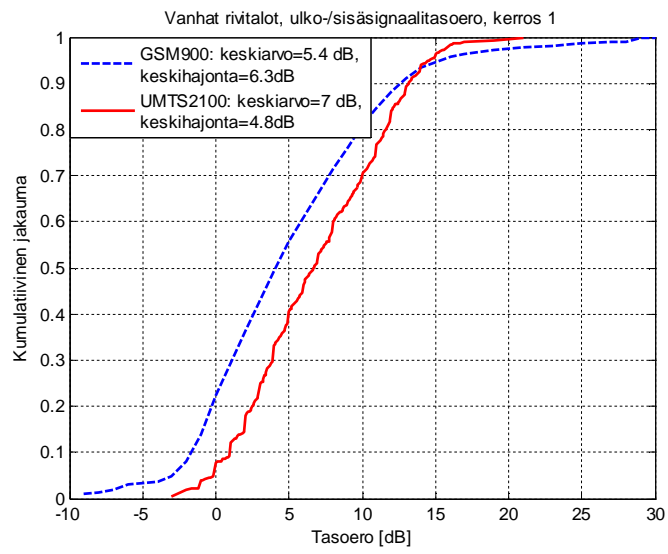
Vanhojen rivitalojen tilanne ensimmäisessä kerroksessa on samaa luokkaa kuin vanhoissa kerrostaloissa. Mittaustulokset on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuva 38, Kuva 39 ja Kuva 40). Vaimennukset ovat keskimäärin 5,5 dB:n luokkaa GSM:llä ja 8 dB:n luokkaa UMTS:llä. Vastaavat keskihajonnat ovat 6,3 dB ja 4,8 dB. Histogrammien muodot eivät noudata normaalijakauman muotoa. Tämä johtuu siitä, että vanhojen rivitalojen mittaukset suoritettiin hyvin erityyppisissä rakennuksissa ja erilaisia reittejä käyttäen. Tämän lisäksi vanhojen rivitalojen määrä mittauksissa oli huomattavasti pienempi, kuin muiden rakennustyyppien.



Kuva 38. Vanhojen rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot alakerrassa histogrammina.



Kuva 39. Vanhojen rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.



Kuva 40. Vanhojen rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

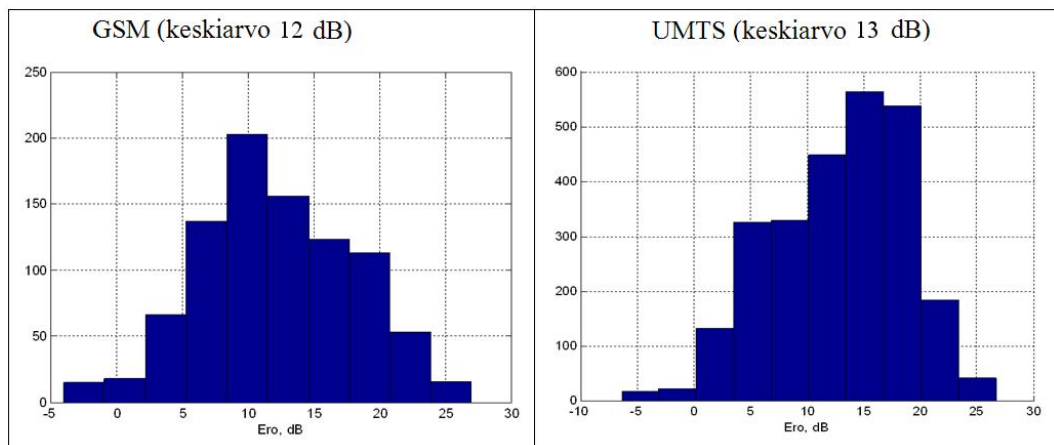
4.2.5 Uudistetut vanhat kerrostalot

Tässä esitetään vanhojen, mutta äskettäin uudistettujen kerrostalojen mittaustulokset. Uudistamisella tarkoitetaan ikkunoiden ja eristyksen uudistamista eli rakennuksen perusparantamista.

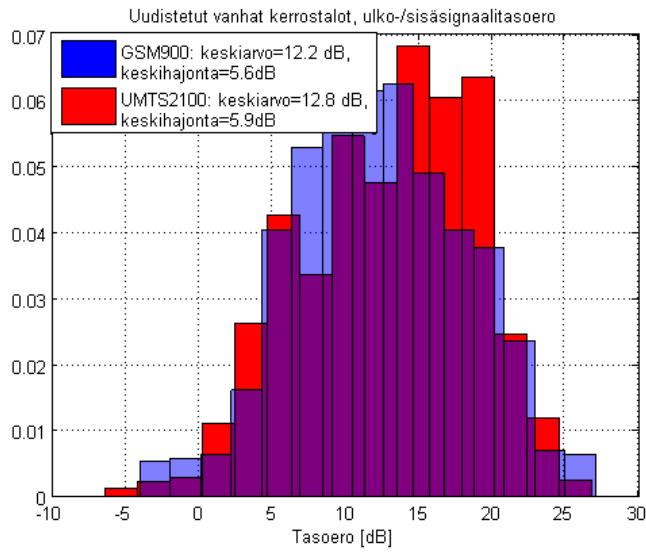
Ulko-/sisäsignaalitasoero

Uudistetuissa vanhoissa kerrostaloissa vaimennukset ovat GSM:llä luokkaa 12 dB ja vain hieman korkeammat UMTS:llä ollen 13 dB. Keskihajonnat asettuvat GSM:llä 5,6 dB:n tasoon ja UMTS:llä 5,9 dB:n tasoon. Tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuva 41, Kuva 42 ja Kuva 43), joista selviää, että vaimennukset ovat noin 5 dB korkeampia kuin uudistamattomissa kerrostaloissa. Tulokset eivät noudata normaalijakaumaa, joka johtuu osittain siitä, että mitatut uudistetut talot ovat olleet osittain keskeneräisiä eli taloissa on ollut sekä uusia että vanhoja rakenteita. Tämän lisäksi näitä mittauskohteita on ollut ainoastaan muutama.

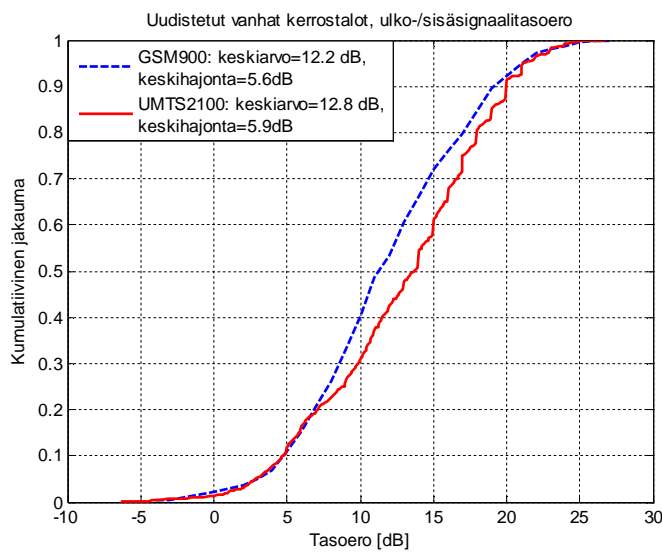
Näiden mittaustulosten perusteella peruskorjaamisella ei synny uutta uudisrakennusta vastaavaa taloa. Tietysti ikkunoiden vaihtamisella ja lisäeristämällä heikennetään sisäsignaalitasoa, mutta mittausten perusteella ei niin paljoa, että siitä aiheutuisi normaalitilanteessa ongelmia.



Kuva 41. Uudistettujen vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot histogrammina.



Kuva 42. Uudistettujen vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.



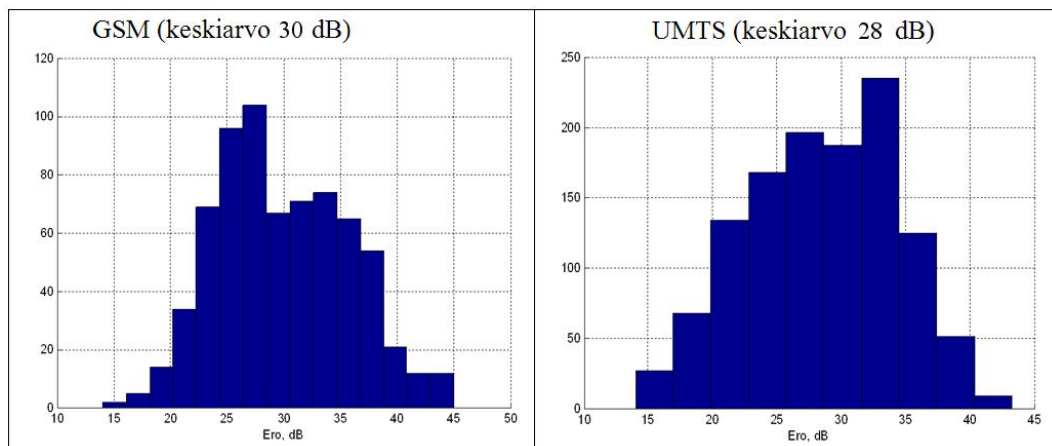
Kuva 43. Uudistettujen vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

4.2.6 Uudet liiketilat – kerrostalon ensimmäisessä kerroksessa

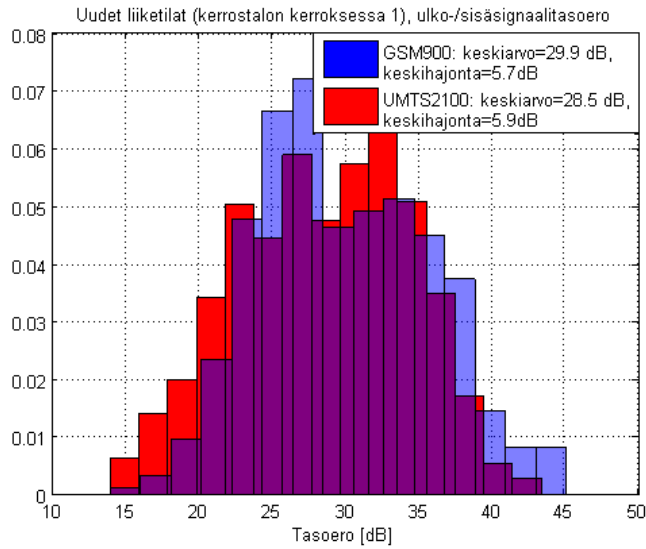
Tässä tutustutaan uusien liiketilojen tuloksiin. Mittaussarjassa mitattiin kaksi eri liiketilaa, joissa mittauspaikkoja oli yhteensä neljä. Mittausvektoreita kertyi yhteensä noin 50. Mitatut liiketilat sijaitsivat kerrostalojen ensimmäisissä kerroksissa.

Ulko-/sisäsignaalitasoero

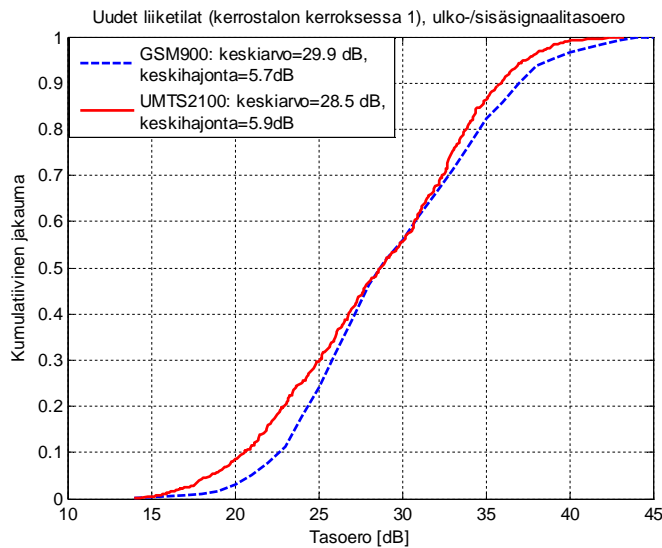
Uusien katutasossa sijaitsevien liiketilojen mittauksissa todettiin, että vaimennukset ovat todella suuria eli GSM:llä noin 30 dB ja UMTS:llä noin 28 dB, jolloin useimmiten puhelimen käyttö ei enää onnistu sisätiloissa. Keskihajonnoiksi saadaan 5,7 dB ja 5,9 dB. Tämän seurauksena operaattorit usein rakentavat omille asiakkailleen paikkaan sisäverkon esimerkiksi toistimen avulla. Mittaustulokset on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuva 44, Kuva 45 ja Kuva 46). Mittaustulokset eivät noudata normaalijakaumaa. Tähän syynä voi olla se, että liiketiloissa on monen tyyppisiä rakenteita, yksinkertaisia suuria näyteikkunoita, tavallisia avattavia ikkunoita sekä erityyppisiä heijastavia pintoja, jotka aiheuttavat signaalille muutoksia.



Kuva 44. Uusien liiketilojen (kerrostalon ensimmäisessä kerroksessa) ulko-/sisäsignaalitasoerot histogrammina.



Kuva 45. Uusien liiketilöjen ulko-/sisäsignaalitasoerot (kerrostalon ensimmäisessä kerroksessa) vertailuhistogrammina.



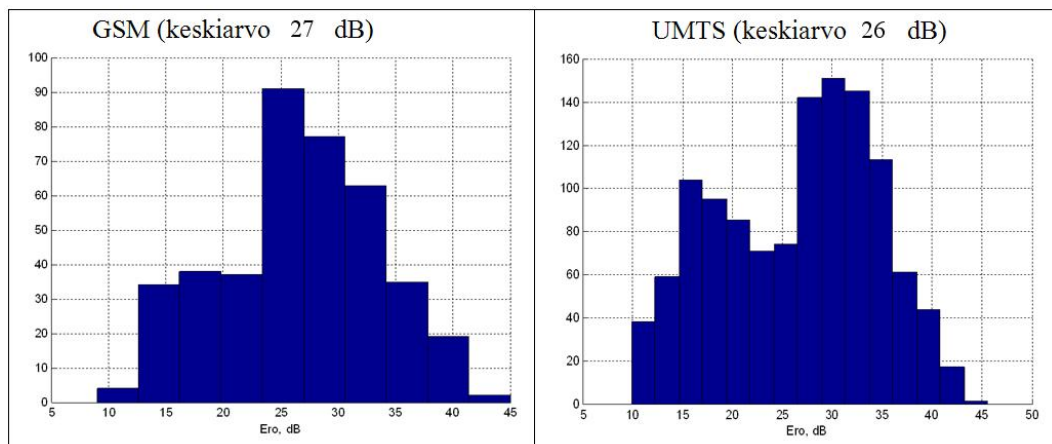
Kuva 46. Uusien liiketilöjen ulko-/sisäsignaalitasoerot (kerrostalon ensimmäisessä kerroksessa) CDF-kuvaajana.

4.2.7 Uudet liiketilat – isot rakennukset

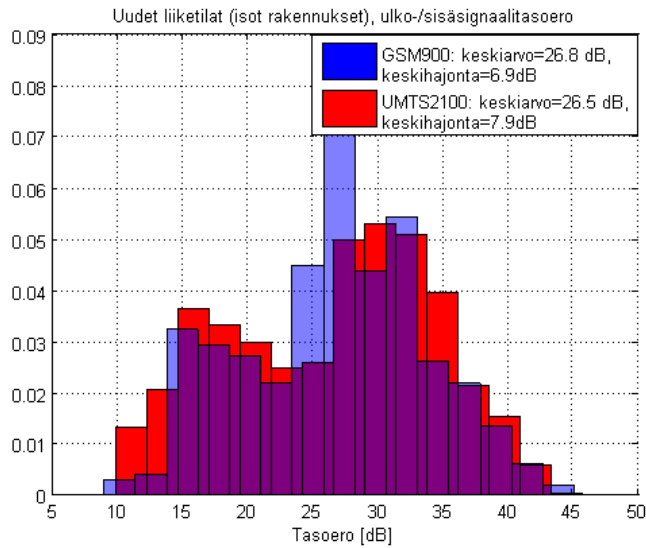
Tässä tarkastellaan mittaustuloksia uusien isoissa rakennuksissa sijaitsevien liiketilojen osalta. Mittauskohteena oli melko uusi kauppakeskus.

Ulko-/sisäsignaalitasoero

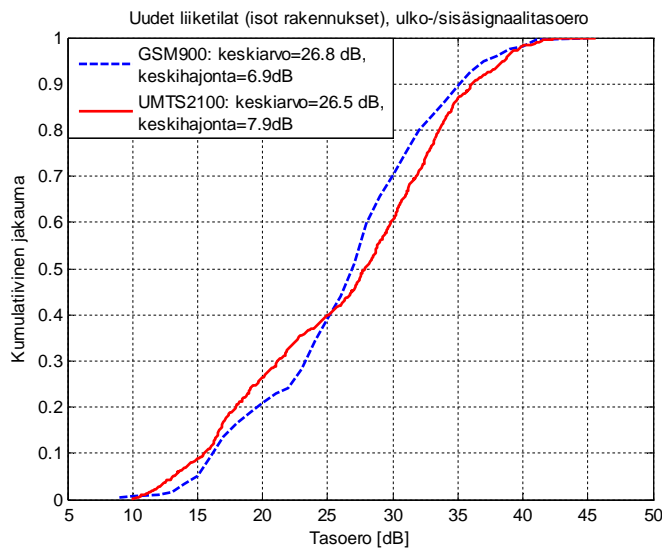
Uusissa liiketiloissa kuten kauppakeskuksissa vaimennuksiksi saatiin noin 27 dB GSM:lle ja 26 dB UMTS:lle, jolloin keskihajonnat olivat vastaavasti 6,9 dB ja 7,9 dB. Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että matkapuhelimien käyttö sisätiloissa ei todennäköisesti onnistu. Näissäkin kohteissa operaattorit rakentavat usein sisäverkon palvelemaan asiakkaitaan. Mittaustulokset on esitetty seuraavissa kuvissa (Kuva 47, Kuva 48 ja Kuva 49). Kuvaajien muodoista nähdään, että mittauksissa on ollut jonkin verran hajontaa, ja vaimennusarvot eroavat jonkin verran toisistaan. Kuvaajat eivät noudata normaalijakaumaa. Tätä selittää se, että isot rakennukset ovat pääosin metallirakenteisia ja signaali tulee rakennukseen erityyppisten metallipintojen läpi tai erityyppisten aukkojen kautta. Tämän vuoksi myös CDF-kuvaaja on osittain vääristynyt.



Kuva 47. Uusien liiketilojen (isot rakennukset) ulko-/sisäsignaalitasoerot histogrammina.



Kuva 48. Uusien liiketilöiden (isot rakennukset) ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.



Kuva 49. Uusien liiketilöiden (isot rakennukset) ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

4.2.8 Julkiset rakennukset – Lukio

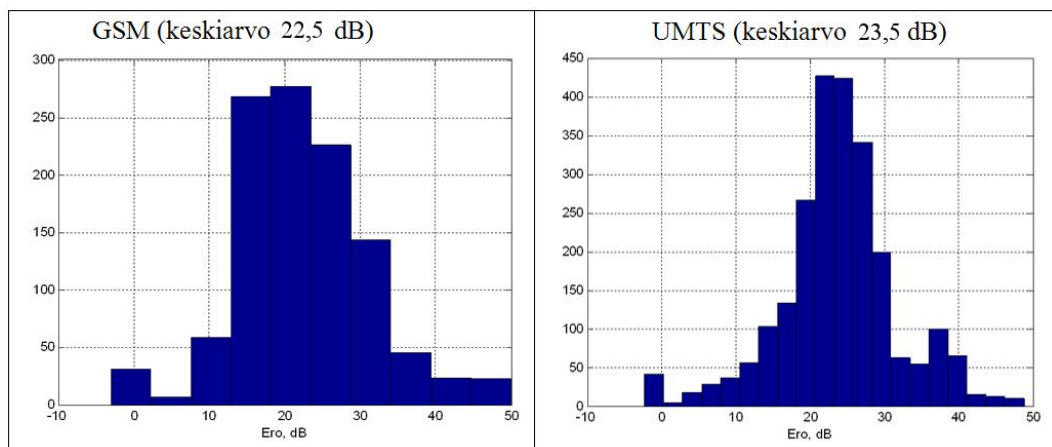
Tässä tutustutaan yhden julkisen rakennuksen mittaustuloksiin. Vaikka tuloksia on vain yhdestä kohteesta, se antaa hyvän kuvan siitä, kuinka ongelmallisia uudet isot rakennukset ovat. Kohteessa mitattiin viidessä eri mittauspaiassa ja yksittäisiä mittauksia kertyi noin 60 kappaletta.

Ulko-/sisäsignaalitasoero

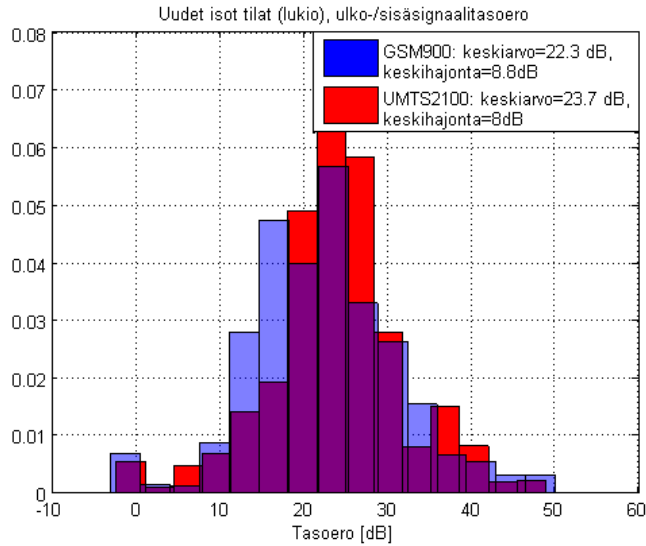
Mittauksissa tutkittiin myös vastavalmistuneen lukiorakennuksen vaimennuksia. Kuvien (Kuva 50, Kuva 51 ja Kuva 52) perusteella todetaan, että vaimennukset ovat noin 22 dB GSM:llä ja noin 24 dB UMTS:ssä. Vastaavat keskihajonnat olivat noin 8 dB ja 8,8 dB.

Tuloksia tutkiessa tulee huomioida se, että rakennuksessa oli yhden operaattorin toistin. Tämän vuoksi tulokset osoittavat hieman parempaa tilannetta kuin se todellisuudessa oli. Koska tulokset osoittavat yli 20 dB:n vaimennustasoa, tarkoittaa tämä käytännössä sitä, että puhelimen käyttäminen rakennuksessa on melko haastavaa, jollei rakennusta palveleva tukiasema ole hyvin lähellä rakennusta. Näin ei kuitenkaan ollut, jonka seurauksena rakennuksen kaikissa tiloissa ei ollut verkkoa saatavilla lainkaan.

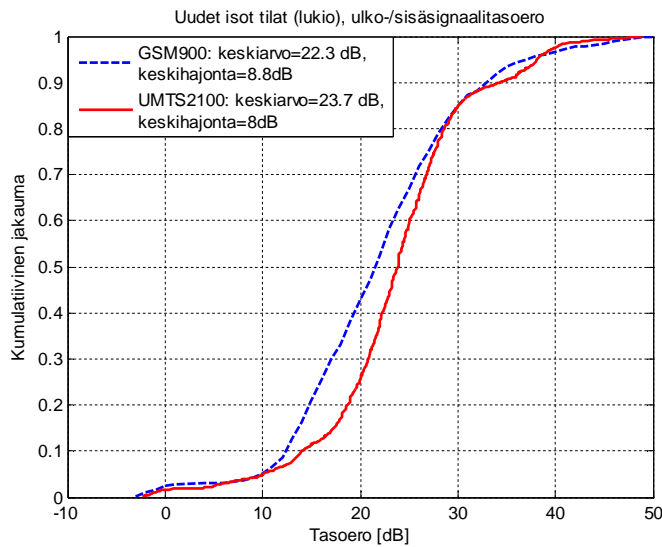
Kuvaajista myös nähdään se seikka, että mittauksissa on mitattu hyvin erityyppisiä reittejä, joissa vaimennusarvot ovat vaihdelleet suuresti. Tämän seurauksena kuvaajista ei voi havaita normaalijakauman piirteitä. Kuvaajien muodot ovat melko epäsäännöllisiä, joka osoittaa sen, että mittauksia olisi pitänyt olla enemmän tilastollisen analyysin laadintaan.



Kuva 50. Uusien isojenrakennusten ulko-/sisäsignaalitasoerot histogrammina.



Kuva 51. Uusien isojen rakennusten ulko-/sisäsignaalitasoerot vertailuhistogrammina.



Kuva 52. Uusien isojen rakennusten ulko-/sisäsignaalitasoerot CDF-kuvaajana.

4.3 Uusien ja vanhojen talojen vertailu

Tässä keskitytään uusien ja vanhojen kerros- ja rivitalojen ulko-/sisäkuuluvuuseron vertailemiseen. Tämän lisäksi verrataan ensimmäisen ja toisen kerroksen kuuluvuuseroa toisiinsa.

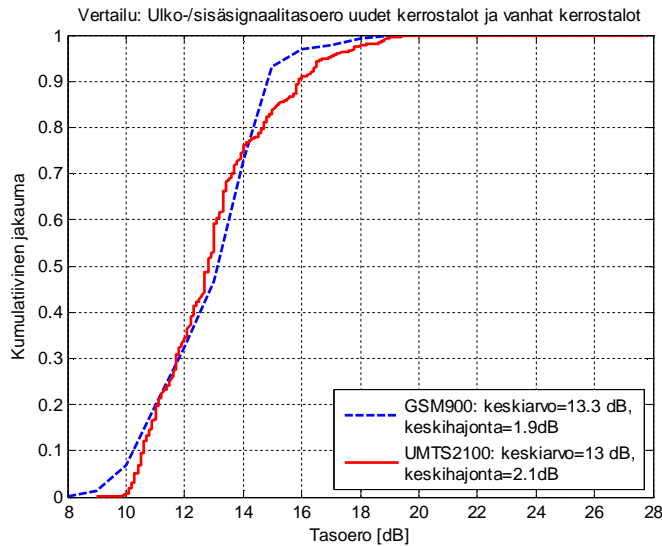
Aikaisemmin esitettyjen kerrostalojen kuvien (Kuva 6 ja Kuva 35) asteikot ovat erilaiset, mutta keskimääräiset vaimennusarvot (uusilla taloilla 19 dB GSM:lle ja 21 dB UMTS:lle ja vanhoille taloille vastaavasti 6 dB ja 8 dB) ovat suuruusluokaltaan hyvin erilaisia. Kuvista havaitaan, että hajonta vanhojen talojen mittaustuloksissa on hieman pienempää, kuin uusissa taloissa. Tämä kertoo siitä, että uusissa taloissa on paikkoja, joissa signaalitaso on kohtuullisen hyvä, mutta toisena ääripäänä on paikkoja, joissa signaalitaso on hyvin matala.

Tuloksia voidaan pitää luotettavina niihin koostettujen mittausten suuren määrän vuoksi. Yksittäisiä mittauskohteita sekä uusissa että vanhoissa taloissa oli yhteensä 18 kappaletta. Mittauksia kertyi yli 200 kappaletta kummallekin talotyypille. Tuloksia vertailtaessa on syytä huomioida, että uusien talojen kuvaajat antavat hieman todellisuutta paremman kuvan vaimennuksista. Tämä selittyy sillä, että osassa mittauskohteita jokin operaattoreiden signaaleista oli niin heikko, että siitä ei saatu luotettavaa mittausvektoria. Tällöin sitä ei voitu verrata talon ulkopuolella olevaan signaalinvoimakkuutta kuvaavaan vektoriin, ja kyseisen operaattorin tulos jäi pois kokonaistarkastelusta. Kokonaiskuvaan syntyy siis hieman positiivista virhettä kun osa huonoimmista tuloksista jää pois. Virhe ei kuitenkaan ole merkittävä, sillä alle 10 % mittauksista jouduttiin edellä olevasta syystä hylkäämään.

4.3.1 Kerrostalojen vertailu

Kuvassa (Kuva 53) esitetään uusien ja vanhojen kerrostalojen vaimennukset samassa kuvassa. Kuvaan on kerätty kaikkien mitattujen kohteiden erovektorit, koostettuna kaikilta kolmelta operaattorilta, pois lukien aikaisemmin mainitut yksittäiset mittaukset, joista erovektoria ei saatu. Kuvassa molemmat talotyypit on yhdistetty ja talotyyppien keskimääräisistä erokäyristä on laskettu uusien ja vanhojen talotyyppien väliset keskimääräiset erot.

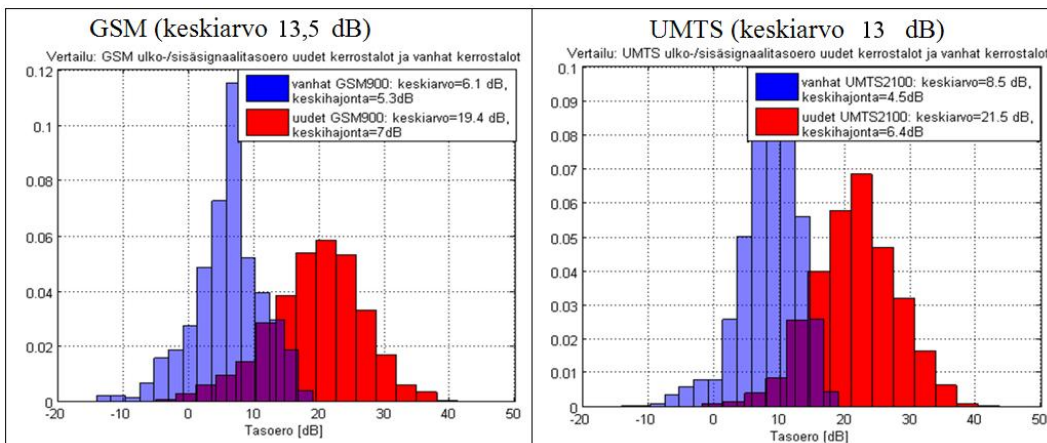
Tulosten perusteella kerrostaloissa GSM- ja UMTS-verkkojen erot ovat yllättävän pieniä ja asettuivat päinvastoin kuin odotettiin. GSM:llä eroksi saatiin 13,3 dB ja UMTS:llä 13,0 dB. Keskihajonnoiksi saatiin vastaavasti 1,9 dB ja 2,1 dB.



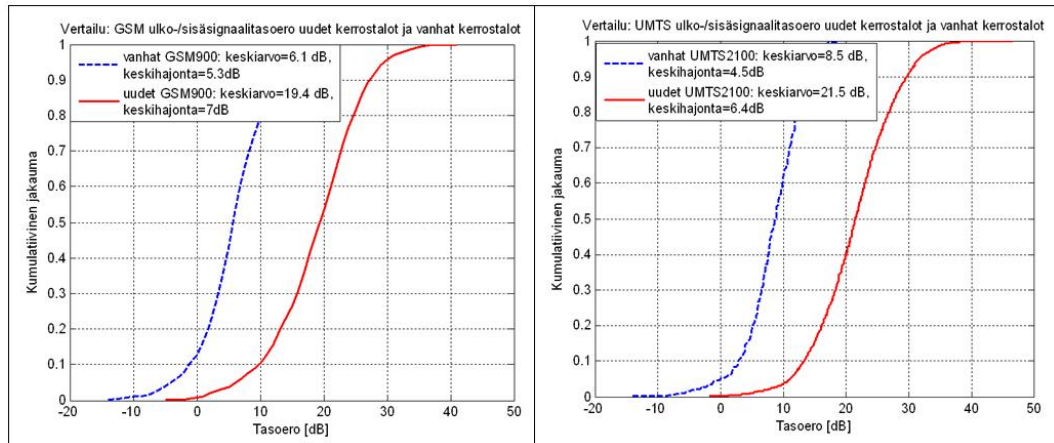
Kuva 53. Uusien ja vanhojen talojen signaalitasoerojakauma.

4.3.2 Uusien ja vanhojen kerrostalojen vertailu

Seuraavissa kuvissa (Kuva 54 ja Kuva 55) on vertailtu uusien ja vanhojen kerrostalojen ulko-/sisäsignaalitasoeroa toisiinsa. Kuvaajissa punainen pylväs tai käyrä kuvaa uusia taloja ja sininen vanhoja taloja. Kuten histogrammikuvaajista voidaan havaita, on uusien talojen vaimennus sekä GSM:llä että UMTS:llä keskimäärin noin 13 dB suurempi kuin vanhojen talojen. Keskihajonta on uusissa taloissa GSM:llä 7 dB ja UMTS:llä 6,4 dB, jotka ovat hieman suurempia kuin vanhojen talojen 5,3 dB ja 4,5 dB.



Kuva 54. Uusien ja vanhojen talojen signaalitasoerohistogrammit.



Kuva 55. Uusien ja vanhojen kerrostalojen signaalitasoerojen CDF-kuvaajat.

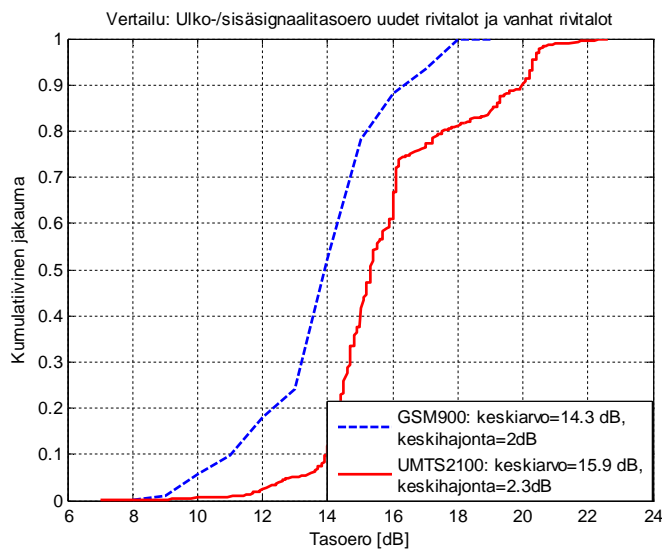
Käyrien yhdenmukaisuus sekä niiden symmetrinen muoto tukevat käsitystä tulosten luotettavuudesta, sillä kohdekohtaisessa vertailussa havaittu vaihtelu on tasoittunut. Samoin mittauskohteiden tulokset ovat toisistaan riippumattomia, ja mittalaitteiden virhe RSCP- ja Rx-level-tasojen osalta keskiarvottuu lähelle nollaa.

Kuvaajien perusteella voidaan uusien ja vanhojen talojen väliseksi signaalitasoeroksi todeta noin 13 dB. Kuvassa olevien käyrien muoto kertoo taustadatan olevan lähes normaalijakautunutta, ja silloin kumulatiivisen jakauman 0,5-tason leikkaavia pisteitä voidaan pitää myös keskiarvoina.

Yllättävä piirre tuloksissa on se, että sekä GSM900- että UMTS2100-verkkojen erot ovat uusissa ja vanhoissa taloissa lähes samat, vaikka rakenteiden vaimennukset ovat voimakkaasti taajuudesta riippuvia. Selitys tälle on se, että rakenteiden taajuusriippuvuus on samankaltaista materiaaleista ja niiden absoluuttisten arvojen erosta huolimatta. Suhteelliset erot eri taajuudella toimivien verkkojen välillä näyttävät siis säilyvän erikäsissä, rakenteeltaan samankaltaisissa taloissa.

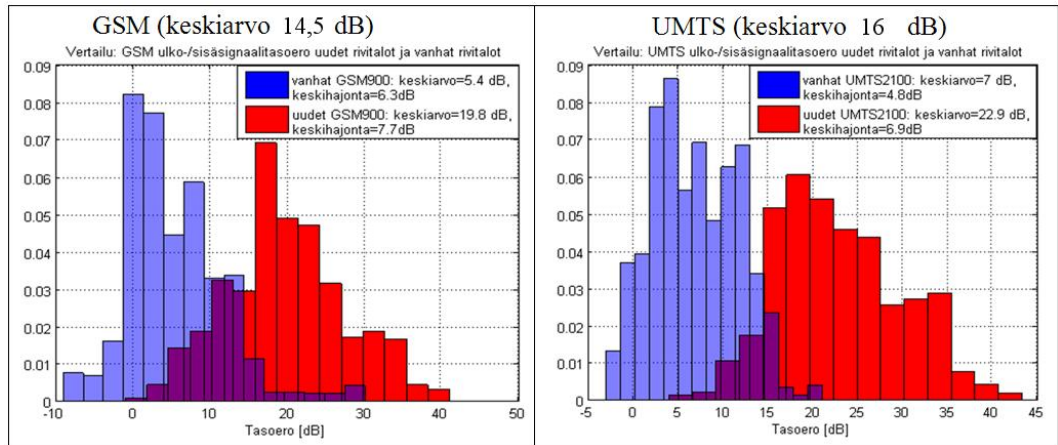
4.3.3 Uusien ja vanhojen rivitalojen vertailu

Tässä vertaillaan uusia ja vanhoja rivitaloja toisiinsa. CDF-kuvassa (Kuva 56) on vertailtu uusien ja vanhojen rivitalojen vaimennuksia. Kuvaan on kerätty kaikkien mitattujen kohteiden erovektorit koostettuna kaikilta kolmelta operaattorilta. Kuvaajasta on poistettu yksittäiset mittaukset, joista mittausvektoria ei saatu. Kuvassa molemmat talotyypit on yhdistetty ja talotyyppien keskimääräisistä erokäyristä on laskettu uusien ja vanhojen talotyyppien väliset keskimääräiset erot. Koska kuvaajaan kerätty data on peräisin hyvin erityyppisistä mittauksista, kuvaajan muoto on osittain vääristynyt. Tämä johtuu muun muassa siitä, että yhdistetty data ei ole enää tasaisesti jakautunutta.

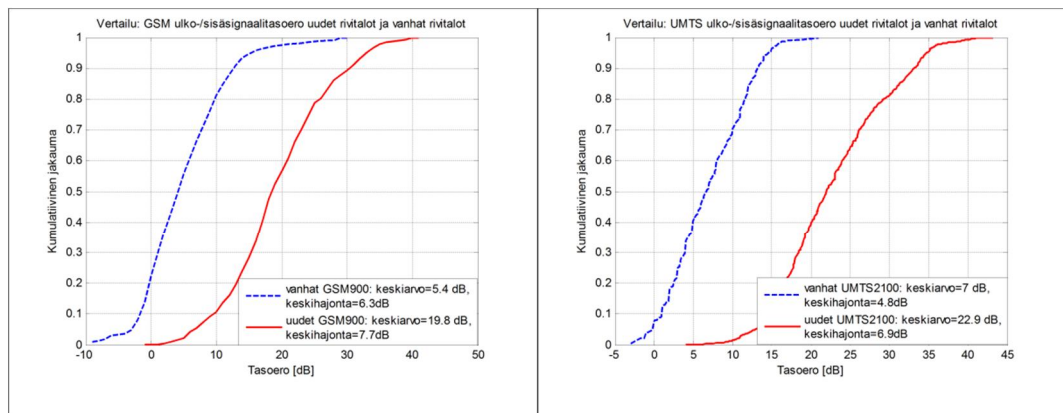


Kuva 56. Vanhojen ja uusien rivitalojen CDF-kuvaajat.

Kuvissa (Kuva 57 ja Kuva 58) on vertailtu uusien ja vanhojen rivitalojen ulko-/sisäsignaalitasoeroa toisiinsa. Kuvaajissa punainen pylväs tai käyrä kuvaa uusia taloja ja sininen vanhoja taloja. Kuten histogrammikuvaajista voidaan havaita, on uusien talojen vaimennus GSM:llä noin 14,5 dB ja UMTS:llä noin 16 dB suurempi kuin vanhojen talojen vaimennus. Nämä arvot ovat hieman korkeammat kuin aikaisemmin esitetyt kerrostalojen arvot. Tämä osoittaa sen, että rivitaloissa signaalitasot ovat vaimentuneet jopa enemmän kuin kerrostaloissa. Keskihajonnat ovat vanhoissa taloissa GSM:lle 6,3 dB ja UMTS:llä 4,8 dB, kun vastaavat uusille taloille ovat 7,7 dB ja 6,9 dB.



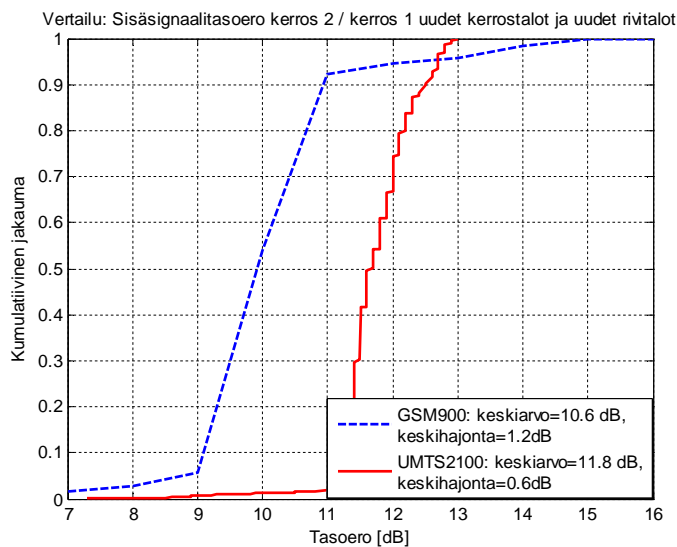
Kuva 57. Vanhojen ja uusien rivitalojen vertailuhistogrammit.



Kuva 58. Vanhojen ja uusien rivitalojen CDF-kuvaajat.

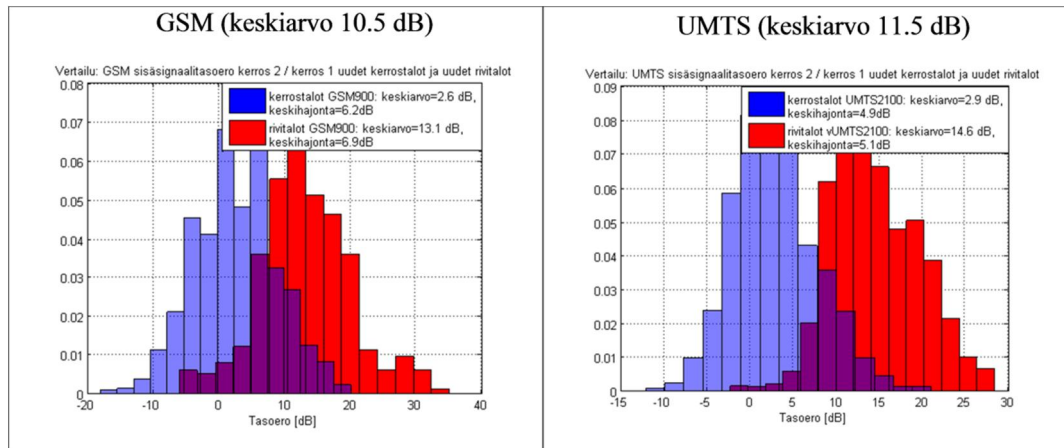
4.3.4 Uusien kerros- ja rivitalojen vertailu – kerros 2 / kerros 1

Kuvassa (Kuva 59) on esitetty uusien kerros- ja rivitalojen ensimmäisen ja toisen kerroksen signaalitasojen ero. Kuvaajaan on kerätty kaikkien mitattujen kohteiden erovektorit koostettuna kaikilta kolmelta operaattorilta. Kuvaajasta on jätetty pois yksittäiset mittaukset, joista erovektoria ei saatu. Kuvassa molemmat talotyypit on yhdistetty ja talotyyppien keskimääräisistä erokäyristä on laskettu uusien ja vanhojen talotyyppien väliset keskimääräiset erot. Myöskään tässä kuvaajassa data ei ole enää yhdistämisen jälkeen tasaisesti jakautunutta, josta seuraa kuvaajan kulmikas muoto.

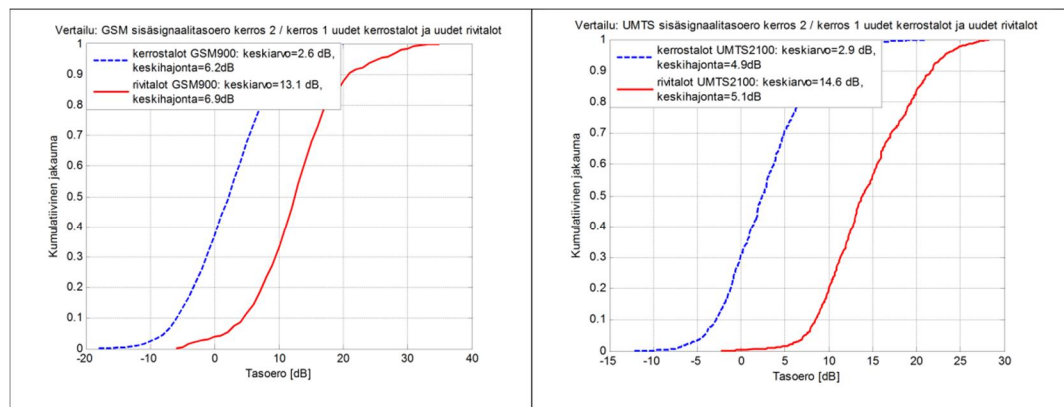


Kuva 59. Uusien kerros- ja rivitalojen kerros 2 / kerros 1 CDF-kuvaajat.

Kuvissa (Kuva 60 ja Kuva 61) on vertailtu uusien kerros- ja rivitalojen ensimmäisen ja toisen kerroksen sisäsignaalitasoeroa toisiinsa. Kuvaajissa punainen pylvä tai käyrä kuvaa rivitaloja ja sininen kuvaa kerrostaloja. Kuten histogrammikuvaajista voidaan havaita, on kerrostalojen vaimennus ensimmäisessä kerroksessa noin 2,5–3 dB suurempi kuin toisessa kerroksessa. Rivitalojen tapauksessa vaimennus ensimmäisessä kerroksessa on noin 13–15 dB suurempi kuin toisessa kerroksessa.



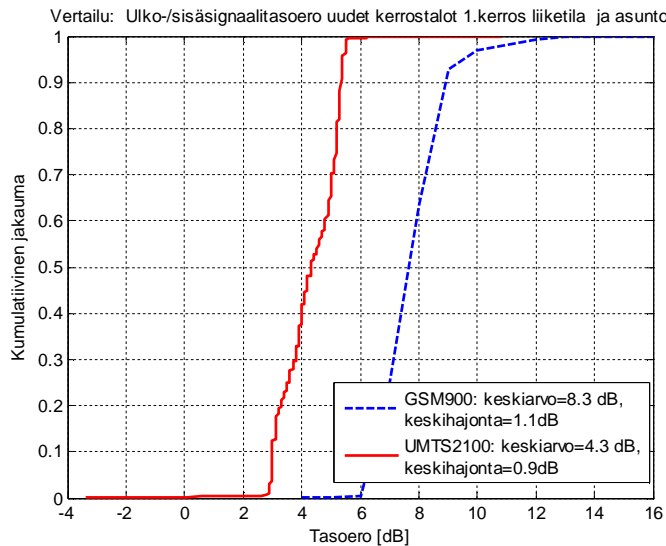
Kuva 60. Uusien kerros- ja rivitalojen kerros 2 / kerros 1 vertailuhistogrammit.



Kuva 61. Uusien kerros- ja rivitalojen kerros 2 / kerros 1 CDF-kuvaajat.

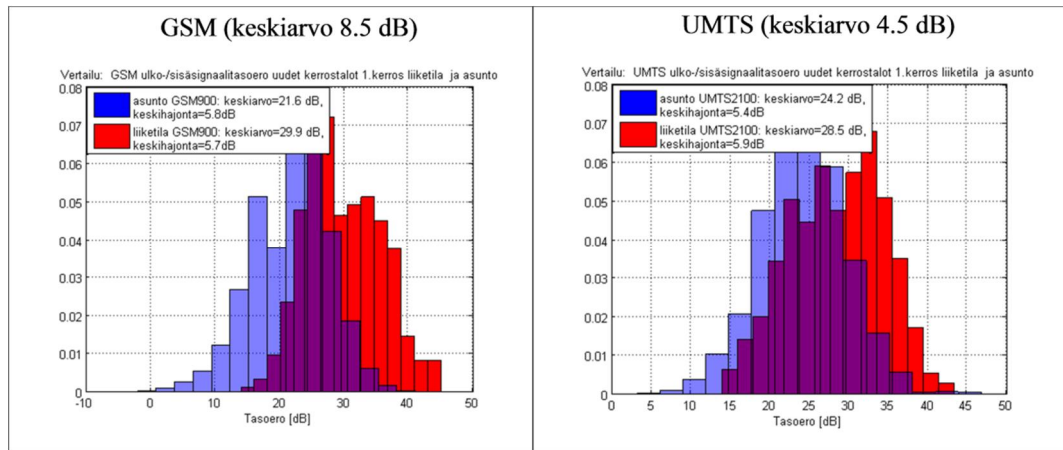
4.3.5 Uusien kerrostalojen vertailu – liiketila/asunto katutasossa

Kuvassa (Kuva 62) verrataan uusia asuinkerrostalojen asuntoja vastaaviin liiketiloihin samantyyppisissä taloissa. Kuvaajaan on kerätty kaikkien tämän tyyppisten kohteiden erovektorit kaikilta kolmelta operaattorilta. Tuloksista pois on jätetty edellä mainitut yksittäiset mittaukset, joista erovektoria ei saatu. Kuvaajasta nähdään, ettei data ole normaalijakautunutta, joka johtuu useiden mittaustulosten yhdistelystä.

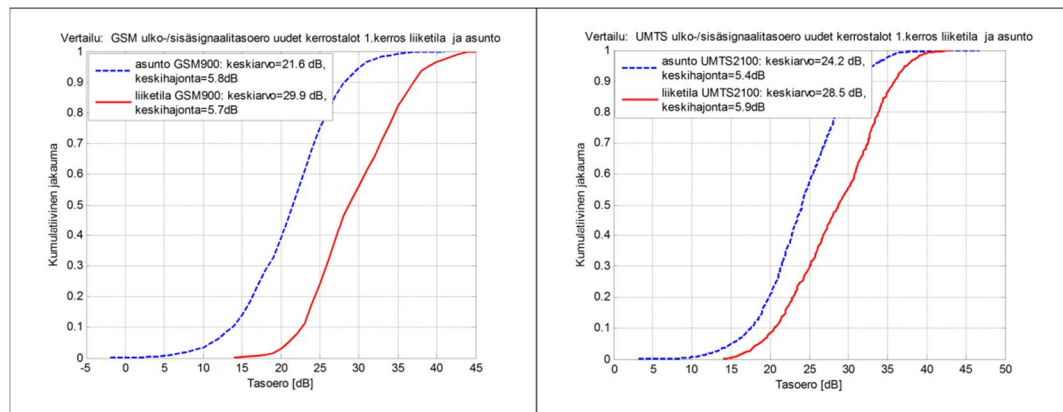


Kuva 62. Liiketilojen ja asuntojen CDF-kuvaajat.

Seuraavissa kuvissa (Kuva 63 ja Kuva 64) on esitetty kerrostalojen katutasoissa olevien liiketilojen ja asuntojen ulko-/sisäsignaalitasoerot. Sininen käyrä tai palkki kuvaa asunnon tilannetta ja punainen liiketilannetta. Kuvaajien perusteella asunnoissa signaalitaso oli GSM:llä noin 8,5 dB ja UMTS:llä noin 4,5 dB parempi kuin vastaavassa paikassa sijaitsevassa liiketilassa.



Kuva 63. Liiketilöjen ja asuntojen vertailuhistogrammit.



Kuva 64. Liiketilöjen ja asuntojen CDF-kuvaajat.

4.4 Mittaustulosten yhteenveto

Mittaustuloksien yhteenveto on esitetty tässä. Mittaustuloksien koonti on esitetty taulukossa (Taulukko 2). Niiden perusteella uusissa kerrostaloissa ulko- ja sisäsignaalitason ero on luokkaa 19–21 dB ja vastaavasti rivitaloissa noin 20–23 dB. Vanhoissa kerrostaloissa vastaavat arvot ovat ainoastaan 6–8 dB ja rivitaloissa 5–7 dB. Tämän perusteella uusien talojen sisäsignaalitaso on noin 13–16 dB heikompi kuin vanhoissa taloissa. Tämä on merkittävä heikennys, joka aiheuttaa katveja varsinkin talojen sisäosissa.

Taulukko 2. Sisä-/ulkosignaalisero [dB]:

	Uudet kerrostalot	Vanhat kerrostalot	Ero KT	Uudet rivitalot	Vanhat rivitalot	Ero RT	Uudet isot rakennukset	Lukio
UMTS2100	21,5	8,5	13,0	22,9	7,0	15,9	26,5	23,7
GSM900	19,4	6,1	13,3	19,8	5,4	14,4	26,8	22,3

Tutkimuksen tarkoitus oli arvioida erilaisia ratkaisuja, joilla lähinnä asunkerrostalojen matkapuhelinverkkojen sisäsignaalitasoja voitaisiin parantaa. Yhtenä ehdotuksena oli selektiivikalvon poistaminen yhdestä asunnon ikkunasta. Taulukkoon (**Taulukko 3**) on koottu yhden selektiivikalvon poistamisen tuottama parannus saman huoneen signaalitasoon. Sen perusteella parannusta saadaan noin 4,5–6 dB, joka on paikallisesti hyvin merkittävä signaalitason parannus. Kuitenkin parannus on hyvin paikallinen ja edellyttää tukiaseman sijoittumista suotuisasti. Tulosten perusteella koko asunnon signaalitason parantamiseen yhden kalvon poisto ei riitä.

Taulukko 3. Ikkunan tai oven avaamisen vaikutus [dB]

	Uudet kerrostalot	Vanhat kerrostalot
UMTS2100	6,0	4,8
GSM900	4,6	4,4

4.5 Linkkibudjettianalyysi

Edellä esiteltyjen tulosten perusteella kuuluvuutta voidaan tarkastella myös linkkibudjettianalyysin näkökulmasta. Linkkibudjetti on yleinen työkalu radioverkkojen suunnittelussa ja siinä esitetyjä arvoja on esitetty paljon alan kirjallisuudessa esimerkiksi lähteestä [19]. Sen avulla verkot pyritään suunnittelemaan niin, että kyseisellä alueella on tietyllä todennäköisyydelle peitto. Linkkibudjetin avulla voidaan laskea kuinka millaisilla signaalitasoilla päätelaite voi muodostaa yhteyden ylälinkissä (Uplink, UL) eli päätelaitteesta tukiasemalle ja alalinkissä (Downlink, DL) eli tukiasemalta päätelaitteelle. Tässä linkkibudjettia on käytetty selvittämään kuinka tiheään tukiasemia tarvitaan, jotta alueelle saadaan haluttu peitto. Esimerkki on laskettu kahdelle eri esimerkkitapaukselle. Toisessa laskenta on tehty vanhojen talojen vaimennusarvoille ja toisessa uusien talojen vaimennusarvoille. Näin saadaan hyvä kuva siitä kuinka paljon tiheämpään tukiasemia tulisi rakentaa, jotta uusien talojen sisäpeitto olisi samalla tasolla kuin vanhojen talojen.

Taulukossa (Taulukko 4), esitetään esimerkkilinkkibudjettilaskelma UMTS:n HSPA-teknikalle 900 MHz:n ja 2100 MHz:n taajuusalueille. Linkkibudjetti on esitetty erikseen sekä että ylä- että alalinkille.

Taulukko 4. *Linkkibudjetin parametrit.*

	Yksiköt	HSPA 900		HSPA 2100	
		UL	DL	UL	DL
Vastaanottopää					
Lämpökohinan teho (Thermal Noise power)	dBm	-174	-174	-174	-174
Vastaanottimen kohinaluku (RX noise figure)	dB	2,5	11	2,5	8
Vastaanottimen kohinateho (RX noise power)	dBm	-105,6	-97,1	-105,6	-100,1
Vaadittu signaali-kohinasuhde (Required SNR)	dB	-7	-2	-7	-2
Häiriömarginaali (Interference margin)	dB	6	6	6	6
Vastaanottimen herkkyys (RX sensitivity)	dBm	-105,6	-97,1	-105,6	-100,1
Vastaanottavan antennin vahvistus (RX antenna gain)	dBi	15	0	18	0
Kaapelihäviö (Cable loss)	dB	0,5	0	0,5	0
Antennin diversiteettivahvistus (Antenna diversity gain)	dB	3	0	3	0
SHO diversiteettivahvistus (SHO diversity gain)	dB	2	0	2	0
Vaadittu signaalin teho (Required signal power)	dBm	-123,1	-93	-126,1	-96,1

Lähetyspää					
Yhteyden lähetysteho (TX power connection)	dBm	24	43	24	43
Kaapelihäviö (Cable loss)	dB	0	0,5	0	0,5
Lähetysantennin vahvistus (TX antenna gain)	dBi	0	15	0	18
Isotrooppinen huippu säteilyteho (Peak EIRP)	dBm	24	47,5	24	60,5
Isotrooppinen etenemishäviö (Isotropic path loss)	dB	147,1	150,6	150,1	156,6

Taulukossa (Taulukko 5) on laskettu tukiasemien kantamia ja peittoalueita käyttämällä Okumura-Hata-mallia, jota kuvaavat kaavat (4)–(8). Vaimennukset pienille ja keskisuurille kaupungeille, mikä kuvaa parhaiten Suomen kaupunkeja. Kaavassa 4 PL (Path Loss) on etenemisvaimennus. A ja B ovat parametreja, jotka saadaan kaavoista 5, 6 ja 7. Näissä f_c tarkoittaa käytettävää keskitaajuutta megahertseissä, h_b tukiaseman antennien korkeutta metreissä ja h_m päätelaitteen antennin korkeutta metreissä. Parametri C on korjauskerroin eri ympäristöille ja se on pienten ja keskisuurten kaupunkien tapauksessa 0. Kaavasta 4 on ratkaistu d , joka on solun kantama kilometreissä. Tämän avulla voidaan arvioida tukiasemalle lähes ympyränmuotoinen peittoalue X . Se voidaan laskea kaavalla 8, jossa r on solun kantama kilometreissä eli sama kuin edellisten kaavojen d , jolloin kaava antaa peittoalueen neliökilometreissä. [20][53]

$$PL = A + B \log(d) + C \quad (4)$$

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) \quad (5)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b) a(h_m) \quad (6)$$

$$a(h_m) = (1.1 \log(f_c) - 0.7) - (1.56 \log(f_c) - 0.8) \quad (7)$$

$$X = 1.95r^2 \quad (8)$$

Linkkibudjettianalysissa vanhojen talojen seinien vaimennuksena on käytetty mitauksissa todettuja vaimennusarvoja. Kerrostalojen GSM:lle 7dB ja UMTS:lle 8,2 dB. Vastaavasti uusien talojen vaimennuksina on käytetty 19,4 dB ja 21,5 dB.

Taulukko 5. Uusien ja vanhojen talojen vertailu linkkibudjetilla.

		HSPA 900		HSPA 2100	
Solujen tarve vanhoille taloille	Yksiköt	UL	DL	UL	DL
Päätelaitteen antennin korkeus (MS antenna height)	m	1,5		1,5	
Tukiaseman antennin korkeus (BTS antenna height)	m	50		25	
Seinien vaimennus keskimäärin (Wall attenuation average)	dB	6		8,5	
Solun kantama (Cell range)	km	3,4	4,3	1,3	2,0
Peittoalue (Coverage area)	km ²	22,0	35,4	3,5	8,0

Solujen tarve uusille taloille					
Päätelaitteen antennin korkeus (MS antenna height)	m	1,5		1,5	
Tukiaseman antennin korkeus (BTS antenna height)	m	50		25	
Seinien vaimennus keskimäärin (Wall attenuation average)	dB	19,4		21,5	
Solun kantama (Cell range)	km	1,4	1,7	0,6	0,9
Peittoalue (Coverage area)	km ²	3,7	5,5	0,7	1,4

Linkkibudjettianalyysin perusteella nähdään, että yhden tukiasemasolun kantama pienenee 900 MHz:n taajuusalueella reilusta kolmesta kilometristä noin 1,3 kilometriin ja 2100 MHz:n taajuusalueella noin 1,1 kilometristä noin puoleen kilometriin. Tämä tarkoittaa sitä, että tukiasemia pitäisi rakentaa noin kaksi – kolme kertaa tiheämpään.

Peittoaluetarkastelussa vaikutus on vielä dramaattisempi, sillä peittoalue pienenee 900 MHz:n alueella noin 21,9 neliökilometristä noin 3,5 neliökilometriin. Vastaavasti 2100 MHz:n alueella peittoalue pienenee noin 3,8 neliökilometristä noin 0,6 neliökilometriin. Eli tässä tapauksessa tukiasemamäärää tulisi lisätä moninkertaiseksi.

Tukiasemien määrää on jossain määrin mahdollista lisätä, mutta niiden määrää ei voida lisätä loputtomiin. Erittäin tiheää tukiasemaverkkoa on hankala suunnitella ja ylläpitää. Toisaalta tukiasemien aiheuttaman säteilyn määrä kohoaa tarpeettomasti rakennusten ulkopuolella. Tämän lisäksi suuren tukiasemamäärän ylläpitäminen tulee kalliiksi.

5 YHTEENVETO

Viime vuosina ympäristönsuojelun ja ilmastonmuutoksen kiihtymisen vuoksi on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota kasvihuonekaasupäästöihin. Tämän myötä kiristyneet kansainväliset ja kansalliset energiatehokkuusvaatimukset ovat ohjanneet rakentamista Suomessa entistä energiatehokkaampiin ratkaisuihin sekä uusiin rakennusmateriaaleihin. Osa näistä uusista ratkaisuista ja rakennusmateriaaleista vaimentaa radiosignaaleja voimakkaasti. Samaan aikaan internetin käyttö mobiiliverkkojen kautta on kasvanut räjähdysmäisesti sekä suurin osa puheluliikenteestä on siirtynyt langattomiin verkkoihin. Tämän kasvaneen tiedonsiirtotarpeen ja uusien verkkotekniikoiden myötä mobiiliverkoissa on osittain siirrytty käyttämään entistä korkeampia ja samalla heikommin rakenteita läpäiseviä taajuusalueita. Näiden seikkojen yhteysvaikutuksena mobiiliverkot toimivat varsinkin uusissa taloissa paikoin erittäin huonosti. Kuuluvuusongelmat ovat tulleet esille muun muassa kuuluvuusvalitusten määrän lisääntymisenä

Edellä mainittujen kuuluvuusongelmien laajuuden selvittämiseksi laadittiin TTY:llä mittaussarja, jossa vertailtiin uusia ja vanhoja taloja toisiinsa. Mittausten tarkoituksena oli selvittää kuuluvuusongelmien syytä ja kartoittaa samalla mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja ongelmaan. Mittauksia tehtiin hyvin erityyppisissä kohteissa ja niiden määrän voidaan sanoa olevan riittävä, sillä kaikkien mittaustulosten jakaumat lähenivät normaalijakauman muotoa. Mittausten pääasiallisiksi kohteiksi valikoitui joukko uusia ja vanhoja kerros- ja rivitaloja. Tämän lisäksi mittauksia tehtiin uusissa julkisissa rakennuksissa ja liiketiloissa. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kaikkien uusien rakennusten radiosignaalien vaimennukset ovat uusissa rakennuksissa oleellisesti korkeampia kuin vanhoissa taloissa. Mittaukset osoittavat myös kuuluvuuspalautteiden määrän kasvun osoittaman seikan, että uusissa rakennuksissa on kuuluvuusongelmia, jotka johtuvat rakenteiden aiheuttamasta vaimennuksesta radiosignaalille. Radiosignaalien kannalta ongelmallisia materiaaleja ovat kaikki metallia sisältävät materiaalit kuten metallipinnoitteilla päällystetyt eristeet, ikkunoiden metallioksideja sisältävät selektiivikalvot sekä useimpien rakennusten rakennusmateriaalina käytetty teräsbetoni. Uusien energiatehokkuusmääräysten myötä erilaisia metallikalvoja sisältävien materiaalien käyttö on lisääntynyt, minkä seurauksena useimmissa uudisrakennuksissa matkapuhelinverkon peittoalue ei kata koko asuntoa, ja varsinkin rakennuksen sisäosissa ja rappukäytävissä signaalitaso on erittäin heikko.

Ratkaisuja kuuluvuusongelmiin on useita, mutta niiden käyttökelpoisuus tulee tutkia tapauskohtaisesti, sillä yhtä kaikissa paikoissa ongelmat ratkaisevaa tapaa ei ole. Kuuluvuusongelmia voidaan ratkaista esimerkiksi rakentamalla mobiiliverkkoja entistä tiheämmiksi, mutta aikaisemmin esitetyn linkkibudjettianalyysin perusteella tukiasemien

määrää tulisi kasvattaa todella huomattavasti, mikä ei olisi enää taloudellisesti tai teknisesti kannattavaa. Rakennusten sisätalokuuluvuutta voidaan parantaa myös muuten kuin makrotukiasemia rakentamalla. Esimerkiksi voidaan hyödyntää erityyppisiä sisäverkkoratkaisuja, kuten hajautettuja antenniratkaisuja tai toistimia. Myös mikro- tai piko-soluja voidaan käyttää luomaan peittoa tietyille alueelle. Näiden ratkaisuiden hyödyntäminen edellyttää operaattorien investointeja, sillä Suomen lainsäädäntö sallii aktiivisten laitteiden käytön ainoastaan operaattoreille. Tämän lisäksi on mahdollista hyödyntää kotitukiasematekniikkaa, jossa asukas hankkii käyttöönsä tukiaseman, joka parantaa juuri omien päätelaitteiden toimivuutta kodin alueella. Kotitukiasemat ratkaisevat tiettyjä ongelmia, mutta niiden hyödyntämiseen liittyy monia ongelmia. Toistaiseksi kotitukiasemat eivät ole sallittuja Suomessa.

Toisaalta rakennusten suuri vaimennus mahdollistaa juuri sisäverkkojen rakentamisen entistä helpommin, sillä tällöin sisä- ja ulkoverkko eivät häiritse toisiaan niin paljoa. Tämä helpottaa esimerkiksi toistimien käyttöä. Kuitenkaan sisäverkkoratkaisuiden käyttäminen ei ole halpaa varsinkaan, jos jokainen operaattori joutuu rakentamaan oman verkkonsa. Jokaisen talon varustaminen sisäverkolla maksaa paljon, ja nostaa oleellisesti mobiiliverkkojen käyttö- ja rakennuskuluja verrattuna makrotukiasemaverkon käyttöön.

Yhtä ratkaisua kuuluvuusongelmiin ei ole, mutta kuuluvuutta voidaan parantaa usealla eri tavalla, kuten materiaalivalinnoilla. Sisäkuuluvuutta voidaan paikallisesti parantaa esimerkiksi poistamalla ikkunoista selektiivikalvoja tai käyttämällä eristeitä, joissa ei ole metallipinnoitteita. Operaattorit voivat vastaavasti parantaa kuuluvuutta lisäämällä alueelle tukiasemia tai rakentamalla erityyppisiä sisäverkkoratkaisuja, kuten toistimia tai hajautettuja antennijärjestelmiä. Joissain tilanteissa myös passiiviset antenniratkaisut voivat tulla kyseeseen, mutta niiden käyttökelpoisuus riippuu voimakkaasti lähimmän tukiaseman sijainnista ja etäisyydestä. Tulevaisuudessa myös taajuusselektiiviset pinnat voivat parantaa esimerkiksi ikkunoiden selektiivikalvojen radiosignaalinläpäisykykyä.

Kuuluvuusongelmat ovat osittain myös yhteiskunnallinen ongelma, sillä toimivat tietoliikenneyhteydet koetaan perustarpeiksi Suomessa. Langattoman puhelinyhteyden puuttumista asunnosta pidetään hankalana eikä kaikkiin uusiin taloihin ei rakenneta enää lainkaan perinteistä puhelinverkkoa. Ihmiset ovat oppineet, että he ovat tavoitettavissa matkapuhelimella aina, riippumatta siitä onko heidän puhelimensa lähellä ikkunaa vai asunnon sisäosissa. Haasteellista asiassa on myös se, että väestön ikääntyessä juuri kriittiset tilat kuten, kylpyhuoneet ja WC:t, ovat usein katvealueita, joissa tarvittaisiin toimivia yhteyksiä hätäpuheluille tai mobiiliverkoissa toimiville turvapuhelimille. Tämän lisäksi talojen rappukäytävissä on kuuluvuuspuutteita, jolloin asunnossa aloitettu puhelu saattaa katketa rappukäytävän kautta ulos mentäessä.

Todelliseksi haasteeksi tämä muodostuu, kun nykyaikainen rakennuskanta yleistyy ja asian vakavuuteen havahdutaan liian myöhään. Ongelman korjaaminen ei ole yksinkertaista, sillä energiatehokkuusmääräyksistä ei olla valmiita tinkimään. Mittausten perusteella lähes kaikkiin nykyisellä rakennustavalla rakennettuihin rakennuksiin pitäisi rakentaa sisäverkko hyvän kuuluvuuden takaamiseksi. Sisäverkkojen rakentaminen on

erittäin kallista ja osittain hankalaa, sillä nykyisissä rakennusmääräyksissä ei olla varauduttu sisäverkon rakentamiseen esimerkiksi kaapelireittien muodossa.

Ongelmat langattomien verkkojen kuuluvuudessa uusissa rakennuksissa ovat suuria ja niihin on vasta viime aikoina kiinnitetty huomiota. Nykyisen energiatehokkaan rakentamistavan myötä myös matkapuhelinverkkojen rakentaminen täytyy ottaa uuteen tarkasteluun, sillä entiset etenemismallit ja suunnitteluperiaatteet eivät enää täysin päde. Tämän vuoksi olisi sekä rakennusteollisuuden että operaattoreiden hyvä selvittää ongelmia yhdessä, jotta toimivat yhteydet kaikille asukkaille voidaan taata myös tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] Viestintävirasto. Viestinnän peruspalvelut [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: <https://www.viestintavirasto.fi/internetpuhelin/peruspalvelu.html>.
- [2] Liikenne- ja viestintäministeriö. Laajakaista kaikille [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: <http://www.lvm.fi/web/hanke/laajakaista-kaikille>.
- [3] Viestintävirasto. Radiotaajuuksien kysyntä tulevaisuudessa. 2009. [viitattu 4.5.2014]. Saatavissa: <https://www.viestintavirasto.fi/tietoatoimialasta/katsauksetjaartikkelit/taajuudet/radiotaajuuksienkysyntatulevaisuudessa.html>.
- [4] Ilmasto opas.fi - sivusto. Ilmastonmuutos ilmiönä [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: <http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/962d9aa2-e7e3-4df5-89a2-9f1f653e0d4e/ilmastonmuutos-ilmiona.html>.
- [5] Ympäristöministeriö. Kioton pöytäkirja [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Kansainvalinen_yhteistyö/Kansainvaliset_ymparistosopimukset.
- [6] Ympäristöministeriö. Varsovasta ei riittävästi vauhtia uuden ilmastopimuksen rakentamiseen. [WWW]. [viitattu 18.2.2014]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Varsovasta_ei_riittavasti_vauhtia_uuden_%2827439%29
- [7] Ympäristöministeriö. EU:n ilmasto- ja energiapaketti. [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopolitiikka.
- [8] Työ- ja elinkeinoministeriö. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian esittely [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/1374/Pitkan_aikavalin_ilmasto-ja_energiastrategian_esittely_06112008.ppt.
- [9] K. Martinkauppi. ERA 17 Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017. Helsinki 2010. Ympäristöministeriö, Sitra ja Tekes. 91 s. Saatavissa: http://era17.fi/wp-content/uploads/2010/10/ERA17_loppuraportti.pdf.
- [10] Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön asetus energiatehokkuuden parantamisesta korjaus ja muutostöissä. [WWW]. [viitattu 4.5.2013]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/fi->

[FI/Maankaytto ja rakentaminen/Lainsaadanto ja ohjeet/Rakentamismaara yskokoelma.](#)

- [11] Lähdensivu, Jukka. Tekniikan tohtori. Tutkimuspäällikkö, Tampereen teknillinen yliopisto Rakennustekniikka. Haastattelu 22.2.2013.
- [12] A. Räisänen A. Lehto. Radio engineering for wireless communications and sensor applications. Artech House 2003.
- [13] S. Saunders, A. Aragon-Zavala. Antennas and propagation for wireless communication system. Wiley & Sons, toinen painos 2007.
- [14] W. C. Stone. NIST Construction Automation Program Report No. 3 Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology 1997.
- [15] S. Stavrou, S.R. Saunders. Factors influencing outdoor to indoor radio wave propagation. Centre for Communication Systems Research University of Surrey United Kingdom. ICAP International Conference on Antennas and Propagation, 2003.
- [16] S. Stavrou, S. R. Saunders. Review of constitutive parameters of building materials. Centre for Communication System Research University of Surrey United Kingdom ICAP International Conference on Antennas and Propagation, 2003.
- [17] A. M. D. Turkmani, A. F. de Toledo. Modelling of radio transmissions into and within multistorey buildings at 900,1800 and 2300 MHz. IEEE Communications, Speech and Vision Proceedings 1993.
- [18] J. Lempiäinen, M. Manninen (ed.). Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS. Kluwer Academic Publishers 2002.
- [19] J. Laiho, A. Wacker, T. Novosad. Radio Network Planning and Optimisation for UMTS. Wiley & Sons, 2nd ed. 2006.
- [20] A. F. Molisch, Wireless Communications. Wiley & Sons. 2nd ed. 2011.
- [21] J. Railio. Rakennusten energiatehokkuuteen eurooppalaisia standardeja. LVI-talotekniikkateollisuus ry.
- [22] VTT, Energiatehokkaan rakentamisen kosteusriskit vältetään laadukkaalla suunnittelulla ja rakentamisella [WWW] [viitattu 26.3.2013]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/news/2012/20120202_energiatehokkaan_rakentamisen_kosteusriskit_valtetaan_laadukkaalla_suunnittelulla_ja_rakentamisella.jsp.
- [23] R.Langley. Wireless Friendly buildings, Wireless Friendly Building Forum 2009.
- [24] TriData Corporation, Chapter 4: Structure communications issues, NIOSH Firefighter Radio communications, 2003.
- [25] Emmanuel O.O. Ojakominor, Tian F. Lai. Statistical (Radio) Path Loss Modelling: For RF Propagations within localized Indoor and Outdoor Environments of the Academic Building of INTI University College (Laureate International Universities). World Academy of Science, Engineering and Technology 50 2009 [Viitattu 3.5.2013].

- [26] R. Hoppe, G. Wölfle, and F. M. Landstorfer. Measurement of Building Penetration Loss and Propagation Models for Radio Transmission into Buildings. Institut für Hochfrequenztechnik, University of Stuttgart.
- [27] S. Stavrou and S.R. Saunders. Factors influencing outdoor to indoor radio wave propagation.
- [28] D. Molkdar. Review on radio propagation into and within buildings. IEEE PROCEEDINGS-H, Vol. 138, No. I, FEBRUARY 1991.
- [29] W. Honcharenko, H. L. Bertoni, J. L. Dailing, J. Qian, H. D. Yee, Mechanisms. Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Buildings. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 41, NO. 4, NOVEMBER 1992.
- [30] E.H. Walker. Penetration of Radio Signals Into buildings in the Cellular Radio Environment. The Bell System Technical Journal, Vol.62 No. 9, 1983.
- [31] A.M.D Turkmani, J. D. Parsons, D.G. Lewis. Measurement of building penetration loss on radio signals at 441, 900 and 1400MHz. Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers, Vol.58, No.6(Supplement), pp.S169-S174, September-December 1988.
- [32] S. Aguirre, L. H. Loew, Y. Lo. Radio Propagation Into Buildings at 912, 1920, and 5990 MHz Using Microcells. IEEE.
- [33] W. F. Young, C.L. Holloway, G. Koepke, D. Camell, Y. Becquet and K.A. Remley. Radio-Wave Propagation Into Large Building Structures Part 1: CW Signal Attenuation and Variability. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 58, NO. 4, APRIL 2010.
- [34] L. Ferreira, M. Kuipers, C. Rodrigues, L.M. Correia. Characterisation of Signal Penetration into Buildings for GSM and UMTS. IEEE 2006.
- [35] A. Aragón-Zavala, C. Arredondo-Luna, K. Monares-Sánchez, J. L. Cuevas-Ruíz. Measurement-based in-building cellular coverage analysis for GSM1900. 17th International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP'07). IEEE 2007.
- [36] N. Knauer, H. Doecke and P. O'Leary. Outdoor-Indoor Wireless Sensor Communications in a modern Building Management System. 4 th. Workshop on Wireless Sensor Networks 2008.
- [37] N. Knauer, H. Doecke, P.O'Leary, Wireless Attenuation by Energy Efficient Windows in the 8-12.5 GHz region.
- [38] I. Wiesenfeld, P.E., and D. A. Riise. When green will make you blue 2011.
- [39] P. Lähdekorpi. RF-Repeater Performance Assessment and Planning Guidelines for WCDMA Networks. TTY 2012.
<http://dSPACE.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/21052?locale-attribute=fi>.
- [40] Viestintävirasto. Viestintävirasto ei myönnä yksittäisiä lupia matkaviestinverkon toistimille [WWW]. [Viitattu 26.3.2013]. Saatavissa:

https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2012/P_119.html.

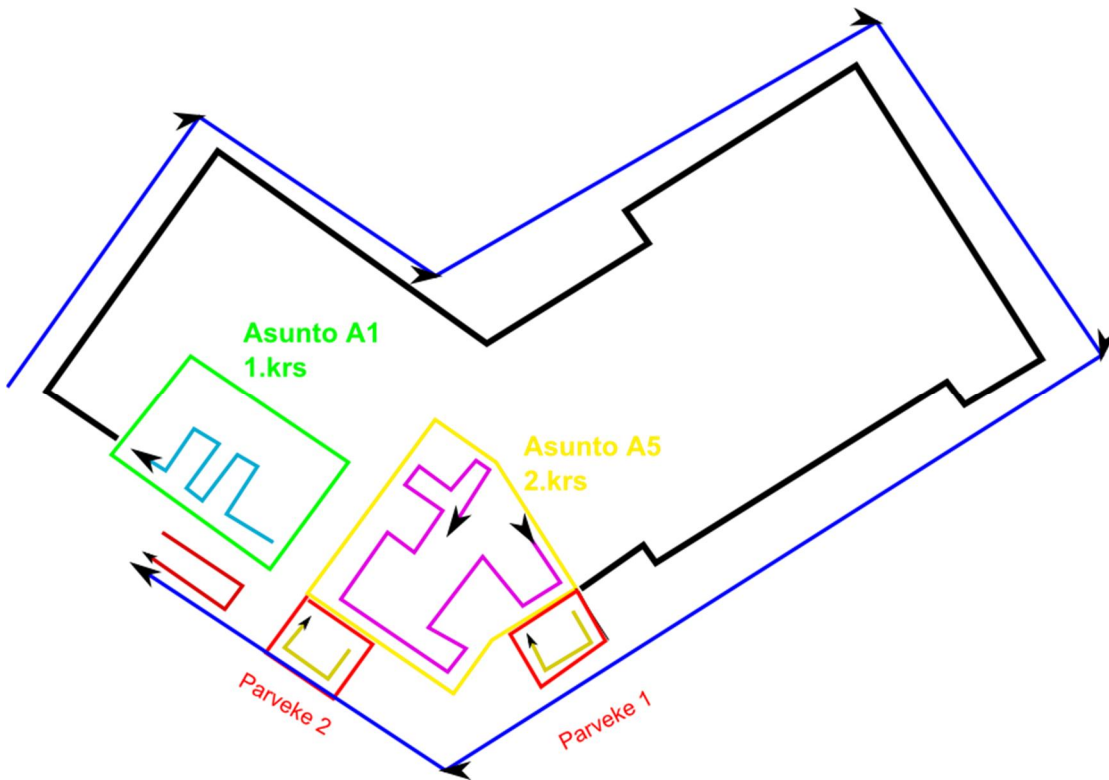
- [41] A. Ali, A. Coustou, H. Aubert. Wide Band Passive Repeaters: Design and Measurements. 2009 IEEE.
- [42] M. Philippakis, C. Martel, D. Kemp, R. Allan et all. Application of FSS Structures to Selectively Control the Propagation of signals into and out of buildings. Executive Summary 2004.
- [43] M. Philippakis, C. Martel, D. Kemp, R. Allan et all. Application of FSS Structures to Selectively Control the Propagation of signals into and out of buildings. Annex 3: Enhancing propagation Into buildings. 2004.
- [44] R. Remski, B. Gray, L. Ma. Frequency Selective Surfaces - Design and Analysis using the Ansoft Product Suite. Ansoft Application Engineering Staff.
- [45] JC Batchelor, E.A. Parker, B. Sanz-Izquierdo, J.-B. Robertson, I.T. Ekpo, A.G. Williamson. Designing FSS for Wireless Propagation Control within Buildings. 2009 Loughborough Antennas \& Propagation Conference.
- [46] Suomen 3M Oy. 3M Prestige ikkunakalvo [esite]. [viitattu 26.3.2013]. http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUN8_GM8mGevUqevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=Prestige_Brochure.pdf.
- [47] M. Raspopoulos, F. A. Chaudhry and S. Stavrou. Radio propagation in frequency se-lective buildings. EUROPEAN TRANSACTIONS ON TELECOMMUNICATIONS Euro. Trans. Telecomms. 2006; 17:40741.
- [48] M. Raspopoulos, S. Stavrou. Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 59, NO. 8, AUGUST 2011.
- [49] G. H. H. Sung, K. W. Sowerby and A. G. Williamson. THE IMPACT OF FREQUENCY SELECTIVE SURFACES APPLIED TO STANDARD WALL CONSTRUCTION MATERIALS. IEEE 2004.
- [50] J. V. R. Rodriguez. Radiowave Propagation through Window Panes and Reinforced Concrete Structures - An application of Frequency Selective Surface techniques. Lund University, Sweden, 2001.
- [51] B. Widenberg and J. V. R. Rodríguez. Design of Energy Saving Windows with High Transmission at 900 MHz and 1800 MHz. Lund Institute of Technology 2002.
- [52] Anders Karlsson. Sähköpostiviesti, Electrical and Information Technology. Lund University, Sweden.
- [53] H. Holma and A. Toskala. WCDMA for UMTS. Radio Access for Third Generation Mobile Communications. Wiley & Sons. 3rd. ed. 2004.
- [54] Tilastokeskus. Asuntokunnat ja asuinolot 2011 [WWW]. [viitattu 26.3.2013]. http://www.stat.fi/til/asas/2011/01/asas_2011_01_2012-10-24_kat_002_fi.html.

- [55] Motiva. Ikkunoiden Ikkunoiden energiatehokkuus [WWW]. [viitattu 22.3.2013].
http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/vaikuta_hankinnoilla/ikkunoiden_energialuokitus/ikkunoiden_energiatehokkuus.
- [56] J. Kemppainen. Rakennusteollisuus: Uusien rakennusten energiamääräykset 2012.
- [57] J. Niemelä, A. Asp, Y. Sydorov. Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa - Loppuraportti. TTY 2012.
- [58] Tilastokeskus. Internetin käyttö muualla kuin kotona tai työpaikalla [WWW]. [viitattu 26.3.2013].
http://www.stat.fi/til/sutivi/2012/sutivi_2012_2012-11-07_kat_003_fi.html.

LIITTEET

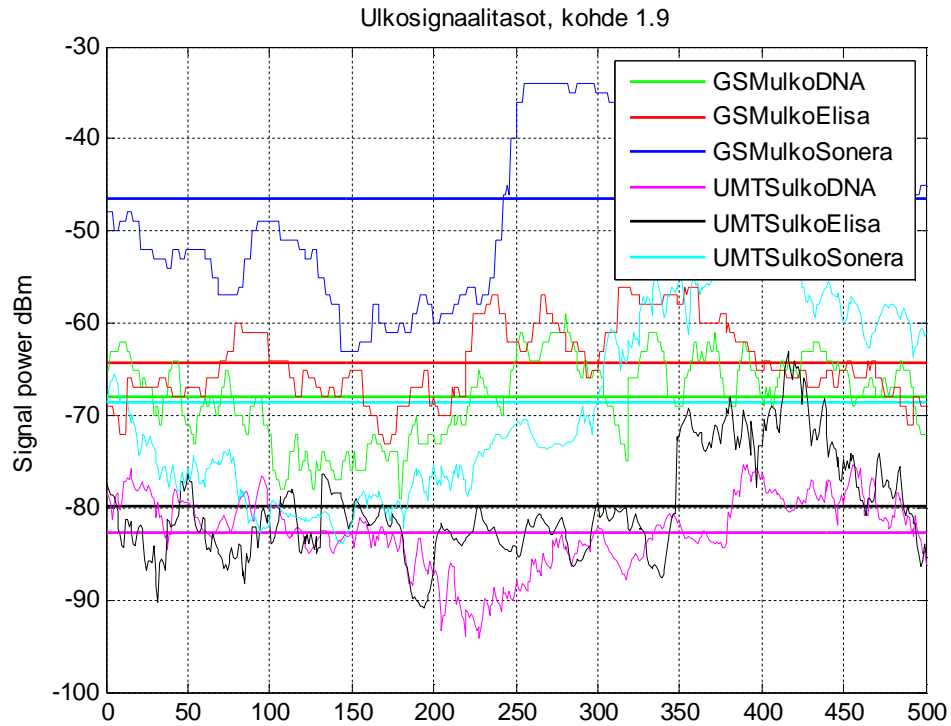
Liitteinä on esitetty kaksi raporttia mitatuista kohteista. Raportissa on esitetty mittausreitit ja niiden tulokset. Tämän lisäksi on vertailtu tuloksia toisiinsa.

Kohde 1.9 (kerrostalo)



Sisäreitit ja parvekereitit on merkitty eri väreillä, ulkoreitti talon ympäri on sinisellä.

Rakennuksen ulkomittaukset ovat tehty yllä olevan kuvan sinisen viivan mukaisesti ja niiden tulokset on esitetty seuraavassa kuvassa. Mittaukset rakennuksen ympäri on suoritettu kaikilla kanavilla ja kuvaajasta voidaan päätellä, että signaalinsuunta on pääasiassa Parveke 1:n suunnasta päin.



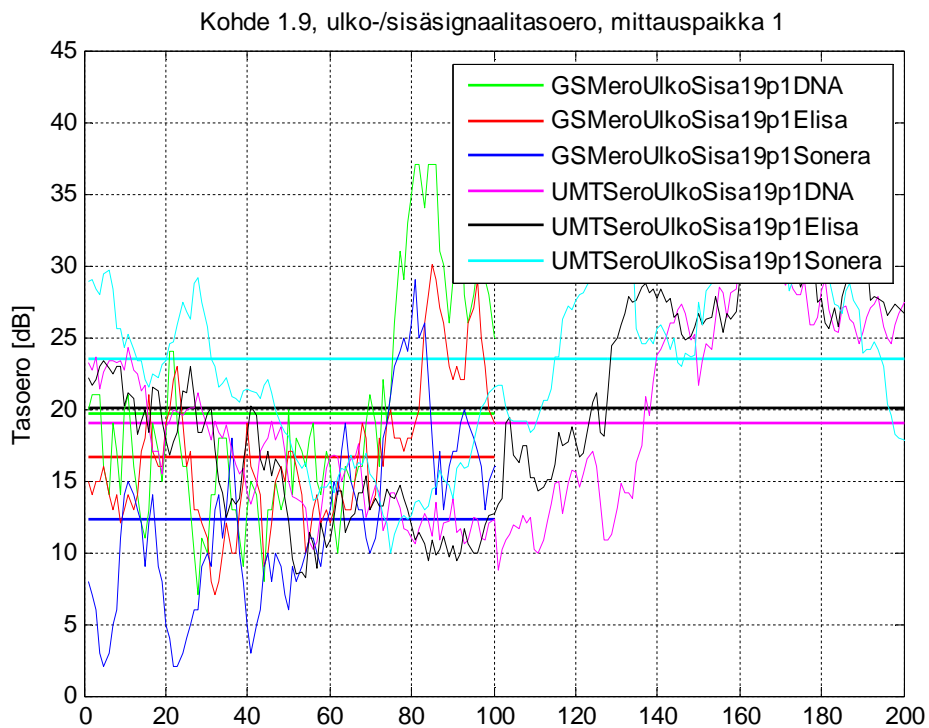
0 ->150->300 – pihapuoli, 250-> katupuoli.

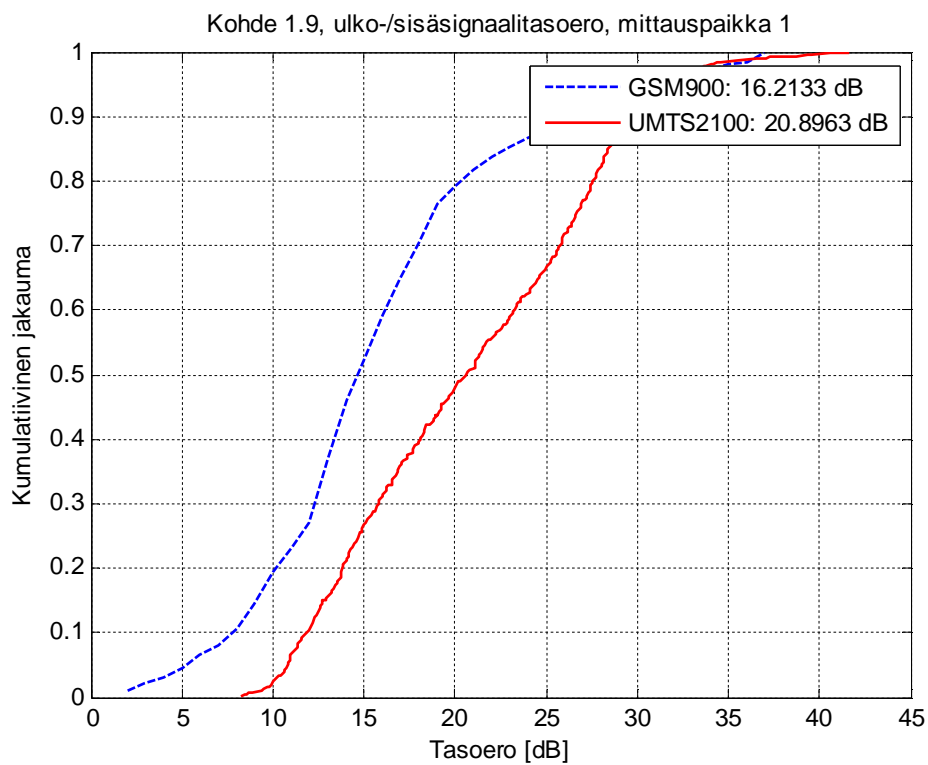
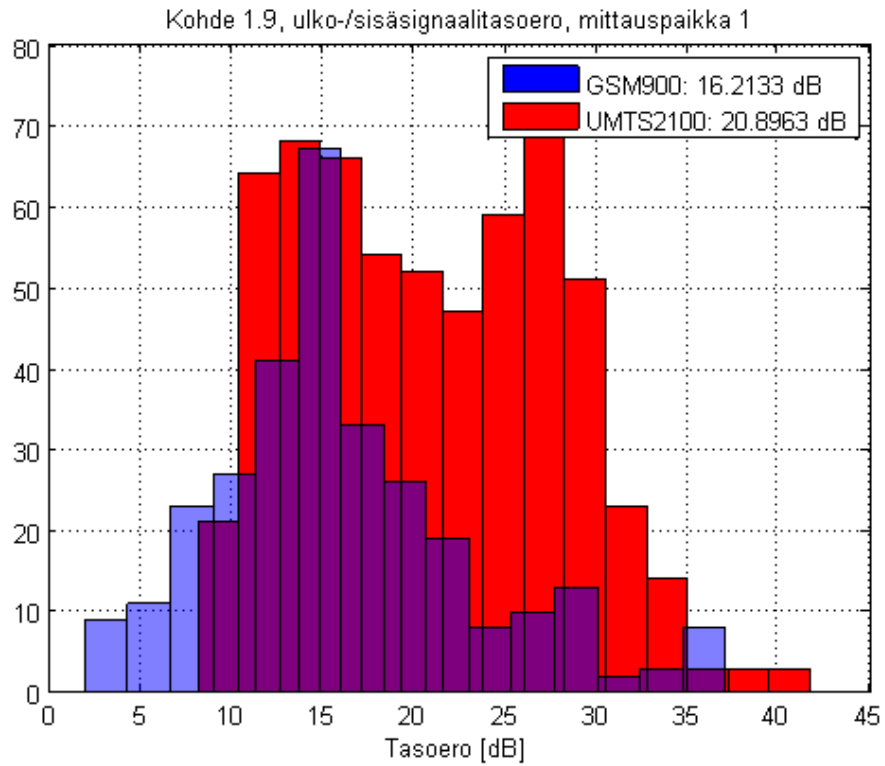
Asunto A5

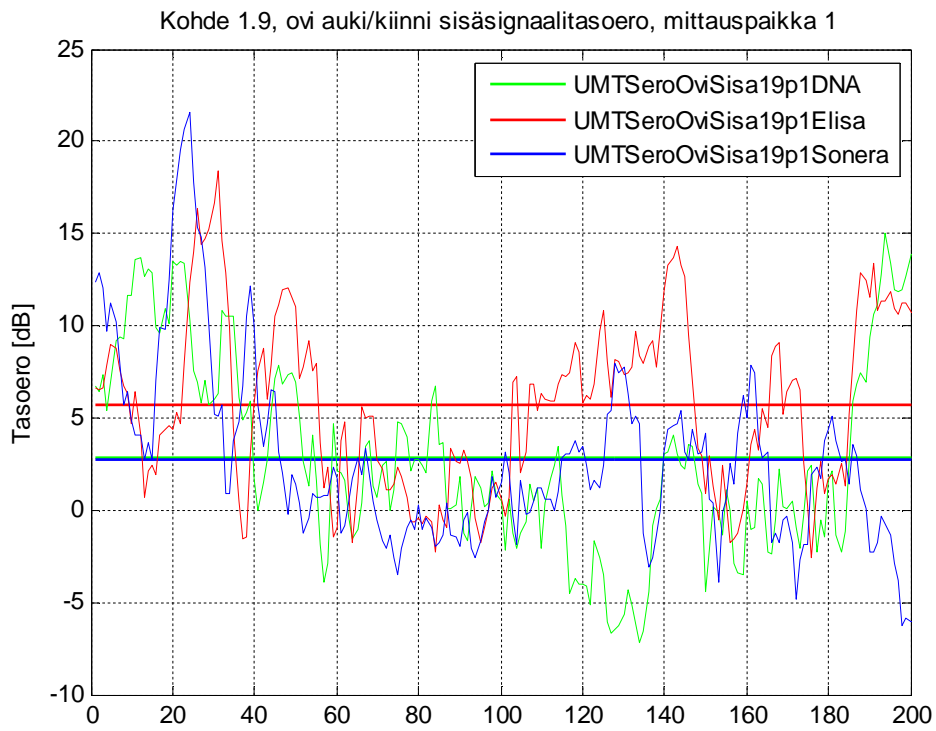
	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	647 (GSM1800!)	10737, 137
Elisa	75	10613, 468
Sonera	19	10837, 406

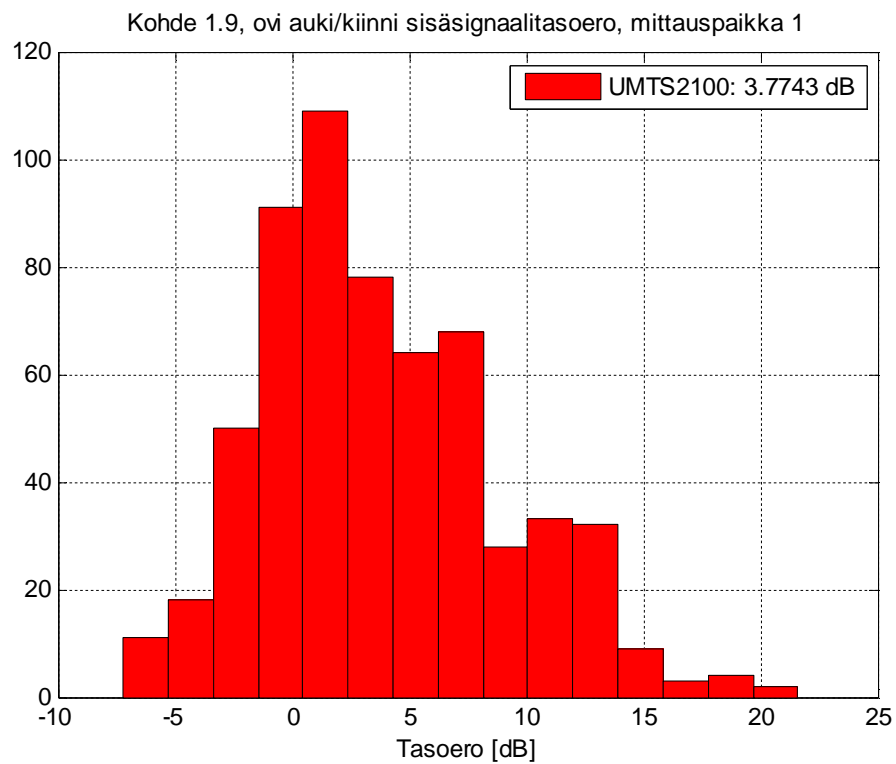
Operaattori	Standar- di	Signaalitasoero, dB			
		ulko/sisä p.1	ulko/sisä p.2	ovi/sisä p.1	ovi/sisä p.2
DNA	GSM	20	20	-	-
	UMTS	19	20	3	3
Elisa	GSM	17	-	-	-
	UMTS	20	22	6	7
Sonera	GSM	12	15	-	-
	UMTS	24	17	3	4

Rakennuksessa vaimennukset ovat luokkaa 17–20 dB ja tilanteeseen saadaan noin 3–7 dB:n parannus avattaessa parvekkeiden ovia.

Ovet kiinni:



Ovet auki:



Asunto A1

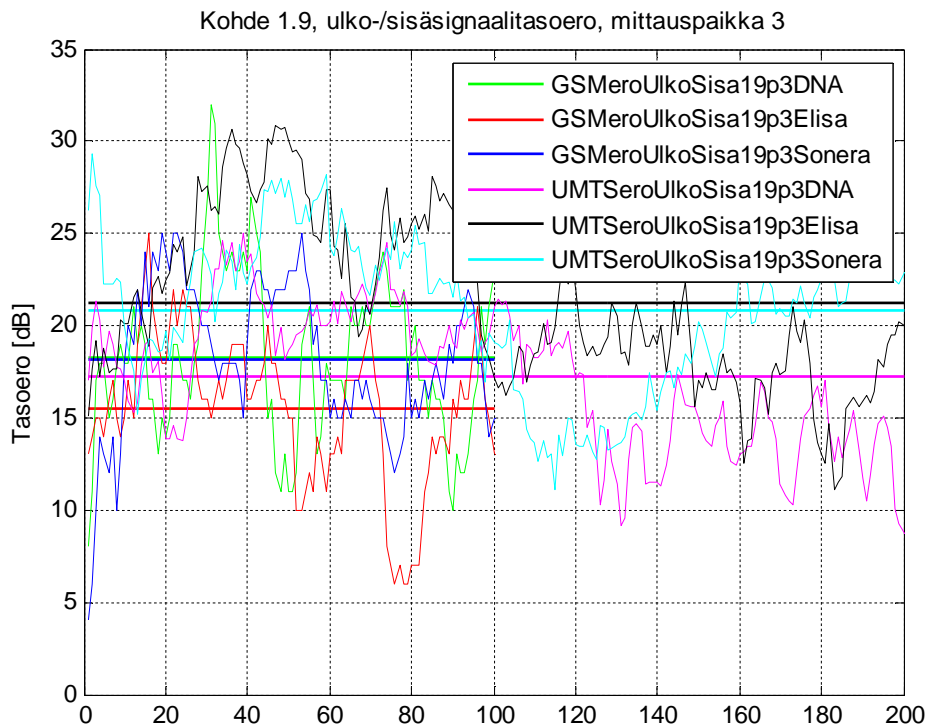
Asunto A1 sijaitsee kuvan osoittamassa kulmauksessa. Asunnon yksi seinä on osittain maan alla ja asunnon edessä on betonimuuri.

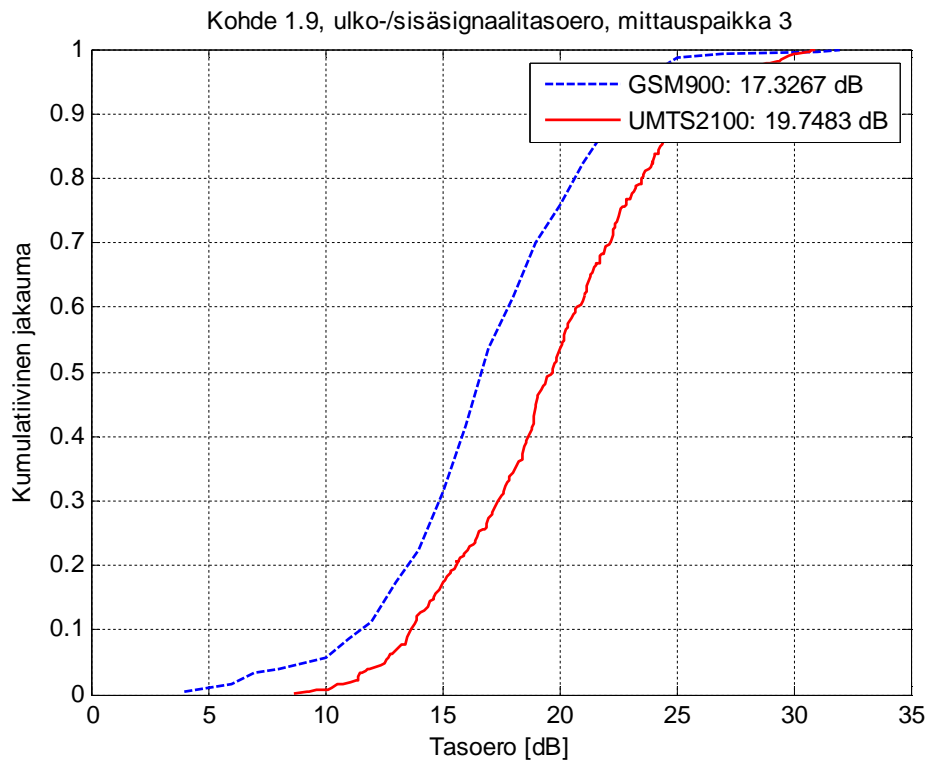
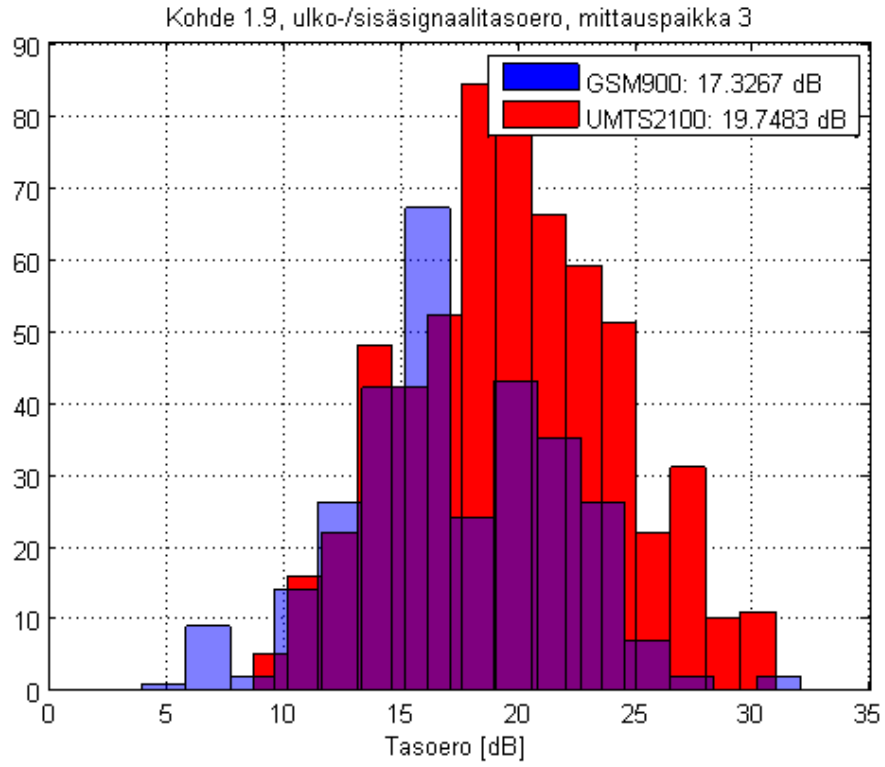
	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	647 (GSM1800!)	10737, 137
Elisa	75	10613, 468
Sonera	19	10837, 406

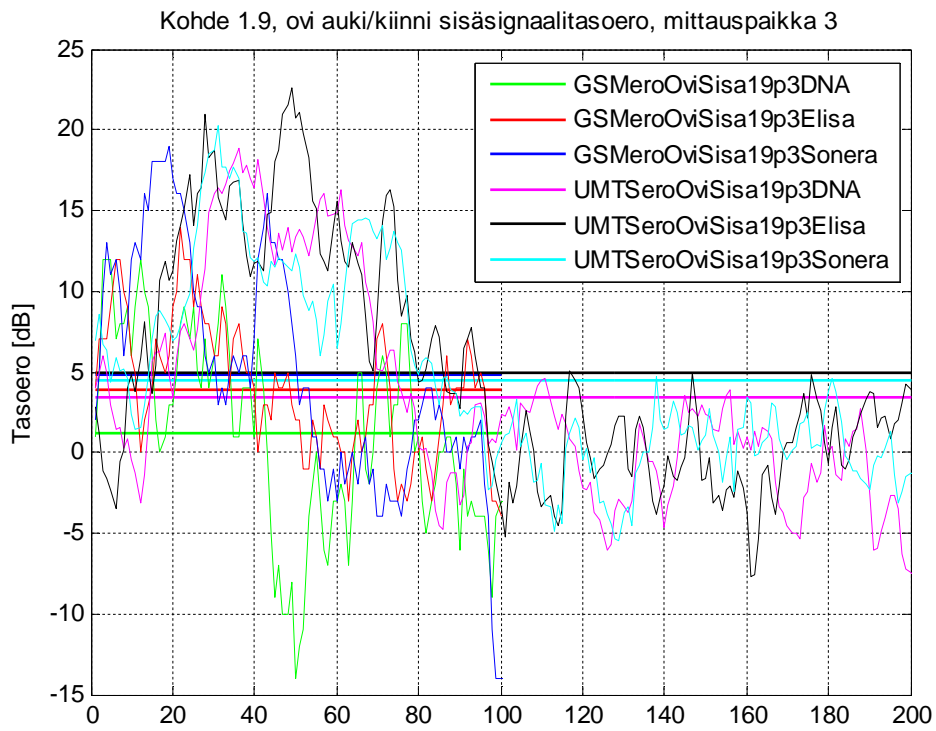
Operaattori	Standardi	Signaalitasoero, dB	
		ulko p3 / sisä	ovi p3 / sisä
DNA	GSM	18	1
	UMTS	17	3
Elisa	GSM	15	4
	UMTS	21	5
Sonera	GSM	18	5
	UMTS	21	4

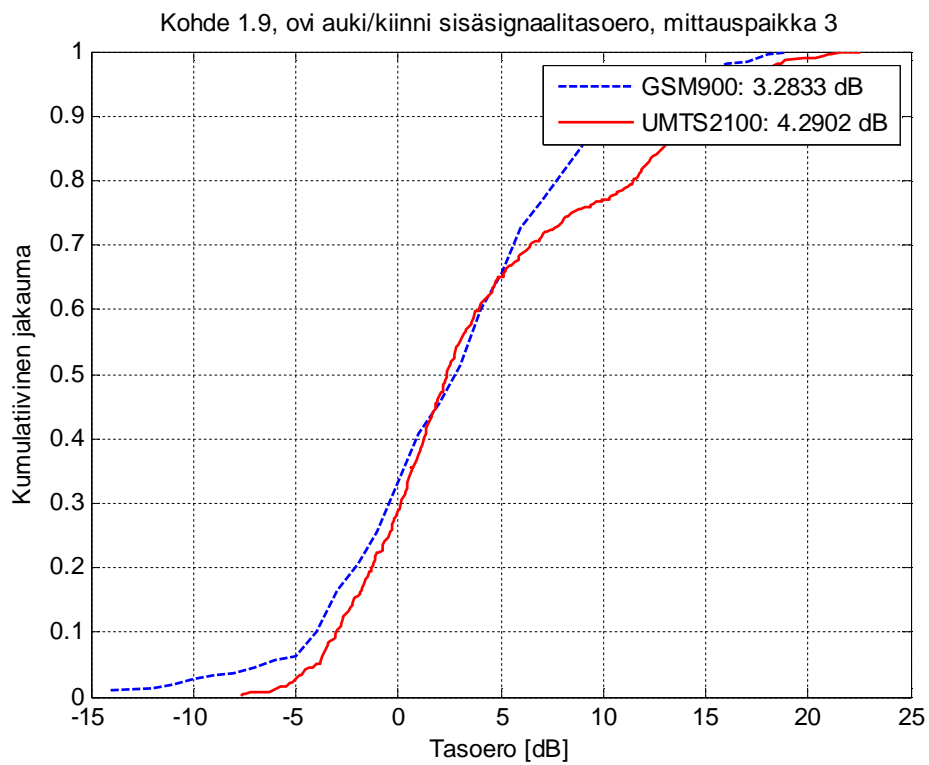
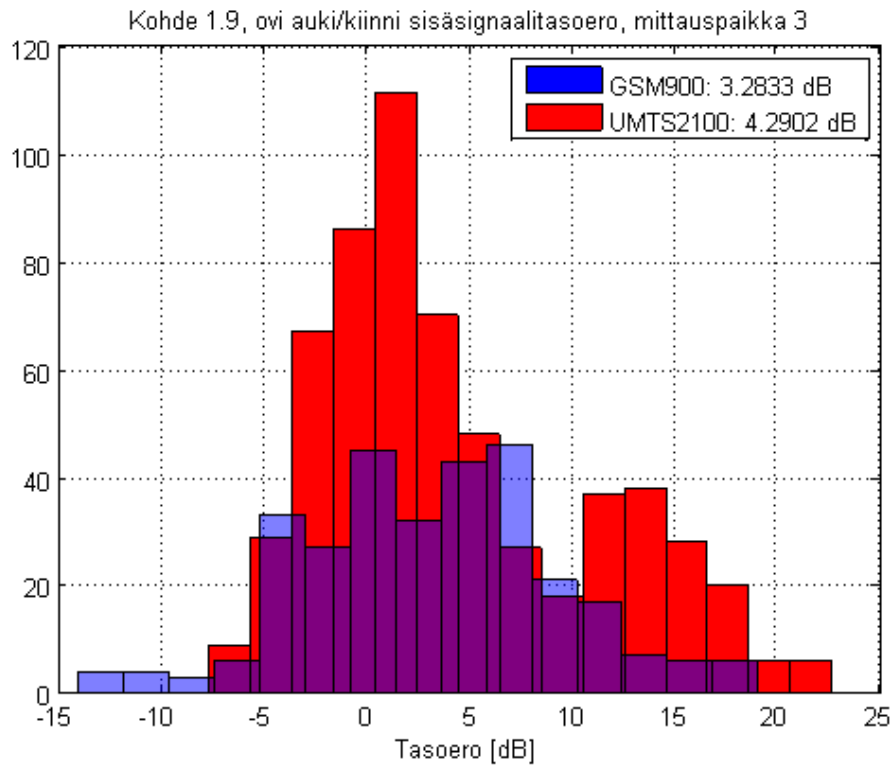
Vaimennukset asunnossa ovat luokkaa 15–20 dB, ja oven avaaminen parantaa tilannetta noin 5 dB.

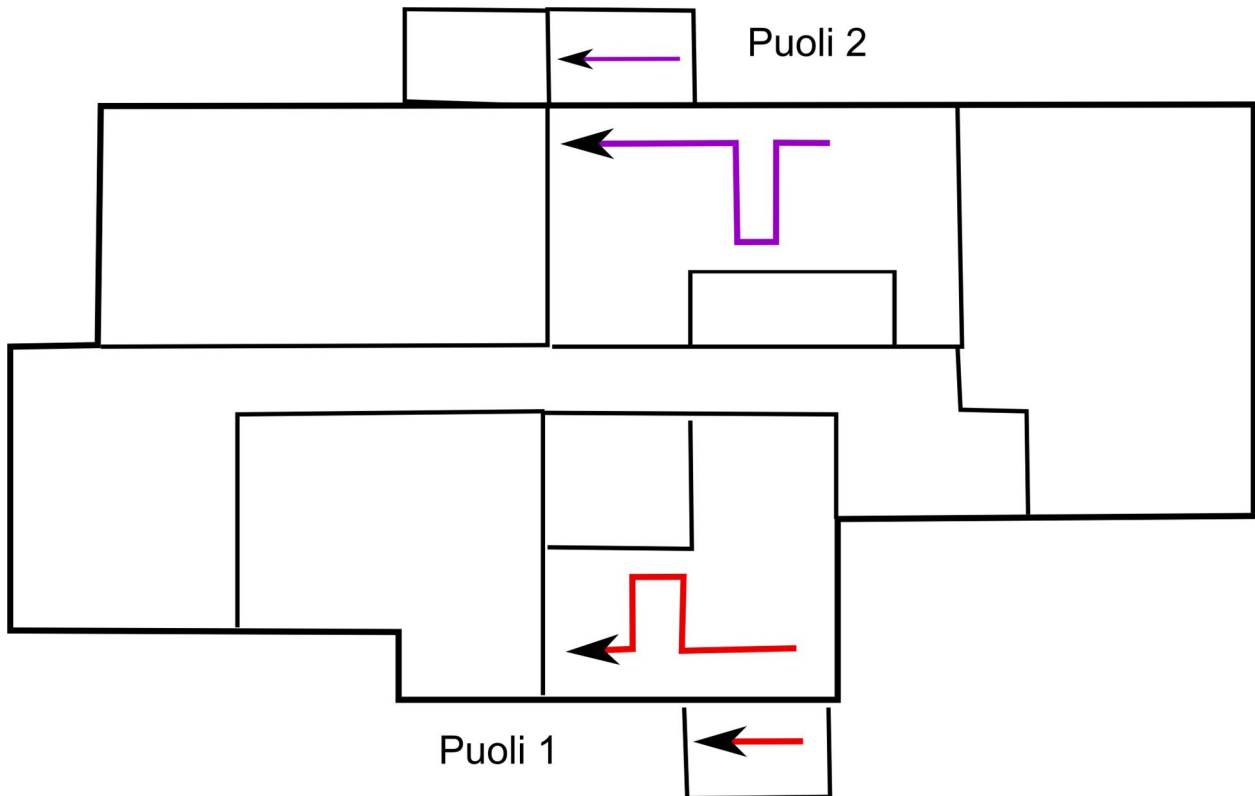
Ovi kiinni:



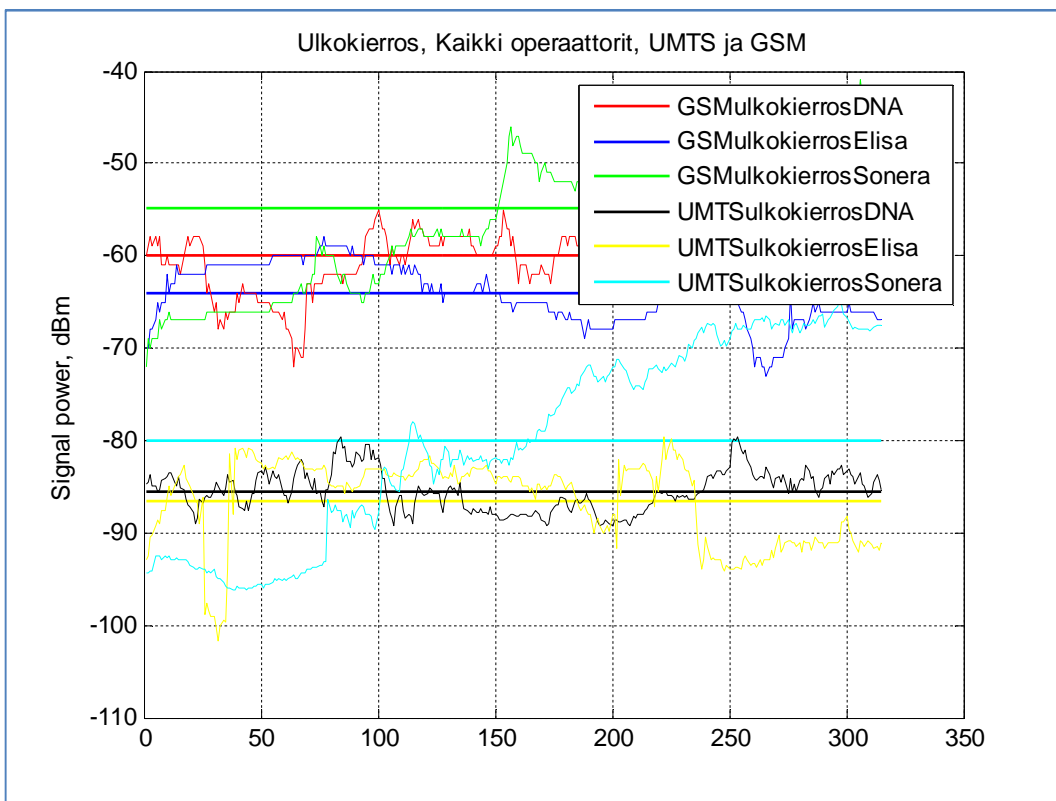


Ovi auki:



Kohde 1.10 (Kerrostalo)

Mittaukset on tehty kiinteistössä rakennuksen molemmin puolin 1-3 kerroksissa.

Ulkokierros talon ympäri

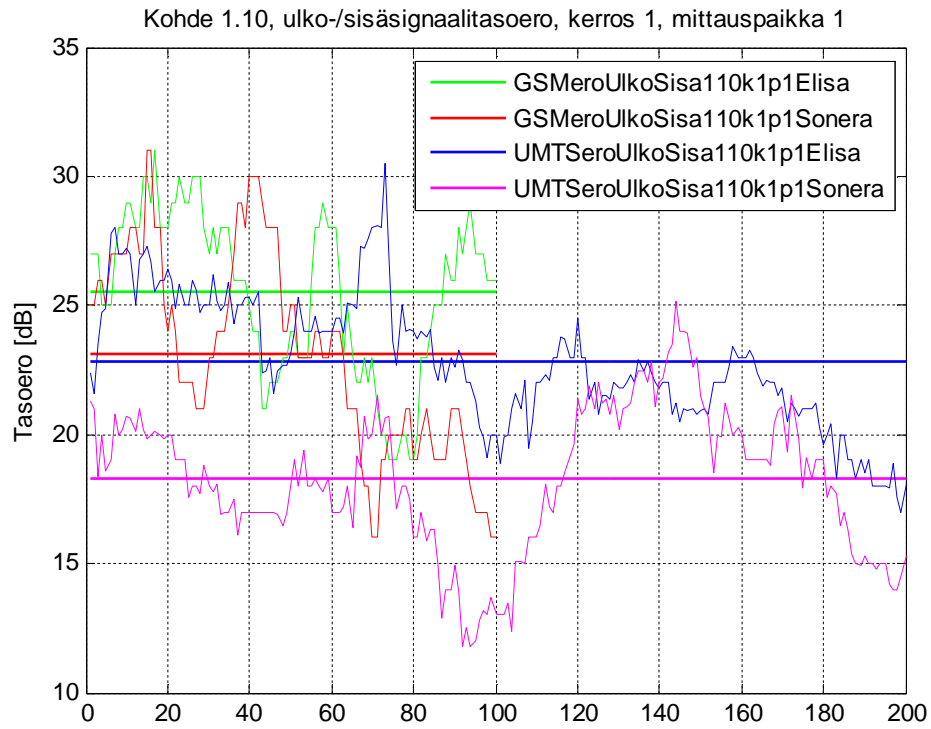
Puoli 1

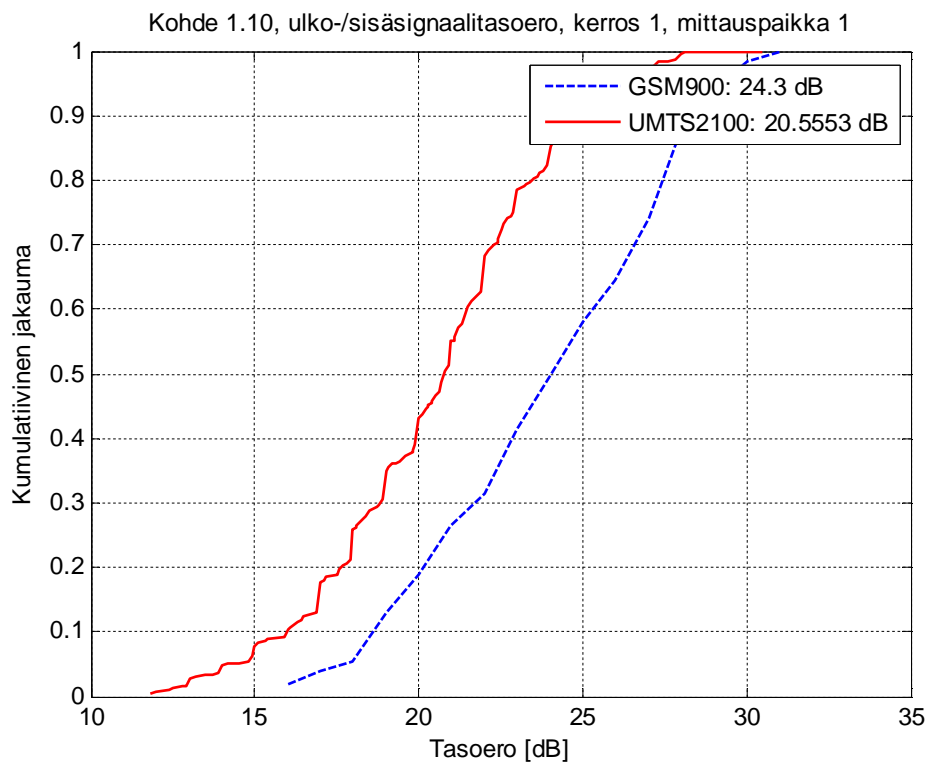
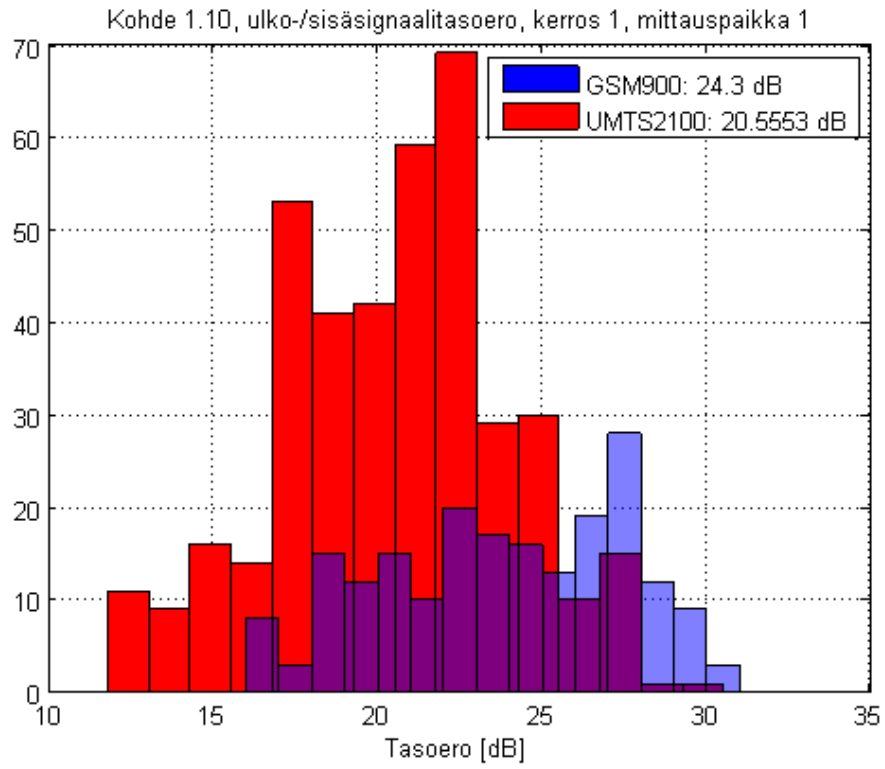
Operaattori	Standardi	Signaalitasoero, dB					
		ulko/sisä k1 p. 1	ulko/sisä k2 p. 1	ulko/sisä k3 p. 1	ovi/sisä k1 p. 1	ovi/sisä k2 p. 1	ovi/sisä k3 p. 1
DNA	GSM	-	-	-	-	-	-
	UMTS	-	-	-	-	-	-
Elisa	GSM	26	20	21	9	5	1
	UMTS	23	22	20	7	8	7
Sonera	GSM	23	24	16	8	6	2
	UMTS	18	18	15	6	6	4

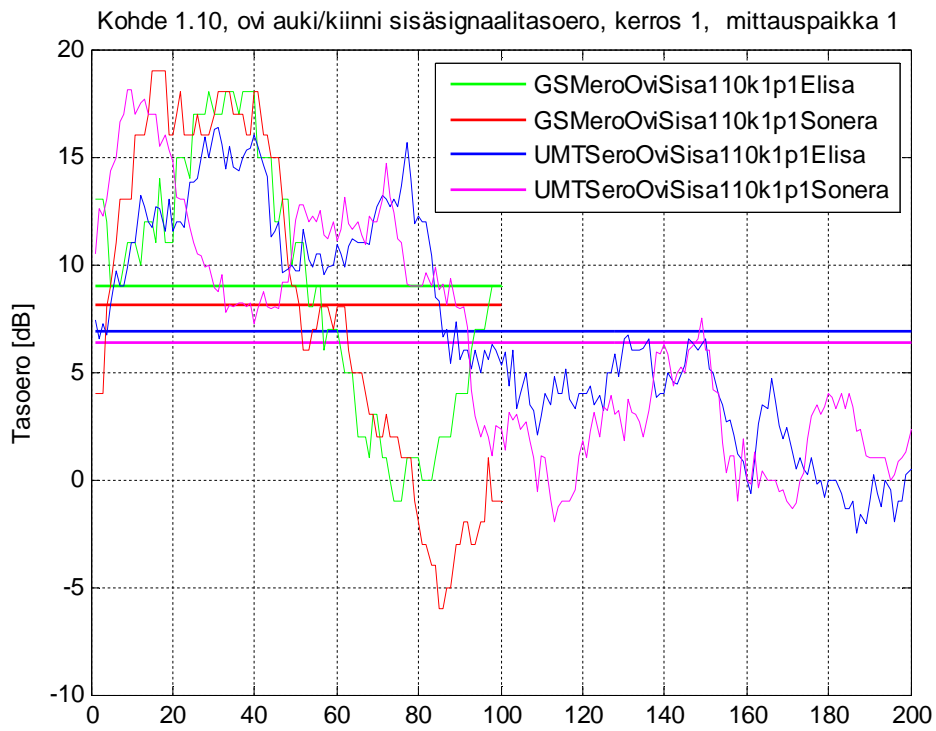
Vaimennukset olivat keskimäärin luokkaa 15–24 dB, pienentyen ylemmissä kerroksissa. Oven avaamisella saavutettiin 5–9 dB:n parannus kuuluvuuteen.

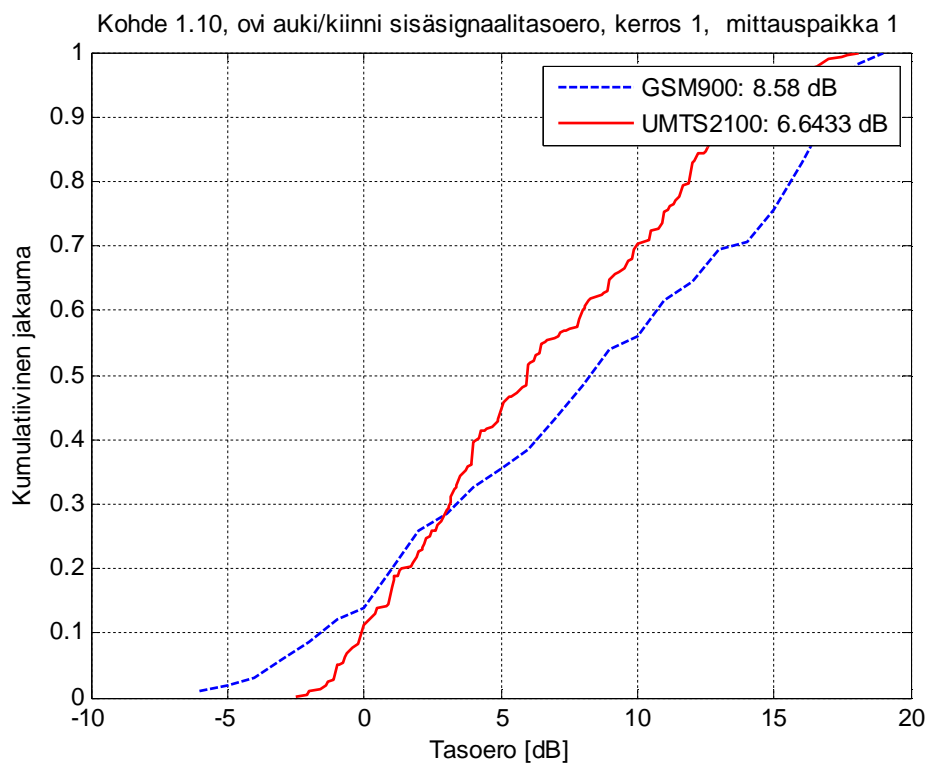
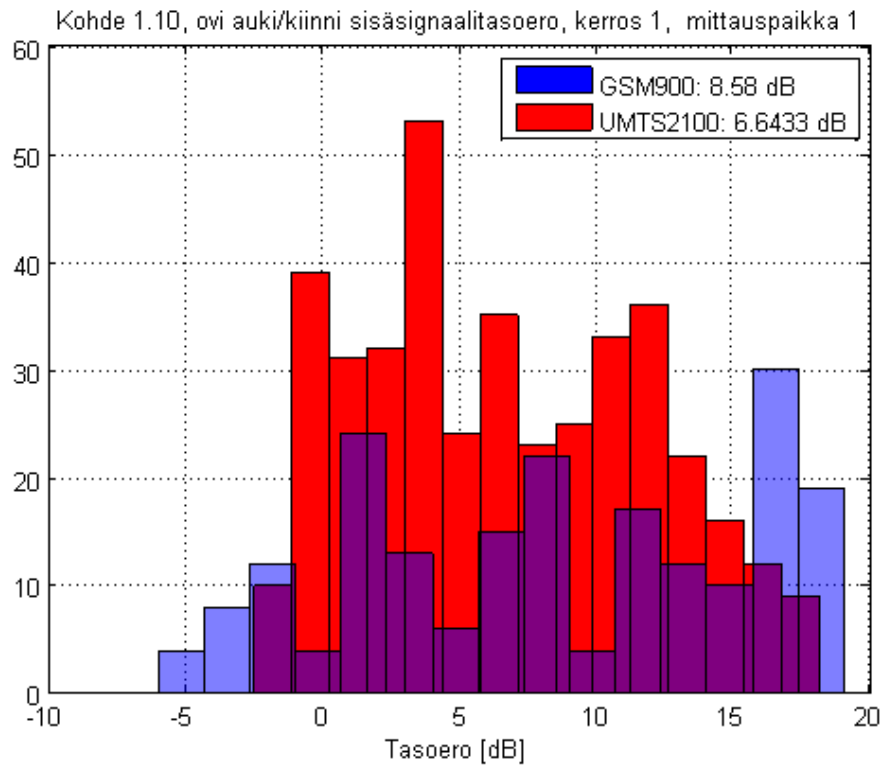
1. krs

	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	-	-
Elisa	95	10563, 446
Sonera	55	10837,75



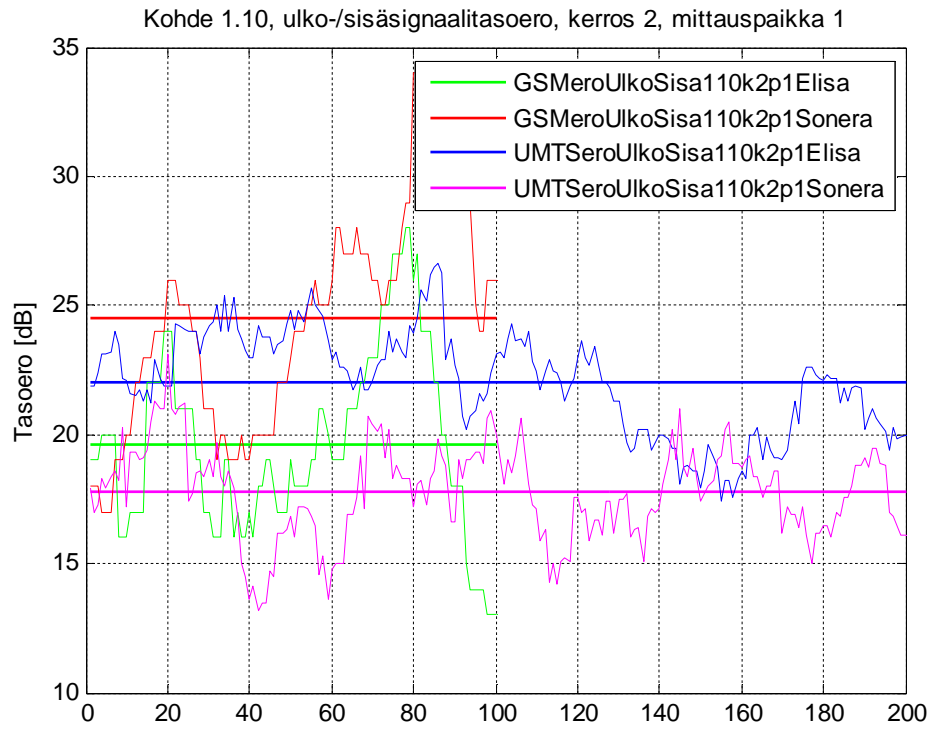


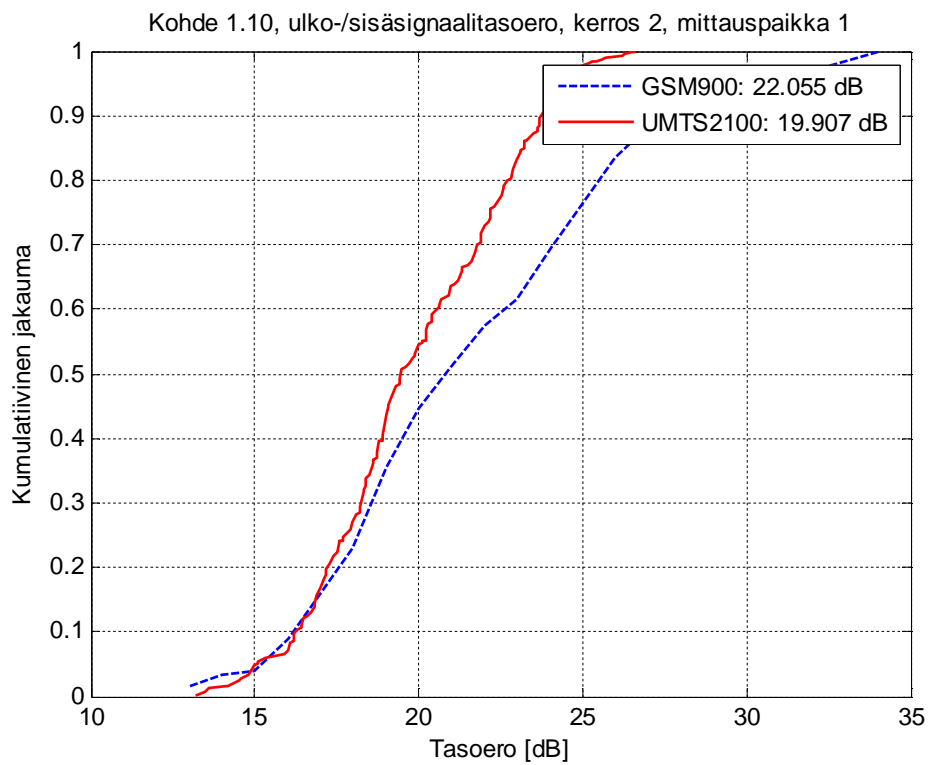
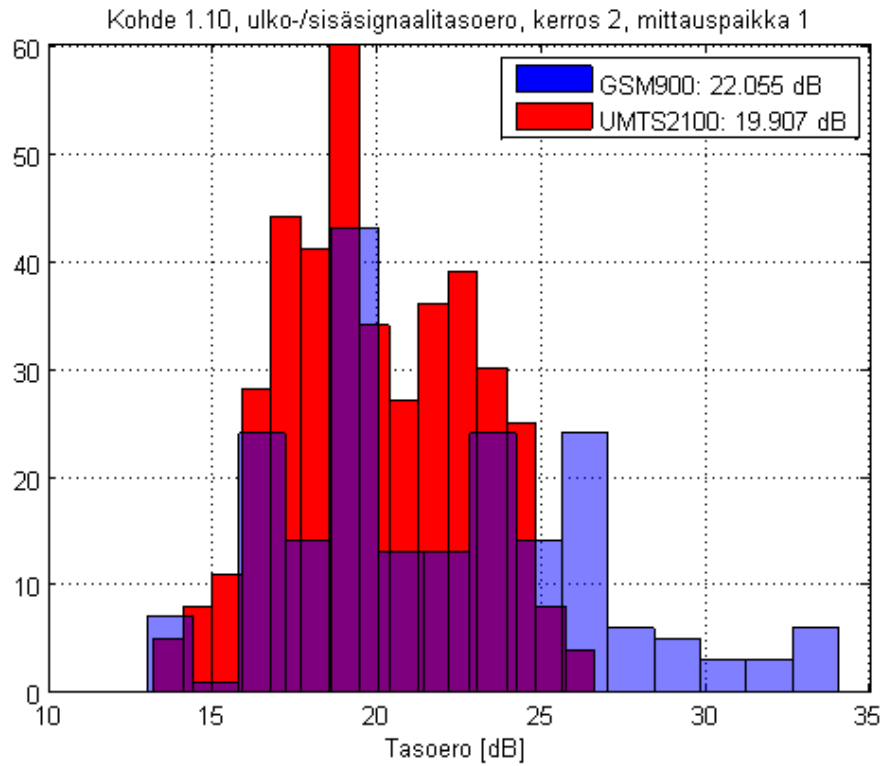
Ovi auki:

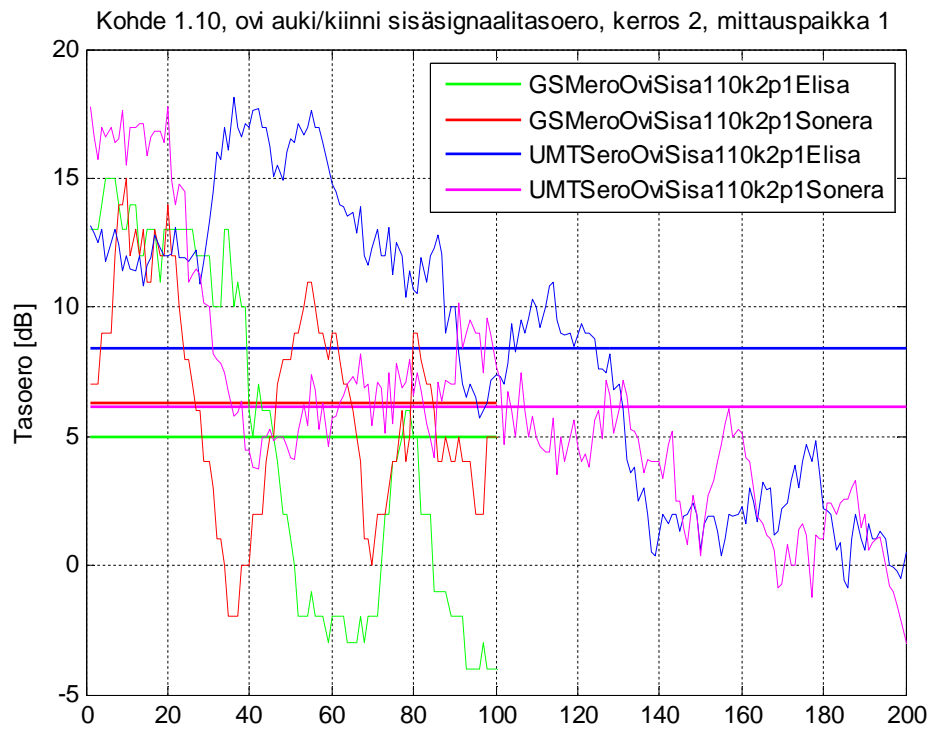


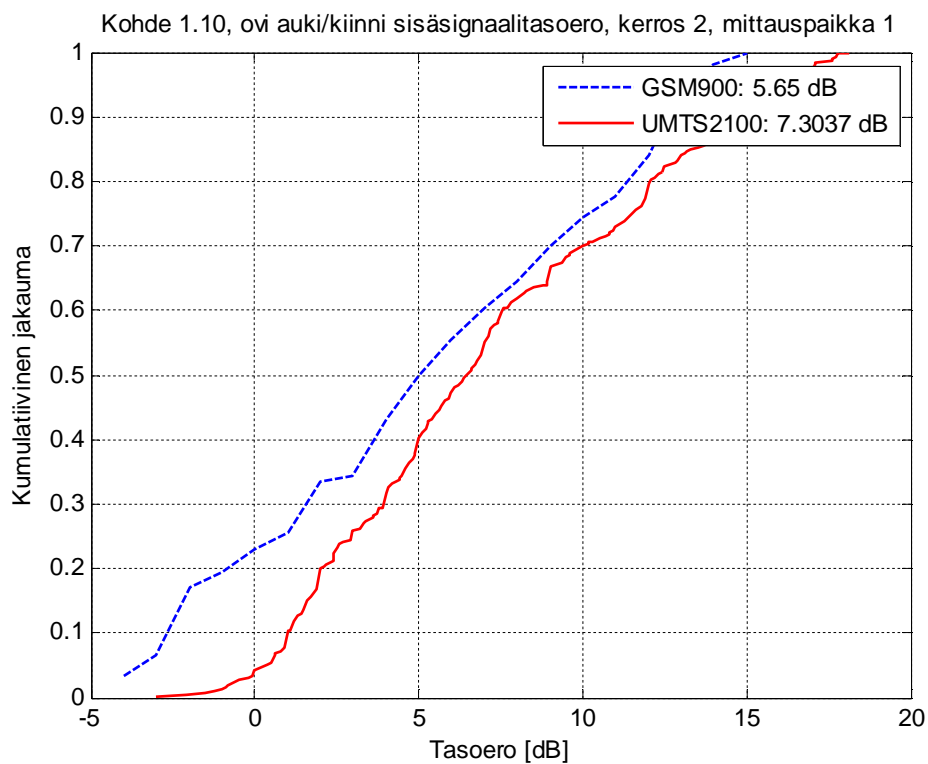
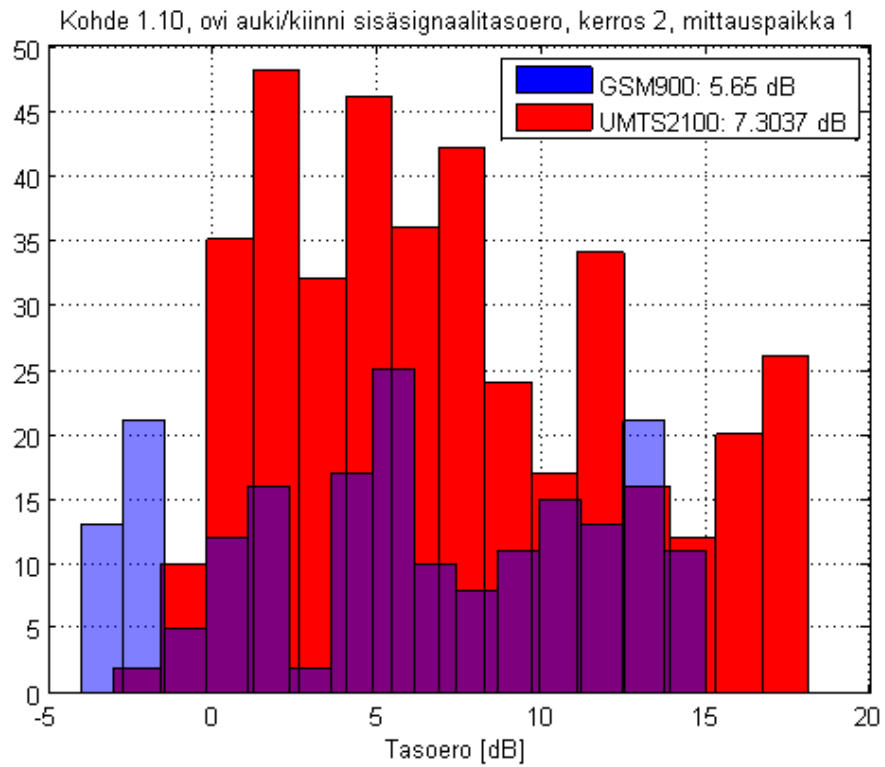
2. krs

	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	-	-
Elisa	95	10563, 446
Sonera	55	10837,75



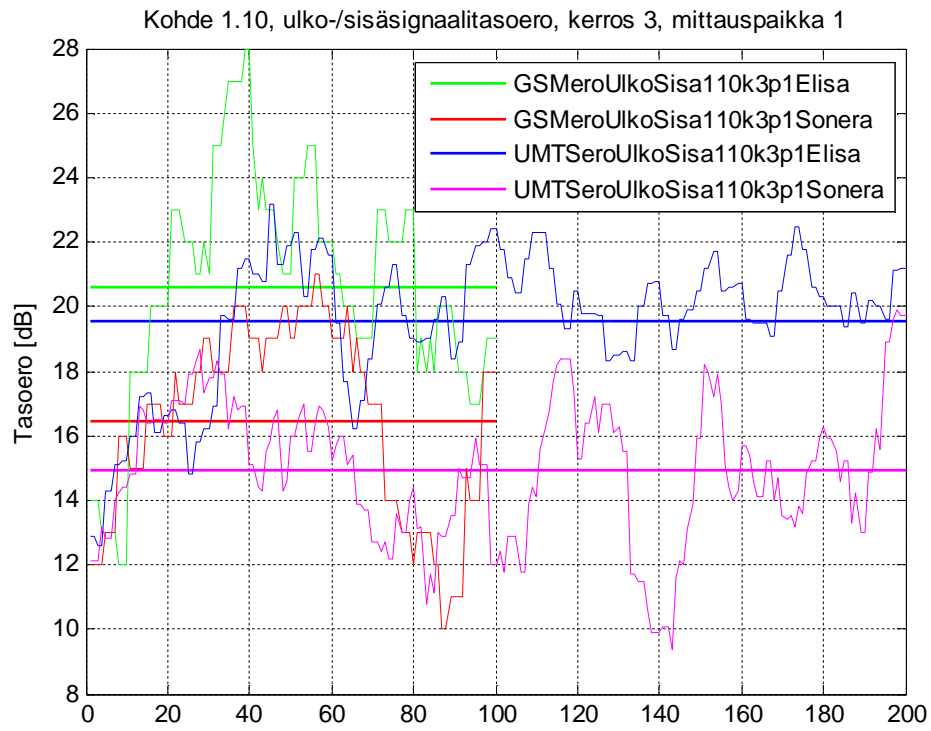


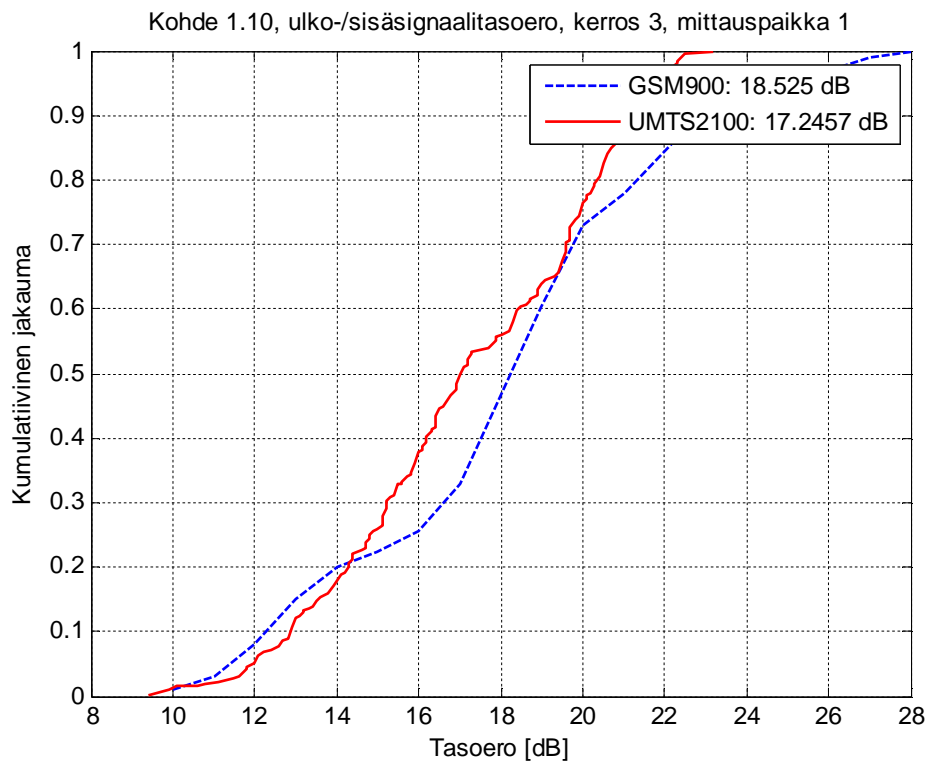
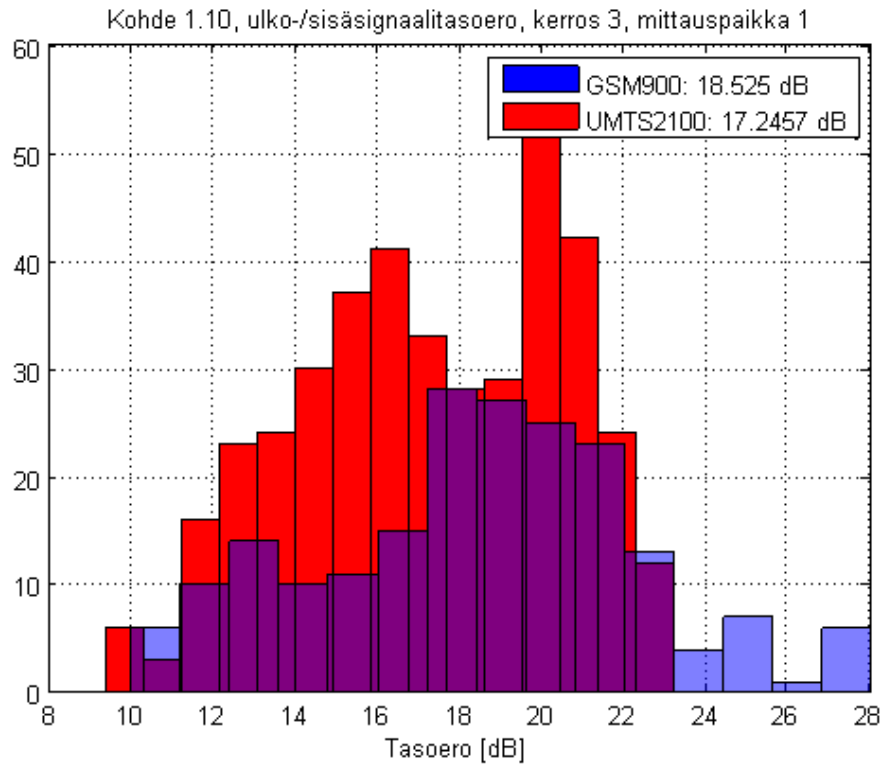
Ovi auki:

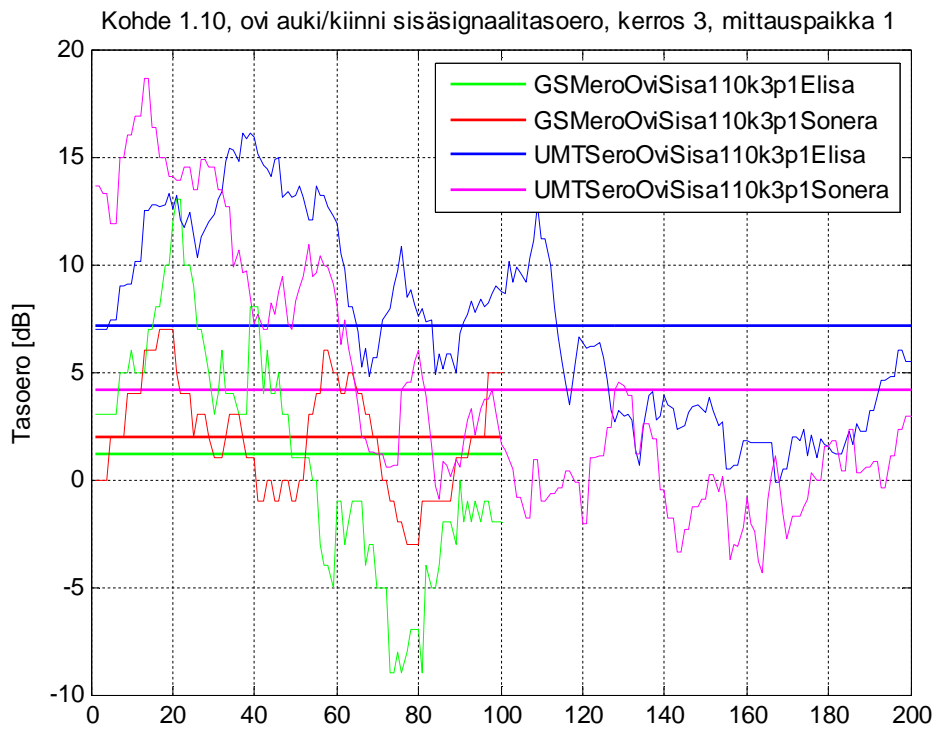


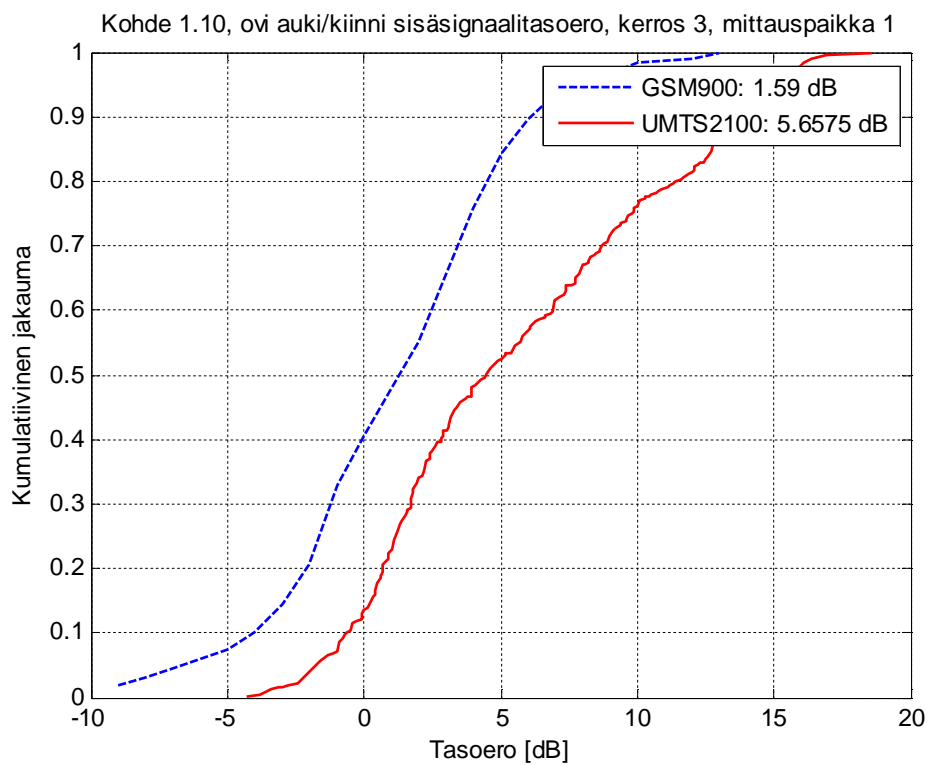
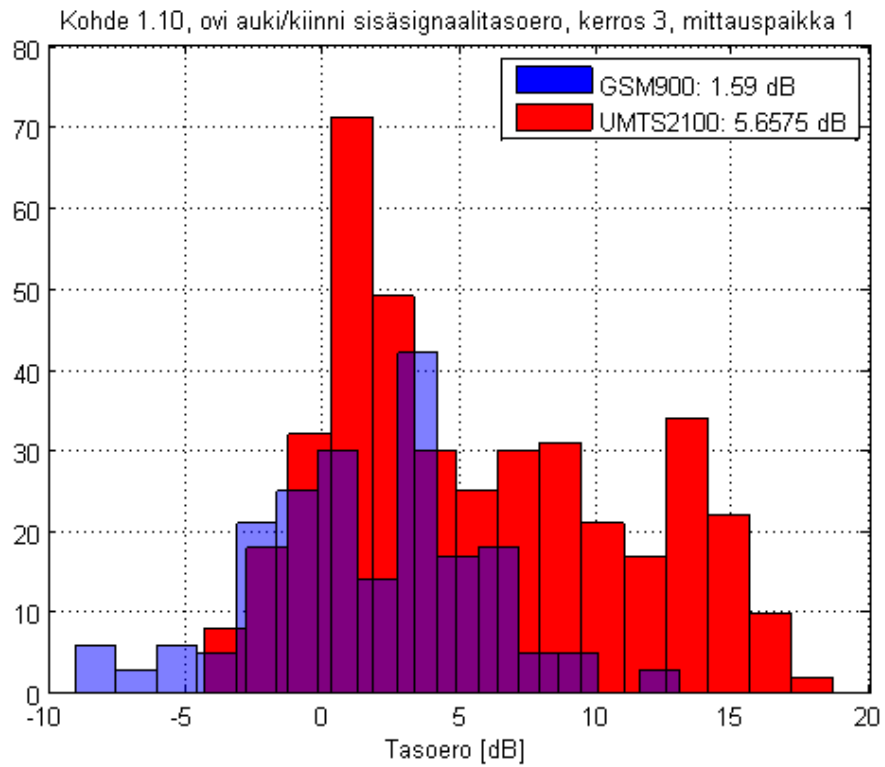
3. krs

	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	-	-
Elisa	111	10563, 97
Sonera	55	10837,75





Ovi auki



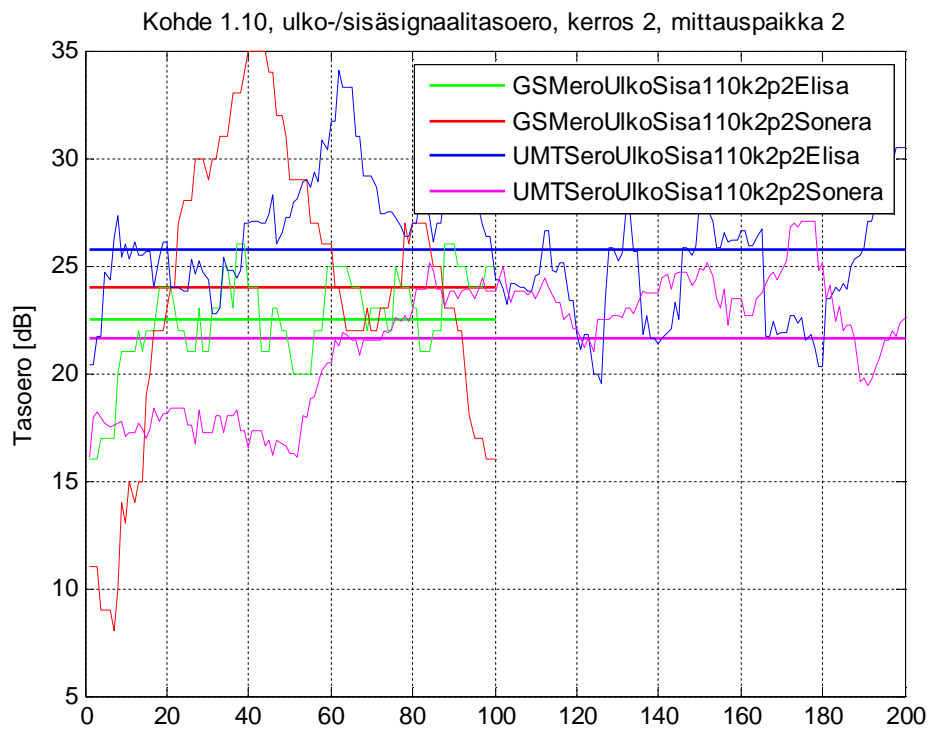
Puoli 2

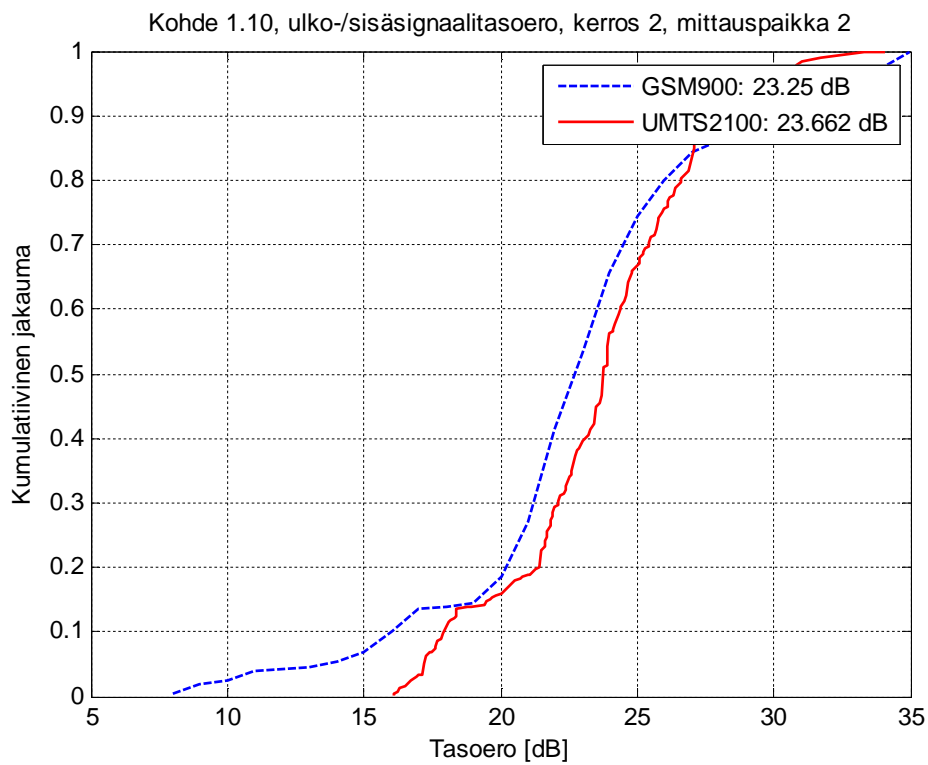
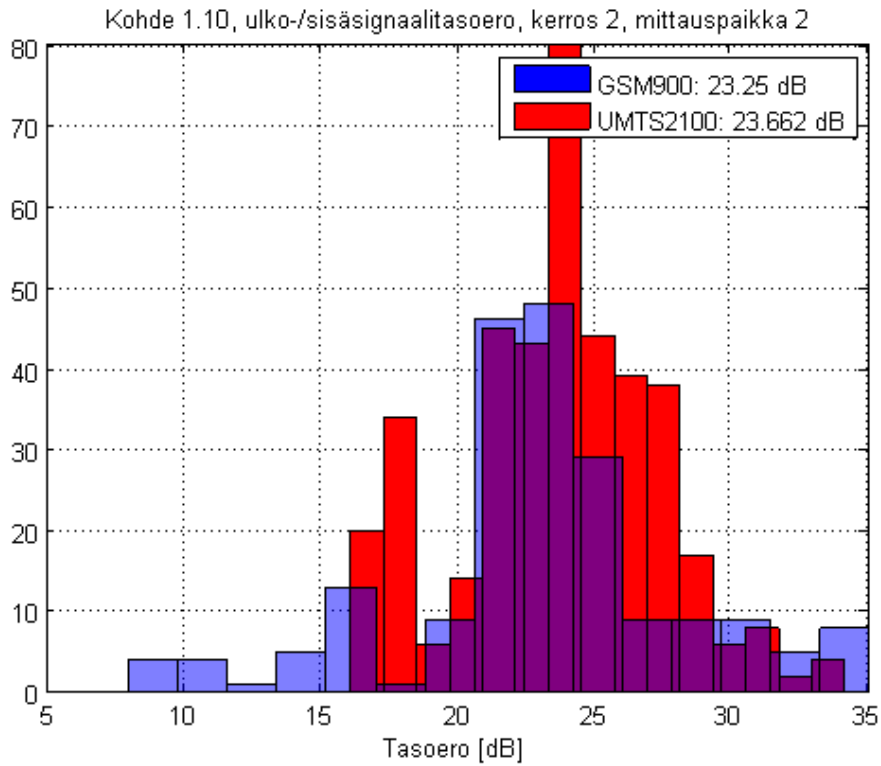
Operaattori	Standardi	Signaalitasoero, dB				
		ulko/sisä k1 p. 2	ulko/sisä k2 p. 2	ulko/sisä k3 p. 2	ovi/sisä k2 p. 2	ovi/sisä k3 p. 2
DNA	GSM	-	-	-	-	-
	UMTS	-	-	-	-	-
Elisa	GSM	22	23	24	7	4
	UMTS	24	26	27	5	4
Sonera	GSM	24	24	23	8	4
	UMTS	25	22	24	6	9

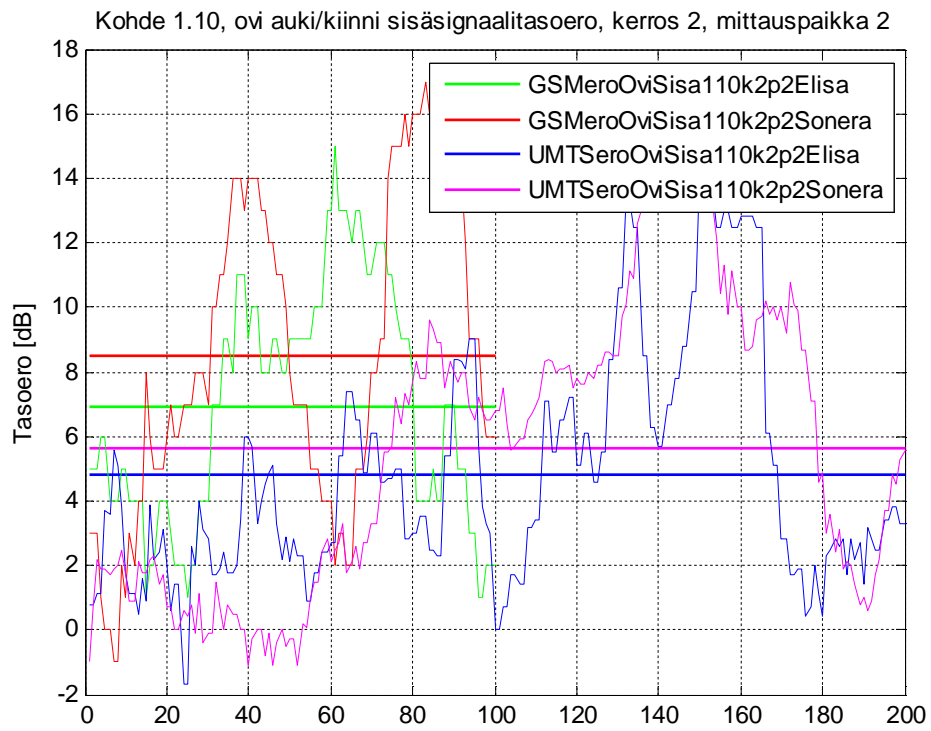
Vaimennukset ovat luokkaa 25 dB, ja oven avaaminen paransi tilannetta noin 5 dB:n verran.

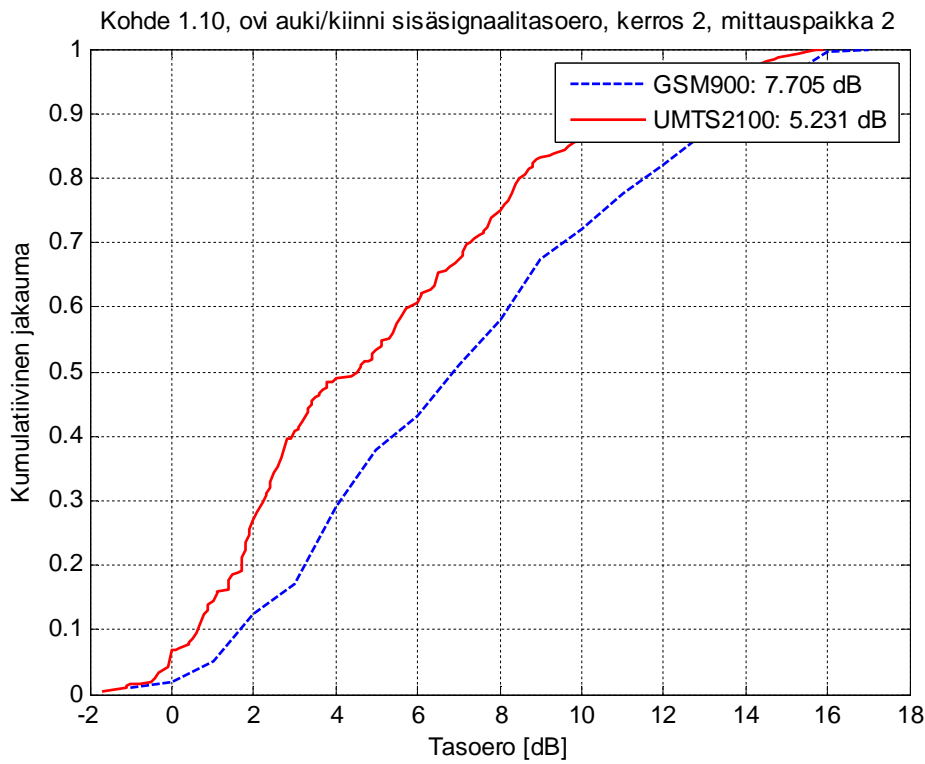
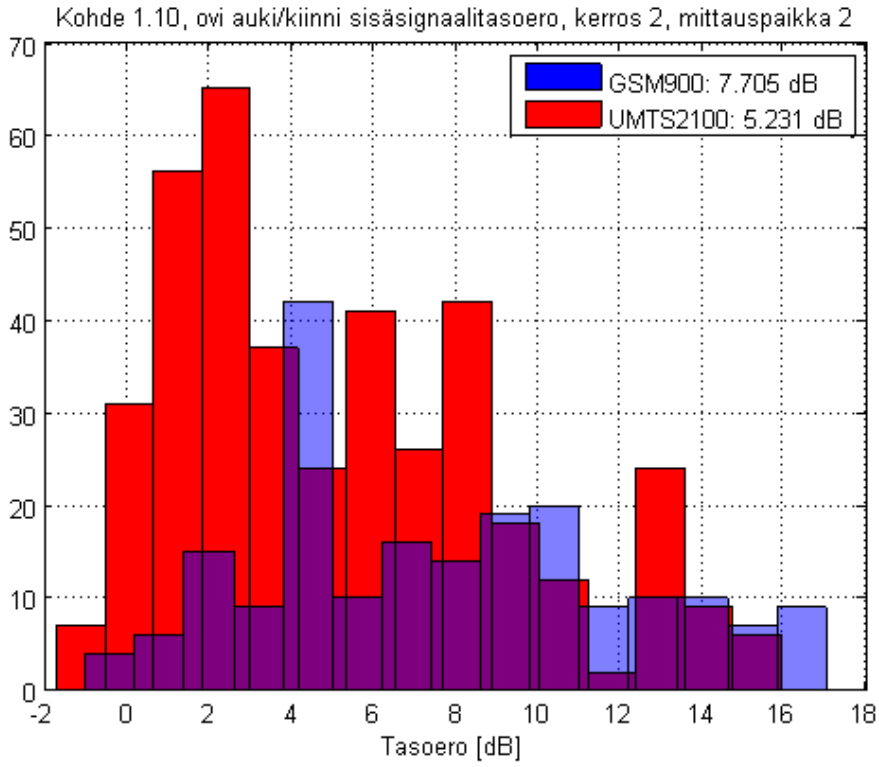
2. krs

	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	-	-
Elisa	95	10563, 446
Sonera	55	10837,75



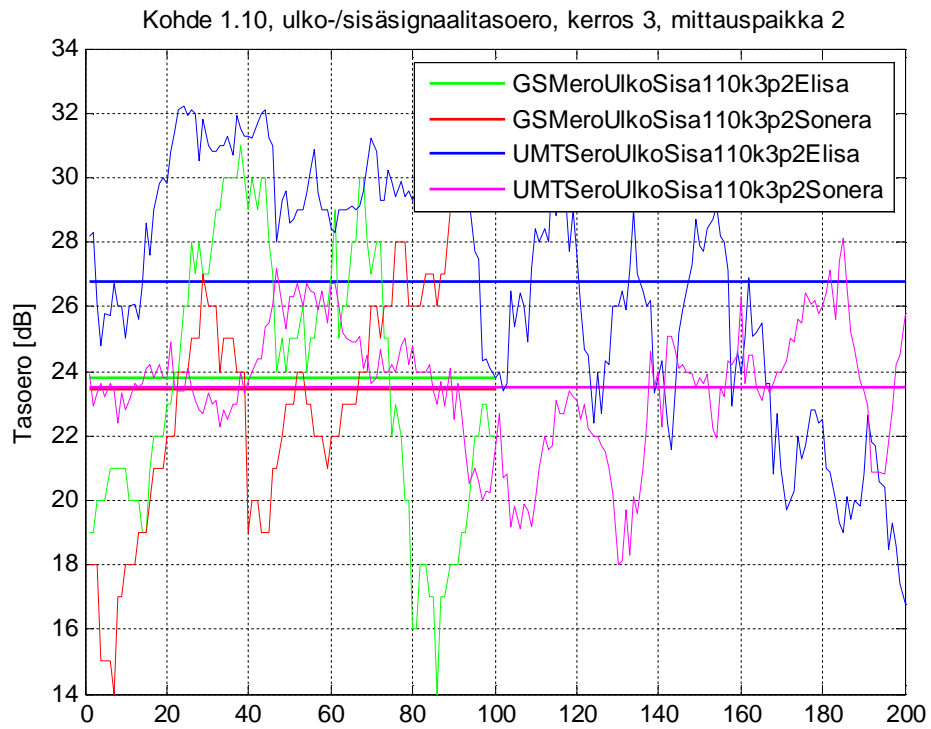


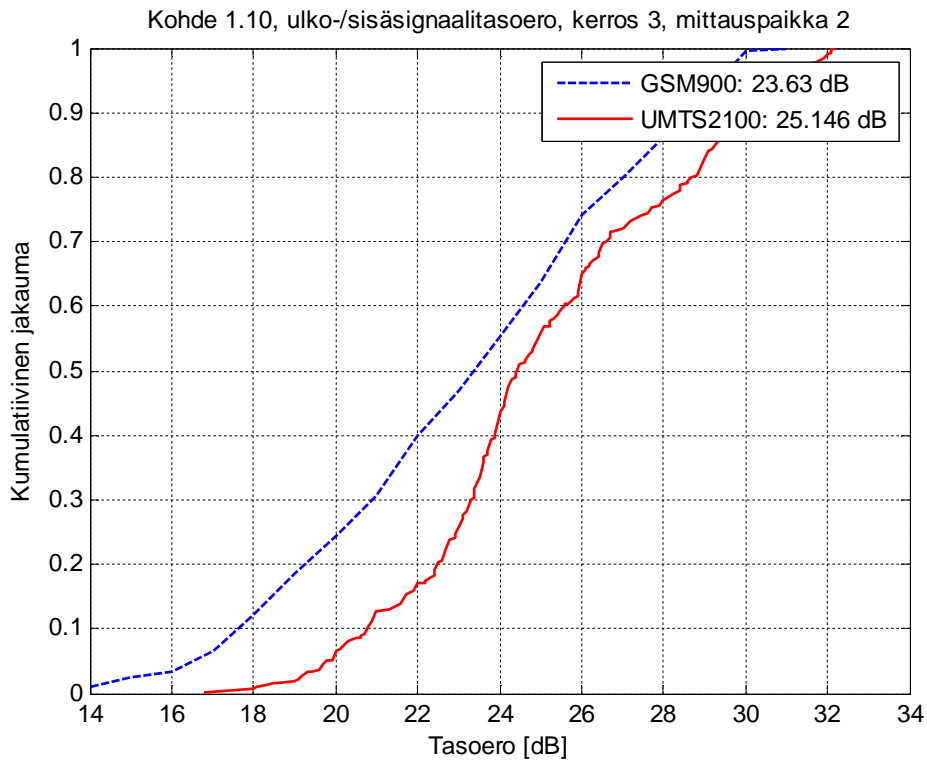
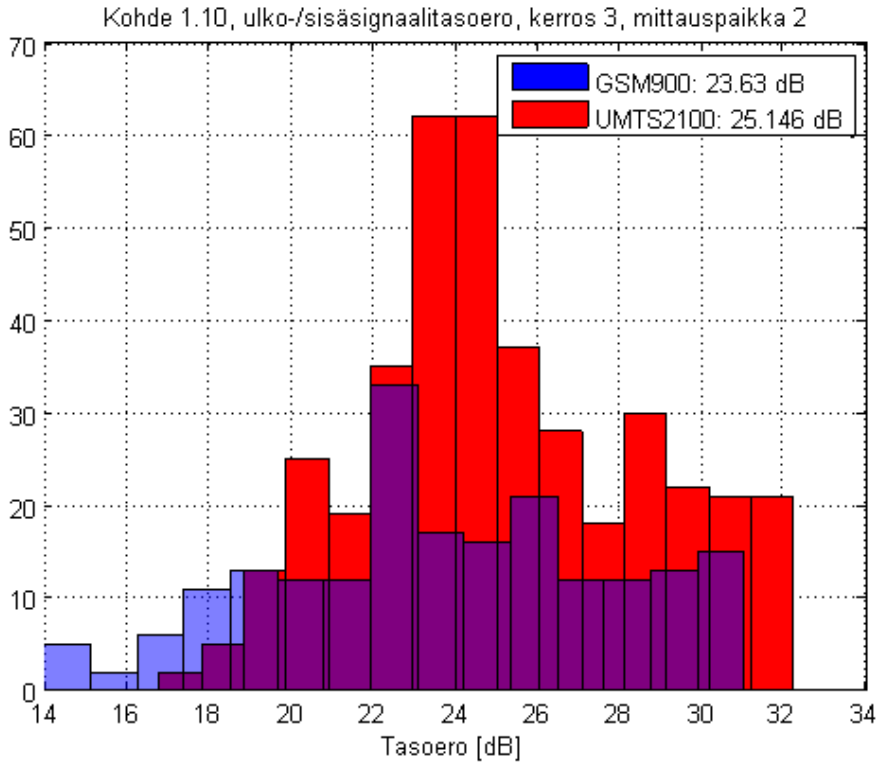
Ovi auki:



3. krs

	GSM kanava	UMTS kanava, scr. koodi
DNA	-	-
Elisa	111	10563, 97
Sonera	55	10837,75





Ovi auki: