

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Puhelintukiasema-antennin säteilykuvion mittaus multikopterilla

kandidaatintyö
11.1.2017

Nina Gunell

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Tekijä Nina Gunell

Työn nimi Puhelintukiasema-antennin säteilykuvion mittauss multikopterilla

Koulutusohjelma Teknillinen fysiikka ja matematiikka

Pääaine Systeemitieteet

Pääaineen koodi SCI3029

Vastuopettaja Eeva Vilkkumaa

Työn valvoja Professori Harri Ehtamo

Työn ohjaaja Yliopistonlehtori Jari Holopainen

Päivämäärä 11.01.2017

Sivumäärä 3 + 27

Kieli suomi

Tiivistelmä

Mobiiliverkon käyttäjien vaatimukset koskien verkon kuuluvuutta ja datansiirtonopeuksia ovat viime vuosina huomattavasti kohonneet. Ylläpitääkseen kilpailukykyään mobiiliverkko-operaattoreilla on tästä syystä kasvava tarve päivittää ja ylläpitää omaa verkkoaan. Verkonsuunnittelun perustana toimivien mallien pitäisi tällöin toimia mahdollisimman virheettömästi. Tässä työssä tarkastellaan täysin uudenlaista mittaustekniikkaa, jonka avulla näiden mallien toimivuutta voidaan arvioida.

Kentän voimakkuutta on aikaisemmin mitattu ainoastaan maantasolta, jolloin saatu kuva kentän todellisesta toimivuudesta on ollut vajaavainen. Tämän työn perustana olleessa pilottihankkeessa Sharper Shape Ltd. suoritti kirjoittajan tietämyksen mukaan ensimmäisen laajamittaisen kolmiulotteisen kenttävoimakkuuden mittauksen maasto-olosuhteissa. Pilotti suoritettiin yhteistyössä erään Suomen johtavan mobiiliverkko-operattorin kanssa. Mittaukset suoritettiin Tarot T960 heksakopterilla, joka lensi noin 110 m vakioetäisyydellä valitusta puhelintukiasema-antennista mitaten säteilykuviota antennin edestä.

Mittausten perusteella pystyttiin vertailemaan antennin muodostaman kentän vahvuutta valmistajan laboratorio-olosuhteissa mitattuihin arvoihin. Näissä arvoissa huomattiin selviä eroja etenkin suunnassa, johon antenni oli operaattorin mukaan suunnattu. Yksi selittävä tekijä tähän voi olla mittausalueen alapuolella osittain ollut avokallio, mikä on voinut aiheuttaa heijastuksista johtuvia signaalien paikallisia heikkenemisiä ja vahvistuksia.

Tässä työssä kehitetyn mittaussmenetelmän avulla on mahdollista hyvinkin tarkasti määrittää kolmiulotteinen säteilykuvio antennin ympärillä. Lisätutkimusten avulla mahdollisten virhetekijöiden vaikutus voitaisiin paremmin ottaa huomioon, jolloin järjestelmä voitaisiin laajalti käyttää esimerkiksi katvealueilla häiriötekijöiden paikallistamiseen tai asennuksen jälkeiseen rutiinitarkastukseen.

Avainsanat antenni, säteilykuvio, verkon suunnittelu, multikopteri

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Teoria	2
2.1	Radioaallot	2
2.1.1	Radioaaltojen tärkeitä ominaisuuksia	3
2.2	Antenni	3
2.2.1	Signaalin voimakkuus	4
2.2.2	Antennia ympäröivät kentät	5
2.2.3	Antennin säteilykuvio	5
2.2.4	Mittauksen kohteena ollut antenni	7
2.3	Matkapuhelinverkko	7
2.3.1	Puhelintukiasema	8
2.3.2	Verkon suunnittelu	8
2.3.3	3G-verkko	9
3	Mittauslaitteisto ja lennonsuunnittelu	10
3.1	Heksakopteri	10
3.2	Nemo Handy	11
3.2.1	Mitattu suure	11
3.3	GPS-mittaus	12
3.4	Lennonsuunnittelu	12
3.4.1	Lentoreitin suunnittelu	13
3.4.2	Lennonsuunnittelu Pythonilla	13
3.5	Testilennot	15
4	Tulokset	16
4.1	Raakadatan prosessointi	17
4.2	Datan interpolointi	19
4.3	Säteilykuvioiden vertailu	20
4.4	Virhetekijät	22
4.4.1	GPS-paikannuksesta johtuvat virheet	22
4.4.2	Etäisyyden vaihtelun vaikutus	22
4.5	Muut virhetekijät	23
5	Johtopäätökset	24

1 Johdanto

Lähes jokainen mobiilipuhelimen omistaja on joutunut tilanteeseen, jossa heikosta signaalista johtuen puhelimen käyttö ei ole ollut mahdollista. Tällaiset katvealueiksi kutsutut alueet ovat mobiiliverkko-operaattoreille erittäin ongelmallisia. Verkon suunnittelun perustana käytetyt matemaattiset mallit nimittäin usein osoittavat kentän toimivan katvealueellakin, vaikka näin ei todellisuudessa ole. Tässä työssä keskitymme mallien perustana olevan tukiasema-antennin ympäröivän säteilykuvion mittaamiseen.

Matkapuhelinkäytön lisääntyttyä viime vuosien aikana ovat asiakkaiden vaatimukset luotettavalle ja nopealle puhelinverkolle huomattavasti lisääntyneet. Vaatimukset liittyvät puhelun laatuun, datansiirtonopeuksiin sekä etenkin kuuluvuuteen. Näitä ominaisuuksia mitataan jatkuvasti mahdollisilla katvealueilla operaattorien omien työntekijöiden toimesta. Myös operaattorien välisiä vertailuja on tehty, esimerkiksi European Communication Engineering toteuttama tutkimus vuonna 2012. Kaikissa näissä tutkimuksissa esiintyy kuitenkin yksi suuri puute: kaikki mittaukset on suoritettu maantasalta. [1]

Tässä työssä esitetyssä pilottihankkeessa antennin kentänvoimakkuus on, kirjoittajan tietämyksen mukaan, ensimmäistä kertaa mitattu fyysisen antennin ympäriltä kolmiulotteisen lentoradan avulla. Nämä lennot suoritettiin Sharper Shape yrityksen Tarot T960 heksakopterin avulla. Mittauksia suorittava puhelin oli kytketty kopterin laskutelineeseen koko lennon ajan.

Työn tärkein tavoite on selvittää, pystyykö antennin säteilykuvion määrittämään riittävän tarkasti edellä mainittujen mittausvälineiden avulla, sekä pohtia minkälaista hyötyä tästä voisi olla mobiilioperaattoreille. Tavoitteena on myös suunnitella tarkoituksenmukainen ja käytännöllinen dynaaminen lennonsuunnitteluohjelmisto, joka mahdollistaisi nopean ja joustavan ope-roinnin mielivaltaisessa maastossa. Yksi suurimmista haasteista tulostenkäsittelyssä on mittauksiin vaikuttavien virhetekijöiden identifiointi sekä näiden suuruusluokan määrittäminen.

Kappaleessa 2 tarkastelemme puhelinverkon perustana olevien antennien toiminnallisuutta ja ominaisuuksia. Lennätyksessä käytetty heksakopteri, mittausjärjestelmä sekä lennonsuunnitteluohjelmisto, jonka toteutuksen on suunnitellut tämän kandidaatintyön tekijä, ovat esitetty tarkemmin kappaleessa 3. Tulokset sekä näihin liittyvät johtopäätökset ovat lopuksi esitetty kappaleissa 5 ja 6.

2 Teoria

Tässä kappaleessa esitetyt faktat perustuvat Antti Räisäsen kirjaan Radiotekniikan perusteet [2], ellei tekstissä muuta mainita.

2.1 Radioaallot

Sähkömagneettisessa säteilyssä sähkö- ja magneettikenttä värähtelevät kohtisuorassa sekä toisiaan että etenemissuuntaa vastaan. Sähkömagneettisen taosaallon etenemisnopeus on riippuvainen väliaineesta ja tyhjiössä nämä aallot etenevät valon nopeudella $c = 299\,792\,458$ m/s. Värähtelyn taajuuden ollessa f pystymme tällöin määrittämään aallonpituuden $\lambda = c/f$. Sähkömagneettinen säteily syntyy aina hiukkasen ollessa kiihtyvässä liikkeessä. Tällainen tilanne muodostuu esimerkiksi antennissa, joka on esitetty tarkemmin kappaleessa 2.2.

Sähkömagneettinen spektri jaetaan taajuuden perusteella useaan eri osaluueeseen, josta 3 kHz - 300 GHz aluetta kutsutaan *radioaalloiksi*. Vertailukohteena näkyvän valon raja on noin 380 THz, eli radioaallot eivät koskaan ole nähtävissä paljain silmin. Radioaallot jaetaan perinteisesti vielä pienempiin osa-alueisiin, jotta eri sovelluksissa käytetyt eritaajuiset aallot helpommin voidaan erottaa toisistaan. Tämä jako on esitetty Taulukossa 1. Nykyisin lähes kaikki tiedonsiirto, aina satelliittien välisestä kommunikoinnista matkaviestintään, suoritetaan radioaaltojen avulla.

Taulukko 1: Radioaaltojen 3kHz - 300 GHz taajuusalueet

VLF	Very Low Frequencies	3-30 kHz
LF	Low Frequencies	30-300 kHz
MF	Medium Frequencies	300-3000 kHz
HF	High Frequencies	3-30 MHz
VHF	Very High Frequencies	30-300 MHz
UHF	Ultra High Frequencies	300-3000 MHz
SHF	Super High Frequencies	3-30 GHz
EHF	Extremely High Frequencies	30-300 GHz

Käytössä olevat taajuudet ovat jaettu muun muassa käyttötarkoituksen ja kantaman perusteella viranomaisten, kaupallisten toimijoiden sekä yksityishenkilöiden välille. Suomen viranomaisradioverkko VIRVE:lle on esimerkiksi varattu taajuudet 380–396 MHz, eikä kukaan muu toimija saa käyttää kyseisiä taajuuksia [3]. Tässä työssä tulemme keskittymään Suomessa UHF-taajuuksien 900-2100 MHz välissä toimivaan **3G-verkkoon**.

2.1.1 Radioaaltojen tärkeitä ominaisuuksia

Radioalloilla on monia ominaisuuksia, joista tämän työn kannalta erityisen tärkeitä ovat heijastuminen, interferenssi sekä vaimentuminen. Vaimennukselle olemme pystyneet laskennallisesti määrittämään suuruusluokan, mutta heijastus ja interferenssi on pitänyt ottaa huomioon tulosten luotettavuutta analysoitaessa.

Heijastuminen tapahtuu radioaallon osuessa heijastavaan pintaan, kuten esimerkiksi rakennukseen tai maanpinnalla oleviin kiviin. Heijastuva aalto tulee tällöin olemaan eri vaiheessa kuin suoraan mittauspisteeseen edennyt aalto, jolloin nämä tulevat superpositioperiaatteen mukaan summautumaan. Tätä ilmiötä kutsutaan myös interferenssiksi. Heijastunut aalto johtaa tällöin alkuperäisen radioaallon vahvistumiseen tai vaimentumiseen. Esimerkki tällaisesta tilanteesta on esitetty Kuvassa 1. Kuvan mittauspisteessä rakennuksen kautta heijastunut aallon f_2 ja suoraan kulkeneen aallon f_1 vaihe-ero on π . Tällöin aallot ovat vastakkaisissa vaiheissa, jolloin niiden summasta tulee nolla. [4]

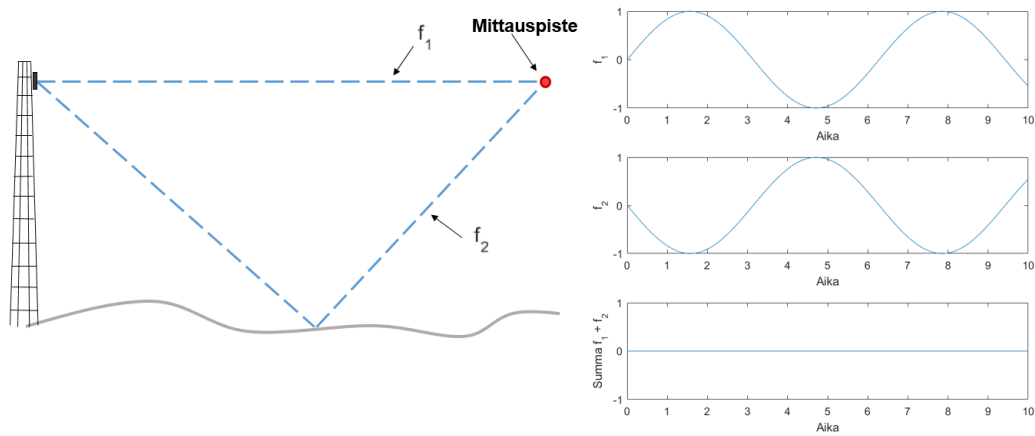
Vapaan tilan vaimennuksella FSPL (engl. Free Space Path Loss) tarkoitetaan radioaallon vaimentumista ilmakehässä, jossa ei ole signaaliin vaikuttavia esteitä. Tämä voidaan kuvata logaritmisella kaavalla [5]

$$FSPL = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right), \quad (1)$$

missä λ on aallonpituus ja d on etäisyys.

2.2 Antenni

Antenni on radioaaltojen lähettämiseen sekä vastaanottamiseen suunniteltu laite, jonka tehtävä on mahdollisimman tehokkaasti käsitellä tietyillä taajuuksilla tulevia ja lähteviä radioaaltoja. Tällaisia radioaaltoja voidaan myös



Kuva 1: Esimerkki radioaaltojen heijastumisesta ja interferenssistä

kutsua signaaleiksi. Käytännössä lähettävässä antennissa olevan sähköjohdon läpi kulkee korkeataajuuksinen vaihtovirta, joka aiheuttaa sähkömagneettisen aallon antennin välittömään läheisyyteen. Tämä aalto etenee ilmakehän (sekä mahdollisten esteiden) halki vastaanottavalle antennille, johon muodostuu radioaaltoista johtuva sähkövirta. Vastaanotin pystyy tämän jälkeen muuntamaan virrasta saadun signaalin haluttuun muotoon hyötykäyttöä varten. Vastaava toimintaperiaate toimii myös toiseen suuntaan, jolloin lähettävä antenni toimii vastaanottavana ja päinvastoin.

Antennilla on täysin samat ominaisuudet sekä lähetys- että vastaanottotilanteissa. Tätä tärkeää ominaisuutta kutsutaan *resiprookkisuuudeksi*. Signaalin voimakkuuden määrittää lähettimen lähetysteho. Antennin muita tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa säteilykuvio, suuntaavuus, keilan leveys, polarisaatio, hyötysuhde, vahvistus, impedanssi, häviöt sekä kaistanleveys (taajuudet, joilla antenni toimii). Tulemme seuraavaksi lyhyesti tutustumaan näistä tämän työn kannalta keskeisiin.

2.2.1 Signaalin voimakkuus

Lähettimen lähetysteho ilmoitetaan watteina (W), mutta tehonmuutokset (esimerkiksi vaimennus) ilmoitetaan tavallisesti desibeleissä (dB). Desibeli kuvaa kahden samaa yksikköä olevan tehon suhdetta toisiinsa. Syy logaritmisin asteikon käyttöön signaalin voimakkuutta mitattaessa ovat suuret erot signaalien tehoarvoissa, jotka olisivat vaikeat havinnollistaa tavallisella (lineaarilla) asteikoilla. Matkapuhelimella vastaanotettua tehoa mitataan yleis-

sesti desibeli-milliwatteina (dBm). Vertailutasoa 0 dBm vastaa tällöin 1 mW, ja tätä alemmat signaalit ilmoitetaan negatiivisina. Esimerkkejä logaritmisen dBm asteikon arvoista sekä niitä vastaavista absoluuttisista tehoarvoista on esitetty Taulukossa 2.

Taulukko 2: Logaritminen dBm asteikko

dBm	mW	dBm	mW	dBm	mW
0	1	-20	0.01	-40	10^{-4}
-10	0.1	-30	0.001	-50	10^{-5}

2.2.2 Antennia ympäröivät kentät

Antennin ympärillä oleva tila voidaan etäisyyden perusteella jakaa kolmeen ominaisuuksiltaan eri kenttään. *Reaktiivinen lähikenttä* antennin välittömässä läheisyydessä, säteilyominaisuuksiltaan etäisyydestä riippuva *lähikenttä* sekä *kaukokenttä*. Kaukokentän säteilyominaisuudet eivät juurikaan muutu etäisyyden muuttuessa, jolloin kentän voimakkuus tällä alueella ainoastaan laskee kentän laajentuessa suuremmalle pinta-alalle. Muutokset kentissä tapahtuvat vähitellen, joten tarkkaa rajaa eri kenttien välillä ei tietenkään voida määrittää. Yleensä lähi- ja kaukokentän rajana kuitenkin pidetään etäisyyttä

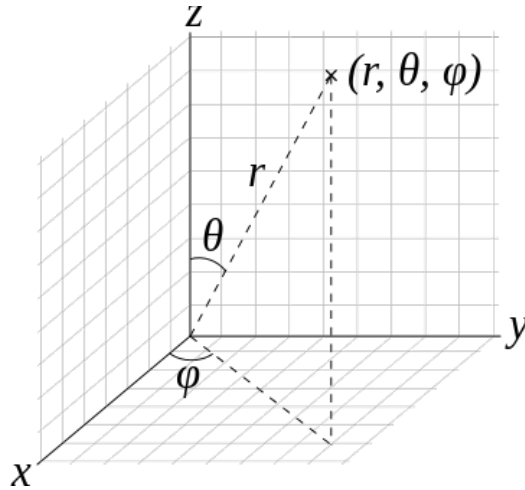
$$r_{raja} = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2)$$

missä D on antennin suurin mitta kohtisuorassa säteilysuuntaan nähden.

2.2.3 Antennin säteilykuvio

Useimmat antennit eivät lähetä ja vastaanota signaaleja yhtä hyvin kaikista suunnista, vaan ovat vahvasti *suunnattuja*. Käyttämällä suunnattua antennia ympärisäteilevän sijaan, on mahdollista samalla teholla lähettää korkeampi tehotiheyksistä signaalia ennalta valittuihin suuntiin. Tällä tavoin voidaan vaikuttaa kenttävoimakkuuteen $E(\theta, \varphi)$ valituilla kulmilla θ ja φ antennista lähtien. Tällaisesta on hyötyä esimerkiksi puhelintukiasemaan kytketyssä kiinteässä antennissa. Tukiaseman antenniin ollessa maanpintaa korkeammalla tasolla, ovat antenniin yhteydessä olevat mobiililaitteet lähtökohtaisesti tätä maantieteellisesti alempana. Tällöin suurin hyöty saadaan voimakaimman signaalin ollessa suunnattuna hieman horisontin alle.

Säteilykuvion tarkoitus on havainnollistaa kenttävoimakkuuden kulmariippuvuutta elevaatiokulmasta θ sekä atsimuuttikulmasta φ (Kuva 2).



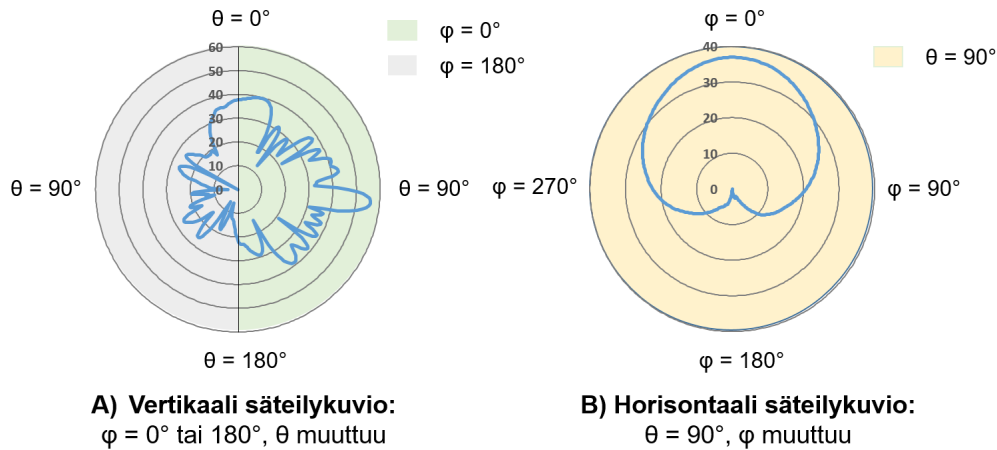
Kuva 2: Elevaatiokulma θ ja atsimuuttikulma φ pallokoordinaatistossa [6]

Säteilykuvio voidaan käyttötarkoituksesta riippuen muodostaa joko kolmi- tai kaksiulotteisena. Kaksiulotteisessa tapauksessa säteilykuvio on teholu- kemien $P(\theta, \varphi)$ leikkaus seuraavissa päätasoissa:

- 1) Vertikaali säteilykuvio $\{P(\theta, \varphi) \mid \varphi = 0^\circ, \theta \in [0^\circ, 180^\circ]\}$
- 2) Horisontaali säteilykuvio $\{P(\theta, \varphi) \mid \theta = 90^\circ, \varphi \in [0^\circ, 360^\circ]\}$

Antenni on säteilykuviossa tavallisesti asetettu origoon ja sitä ympäröivä kenttä normalisoitu siten, että heikoin kenttä on origossa ja vahvin signaali ulkokehällä.

Esimerkki antennin säteilykuvioista on esitetty Kuvassa 3, jossa selvästi on havaittavissa suuria eroja kentänvoimakkuudessa eri asteluvuilla. Vahvinta maksimia kutsutaan nimellä pääkeila, ja sivuilla olevia lokaaleja maksimeja kutsutaan sivukeiloiksi. Vertikaali säteilykuvio vastaa antennin säteilykuvio- ta katsomista sivulta siten, että 90° osoittaa suoraan horisonttiin. Vastaavasti horisontaali kuva vastaa antennin säteilykuvion katsomista suoraan ylhääl- täpäin. Kuvioiden skaalat ovat logaritmisia siten, että kuvioin keskipiste 0 dB vastaa heikonta signaalia ja uloin kehä vahvinta signaalia.



Kuva 3: Kathrein Datenblatt 9364176 antennin säteilykuviot [7]

2.2.4 Mittauksen kohteena ollut antenni

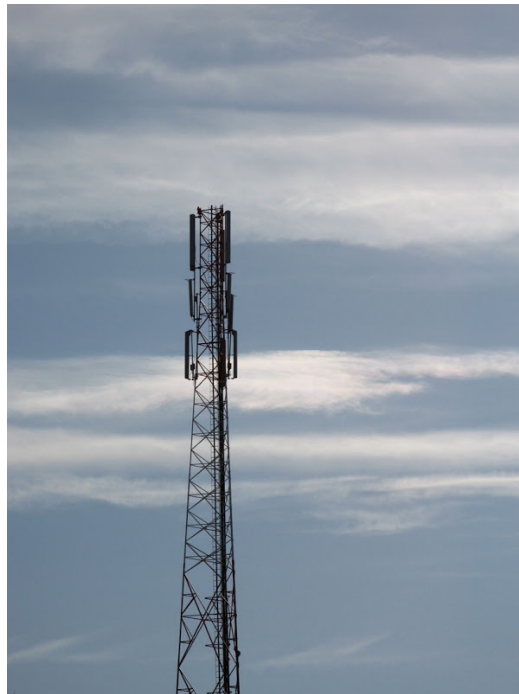
Mittauksen kohteena ollut tukiasema-antenni oli Kathrein Datenblatt 9364176 laajakaistainen paneeliantenni. Vastaavia antennia oli telemastossa samalla korkeudella kolme kappaletta, ja ero näiden atsimuuttikulmissa φ oli 120° . Kyseisen antennin valmistajan ilmoittama säteilykuvio on esitetty Kuvassa 3. Vertikaalisti antennia voidaan sähköisesti säätää $0...8^\circ$ horisontin alapuolelle, jolloin säätöä tehdään kallistuskulmalle. Antenni toimi 900 MHz taajuudella ja suurin mitta kohtisuorassa säteilysuuntaan nähden oli 2.6 m. Tällöin kaavalla 2 saadaan lähi- ja kaukokentän rajaksi noin 42 metriä, eli 110 metrin säteellä suoritettavat mittaukset olivat selvästi kaukokentän alueella. [7]

2.3 Matkapuhelinverkko

Matkapuhelinverkot ovat soluista muodostuvia verkkoja, joissa jokaisessa solussa on runkoverkkoon kytketty tukiasema. Solun koon määrittää tukiaseman kuuluvuusalue, mikä vaihtelee sekä maantieteellisistä että käyttäjämäärään liittyvistä syistä. Tukiaseman tehtävä on muodostaa ja ylläpitää radioyhteyttä solun alueella liikkuviin matkapuhelimiin. Osittain päällekkäin olevien tukiasemien kuuluvuusalueet mahdollistavat käyttäjän siirtymisen solusta toiseen ilman yhteydenkatkosta. Matkapuhelinverkkoja Suomessa ylläpitää yksityiset mobiiliverkko-operaattorit.

2.3.1 Puhelintukiasema

Puhelintukiasema toimii solmupisteenä alueella olevien mobiililaitteiden ja runkoverkon välillä. Tukiaseman antennit sijoitetaan tyypillisesti huomattavasti maanpintaa korkeammalle tasolle Kuvassa 4 näkyvään telemastoon. Telemastossa on usein monien operaattorien tukiasemia ja yhteen tukiasemaan on kytkettynä useampi antenni. Usein antennoja on samalla tasolla maston ympärillä kolme kappaletta suunnattuna maston ympärille 120° välein, jolloin Kuvassa 3B esitetty horisontaali säteilykuvio jakaantuu tasaisesti maston ympärille. Eri operaattoreiden tukiasemat ovat yleisesti korkeussuunnassa eriävillä tasoilla, jonka lisäksi nämä käyttävät toisistaan eriäviä taajuuksia.



Kuva 4: Telemastoon kiinnitettyjä antennoja [8]

2.3.2 Verkon suunnittelu

Verkon suunnittelussa täytyy huomioida samanaikaisesti monia eri tekijöitä, jotta käyttäjälle voidaan taata mahdollisimman luotettavasti toimiva kenttäyhteys. Tukiasemien fyysisen sijoittelun lisäksi verkonsuunnittelijan täytyy muun muassa pystyä määrittämään mahdollisimman tarkkoja arvioita yksittäisen solun alueella olevista maksimikäyttäjämääristä. Tukiasema pystyy

palvelemaan vain rajoitetun määrän matkapuhelimia samanaikaisesti, mikä on huomattavissa esimerkiksi suurten urheilutapahtumien aikana.

Ideaalitilanteessa tukiaseman ja matkapuhelimen välillä on näköyhteys, etäisyys ei ole liian suuri eikä välissä ole häiriötekijöitä. Kaukokentän alueella voidaan tällöin vakioetäisyydellä r määrittää signaalin normalisoitu voimakkuus suoraan antennin säteilykuvioista. Vertailutasona 0 dB on heikoin signaalinvoimakkuus antennia etäisyydellä r ympyröivällä pallonpinnalla. Signaalin absoluuttiseen arvoon vaikuttavat myös käytetyn antennin muut ominaisuudet, varsinkin lähetysteho, vahvistus ja käytössä olevat taajuudet. Todellisessa maailmassa tukiasemaa ympäröivään kenttään vaikuttavat vahvasti myös erinäiset häiriötekijät, kuten esimerkiksi rakennuksista ja maanpinnan muodoista johtuvat heijastukset ja vaimennus. Verkon suunnittelu urbaanisissa ympäristöissä on näistä syistä huomattavasti erilaista kuin maakunnissa ja harvaan asutuilla alueilla. [9]

Vaikka verkonsuunnittelussa onkin tärkeää ottaa huomioon kenttään vaikuttavat häiriötekijät, täytyy suunnittelun kuitenkin aina perustua käytettyyn antenniin ja tämän säteilykuvioon. Ilman luotettavaa mallia antennin muodostamasta kentänvoimakkuudesta optimaalinen ja tehokas verkonsuunnittelu on lähes mahdotonta.

2.3.3 3G-verkko

Suomessa on tällä hetkellä laajalti käytössä niin kutsuttu 3G-verkko (engl. 3rd Generation), mikä edustaa kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoja. UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) on Suomessa vuodesta 2004 lähtien käytössä ollut Eurooppalainen 3G-järjestelmä. Suurin ero UMTS:n ja toisen sukupolven GSM järjestelmän välillä on UMTS järjestelmän huomattavasti suuremmat tiedonsiirtonopeudet. Tällä tavoin mobiiliverkko-operaattorit ovat pystyneet tyydyttämään asiakkaiden kasvavaa kysyntää matkapuhelimella toimivaan nopeaan internetyhteyteen. UMTS verkot Suomessa toimivat 900 ja 2100 MHz taajuuksilla. Haja-asutuilla alueilla on yhä käytössä GSM verkkoja, kun taas tiheästi asutuissa kaupungeissa on jo neljännen sukupolven LTE tukiasemien käyttöönotto aloitettu. Mikäli matkapuhelin sijaitsee useamman tukiaseman kuuluvuusalueella, valitsee puhelin automaattisesti näistä vahvimman signaalin. [1]

3 Mittauslaitteisto ja lennonsuunnittelu

3.1 Heksakopteri

Mittauksen vaatimat lennot suoritettiin Kuvassa 5 näkyvällä Tarot T960 heksakopterilla. Hiilikuiturunkoinen kuudella moottorilla varustettu kopteri pystyy kantamaan oman painonsa lisäksi noin 1.5 kg hyötykuormaa. Virtalähteinä toimivat kaksi rinnakkainkytkettyä 6S akkua ja lentotilasta riippuen lentoaika on 15-25 min. Tarot on varustettu GPS-anturilla sekä Pixhawk-autopilotilla, jolla normaalitoiminnassa on neljä erilaista lentomoodia:

1. **Stabilize** - Autopilotti pyrkii pitämään kopterin vaakatasossa.
2. **AltHold** - Autopilotti pyrkii pitämään kopterin vakiokorkeudella.
3. **PosHold** - Autopilotti pyrkii pitämään kopterin tietyssä GPS-pisteessä.
4. **Auto** - Autopilotti lentää ennalta määrättyä lentoreittiä.

Auto-moodia lukuunottamatta lentäjä pystyy aina manuaalasti ohjaamaan kopteria 430 MHz taajuudella toimivan radiolähtetimen avulla. Vaihtamalla Auto-moodista esimerkiksi Stabilize-moodiin, pystyy lentäjä kaikissa tilanteissa ottamaan kopterin ohjauksen haltuunsa.



Kuva 5: Heksakopteri Tarot T960 [10]

Autopilotti käyttää suhteellisia korkeuksia, joissa nollassa määrittyy lento-
toonlähtöpaikan mukaan. Korkeus ilmoitetaan tästä syystä usein korkeutena
maanpinnan yläpuolella absoluuttisten korkeuksien sijaan. Ilmailussa tälle
korkeudelle käytetään lyhennettä AGL (engl. Above Ground Level).

3.2 Nemo Handy

Mittauksessa käytettiin Samsung Galaxy S4 puhelinta, johon oli asennettu
Aniten Nemo Handy ohjelmisto. Puhelin oli kiinnitetty kopterin laskuteli-
neeseen siten, että sen takapuoli osoitti antennia kohden koko lennon ajan.
Mittauslaitteisto on esitetty kiinnitettynä Kuvassa 6.



Kuva 6: Puhelin kiinnitettynä kopterin laskutelineeseen [10]

Nemo Handy on operaattorien käyttämä mittaus- ja optimointityökalu radio-
verkoille sekä mobiililaitteiden käyttäjien kokeman laadun tarkkailuun [11].
Perinteisesti ohjelmistoa käyttävät työntekijät ovat liikkuneet jalan, mita-
ten signaalin voimakkuutta maan tasalta [9]. Heksakopterin avulla suoritete-
tu mittaus mahdollisti ensimmäistä kertaa kolmiulotteisen mittauksen.

3.2.1 Mitattu suure

Nemo Handyn avulla mitattu suure oli ns. pilot-signaali RSCP (engl. Recei-
ved Signal Code Power). Pilot-signaali määrittää vastaanotetun tehon voi-
makkuuden tietyllä taajuuskaistalla. Tällä tavalla mittauksessa voitiin mää-
rittää yksittäisen antennin tuottaman kentän voimakkuutta.

Kentänvoimakkuus kuvataan yleisesti kappaleessa 2.2.1 kuvatulla yksiköllä
dBm, jonka arvo on negatiivinen. Toimivassa matkapuhelinverkossa kenttä-
voimakkuuden vaihteluväli on tyypillisesti -60... -100 dBm [1].

3.3 GPS-mittaus

GPS (Global Positioning System) toimii pääsääntöisesti kahdella päätaajuudella L1 ja L2. Käyttämällä molempia taajuuksia tukevaa laitetta voidaan tarkkuutta parantaa huomattavasti. Käyttötarkoituksen mukaan on myös mahdollista suorittaa GPS-datalle *reaaliaikakorjausta* tai *postprosessointikorjausta*. SBAS (Satellite-based Augmentation System) on esimerkki matkustajalentokoneille reaaliaikakorjausdataa tuottavasta yrityksestä. Tämä korjausdata perustuu mittausasemaverkoston keräämään tietoon GPS-signaaliin vaikuttavista tekijöistä tietyssä maantieteellisessä paikassa, tietyllä ajanhetkellä. Suurimmat virhelähteet ovat ionosfäärin ja troposfäärin vaikutukset satelliittien lähettämien signaalien etenemisnopeuksiin. [12],[13]

Postprosessointikorjaukseen on vapaasti internetistä saatavilla olevaa dataa, jonka avulla kerätty GPS-data voidaan korjata kyseisenä ajanhetkenä esiintyneiden virhelähteiden kumoamiseksi. Tällä tavalla voidaan jälkikäteen selvittää erittäin tarkat sijainnit eri ajanhetkillä. Mitä lähempänä lähin kiinteä dataa keräävä mittausasema on, sen tarkempi postprosessointikorjaus on. [14]

Heksakopterin GPS-anturi vastaanotti ainoastaan L1-taajuutta, joten sen paikannuksen tarkkuus oli < 10 m. Tavalliseen lentotoimintaan tämä tarkkuus on riittävä, mutta datan jälkikäsitteilyä varten tämä tarkkuus oli liian huono. Puhelintukiaseman juurelle asetettiin kiinteä GPS-vastaanotin, joka tallensi GPS-dataa koko mittauksen ajan. Jälkiprosessoinnissa käytettiin hyväksi sekä tätä että EUREF:n sivuilta saatua korjausdataa [14]. Näiden avulla suhteelliseksi tarkkuudeksi lopullisessa GPS-datassa saatiin < 5 cm. [12]

3.4 Lennonsuunnittelu

Työssä esitetyn projektin tavoitteena oli mitata kohteena olleen antennin kolme dimensiota säteilykuvio 110 metrin säteellä. Projektin kolme tärkeintä vaihetta olivat:

- 1) Lennonsuunnittelu ja testilennot
- 2) Mittausdatan keräys maastossa
- 3) Datan jälkikäsitteily

Perehdymme seuraaviksi ensimmäisen työvaiheen tärkeimpiin teorianalleihin ja ominaisuuksiin. Toinen ja kolmas työvaihe ovat esitetty tarkemmin kappaleessa 4 Tulokset.

3.4.1 Lentoreitin suunnittelu

Lennonsuunnittelun kannalta mittauksen ensisijaiset vaatimukset olivat mittausdatan kerääminen mahdollisimman laajalta alueelta sekä mahdollisimman yksinkertainen datan jälkiprosessointi. Lennot täytyi myös suorittaa lentoturvallisuuden rajoissa: puihin täytyi jättää reilu turvaväli eikä maksimilentokorkeutta 150 m AGL saatu ylittää. Toissijainen vaatimus oli rakentaa dynaaminen lennonsuunnitteluohjelma, jota tulevaisuudessa olisi helppo käyttää uusilla mittauspaikoilla.

Asiakkaalta saadut toiveet lentoreitin laajuudesta oli korkeussuunnassa $\theta \in [55^\circ, 135^\circ]$, eli 35° horisontin yläpuolelle ja 45° alapuolelle. Horisontaalasti vastaavat rajat olivat $\varphi \in [\varphi_0 - 60^\circ, \varphi_0 + 60^\circ]$, missä φ_0 on antennin vahvimman pääkeilan, myös antennisuunnaksi kutsuttu, suunta.

Näiden vaatimusten perusteella tehtiin päätös pallopintaisesta lentoreitistä, jossa kopteri lensi koko lennon ajan vakioetäisyydellä antennista. Lentoreitti kulki tällöin vakiokorkeudella yhden 120° leveän tason nousten sen jälkeen korkeussuunnassa yhden asteen ylöspäin. Suunniteltu lentoreitti on esitetty Kuvassa 7.

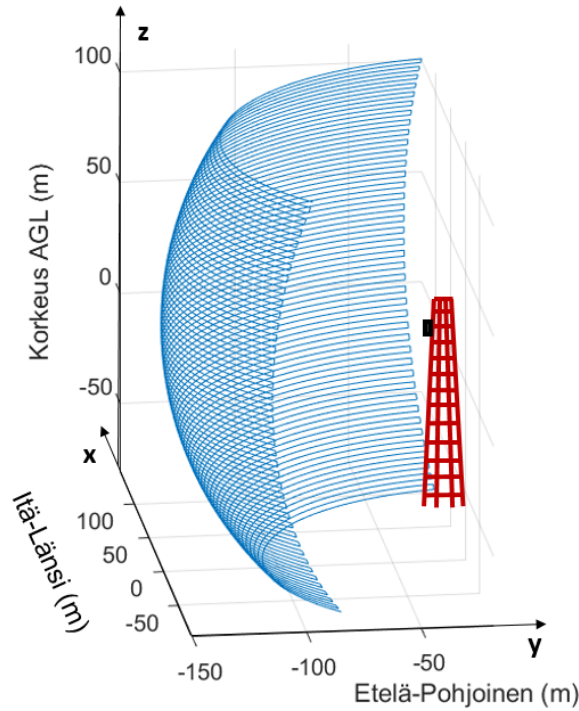
3.4.2 Lennonsuunnittelu Pythonilla

Lopullinen lennonsuunnittelu toteutettiin Python 2.7:lla. Lentoreitin perustana toimi käyttäjän graafisen käyttöliittymän kautta antamat lentopaikan parametrit. Mittauksessa käytetyt parametrit on esitetty myöhemmin Kuvassa 8. Antennisuunta on tässä tapauksessa $\varphi_0 = 280^\circ$ ja kallistuskulma $\theta_0 = -6^\circ$ horisontin alapuolelle. Lähtien pallokoordinaatistossa olevasta pallosta, ohjelma laskee rajoitusten mukaisesti jokaiselle tasolle kolme reittipistettä sekä näitä pisteitä vastaavat arvot kulmille φ ja θ . Näiden pisteiden avulla autopilotti pystyy seuraamaan kaarrenmuotoista rataa 110 metrin etäisyydellä antennista.

Tämän jälkeen ohjelma tekee muunnoksen karteesisen koordinaatistoon seuraavien kaavojen avulla [15]:

$$\begin{aligned}x &= r \sin \theta \cos \varphi \\y &= r \sin \theta \sin \varphi \\z &= r \cos \theta,\end{aligned}$$

missä x on siirtyminen Itä(+)-Länsi(-)-suunnassa, y siirtyminen Etelä(-)-Pohjois(+)-suunnassa ja z AGL korkeutta.



Kuva 7: Suunniteltu lentoreitti. Havainnollisuuden vuoksi piirretty mukaan masto (punaine) ja tukiasema-antenni (musta)

Laskuista saadut arvot kuvaavat näin ollen suunnitellun lentoreitin x , y ja z etäisyyksiä origossa olevaan antenniin. Vähentämällä vielä antennin korkeutta vastaava arvon kaikista z arvoista, siirrämme origon maantasolle antennin juureen. Tämän jälkeen voimme tehdä muunnoksen WGS84 -järjestelmän koordinaatteihin käyttämällä hyödyksi antennin juuren koordinaatteja $Long_0$ ja Lat_0 :

$$\begin{aligned} \text{Long} &= \text{Long}_0 + \frac{x}{R \cos(\text{Long}_0)} \\ \text{Lat} &= \text{Lat}_0 + \frac{x}{R} \\ h &= z - h_{antenni} \end{aligned}$$

missä Lat , $Long$ ja h ovat lentoreitin tarkat koordinaatit ja $h_{antenni}$ on antennin korkeus maanpinnasta. Kaavassa esitetty maapallon säde R määritetään seuraavalla kaavalla:

$$R = \sqrt{\frac{(a^2 \cos(\text{Lat}))^2 + (b^2 \sin(\text{Lat}))^2}{(a \cos(\text{Lat}))^2 + (b \sin(\text{Lat}))^2}},$$

missä $a = 6378137.0$ m ja $b = 6356752.3$ m ovat WGS84 järjestelmän referenssiellipsoidin semiakselit [16]. Pitkillä etäisyyksillä ylläolevat kaavat eivät maanpinnan kaarevuudesta johtuen anna tarkkoja ratkaisuja. Alle kilometrin etäisyyksillä virhe on kuitenkin lähes mitätön.

Saadut tulokset tallennettiin tekstitiedostoon Taulukossa 3 esitettyssä muodossa. Autopilotti suorittaa tekstitiedoston aina rivi kerrallaan. Ensimmäinen rivi Taulukossa 3 asettaa kopterin lentämään keula kohti antennia koko lennon ajan. Kaikki rivit tämän jälkeen vastaavat yhtä reittipistettä, kuvaten sen GPS-koordinaatteja WGS84 järjestelmässä, korkeutta sekä mahdollisen pysähtymisen keston pituutta. Puolen sekunnin pysäytys suoritettiin aina jokaisen tason lopussa, jotta kopteri hidastaisi vauhtiaan tarpeeksi ennen suunnanmuutosta. Lennonsuunnittelussa käytetty Python koodi on esitetty liitteessä A.

Taulukko 3: Ohjelman tuottamat ohjauskäskyt autopilotille (.txt tiedosto)

1	0	3	201	0	0	0	0	60.295780	24.283037	72.000000	1
2	0	3	16	0	0	0	0	60.295116	24.281913	18.670942	1
3	0	3	82	0	0	0	0	60.295930	24.281315	18.670942	1
4	0	3	82	0.5	0	0	0	60.296594	24.282439	18.670942	1
5	0	3	16	0	0	0	0	60.296602	24.282433	20.358128	1
6	0	3	82	0	0	0	0	60.295932	24.281299	20.358128	1

3.5 Testilennot

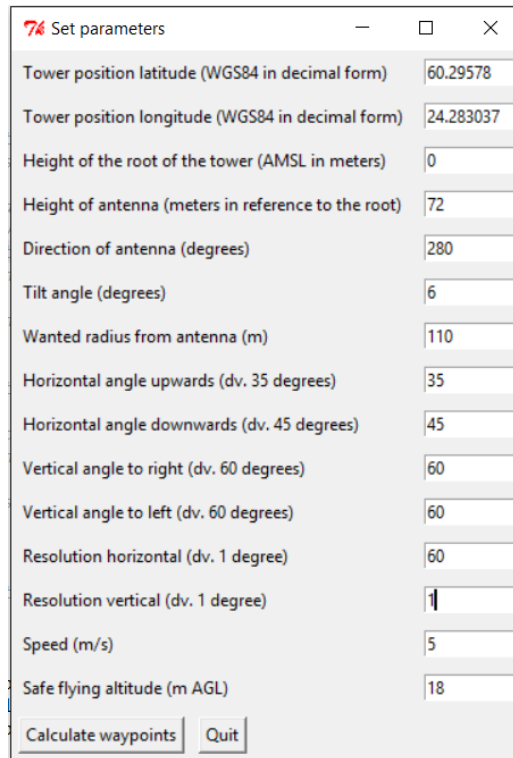
Ennen varsinaisia testilentoja Tarot T960:lla suoritettiin laajoja testejä pienemmällä heksakopterilla. Nämä testilennot aloitettiin heti ensimmäisen lennonsuunnitteluversion valmistuttua. Kaikki testilennot suoritettiin suljetulla alueella.

Ensimmäisessä versiossa jokaisella tasolla oli 60 GPS-reittipistettä, joiden välillä kopterin piti lentää suoraviivaisesti. Testeissä tuli nopeasti esille, ettei tämä tuottanut tarpeeksi tarkkoja lentoreittejä. Sen sijaan päädyttiin jokaista tasoa kohden kolmeen 'Spline' reittipisteeseen, joiden välille autopilotti lensi ympyräkaarella. Tällä tavoin kopteri pystyi lentämään sileää ja lähes täydellistä ympyränkaaren muotoista lentorataa. Tasojen välissä kopteri sen sijaan nousi suoraviivaisesti reittipisteeltä seuraavalle.

4 Tulokset

Lennot suoritettiin 26.9.2015 Etelä-Suomessa sijaitsevan puhelinmaston ympäristössä. Asiakkaan pyynnöstä maston GPS-koordinaatit ja antennin suunta ovat tässä työssä muutettu. Muilta osin kaikki arvot ja mittaustulokset vastaavat todellisia arvoja.

Kuvassa 8 on esitetty lennolle asetetut parametrit, joista tärkeimmät ovat antennin todellinen ilmansuunta 280° sekä kallistuskulma 6° horisontin alapuolelle. Oikeanlaisen lentoreitin kannalta myös maston tarkka GPS-sijainti sekä antennin korkeus mastossa olivat tärkeitä. Minimilentokorkeus 18 m AGL määritettiin testilentojen aikana puiden latvojen korkeuksien mukaan. Lentoalue ylhäältäpäin on esitetty Kuvassa 9.

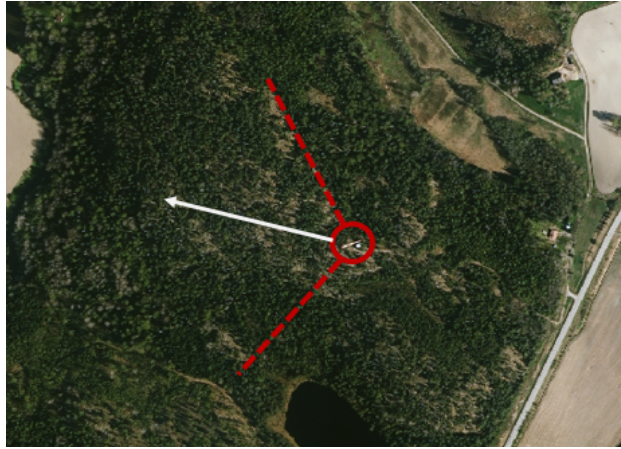


Parameter	Value
Tower position latitude (WGS84 in decimal form)	60.29578
Tower position longitude (WGS84 in decimal form)	24.283037
Height of the root of the tower (AMSL in meters)	0
Height of antenna (meters in reference to the root)	72
Direction of antenna (degrees)	280
Tilt angle (degrees)	6
Wanted radius from antenna (m)	110
Horizontal angle upwards (dv. 35 degrees)	35
Horizontal angle downwards (dv. 45 degrees)	45
Vertical angle to right (dv. 60 degrees)	60
Vertical angle to left (dv. 60 degrees)	60
Resolution horizontal (dv. 1 degree)	60
Resolution vertical (dv. 1 degree)	1
Speed (m/s)	5
Safe flying altitude (m AGL)	18

Buttons: Calculate waypoints, Quit

Kuva 8: Lennonsuunnittelussa käytetyt parametrit

Mittaus suoritettiin neljänä eri lentona, jotka olivat 8 - 19 minuutin pituisia. Kokonaislentoaika oli 50 minuuttia ja kokonaismatka 14.7 km. Reittipisteitä oli yhteensä 213 ja korkein lentokorkeus oli 147 m AGL. Mittauslaitteisto oli käynnissä koko operaation ajan, joten lentojen väliset mittaukset poistettiin myöhemmin käsin.



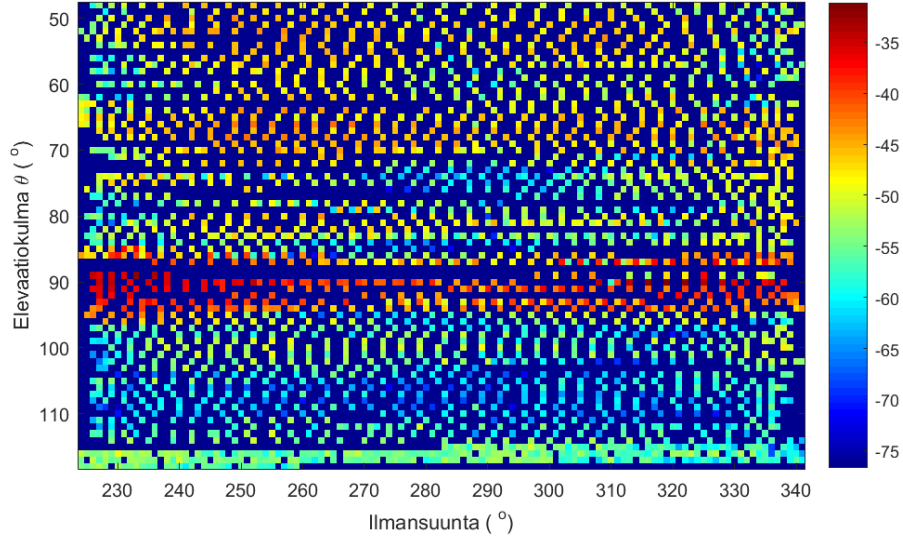
Kuva 9: Lentoalue ylhäältäpäin katsottuna, valkoisella antennisuunta ja punaisella lentoalueen rajat

4.1 Raakadatan prosessointi

Lentojen jälkeen suoritettiin GPS-datan jälkiprosessointi. Tämän jälkeen kerätyt RSCP arvot (kts. kappale 3.2.1) yhdistettiin näihin tuloksiin GPS-ajan mukaan. Yhdistys tehtiin sekunnin tarkkuudella. Mikäli yhden sekunnin ajalle osui useampi mittaus, lukemat keskiarvoistettiin. Helpottaakseen myöhempää kentänvoimakkuuden interpolointiprosessia, tehtiin vielä GPS-pisteiden muunnos takaisin pallokoordinaatistoon. Tuloksena saatiin yhdistettyä jokainen RSCP mittaus pallokoordinaatiston r , θ ja φ arvoihin (antenni origossa).

Absoluuttisia RSCP arvoja käsiteltiin Matlabissa asteen tarkkuudella sekä elevaatiokulman θ että atsimuuttikulman φ suhteen. Mikäli useampi mittaus osui samalle astevälille molempien kulmien suhteen, keskiarvoistettiin mitausarvot. Tämän lisäksi pienet erot heksakopterin etäisyydessä antenniin ($< 7\text{m}$) korjattiin FSPL:llä kaavan 1 mukaan. Tuloksena saatiin Kuvassa 10 esitetty lämpökartta, jossa signaalin voimakkuus tietyllä asteluvulla on esitetty kuvassa näkyvän väriskaalan avulla. Kaikkein tummimmat pisteet vastaavat astelukuja, joilta ei ole RSCP mittausta. Pystyakselilla on esitetty elevaatiokulma θ , jossa 90° vastaa horisonttia. Vaaka-akselina ollaan tässä kuvassa käytetty atsimuuttikulman φ sijaan tosi ilmansuuntaa. Tällöin suunta 000° vastaa kartalla pohjoista ja suunta 180° etelää.

Asiakkaan antamien tietojen mukaan antennin oletettu suunta oli suunta 280° , joten lennonsuunnittelu tehtiin suuntien $220 - 340^\circ$ väliin. Kallistuskulman ollessa 6° horisontin alle, tehtiin lennonsuunnittelu vastaavasti ele-



Kuva 10: Mittauksesta saatu raakadata

vaatiokulmille $\theta \in [61^\circ, 141^\circ]$. Minimilentokorkeuden ollessa 18 m AGL jouduimme kuitenkin pienentämään elevaatiokulmiksi $\theta \in [61^\circ, 131^\circ]$. Todelliset mittauskulmat sekä kenttävoimakkuutta kuvaavan RSCP:n minimi- ja maksimiarvot ovat esitetty Taulukossa 4. Kuten taulukosta näkee, toteutui- vat ilmansuunnat alle 5° tarkkuudella. Toteutuneet elevaatiokulmat θ sekä antennista mitattu säde r eroavat sen sijaan huomattavasti suunnitelluista arvoista. Syynä tähän on ollut se, että heksakopterin lennon aikana saama tieto GPS-korkeudesta on ollut epätarkka ja arvoltaan liian korkea koko lennon ajan. Tuloksena kopteri lensi 13° liian korkealla, ja vastaavasti 13° jäi alhaalta lentämättä. Samasta syystä kopterin etäisyys antennista on myös hieman vaihdellut. Tarkat paikka- ja korkeusarvot saatiin jälkikäteen GPS-datan jälkiprosessoinnin avulla, ja kaikki tulosten käsittely on tehty näiden tarkkojen arvojen perusteella.

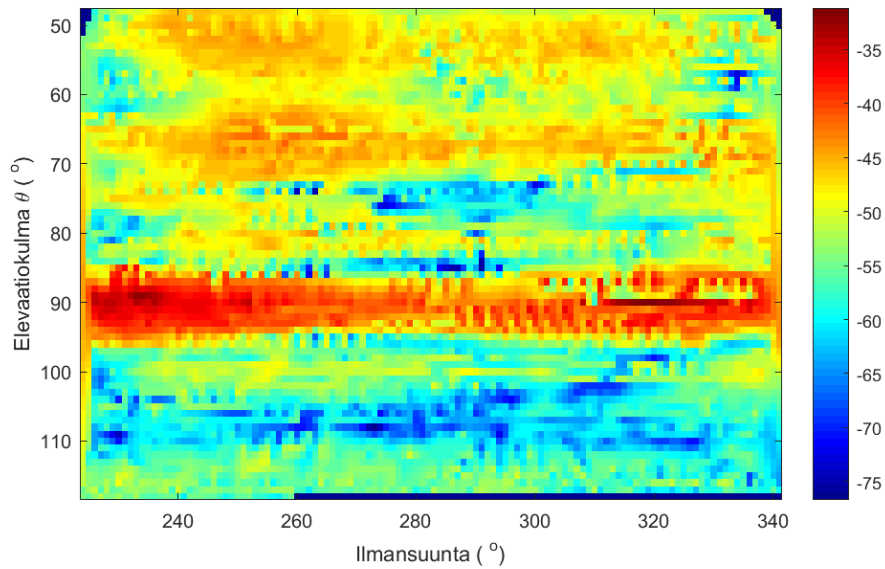
Taulukko 4: Mittauksen tärkeimmät maksimi- ja minimiarvot

Antennin suunta	280°	Kallistuskulma	6° (alaspäin)
Ilmansuunnat, suunniteltu	220° - 340°	θ , suunniteltu	61° - 141°
Ilmansuunnat, toteutunut	224° - 341°	θ , toteutunut	48° - 118°
Säde r , suunniteltu	110 m	RSCP, max	-31.2 dBm
Säde r , toteutunut	106.2-116.6 m	RSCP, min	-76.7 dBm

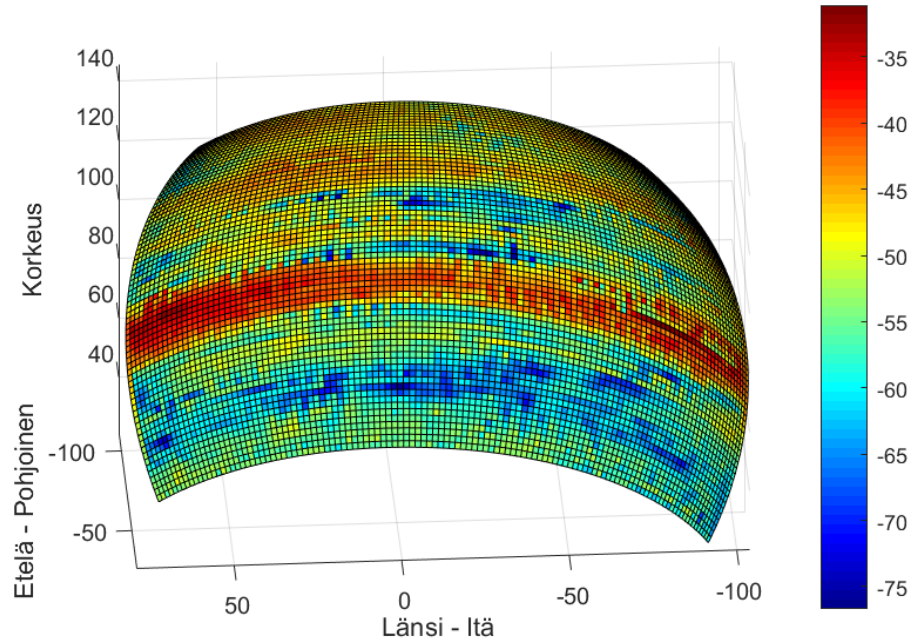
4.2 Datan interpolointi

Raakadatan ollessa hajautettu (mittausarvot saatiin vaihtelevilla φ ja θ arvoilla) tehtiin datan interpolointi Matlabin `griddata` -funktion avulla. Interpolointi tehtiin käyttäen griddatan `'cubic'` ja `'v4'` metodeja. Molempien metodien interpolaatiot ovat jatkuvia, jonka lisäksi myös näiden toiset derivaatat ovat jatkuvia. [17]

Cubic-metodin avulla raakadatasta (Kuva 10) interpoloitu Taulukko on esitetty Kuvassa 11. Vastaava data on myös piirretty kolmiulotteisena Kuvassa 12.



Kuva 11: Interpoloitu data piirretty kaksiulotteisena



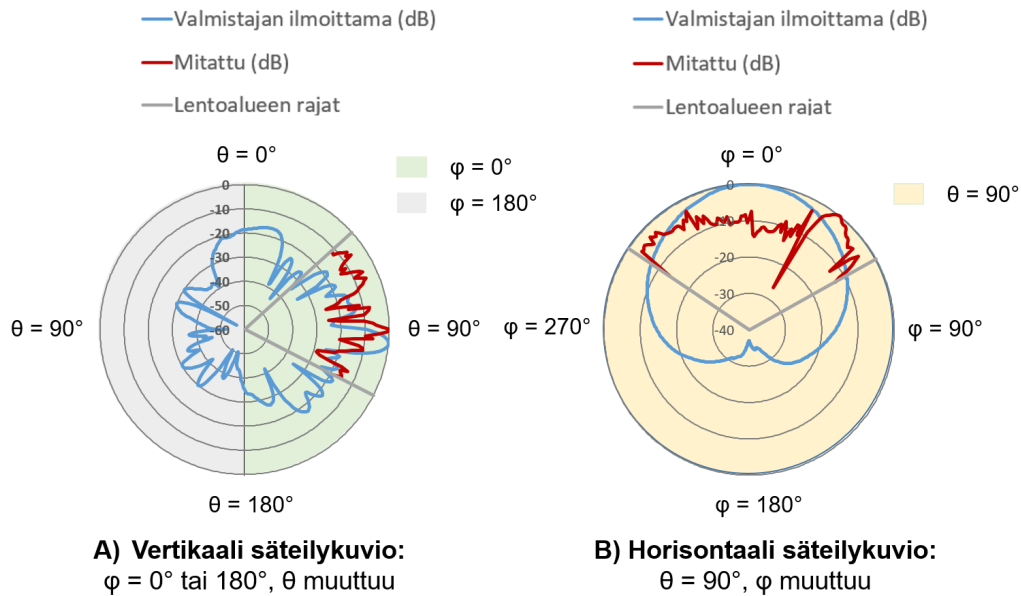
Kuva 12: Interpoloitu data piirretty kolmiulotteisena

4.3 Säteilykuvioiden vertailu

Antennin oletetut päätasot olivat kyseisessä mittauksessa antennisuunta 280 sekä elevaatiokulma 90° . Ottamalla saadusta interpolointitaulukosta leikkaukset näiltä tasoilta ja vertaamalla niitä Kuvassa 3 esitettyhin valmistajan ilmoittamiin säteilykuvioihin, saadaan Kuvassa 13 esitetyt kuvaajat. Molemmat säteilykuviot ovat normalisoitu siten, että vahvin signaali löytyy ulkokehältä arvolla 0 dB.

Päätasojen leikkaukset eivät kuitenkaan kuvaa antennin kolmiulotteista säteilykuvioa täydellisesti, sillä tasot ovat riippuvaisia oletettujen päätasojen leikkauspisteestä ($\varphi = 0^\circ$ ja $\theta = 90^\circ$). Koska osa tehtäväämme oli määrittää mihin suuntaan antenni oikeasti on suunnattu, suoritimme vielä seuraavan Pienimmän Neliösumman Menetelmällä (PNS) suoritettua tarkastelua:

1. Siirsimme leikkauspisteen uuteen pisteeseen
2. Laskimme pistettä vastaavat päätasot ja normalisoimme nämä siten, että vahvin signaali = 0 dB



Kuva 13: Vertaus valmistajan ilmoittaman ja mitatun säteilykuvion välillä

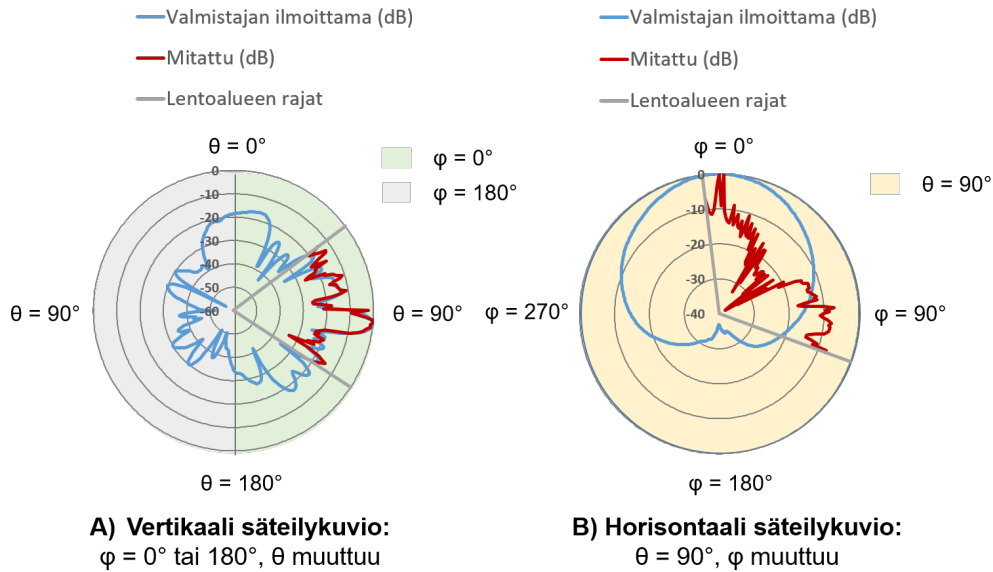
3. Vertasimme saatuja tuloksia valmistajan antamiin tietoihin. Virheen neliö tallennettiin summamuuttujaan.

Yllä mainitut kolme vaihetta toistettiin kaikille matriisin pisteille. Parhain sovite saatiin taulukossa 5 esitetystä pisteestä, joka on uusi ehdotus antennin todelliseksi suunaksi. Käytännössä antenni on näiden laskujen mukaan suunnattu 6° liian korkealla ja 48° liikaa myötapäivään. Näillä arvoilla saamme Kuvassa 14 esitetyt kuvaajat säteilykuvioille.

Tässä vaiheessa on kuitenkin tärkeä huomioida, että valmistajan suuntakuviot ovat todennäköisesti määritetty kaiuttomassa huoneessa. Tällaisen "täydellisen ympäristön" vertailu todelliseen (heijastukselliseen) ympäristöön täytyy siitä syystä suhtautua kriittisesti.

Taulukko 5: Ehdotus todelliselle antenninsuunalle

	Vanha	Uusi
θ	90°	84°
Ilmansuunta	280°	232°



Kuva 14: Ehdotus antennin todelliselle suunnalle

4.4 Virhetekijät

4.4.1 GPS-paikannuksesta johtuvat virheet

Tarkasteltaessa Kuvaa 10 on selvästi huomattavissa, ettei kopteri ole lentänyt täydellisesti vakiokorkeudella olevia tasoja. Erityisen selvästi tämän huomaa horisontin tasalla $\theta = 90^\circ$, mistä lähes täysin puuttuu mittauksia kahdelta tasolta. Tämä johtuu juuri tällä korkeudella suoritetusta akkujen vaihdosta. Vaihdon aikana satelliitit ovat siirtyneet uusiin asentoihin, mikä on vaikuttanut huomattavasti autopilotin GPS-lukemiin lennon jatkuessa. Tämän olisi voinut korjata käyttämällä kappaleessa 3.3 kuvattua reaaliaikakorjausta GPS-sijainnin määrittämiseen. Tällä tavoin oltaisiin myös vältetty pysyvistä 13° virheistä korkeussuunnassa koko lennon aikana.

4.4.2 Etäisyyden vaihtelun vaikutus

Etäisyys kopterista antenniin vaihteli mittauksen aikana 106.2 - 116.6 m välillä tavoitearvon ollessa 110 metriä. Tarkistelemme seuraavaksi tämän vaihtelun vaikutusta mittaustuloksiin. Käyttämällä kaavaa 1 vapaan tilan vaimenukselle, pystymme määrittämään kuinka suurista suhteellisista virheistä on

kyse. Erotukset laskemalla saamme:

$$\begin{aligned} \text{FSPL}(116.6 \text{ m}) - \text{FSPL}(110 \text{ m}) &= 72.866 \text{ dB} - 72.3605 \text{ dB} \\ &= 0.506 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FSPL}(106.2 \text{ m}) - \text{FSPL}(110 \text{ m}) &= 72.0551 \text{ dB} - 72.3605 \text{ dB} \\ &= -0.305 \text{ dB} \end{aligned}$$

RSCP:n ollessa myös määritetty logaritmisella asteikolla, on etäisyydestä johtuva virhe näin ollen alle ± 0.6 dBm.

4.5 Muut virhetekijät

Yksi tärkeä mahdollinen virhetekijä on käytetyn matkapuhelimen vastaanottoantennin ominaisuuksien vaikutus mittaustuloksiin. Matkapuhelimessa olevan vastaanottoantennin säteilykuviot eivät tavallisesti ole vahvasti suunnattu (puhelintukiasema voi olla missä suunnassa tahansa puhelimen ollessa korvalla), mutta se ei kuitenkaan ole kaikissa suunnissa vakio. Puhelimen takakansi oli koko mittauksen ajan suunnattu tukiasema-antennia kohti, mutta eri korkeuksilla signaali tuli kuitenkin hieman eri suunnista. Tämän olisi voinut korjata esimerkiksi kallistuskulmaa ohjaavalla servomootorilla.

Toiseksi tukiasemien antennit säädetään käsin, joten mahdollisuus väärinasennukselle on aina olemassa. Väärinasennusten välttämiseksi on kuitenkin esimerkiksi mittauksen kohteena olleissa antenneissa sähköisesti säädettävä kallistuskulma [7].

Kolmas mahdollinen virhelähde on virhe oletetussa antennin korkeudessa. Operaattorin antama arvo tälle oli tässä mittauksessa 79 m, josta vähennettiin maston juuren ja lentoonlähtöpaikan välinen 7 metrin korkeusero. Mikäli ehdotettu 6° virheasennus johtuisi ainoastaan korkeuden virheellisestä arvosta olisi tämä virhe:

$$\Delta h = r \sin(6^\circ) = 110 \sin(6^\circ) \text{ m} = 11.5 \text{ m}$$

5 Johtopäätökset

Mittauksissa määritimme valitun antennin säteilykuvion noin 110 metrin etäisyydellä antennin fyysisestä lokaatiosta. Suoritimme saaduille mittaustuloksille interpoloinnin ja vertasimme tuloksia valmistajan ilmoittamiin säteilykuvioihin. Lopuksi määritimme vielä uuden ehdotuksen todelliselle antennisuunnalle ja kallistuskulmalle.

Kuvassa 13 nähdään selvä ero mitatun ja oletetun säteilykuvion välillä. Syy tähän on mahdollisesti antennin väärä suuntaus: esitetystä ehdotuksesta antenni on suunnattu 6° liian korkealle ja 48° liikaa myötäpäivään. Vertikaali säteilykuvio täsmää tämän ehdotuksen mukaan lähes täysin valmistajan ilmoittaman kuvion kanssa (Kuva 14). Tarkastellessamme lisäksi raaka- ja interpolointituloksia voimme todeta noin 6° väärin asennetun kallistuskulman olevan melko todennäköinen, sillä vahvin signaali on selvästi horisontissa. Horisontaalisessa säteilykuviossa on sen sijaan erittäin suuria eroja. Lähes 50° virhe antennisuunnassa on lisäksi niin suuri, ettei sitä voi olettaa asennusvirheeksi.

Maasto antennin ja mittausta tekevän heksakopterin välissä oli suurimmalta osin avokalliota, lukuunottamatta mittausalueen vasemmanpuoleista ulko-reunaa. Mielenkiintoisesti juuri ilmansuuntien $226\text{-}232^\circ$ välistä löytyvien sarakkeiden säteilykuviot täsmäsivät valmistajan vertikaaliseen säteilykuvioon lähes täydellisesti. Tämä johtaa suoraan tärkeään kysymykseen, että ovatko avokallion kautta heijastuneet radioaallot voineet paikallisesti heikentää ja vastaavasti vahvistaa tietyllä alueella olevia signaaleja. Tämä selittäisi suoraan, miksi kentänvoimakkuus oletetussa antennisuunnassa 280° voi olla heikompi kuin muilla alueilla, vaikka sen pitäisi juuri siinä suunnassa olla kaikkein suurin.

Tämän työn perusteella ei syytä horisontaalin säteilykuvion eroavaisuudesta referenssikuvioon voida varmuudella esittää. Tärkeä lisätutkimuksen kohde olisi mittauksen toistaminen usealla eri etäisyydellä antennista. Tällä tavoin voitaisiin selvittää, johtuvatko havaitut erot heijastuksista vai antennin todellisen säteilykuvion poikkeamasta oletetusta.

Näiden tulevien tutkimustulosten avulla olisikin mahdollista kehittää kaupallinen kolmiulotteinen mittaussysteemi, jonka avulla sekä väärinasennukset että antennin toimintakunto voitaisiin helposti tarkastaa. Järjestelmää voitaisiin mahdollisesti myös käyttää katvealueilla häirötekijöiden paikallistamiseen sekä yleisesti verkon jatkokehitykseen.

Tämän työn tärkein tavoite oli selvittää, onko antennin kolmiulotteinen sä-

teilykuvio mahdollista määrittää multikopterin avustuksella, sekä minkälais-
ta hyötyä tästä voisi mobiilioperaattoreille olla. Lisäksi tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa dynaaminen lennon suunnitteluohjelmisto. Voimme täten todeta, että kaikki nämä tavoitteet ovat toteutuneet. Aktiivisesti on myös yritetty selvittää mahdollisten virhetekijöiden vaikutuksia tuloksiin, mutta niiden osilta olisi vielä jatkokehitysmahdollisuuksia.

Viitteet

- [1] Selvitys Suomessa toimivien 3G-matkaviestinverkkojen kuuluvuudesta ja datanopeudesta. European Communications Engineering. 02/2012. Verkkoaineisto. http://www.eceltd.com/images/files/papers/Kuuluvuustutkimus_talvi_2012.pdf
- [2] Radiotekniikan perusteet, Antti Räisänen & Arto Lehto. 2011. ISBN 978-951-672-367-2
- [3] Finlex, 12 § Viranomaisverkko. Verkkolähde. Haettu 14.3.2016. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20091169>
- [4] Interference, Radar Basics. Verkkolähde. Haettu 14.3.2016. <http://www.radartutorial.eu/18.explanations/ex31.en.html>
- [5] Free-Space Path Loss, Radar Basics. Verkkolähde. Haettu 14.3.2016. <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Free-Space%20Path%20Loss.en.html>
- [6] Spherical coordinates, Wikipedia. Verkkolähde. Haettu 5.4.2016. https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_coordinate_system#/media/File:3D_Spherical.svg
- [7] Antennin Datenblatt 9364176 tuotekuvaus. Kathrein. Verkkolähde. Haettu 14.3.2016. <https://www.kathrein.de/fileadmin/media/produkte/imports/mca/9364176.pdf>
- [8] Markus Rönkkö, Google plus. Verkkolähde. Haettu 14.3.2016. <https://lh4.googleusercontent.com/-YGsEHWIeSe4/UDkv-hFIsNI/AAAAAAAAAQ/39ZPBqB0mSQ/w800-h800/telemasto.jpg>
- [9] Pilottiin osallistuneen mobiilioperaattorin työntekijöiden antamat tiedot ja haastattelut.
- [10] Kuvan omistaja Sharper Shape.
- [11] Nemo Handy Product Description, Anite. Verkkolähde. Haettu 20.2.2016. http://www.elsinco.com/images/doku/Anite-Nemo_Handy_2-70.pdf
- [12] Satelliittimittaus eli GPS-mittaus, Maanmittauslaitos. Verkkolähde. Haettu 20.2.2016. <http://www.maanimittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaatti-korkeusjarjestelmat/etrs89-euref-fin/satelliittimittaus-eli-gps-mittaus>

- [13] SBAS Fundamentals, Navipedia. Verkkolähde. Haettu 5.4.2016. http://http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Fundamentals
- [14] EUREF Permanent GNSS Network, EUREF. Verkkolähde. Haettu 5.4.2016. http://www.epncb.oma.be/_networkdata/data_access/
- [15] Spherical coordinates. Math Insight. Verkkolähde. Haettu 20.2.2016. http://mathinsight.org/spherical_coordinates
- [16] Ellipsoidi ja Geoidi, Maanmittauslaitos. Verkkolähde. Haettu 20.2.2016. <http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaatti-korkeusjarjestelmat/etrs89-euref-fin/3d-koordinaatitot/ellipsoidi-geoidi>
- [17] Griddata Documentation, MathWorks. Verkkolähde. Haettu 20.2.2016. <http://se.mathworks.com/help/matlab/ref/griddata.html>