

Julius Tamminen

**MATKAPUHELINVERKON  
TUKIASEMA-ANTENNIN  
SÄTEILYKUVION MITTAAMINEN  
DRONEN AVULLA**

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Julius Tamminen: Matkapuhelinverkon tukiasema-antennin säteilykuvion mittaaminen dronen avulla

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Tarkastaja: TkT Joonas Säe

Huhtikuu 2019

---

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää dronen hyväksikäyttämistä mobiiliverkon tukiasema-antennin säteilykuvion mittaamisessa. Dronen avulla pystyttäisiin tutkimaan jo asennetun tukiasema-antennin suuntausta ja toimintakykyä ympäristöön ilman, että tukiasemamastoon tarvitsisi fyysisesti kiivetä. Tällä tavalla pystyttäisiin parantamaan työn tehokkuutta ja turvallisuutta.

Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja käytännön mittauksista dronella. Kirjallisuusosuudessa käydään läpi antennin perusominaisuuksia, kuten säteilykuviota ja antenninvahvistusta, sekä tutustutaan erilaisiin antennityyppeihin. Kirjallisuuskatsauksen lopuksi tarkastellaan vielä LTE-mobiiliverkon toimintaa ja sen erityispiirteitä. Samassa yhteydessä käydään läpi LTE-mobiiliverkon tunnuslukuja, joita käytetään varsinaisten mittausten toteuttamisessa.

Käytännön mittausosuudessa mitataan LTE-mobiiliverkon tukiasema-antennin säteilemän referenssisignaalin tehoa. Tehon mittaukset tapahtuvat korkeus- ja leveysuunnassa. Mittaukset toteutetaan ohjelmoitavan lentoreitin avulla, jossa lennätettävä mittalaitteisto pysähtyy mittapisteelle ja siirtyy tietyn ajan hetken jälkeen seuraavalle. Leveysuunnan mittauksissa korkeus ja lentoreitin säde, suhteessa mitattavaan antenniin, pysyvät vakiona. Korkeussuunnassa säde ja leveysuunta pysyvät vakioina korkeuden muuttuessa. Lentoreiteistä kerätystä datasta muodostetaan antennille säteilykuviot, joita verrataan valmistajan ilmoittamiin ohjeellisiin arvoihin.

Lopputulokseksi saatiin säteilykuviot korkeus- ja leveysuunnassa. Säteilykuviot muodostettiin rajatuille sektoreille, mittausympäristön sallimissa rajoissa. Korkeussuunnan säteilykuvio oli oletetun mukainen, ja siitä löytyi yhtäläisyyksiä valmistajan ilmoittamiin tietoihin. Leveysuunnan säteilykuviossa oli poikkeamaa valmistajan ohjeellisiin arvoihin, sillä kuvioon aiheutui vääristymää johtuen antennin viereisistä heijastavista metallirakenteista. Kaiken kaikkiaan tutkimuksessa käytettyä toteutustapaa pystytään käyttämään tukiasema-antennien säteilykuvioden mittaamisessa. Huomioon tulee kuitenkin ottaa riittävä esteetön tila lentoreiteille ja mahdolliset heijastumat sekä häiriöt.

Avainsanat: tukiasema-antenni, säteilykuvio, drone, LTE, RSRP

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO .....	1
2.ANTENNIT JA NIIDEN OMINAISUUDET .....	2
2.1 Antenni.....	2
2.2 Säteilokuva.....	2
2.3 Antenninvahvistus ja desibeli .....	3
2.4 Antennityypit .....	6
3.LTE-MOBIILIVERKKO .....	8
3.1 Yleistä LTE-mobiiliverkosta .....	8
3.2 LTE-mobiiliverkon tunnusluvut .....	9
4.TOTEUTUS.....	10
4.1 Mittauksen valmistelu ja suunnittelu .....	10
4.2 Mittalaitteisto .....	12
4.3 Mittauksen suorittaminen .....	12
5.MITTAUSTULOKSET .....	14
6.YHTEENVETO.....	15
LÄHTEET .....	17

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

dB	desibeli
FDD	engl. Frequency Division Duplex, taajuusjakodupleksi
GSM	engl. Global System for Mobile Communications
GPRS	engl. General Packet Radio Service
LTE	engl. Long Term Evolution
OFDMA	engl. orthogonal frequency division multiple access
RSRP	engl. reference signal received power
RSRQ	engl. reference signal received quality
RSSI	engl. received signal strength indicator
SC-FDMA	engl. single carrier frequency division multiple access
TDD	engl. Time Division Duplex, aikajakodupleksi
UMTS	engl. Universal Mobile Telecommunications System

# 1. JOHDANTO

Langaton tiedonsiirto yleistyy edelleen ja sitä käytetään yhä enemmän langallisen tiedonsiirron rinnalla tiedon ja datan siirtämisessä. Sen yhä kasvava tiedonsiirron kapasiteetti ja luoma mobiliteetti tekevät langattomista tiedonsiirtotavoista mielenkiintoisen ja hyödyllisen kohteen kuluttajille sekä tutkijoille. Yhtenä tärkeimmistä kehitysaskelista langattomassa tiedonsiirrossa oli radioaaltojen lähettäminen ja vastaanottaminen radiotien yli antennien avulla. Tämä askel tapahtui lennättimen avulla jo 1800-luvun lopussa. Siitä lähtien radioaaltojen ja antennien peruserä on pysynyt suhteellisen samana.

Tutkijat ovat pystyneet kehittämään antenneista modernimpia versioita käyttämällä hyväksi tietoa radioaaltojen käyttäytymisestä. Suuntaamalla antennin lähettämää tai vastaanottamaa tehoa haluttuun suuntaan säästetään resursseja, kuten laitteen kuluttamaa energiaa. Tässä työssä tarkastellaan modernien tukiasema-antennien perusominaisuuksia, ja selvitetään, voidaanko dronea käyttää antennien säteilykuvioiden mittaamiseen. Mittaustulosten pohjalta pyritään vertailemaan, kuinka lähellä reaali maailman ominaisuudet ovat valmistajan ohjeellisia arvoja. Tämä vertaaminen mahdollistaa esimerkiksi virhetilanteissa antennin toimintakyvyn nopean selvittämisen, ilman että kenenkään tarvitsisi kiivetä korkeaan radiomastoon. Työssä pyritään myös selvittämään mistä mahdolliset eroavaisuudet voivat johtua ja kuinka merkittäviä ne ovat. Samankaltainen tutkimus on tehty aiemmin, jossa pyrittiin muodostamaan 3D-mallinnettua säteilykuviota antennille [1]. Tämän työn mittaustapa on verrattuna kuitenkin yksinkertaisempi, mikä mahdollistaa helpomman ja nopeamman toteutuksen.

Luvussa 2 käydään läpi antennien perusominaisuuksia ja niihin liittyvää teoriaa, sekä esitellään erilaisia antennityyppejä. Sitten luvussa 3 käsitellään langattomien mobiiliverkkojen teoriaa ja tunnuslukuja rajaten aihepiiri Long Term Evolution eli LTE-mobiiliverkoihin. Luvussa 4 kerrotaan käytännön mittauksen suunnittelusta, mittalaitteiston kokoonpanosta ja mittauksen suorittamisen vaiheista. Mittauksen esittelyn jälkeen luvussa 5 kerrotaan mittauksesta saadut mittaustulokset. Lopuksi luvussa 6 käsitellään ja analysoidaan mittaustuloksia ja esitetään niistä ilmenevät johtopäätökset.

## 2. ANTENNIT JA NIIDEN OMINAISUUDET

Antenneilla on erilaisia ominaisuuksia, jotka kertovat niiden toiminnallisuudesta ja käyttökohteista. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa antennien säteilykuviot ja antenninvahvistukset. Jotta antenneja voitaisiin tutkia tarkemmin, tulee ymmärtää niiden toiminnan peruseräkkeet.

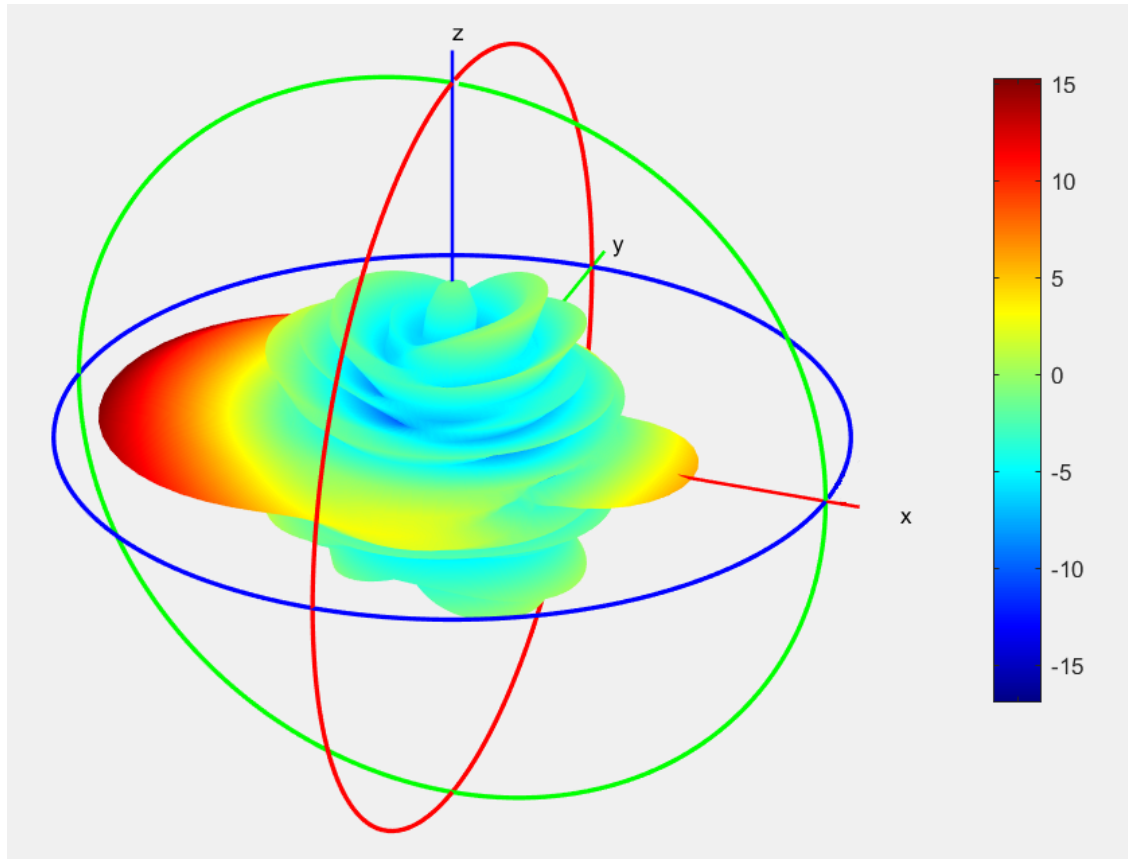
### 2.1 Antenni

Antenni on johdin, jonka avulla lähetettävä sähkösignaali muutetaan sähkömagneettiseksi aalloiksi. Sähkömagneettiset aallot sisältävät lähetetyn viestin, ja ne voidaan vastaanottaa tietyn kantaman sisällä, jos vastaanottimessa on tieto käytetystä taajuudesta. Myös vastaanottimessa on antenni, joka muuttaa saapuneen sähkömagneettisen aallon takaisin käsiteltäväksi sähkösignaaliksi. Tämä antennien kommunikointi niiden välisten kanavien läpi mahdollistaa langattoman tiedonsiirron ja sen erilaisten sovellusten hyödyntämisen nyky-yhteiskunnassa.

Jotta tiedon siirtäminen olisi mahdollisimman energiatehokasta ja häiriövapaata, tulisi antennien kohdistaa lähettämänsä energia kohti vastaanotinta. Antennin fyysiset ominaisuudet luovat sille ominaisen säteilykuvion, jonka avulla pystytään tarkastelemaan erilaisten antennien vaikutusta niiden kautta kulkeviin signaaleihin. Fyysisiä ominaisuuksia ovat muun muassa antennin eri valmistemateriaalit ja muodot.

### 2.2 Säteilykuvio

Säteilykuvio voidaan määrittellä graafiseksi esitykseksi antennin säteilyominaisuuksista avaruuskoordinaatistossa. Antennin säteilyominaisuuksia ovat esimerkiksi säteilyn intensiteetti ja teho. [2] Säteilykuvioista pystytään yleensä erottamaan antennin pääkeila, sivukeilat ja takakeila. Antennin pääkeila kohdistetaan kohti haluttua käyttösuuntaa, sillä suurin osa antennin tehosta keskittyy tälle alueelle. Kaikkea energiaa ei pystytä kohdistamaan pääkeilaan, vaan osa energiasta vuotaa sivu- ja takakeiloiksi. Kuvassa 1 esitetään havainnollistava säteilykuvio, jossa esiintyvät antennin tuottamat pää-, sivu- ja takakeilat.



**Kuva 1:** Antennin säteilykuvio, josta ilmenevät pääkeila tummanpunaisena, sivukeilat sinisenä ja takakeila keltaisena vastakkaiseen suuntaan pääkeilasta. Väripalkissa antenninvahvistus desibeleinä.

Muita oleellisia antennin säteilykuvion mitattavia ominaisuuksia ovat keilanleveys, etu-takasuhde ja sivukeilataso. Antennin keilanleveys määritellään kulmana, jonka reunoina toimivat antennin pääkeilan tehon puoliintumispisteet. Tehon puoliintuminen tarkoittaa logaritmisella asteikolla noin 3 dB:n vähenemistä alkuperäisestä desibelimäärästä. Pääkeilan ja takakeilan huippuamplitudien suhde muodostaa etu-takasuhteen, kun taas sivukeilojen suurin amplitudi muodostaa sivukeilatason. [3] Näillä erilaisilla antennien tunnusluvuilla saadaan tietoa antennin kyvykkyydestä ja käyttäytymisestä, sekä pystytään vertaamaan antennien erilaisia säteilykuvioita keskenään.

### 2.3 Antenninvahvistus ja desibeli

Antenninvahvistus kertoo, kuinka paljon antennin lähettämä energia voimistuu verrattuna täysin suuntaamattomaan ja teoreettiseen vertailupohjaan, isotrooppiseen anteniin. Isotrooppinen anteni on täysin ideaali pistemäinen anteni, joka säteilee tehoa pallomaisesti kaikkiin avaruuden suuntiin [4]. Se on siis täysin vahvistamaton anteni,

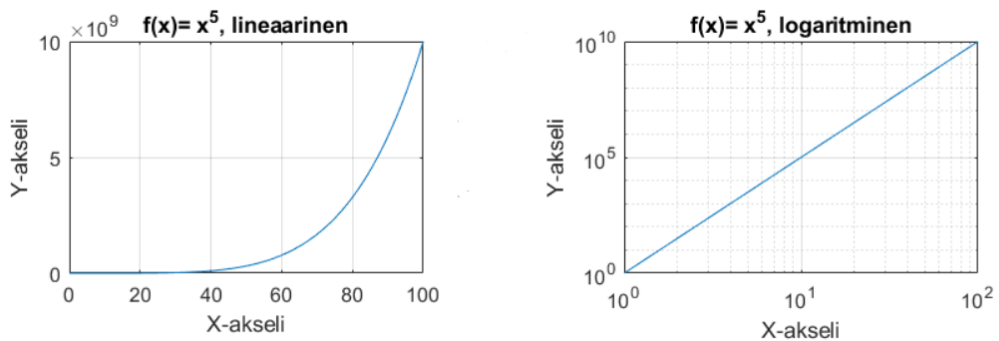
jonka avulla voidaan tarkastella oikeiden antennien kykyä vahvistaa lähettämäänsä signaalin tehoa. Antenninvahvistus  $G$  voidaan laskea, jos tiedetään tarkasteltavan antennin efektiivinen pinta-ala  $A_e$  ja aallonpituus  $\lambda$ , käyttäen kaavaa

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_e. \quad (1)$$

Antenninvahvistus esitetään yleensä desibeleinä (dB), jolloin kaavasta (1) saatu lineaarinen tulos tulee muuttaa logaritmisesti kertomalla se kaavalla

$$G_{\text{dBi}} = 10 \cdot \log_{10}(G). \quad (2)$$

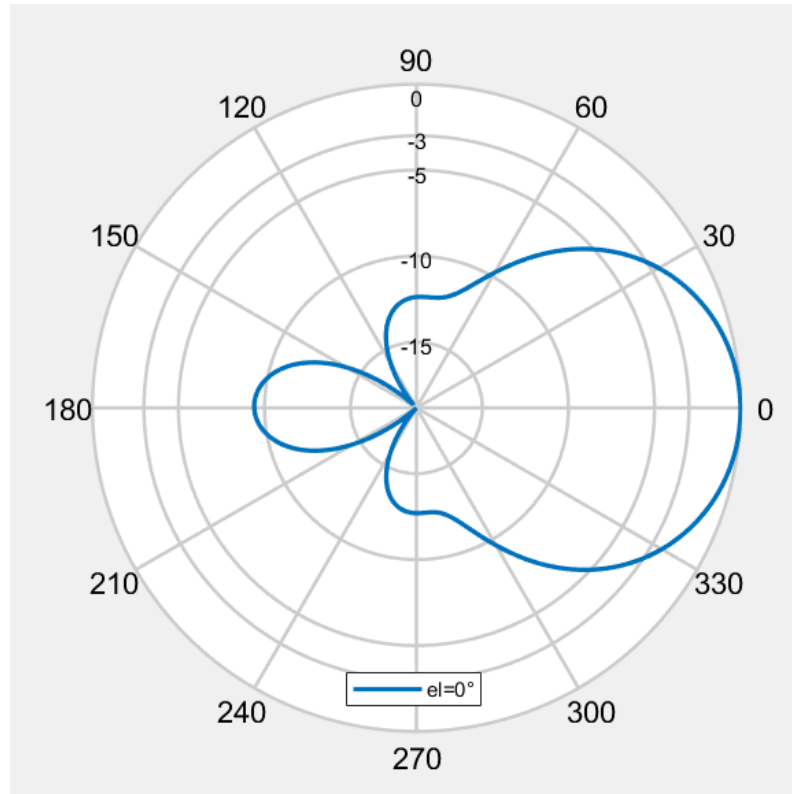
Käyttämällä desibelejä ja logaritmistä asteikkoa lineaarisen sijasta saadaan esimerkiksi suuresti vaihtelevasta mittausdatasta informatiivisempi kuvaaja. Tällöin myös pienemmät mutta merkittävät vaihtelut tulevat näkyviin. Toisaalta lineaarisessa kuvaajassa esitystapa on yksinkertainen ja helposti lukijan tulkittavissa. Asteikon valinta tulisi siis tehdä tapauskohtaisesti, jotta päästäisiin haluttuun lopputulokseen. Kuvassa 2 on esitetty funktio  $f(x) = x^5$  lineaarisella ja logaritmisella asteikolla. Logaritmisessä asteikossa molemmat akselit ovat esitetty logaritmisesti.



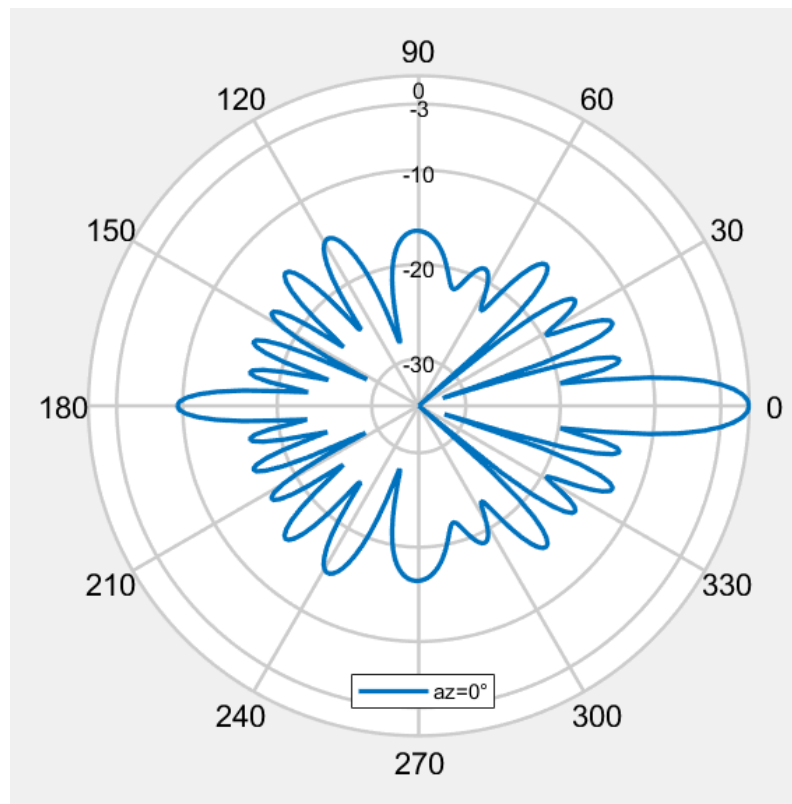
**Kuva 2:** Lineaarinen ja logaritminen esitys kuvaajalle.

Koska antenninvahvistuksessa säteilyn teho riippuu suunnasta, käytetään antenninvahvistuksen kuvantamiseen napakoordinaatistoa. Tällöin voidaan tarkastella antenninvahvistusta erikseen niin pysty- kuin vaakasuunnassakin. [3] Kuvassa 3 on tyypillisen tukiasema-antennin säteilykuvio vaakasuunnassa napakoordinaatistossa. Ympyrän ulko-reunalla ovat suunnan osoittavat asteet, ja ympyrän säteet kertovat normalisoidun antenninvahvistuksen desibeleinä. Normalisoidussa antenninvahvistuksessa vahvistukset esitetään erona suhteessa antennin maksimivahvistukseen. Maksimivahvistus on nollassa asteessa. Kuvasta 4 nähdään saman antennin säteilykuvio pystysuunnassa.





**Kuva 3:** Tukiasema-antennin säteilykuvio vaakasuunnassa.



**Kuva 4:** Tukiasema-antennin säteilykuvio pystysuunnassa.

Antenninvahvistuksen säteilykuvio ei ole samanlainen molemmissa kuvaajissa, sillä antennilta vaaditaan eri ominaisuuksia pysty- ja vaakasuunnassa. Jos halutaan esimerkiksi luoda toimiva ja tehokas mobiilitietoliikenteen solujärjestelmä, tulee antennin säteilykuvio muodostuvan peittoalueen olla rajattu mutta kattava [4]. Tukiasema-antenni sijoitetaan yleensä korkealle radiomastoon ja suunnataan lievästi alaspäin. Tällöin pystysuunnassa kapea antennin keila leviää kuitenkin pitkälle, sillä radioaallot lähtevät leviämään pallomaisesti antennista. Solun sektoroinnilla voidaan vaikuttaa tukiaseman säteilyyn, jolloin esimerkiksi jo kolmella noin 60 asteen levyisellä sektoriantennilla saadaan katettua jokainen suunta. Näin voidaan käyttää tilajakoista kanavointia vähentämään lähetystehoa ja kasvattamaan kapasiteettia solujärjestelmissä. [4]

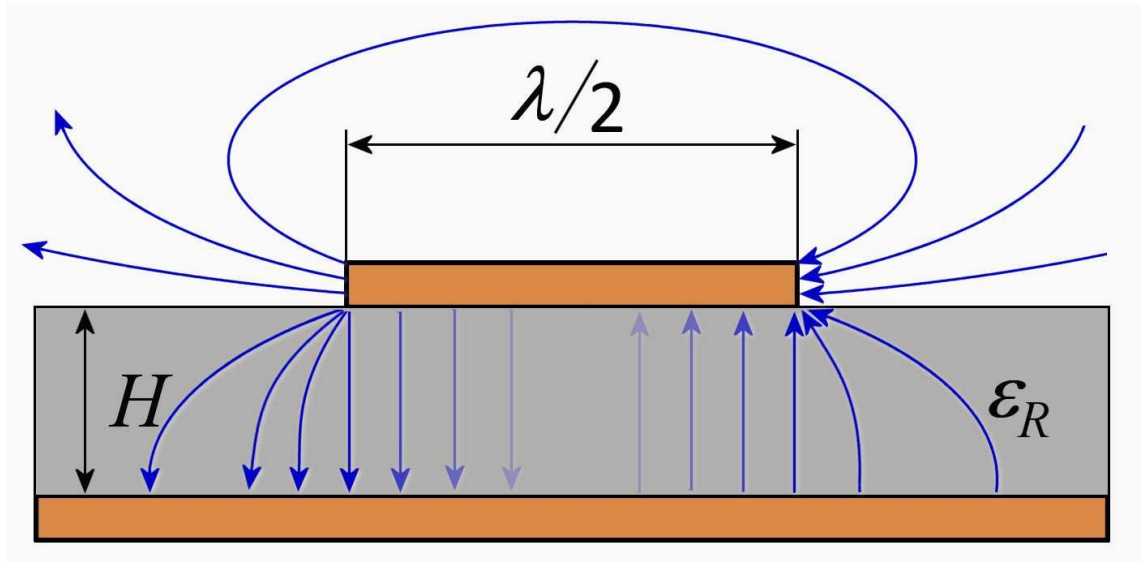
## 2.4 Antennityypit

Erilaisia antennia tarvitaan monenlaisiin tehtäviin, joten on kehitetty useita eri antennityyppejä. Dipoliantenni on yksi yksinkertaisimmista käytännön antennista. Se koostuu johtimesta, jonka pituus riippuu aallonpituudesta. Esimerkiksi puolialttopololi on hyötysuhteeltaan tehokkain, jos sen pituus on puolet käytetyn signaalin aallonpituudesta. Dipoliantennin muodostama säteilykuvio on lähes toroidimainen ja symmetrinen itse antennin suhteen. Dipoliantenneja käytetään etenkin yksinkertaisissa kuluttajille suunnatuissa radiovastaanottimissa, kuten autoissa, sillä ne ovat halpoja valmistaa ja kestävät käyttöä. [4]

Yksi dipoliantenni itsessään ei ole kovin energiatehokas, sillä sen antenninvahvistus on suurimmillaan 2,15 dBi. Dipoliantennin antenninvahvistusta pystytään kuitenkin vielä lisäämään, jos yhdistetään monta dipoliantennia yhdeksi antenniryhmäksi. Antenniryhmä pystyy vahvistamaan lähetettyä signaalia, sillä eri antennielementtiin voidaan syöttää samaa signaalia eri vaiheella, jolloin ne vahvistavat toisiaan. Käyttämällä antenniryhmiä saadaan antenninvahvistuksen huippuarvoksi  $20 \cdot \log(n)$  dB, jossa  $n$  on antennielementtien määrä. Antenniryhmien avulla voidaan esimerkiksi muokata antennin lähettämää säteilykuviota haluttuun suuntaan. Tällöin muokkaus tapahtuu täysin digitaalisesti liikuttamalla itse antennia mekaanisesti. [3]

Patch-antennit edustavat modernia antenniratkaisua, jota hyödynnetään tässä työssä mittauksen kohteena toimivan mobiiliverkon tukiasemassa. Itse antennielementti koostuu kolmesta osasta: hyvin johtavasta ohuesta antennilevystä, eristävästä väliaineesta

ja maadoittavasta pohjalevystä, jotka yhdessä muodostavat piirilevymäisen kokonaisuuden [6]. Tämä kokonaisuus on kuvattu kuvassa 5, jossa näkyy antennin kerroksellisuuden poikkileikkauksessa.



**Kuva 5:** Patch-antennin poikkileikkaus [7].

Patch-antennit ovat yleistyneet nykyään yhä enemmän, sillä ne ovat edullisia, kompakteja ja kevyitä sekä helposti integroitavia haluttuun verkkoon [5]. Täten ne soveltuvat hyvin myös kannetaviin laitteisiin kuten matkapuhelimiin ja satelliittitietoliikennelaitteisiin [6]. Aivan kuten dipoliantennien tapauksessa voidaan myös patch-antenneja käyttää antenniryhminä. Antenniryhmien muodostamisesta on hyötyä, sillä antennin hyvin toimiva taajuusalue kasvaa verrattuna yksittäiseen anteeniin, jonka yksi heikkouksista on kapea kaistanleveys [6].

Muita yleisiä antennityyppejä ovat monopoli-antennit, kehäantennit, rakoantennit, heijastinantennit ja erilaiset älykkäät antennit [2][6]. Monella antenniryhmällä on myös useita alaryhmiä ja variaatiota, joiden pienillä muutoksilla päästään tilannekohtaisesti parhaisiin antenniratkaisuihin kyseisissä järjestelmissä.

## 3. LTE-MOBIILIVERKKO

Suomessa on monia eri mobiiliverkkoja, jotka on rakennettu kuluttajien ja teollisuuden tarpeita varten. Global System for Mobile Communications eli GSM-mobiiliverkko toi pii-rikytkentäiset puhelut parantaen matkapuhelinten puheyhteyksiä. Seuraavaksi General Packet Radio Service (GPRS) päivitys yhdisti pakettikytkentäisen internetin GSM-verk- koon kiihdyttäen matkapuhelinten kehittymistä internetiä hyväksikäyttäviksi älypuheli- miksi. Mobiiliverkkoja kehitettiin entisestään ja Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) loi uuden radorajapinnan jo olemassa olevaan verkostoon, mikä lisäsi tiedonsiirtonopeutta ja vähensi tiedonsiirtoviiveitä verrattuna GSM:ään. Jotta ihmisten yhä kasvaviin tiedonsiirtotarpeisiin pystyttiin vastaamaan, kehitettiin täysin uutta radorajapintaa ja siihen yhdistettyä runkoverkkoa tukeva teknologia Long Term Evolution (LTE). Tässä kandidaatintyössä mitattava tukiasema-antenni on osana LTE-mobiiliverk- koa, jonka teknisiä ratkaisuja käydään seuraavaksi lyhyesti läpi.

### 3.1 Yleistä LTE-mobiiliverkosta

LTE on tällä hetkellä uusin kuluttajien käytössä oleva mobiiliverkkoteknologia, ennen kuin seuraavan sukupolven 5G-teknologia tulee saataville. LTE hyödyntää muun mu- assa monikantaalto- ja moniantennitekniikkaa maksimoidakseen tiedonsiirtokapasiteet- tin. Monikantaaltotekniikoina toimivat orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) alalinkissä ja single carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) ylä- linkissä. Ylä- ja alalinkin erottaminen toisistaan LTE:ssä perustuu joko käytettyyn taajuu- teen eli taajuusjakodupleksiin (FDD) tai aikaan eli aikajakodupleksiin (TDD). [8] FDD:ssä ylä- ja alalinkki toimivat erikseen määrätyillä taajuuksilla, kun taas TDD:ssä voidaan käyt- tää yhtä taajuutta, mutta datan lähetys ja vastaanotto tapahtuvat eri aikavälillä. TDD:n selkeä etu FDD:hen verrattuna on sen kyky säätää resursseja käyttäjien tarpeen mu- kaan. Tällöin purskemaista dataa, kuten nettiselailua, pystytään paremmin hallitsemaan kuin perinteisemmällä kiinteän taajuuskaistan erottelulla. [4] TDD:n toteuttaminen käy- tännössä ei ole kuitenkaan niin yksinkertaista kuin FDD:n, sillä esimerkiksi tukiasemien tulee olla synkronoituja samaan aikaan, jotta ne eivät häiritsisi toistensa signalointia. Ai- kaa ylläpidetään esimerkiksi satelliittien tarkkojen kellojen avulla [8].

Mobiiliverkkojen suunnittelussa ja niiden toiminnan varmistamisessa käytetään yleensä linkkibudjettia, jossa lasketaan signaalien ja kohinan tehoja ja niiden suhteita ottaen huo- mioon vaimennukset ja vahvistukset. Näiden avulla saadaan selville radiokanavan mak- simivaimennus, josta pystytään laskemaan verkon tukiasemien peittoalueet käyttäen eri

etenemisvaimennusmalleja. [3] Antenneilla on merkittävä rooli linkkibudjetissa, sillä niiden päätehtävänä on vahvistaa lähetettyä tai vastaanotettua signaalia. Lisäksi niiden avulla voidaan helposti tasapainottaa epätasapainoista linkkibudjettia. Jos linkkibudjetti on epätasapainossa esimerkiksi matkapuhelimen ja tukiaseman välisen ylä- ja alalinkin välillä, ovat niiden kantamat eriävät. Kantamien ollessa erilaiset, matkapuhelimen ja tukiaseman välinen yhteys katkeaa aiemmin kuin pitäisi, mikä ei ole toivottavaa luotettavalle mobiiliverkolle. Tasapainoinen linkkibudjetti siis takaa lasketun peittoalueen käyttäjilleen ja on edellytys toimivalle mobiiliverkolle, kuten LTE:lle.

### 3.2 LTE-mobiiliverkon tunnusluvut

Signaalien laatua ja niiden voimakkuutta mobiiliverkossa arvioidaan ja mitataan tunnuslukujen avulla. LTE-mobiiliverkolle ominaisia tunnuslukuja ovat reference signal received power (RSRP), received signal strength indicator (RSSI) ja reference signal received quality (RSRQ). RSRP kertoo vastaanotetun yksittäisen referenssisignaalin keskimääräisen tehon ja RSRQ kyseisen signaalin laadun. RSSI puolestaan ilmaisee havaitun signaalin tehon, johon on lisätty kohina ja muut häiriöt. LTE-mobiiliverkoissa olevat laitteet mittaavat näitä tunnuslukuja kertoakseen informaatiota verkon ylläpitäjille ja tukiasemille. Tällöin tukiasema saa tietoa esimerkiksi heikoista signaaleista ja sen myötä aloittaa solunvaihtoprosessin palvelukseen käyttäjiään mahdollisimman tehokkaasti. [9] RSRP toimii tämän työn tarkasteltavana tunnuslukuna, sillä se kertoo yksittäisestä solusta saadun referenssisignaalin tehon. Tämä referenssisignaali lähetetään aina vakioteholla. Näin minkään muun epäoleellisen tukiaseman signaalit eivät pääse sekoittumaan mitattavaan dataan, vaikka ne kantaisivatkin mittauspaikalle asti.

RSRP:n arvo muuttuu paikan funktiona, joten mittaamalla RSRP:tä tietyn etäisyyden päästä antennista ja vaihtamalla mittauskohtia saadaan tietoa RSRP:n käyttäytymisestä. Kyseiset muutokset ovat suoraan verrattavissa antennin antenninvahvistukseen, jos ympäristöstä ei aiheudu voimakkaita heijastuksia, jotka vaikuttaisivat lopputulokseen. RSRP:n avulla antennille voidaan siis mallintaa kuvien 3 ja 4 mukaiset säteilykuviot.

## 4. TOTEUTUS

Tämän kandidaatintyön mittaukset toteutettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella. Mittauksissa käytettiin yliopiston LTE-testiverkkoa, jonka tukiasema-antennin lähettämää signaalia mitattiin lennätettävällä mittalaitteistolla. Varsinaisia mittauksia ennen suoritettiin koelennot, joilla tarkastettiin lentoreittien turvallisuus ja mittalaitteiston toimivuus.

### 4.1 Mittauksen valmistelu ja suunnittelu

Mittausvalmistelut aloitettiin luvanhankinnalla, sillä operatiivisen mobiiliverkon tutkimiseen tarvitaan hyväksyntä sen ylläpitäjältä. Seuraavaksi kartoitettiin mittauspaikkaa ja mittaustapaa. Mittauspaikaksi valittiin kampuksen LTE-testiverkko, koska mittaussympäristö oli tarpeeksi tilava ja sijainti läheinen. Mittausympäristön tuli olla tarpeeksi esteetön, mikä mahdollisti turvallisen lentoreitin mittalaitteistolle. Myöskin suora näköyhteys tukiasema-antennin ja mittalaitteiston välillä piti olla katkeamaton, jotta saadut mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia. Kuvassa 6 näkyy mittaussympäristöä ja tutkittava tukiasema-antenni Kampusareenan katolta.



*Kuva 6: Tutkittava antenni ja sen takana näkyvä metalliaita Kampusareenan katolla.*

Mittausympäristön varmistuttua aloitettiin suunnittelemaan mittalaitteiston kulkemaa lentoreittiä. Lentoreitit suunniteltiin Litchi Mission Hub:lla, sillä mittalaitteiston drone pystyy lentämään ennalta määritettyjä reittejä ohjelmistonsa avulla itsenäisesti [10]. Tämän automatiikan ansiosta lentoreitin eri parametrit voidaan säätää optimaalisiksi mittauksia varten. Kuvassa 7 on esitetty säteilykuvion leveys suunnan mittauksen lentoreitti. Mittapisteet näkyvät kuvassa violetteina palloina, jotka ovat numeroitu välille 1–37. Niiden yläpuolella oleva numero osoittaa korkeuden metreinä mittalaitteiston lähtöpaikkaan verrattuna. Mittapisteistä ilmenevät myös mittalaitteiston senhetkinen kohdesuunta, jonka tulee olla kohti tukiasema-antennia. Tukiasema-antenni on esitetty kuvassa sinisessä ikonissa, jonka keskellä on kameran ääriiviivat. Dronen lähtöpaikka näkyy punaisella tähdellä. Mittapisteiden sekä tukiasema-antennin korkeus on 33 m. Sinisessä ikonissa näkyvä 25 m kertoo mittalaitteiston kameran kohdistumiskorkeuden.

Kaikki mittapisteet ovat vakioetäisyydellä tukiasema-antennista, jolloin ne muodostavat ympyrän kehän halutulla säteellä. Kun ympyrän säde tiedetään, voidaan määrittää mittapisteiden etäisyys toisistaan ja määrittää niille oma paikka ja kulma ympyrän kehälle. Tämä paikan määrittäminen mahdollistaa antennin lopullisen säteilykuvion muodostamisen napakoordinaatistoon.



**Kuva 7:** Litchi Mission Hubin avulla suunniteltu lentoreitti.

## 4.2 Mittalaitteisto

Mittalaitteisto koostui kahdesta osasta: kauko-ohjattavasta dronesta ja siihen kiinnitetyistä matkapuhelimista ohjelmistoinen. Dronena toimi DJI:n Inspire 2 malli, sillä sen tuli kyetä lentämään ennalta määritetty lentoreitti tarpeeksi tarkasti ja luotettavasti pysyen samalla kuljettamaan matkapuhelinta. Matkapuhelimena toimi Samsungin Galaxy S8, ja sen tehtävänä oli mitata tukiaseman lähettämiä RSRP arvoja G-NetTracker Pro -ohjelmiston avulla. Samaa mittalaitteistoa käytettiin Laajan diplomityössä, jossa mittalaitteistoa ja sen toimintaa esitellään tarkemmin kuin tässä kandidaatintyössä [11]. Kuvassa 8 näkyy käytetty mittalaitteisto, jossa matkapuhelin on kiinnitetty dronen alaosaan, sekä tukiasema-antenni Kampusareenan katolla.



**Kuva 8:** Tässä työssä käytetty mittalaitteisto, sekä tukiasema-antenni taustalla Kampusareenan katolla.

## 4.3 Mittauksen suorittaminen

Mittaukset tehtiin 1.4.2019 maanantaina Hervannassa. Sääolosuhteet olivat erittäin hyvät mittauksen toteutukselle ja ne pysyivät lähes samana kaikkien mittauksen ajan. Ulkolämpötila oli noin +3 astetta, pilvisuus 0 %, ilman kosteus 48 %, ilmanpaine 1023 hPa ja tuulen nopeus 5,0 m/s suunnasta 263 astetta. Aluksi mittalaitteisto vietiin mittauspai-



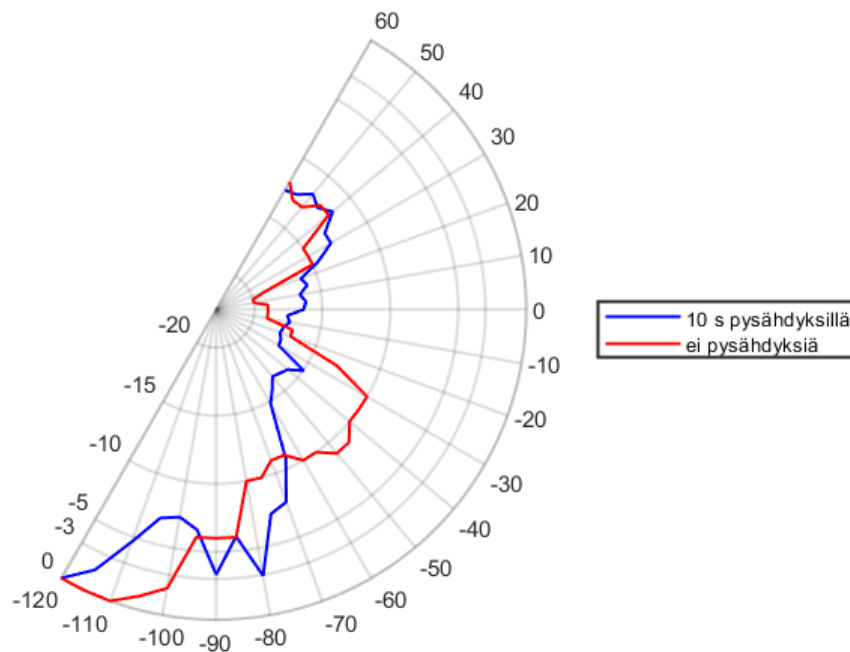
kan läheisyyteen ja laitettiin mittausvalmiuteen. Tähän vaiheeseen kuului dronen kokoaminen, lentoreitin lataaminen, ilmoitus lentämisestä drone-infoon, matkapuhelimen ohjelmiston käynnistäminen, sekä matkapuhelimen kiinnittäminen osaksi dronea muodostaen mittalaitteiston. Kun alkuvalmistelut olivat tehty, nostettiin mittalaitteisto ilmaan ja käynnistettiin sen lentoreitti.

Mittausten lentoreitit muodostuivat kahdesta osasta: korkeussuunnan ja leveyssuunnan mittauksista. Ensin tehtiin leveyssuunnan mittaus, joka koostui 37:stä mittapisteestä 33:n metrin korkeudessa. Korkeus valittiin tukiasema-antennin korkeudeksi, sillä tutkittavan antennin oletettu maksimivahvistus korkeussuunnassa oli 33:ssa metrissä. Mittapisteet muodostivat 180 asteen puoliympyrän antennin ympärille, jossa mittapisteiden väli oli aina 5 astetta. Puoliympyrän säde pysyi mittaustarkkuuden rajoissa vakiona 60:nä metrinä. Mittalaitteisto lähti mittauksiin suunnasta -120 astetta ja oltuaan paikallaan aina 10 sekuntia siirtyi seuraavalle mittapisteelle. Tätä menetelmää toistettiin, kunnes saavuttiin viimeiselle mittapisteelle, jossa odotettiin vielä viimeiset 10 sekuntia. Lentoreitin loputtua suuntaan 60 astetta, mittalaitteisto ohjattiin maahan ja matkapuhelimen keräämä data tallennettiin.

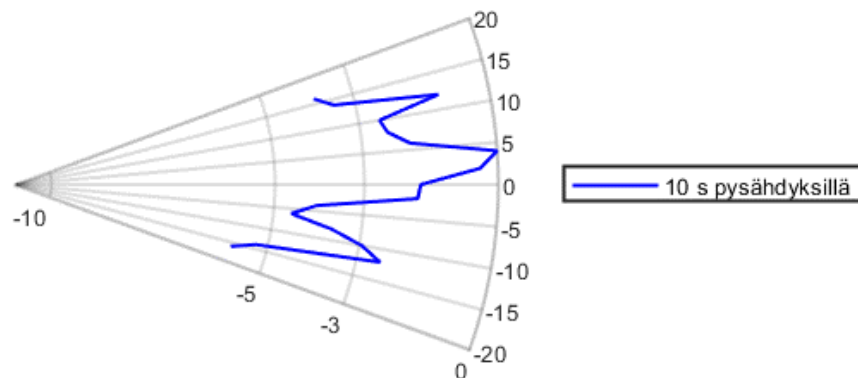
Seuraavana oli vuorossa korkeussuunnan mittaaminen, jonka lentoreitin peruseriaate oli sama, ainoastaan parametrit muuttuivat hieman. Nyt mittalaitteisto liikkui alhaalta ylöspäin välillä 17–49 m. Korkeusmittaus koostui 18:sta mittapisteestä, jotka muodostivat 32 asteisen osan 58 metrin säteisen ympyrän kehästä. Mittapisteiden välit olivat korkeussuunnassa 2 m, mikä tarkoitti ympyrän kehällä 2 astetta. Ensimmäinen mittapiste oli 17 metrin korkeudella, jossa mittalaitteisto odotti jälleen 10 sekuntia ennen kuin siirtyi seuraavaan mittapisteeseen. Mittalaitteiston päästyä loppuun, ohjattiin se alas ja tallennettiin tulokset. Pysähdysmittausten lisäksi tehtiin myös lisämittaukset, joissa mittapisteissä ei pysähdytty lainkaan. Nämä lisämittaukset toivat lisäinformaatiota ja autoivat mittausdatan käsittelyssä ja vertailussa, etenkin leveyssuunnassa.

## 5. MITTAUSTULOKSET

Mittaustulokset on esitetty napakoordinaatistossa, jossa 0 astetta on antennin oletettu kohdistussuunta. Kuvassa 9 esitetään leveysuunnassa tehdyt mittaukset ja kuvassa 10 korkeussuunnan mittaukset. Leveysuunnan mittaukset sijoittuvat välille -60–120 astetta ja korkeussuunnan mittaukset välille -16–16 astetta. Mittaustuloksia ei ole interpoloitu mittapisteiden välillä. Ympyrän säde esittää normalisoidun RSRP:n arvon desibeleinä, jossa maksimiarvo on 0 dB. RSRP arvot ovat keskiarvoja mittapisteiden 10 sekunnin otoksesta, joista on poistettu otoksen suurin ja pienin arvo. Pysähtymättömässä mittauksessa näyte on otettu 1 sekunnin välein koko matkalta.



**Kuva 9:** Mitatut normalisoidut RSRP-arvot leveysuunnassa.



**Kuva 10:** Mitatut normalisoidut RSRP-arvot korkeussuunnassa.

## 6. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli verrata mitattua tukiasema-antennin säteilykuviota sen valmistajan antamiin ohjeellisiin arvoihin, jolloin pystyttäisiin esimerkiksi varmistamaan asennetun antennin suuntauksesta ja toimintakyvystä. Mittaustulokset osoittivat, että tehdyillä mittaustuloksilla pystytään tietyllä tarkkuudella tarkastelemaan antennien säteilykuviota ja suuntausta. Leveyssuunnan säteilykuvioista ilmenee selkeästi pääkeilan muoto, etenkin sen heikentyminen mennessä kohti sivukeilaa. Myöskin korkeussuunnan säteilykuvioista voidaan selkeästi erottaa pää- ja sivukeilat ja niiden keilanleveydet. Näistä mittauksista pystytään myös todentamaan erilaisia antennin valmistajan ilmoittamia ohjeellisia arvoja, kuten keilanleveyttä ja säteilykuviota. Valmistaja on esimerkiksi ilmoittanut, että korkeussuunnassa antennin keilanleveys on 8,4 astetta [12]. Kuvasta 10 nähdään, että mitattu pääkeila on välillä -3–8 astetta, eli noin 11 astetta, joka on lähellä ilmoitettua arvoa. Korkeussuunnassa käytetty mittausrésoluutio oli 2 astetta, joten tätä tarkempiin tuloksiin ei päästä. Valmistajan ohjeelliset arvot tutkitulle antennille löytyvät kokonaisuudessaan valmistajan nettisivuilta [12].

Tulokset ovat oletetun mukaisia, mutta niissä on kuitenkin poikkeamia johtuen pääasiassa erilaisista virhelähteistä. Antennin määrittäystä suuntauksesta leveyssuunnassa ei ollut tarkkaa tietoa, jonka vuoksi nollakohta arvioitiin visuaalisesti. Tämä arvio antennin maksimivahvistuksen suuntauksesta tuo epätarkkuutta tuloksien analysointiin. Tällä arviolla ei ollut suurta vaikutusta korkeussuunnassa, sillä säteilykuvio korkeussuunnassa ei muutu merkittävästi, jos liikutaan pääkeilan alueella leveyssuunnassa. Tämä ilmiö näkyy myös jo esitetyssä kuvassa 1. Lisäksi virhettä mittauksissa toi dronen mahdolliset sivuliikkeet ja tukiasema-antennin korkeuden määrittämisen tarkkuudet. Nyt korkeutta arvioitiin dronen korkeusmittarin ja sen kameran avulla, sillä antennin tarkkaa korkeutta ei ollut tiedossa. Dronen oman sijainnin tarkkuus verrattuna määriteltäisiin mittapisteisiin toi poikkeamaa lentoreitin säteeseen ja kerättyyn dataan. Myöskään drone ei pysynyt täysin paikoillaan pysähdyksissä, vaan liikkui aina hieman, johtuen etenkin tuuliolosuhteista. Korkeussuunnassa mittalaitteisto ei pysty kallistumaan kohti antennia vaan on suorassa, mikä johtaa matkapuhelimen erilaisiin asentoihin. Tätä ongelmaa ei ollut leveyssuunnassa, sillä dronen rintamasuunta pysyi aina kohti mitattavaa antennia.

Mahdollisesti suurin virhevaikutus lopputuloksiin syntyi antennin lähiympäristöstä. Aivan antennin takana Kampusareenan metalliset rakenteet jatkuvat vielä ylöspäin, ja muodostavat heijastuspinnan antennin sivu- ja takakeilalle. Tämä heijastuminen ilmenee kuvassa 9 maksimivahvistuksen poikkeamasta, jossa suurin vastaanotettu RSRP:n arvo

tulee ensimmäisestä mittapistestä -120 astetta sivuun nollakohdasta. Tähän suuntaan siis heijastuu suuri määrä säteilyä, jonka ansiosta säteilykuvio ei ole enää oletetun mukainen 60 metrin päässä antennista tässä ympäristössä. Säteilykuvio vaihtelee myöskin hieman pysähdyksien kanssa ja ilman pysähdyksiä tehdyillä mittauskerroilla. Vaihtelu johtuu eroavuudesta kerättävien näytteiden määrässä mittapistettä kohden. Pysähtymättömässä mittauksessa saadaan 2 näytettä mittauspistettä kohden verrattuna, kun taas pysähdysten kanssa näytteitä saadaan 10 kappaletta. Näytekoon kasvaessa saadaan keskiarvosta tarkempi tulos, jolloin syntyy vaihtelua lopputuloksessa. Näytteenotto tapahtui G-NetTracker Pro -ohjelmiston avulla, joka otti näytteen noin 1 sekunnin välein. Pysähtymättömissä mittauksissa mittapistet arvioitiin jälkikäteen jakamalla näytteiden kokonaismäärä mittapisteiden määrällä, mikä osaltaan lisäsi eroavuutta.

Tämän työn mittaustapaa pystyisi hyödyntämään parhaiten korkealla haja-asutusalueella, jossa on paljon vapaata ilmatilaa ja vähän heijastavia pintoja. Näihin paikkoihin yleensä myös sijoitetaan mobiiliverkkojen tukiasemia, joten niiden tarkempi tutkiminen dronen avulla olisi mahdollista. Esimerkiksi tukiasema-antennien säteilykuvioiden suuntaamisen hienosäätämässä dronen käyttäminen toisi lisää informaatiota etenkin eri korkeuksilla. Myöskin radioverkon virhetilanteissa antennin toimintakykyä pystytään arvioimaan, ilman että kenenkään tarvitsisi kiivetä korkeaan radiomastoon, mikä puolestaan säästää aikaa ja resursseja.

# LÄHTEET

- [1] M. Heikkilä, M. Koskela, T. Kippola, M. Kocak, J. Erkkilä and J. Tervonen, Using Unmanned Aircraft Systems for Mobile Network Verifications, IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) Bologna, 2018, pp. 805-811.
- [2] C. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons Incorporated, 2015, 1095 p.
- [3] A. Aragón-Zavala, S Saunders, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, John Wiley & Sons Incorporated, 2007, 524 p.
- [4] J. Schiller, Mobiilitietoliikenne, IT Press, 2001, 380 s.
- [5] J. Dong, Novel design of omnidirectional microstrip patch antenna, 22nd Wireless and Optical Communication Conference IEEE, 2013, Chongqing, 1–3 p.
- [6] R. Poisel, Antenna Systems and Electronic Warfare Applications, Artech House, 2012, 1036 p.
- [7] C. Wolff, Radar Basics, 1998 Saatavissa (viitattu 31.01.2019): <http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Microstrip%20Antenna.en.html>
- [8] H. Holma, A.Toskala, LTE for UMTS : Evolution to LTE-Advanced, John Wiley & Sons Incorporated, 2011, 543 p.
- [9] L. Korowajczuk, LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis, John Wiley & Sons Incorporated, 2011, 720 p.
- [10] VC Technology Ltd, 2019 Saatavissa (viitattu 10.4.2019): <https://flylitchi.com>
- [11] J. Laaja, Drone enhanced connectivity to cellular networks in disturbance scenarios, 2018 Saatavissa (viitattu 22.3.2019): <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/26691>
- [12] Kathrein Se, 2019 Saatavissa (viitattu 12.4.2019): <https://www.kathrein.com/en/solutions/mobile-communication/products/antennas-accessories/outdoor-antennas/?q=80010681&id=194&L=0>