

Riku Paananen

**TUOTANNONTESTAUKSEN JA MITTAKAMMION VÄLINEN KORRELAATIO
SEKÄ TOIMINNALLISUUDEN TODENTAMINEN ANTENNIMITTAUKSELLA**

**TUOTANNONTESTAUKSEN JA MITTAKAMMION VÄLINEN KORRELAATIO
SEKÄ TOIMINNALLISUUDEN TODENTAMINEN ANTENNIMITTAUKSELLE**

Riku Paananen
Opinnäytetyö
Syksy 2024
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, laite- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Riku Paananen

Opinnäytetyön nimi: Tuotantotestauksen ja mittakammion välinen korrelaatio sekä toiminnallisuuden todentaminen antennimittauksella

Työn ohjaajat: Olli Himanka, Reetta Kuonanoja

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2024

Sivumäärä: 31

Opinnäytetyössä tutkittiin korrelaatiota tuotantotesterin ja kaiuttoman RF-mittakammion välillä, sekä sitä, kuinka tuotteen toiminta todennetaan antennimittauksella. Työssä käytettiin toimeksiantajan Oura Health Oy:n valmistamaa hyvinvointisormusta.

Tavoitteena oli selvittää, miten hyvin testeri soveltuu mekaanisesti erilaisten variaatioiden mittaamiseen sekä kuinka luotettava testeri on verrattuna mittakammioon. Luotettavuuteen liittyviä monia eri asioita, esimerkiksi kuinka paljon eri mittauskertojen ja mittauspaiikkojen välillä on vaihtelevuutta, tai miten päin sormus on testerissä. Opinnäytetyö on jaettu kolmeen osaan: sähkömagnetismin teoria, antenni sekä mittaukset ja tulokset. Työtä varten on koottu tietoa alan kirjallisuudesta, internetistä tieteellisistä tutkimuksista ja artikkeleista sekä toimeksiantajan omista dokumenteista.

Työssä käydään läpi sähkömagnetismin perusteet sekä lyhyesti säteilyn eri muodot. Antenneista käydään läpi peruskäsitteistöä ja lähi- ja kaukokenttien eroja. Työssä tarvitaan myös tuntemusta lähikentästä.

Työn käytännön osuus suunniteltiin ja toteutettiin toimeksiantajan tiloissa. Työssä ensin mitattiin sormusvariantit mittakammiossa, mistä saatiin referenssiarvot. Sen jälkeen mitattiin tuotantotesterillä monella erilaisella tavalla, jotta voitiin varmistua testerin luotettavuudesta mittaus tuloksien välillä. Näitä mittauksia verrattiin referenssimittauksiin, joista koostettiin kuvaajia korrelaatioista Excelillä.

Muutamilla varianteilla korrelaatiota löytyi, mutta suurimmalla osalla ei. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että testeri on suunniteltu mekaanisesti erilaisten sormusten mittaamiseen, kuin ne, joita työssä käytin.

Löytyi seuraavia kehityskohteita: RSSI-arvon laskennan parantaminen, tietyn mittasarjan mekaanisten variaatioiden minimointi ja varianttien elektronisen vaihtelevuuden lisääminen.

Asiasanat: radiotekniikka, sähkömagneettinen säteily, lähikenttä, RSSI, sähkömagnetismi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology, Option of Device and Product Design

Author: Riku Paananen

Title of thesis: Correlation between production testing and the RF chamber, and functional verification by antenna measurement

Supervisors: Olli Himanka, Reetta Kuonanoja

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2024

Number of pages: 31

In this thesis, the correlation between the production tester and the anechoic RF measuring chamber, as well as how the functionality of the product can be verified by antenna measurement, was investigated. A smart ring manufactured by the client, Oura Health Oy, was used in this thesis.

The goal was to find out how well the tester is mechanically suitable for measuring different variations and how dependable the tester is compared to the measuring chamber. Reliability is related to many different things, for example how much variability there is between different measurement times and measurement locations, or which way the ring is on the tester. The thesis is divided into three parts: theory of electromagnetism, antenna and measurements and results. For the thesis, information has been gathered from the literature of the field, scientific studies and articles on the internet, and the client's own documents.

The thesis covers the basics of electromagnetism and briefly discusses the different forms of radiation. The basic concepts of antennas and the differences between near and far fields are also reviewed.

The practical part of the thesis was planned and implemented at the client's premises. In the thesis, the ring variants were first measured in the measuring chamber, from which the reference values were obtained. After that, rings were measured in many ways to ensure the tester's reliability between measurement results. These measurements were compared to reference measurements, from which graphs of correlations were compiled using Excel.

A correlation was found with a few variants, but not with the majority. This is probably because the tester is designed to measure mechanically different rings that I used in the thesis.

The following development targets were found, improving the calculation of the RSSI value, minimizing the mechanical variations of a specific set of measurements to as little as possible and increasing the electronic variability of the variants.

Keywords: radio technology, electromagnetism, electromagnetic radiation, near field, RSSI

SISÄLLYS

1	LYHENTEET JA TERMIT	6
2	JOHDANTO	7
3	SÄHKÖMAGNETISMIN TEORIAA	8
3.1	Sähkö ja magnetismi	8
3.2	Sähkömagneettisen säteilyn perusteet.....	10
3.3	Maxwellin yhtälöt	11
3.3.1	Gaussin laki sähkökentille.....	11
3.3.2	Gaussin laki magnetismille.....	12
3.3.3	Faradayn laki	12
3.3.4	Ampèren-Maxwellin laki	13
3.4	Aallon vuorovaikutus aineen kanssa	14
3.5	Sähkömagneettisen säteilyn eri muodot.....	15
3.5.1	Radioaallot.....	16
3.5.2	Infrapunasäteily.....	17
3.5.3	Näkyvä valo	17
3.5.4	Ultraviolettisäteily	17
3.5.5	Röntgensäteily	17
3.5.6	Gammasäteily	18
4	ANTENNI.....	19
4.1	Resiprookkisuus	19
4.2	Lähi- ja kaukokentät	19
4.3	Suuntakuvio.....	21
4.4	Hyötysuhde	21
4.5	Säteilyresistanssi ja impedanssi.....	22
5	MITTAUKSET JA TULOKSET	23
5.1	Testerin ja kammion korrelaatio	23
5.2	Suuntaerot.....	25
5.3	Tulosten vaihtelevuus samalla paikalla	27
5.4	Paikkaerot	29
6	POHDINTA	30
7	LÄHTEET	31

1 LYHENTEET JA TERMIT

dBi	Termi dBi ilmaisee antennivahvistusta verrattuna teoreettiseen ideaaliantenniin, joka säteilee joka suuntaan yhtä paljon. Esim. jos antennivahvistus on +3 dBi, se tarkoittaa kaksi kertaa suurempaa antennivahvistusta verrattuna ideaaliseen ympärisäteilevään anteniin.
dBd	Antennivahvistus suhteessa dipoliantenniin.
dBm	Radiotekniikassa termillä dBm ilmaistaan desibelimäärää suhteessa milliwattiin. Yhden milliwatin teho on 0 dBm. +30 dBm teho vastaa 1000 mW eli 1 W.
induktio	Sähkömagneettinen induktio tarkoittaa muuttuvan magneettikentän sähköiseen johteeseen aiheuttamaa muutosta.
RF	Radiotaajuus, lyhenne sanasta radio frequency.
RSSI	Received signal strength indication, on kirjaimellisesti vastaanotettu signaalin voimakkuusarvo. Se kertoo, kuinka vahva signaali on desibelimilliwatteina.
TX	TX on lyhenne sanasta transmit eli lähetys. Tässä työssä tarkoitetaan sormuksen lähettämää Bluetooth signaalia.

2 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Oura Health Oy, joka on vuonna 2013 perustettu hyvinvointisormusta kehittävä ja valmistava yritys. Yrityksen kotipaikka on Oulussa ja se työllistää tällä hetkellä noin 500 henkilöä ympäri maailman. (1) (2)

Ouran ydinosasta on unenseuranta, josta yritys alun perin lähti liikkeelle ja jossa se on nykyäänkin markkinajohtaja. Uusimpaan, kolmannen sukupolven sormuksen toimintoihin kuuluu myös aktiivisuuden ja stressin mittaus sekä kuukautiskierron seuranta. Toimintojen pohjalla on muun muassa lämpötilan, sydämen sykkeen, sykevälivaihtelun ja veren happipitoisuuden mittaus. (3)

Sormuksen ja puhelimen välillä yhteys muodostetaan Bluetoothin välityksellä, joten sormuksen antennin ominaisuudet ja suorituskyky vaikuttavat paljon asiakkaan käyttökokemukseen muun muassa tiedonsiirtonopeuden ja kantaman muodossa. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää, että sormus, ja tässä työssä erityisesti antenni, toimii suunnitellusti.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia korrelaatiota antennimittauksissa tuotantotesterin ja laboratorioissa olevan kaiuttoman mittakammion välillä sekä varmentaa sormuksen toimivuus. Opinnäytetyö koostuu teoriaosuudesta ja käytännön osuudesta. Teoriaosuudessa käsitellään sähkömagnetismin perusteita sekä lähikenttäilmaisimella tapahtuvaa antennimittausta ja sen lainalaisuuksia. Käytännön osuudessa mitataan sormuksia tuotantotesterillä ja mittakammiolla eri variaatioin, koostetaan tästä saatua dataa ja vertaillaan korrelaatiota.

Tarve tälle opinnäytetyölle syntyi yrityksen halusta selvittää, miten hyvin testeri soveltuu mekaanisesti erilaisten variaatioiden mittaamiseen sekä kuinka luotettava testeri on verrattuna mittakammioon. Luotettavuuteen liittyy monia eri asioita, esimerkiksi kuinka paljon eri mittauskertojen ja mittauspaikkojen välillä on vaihtelevuutta, tai kummin päin sormus on testerissä.

Aikaisemmin testerin korrelaatio on ollut hyvä, mutta testerit on rakennettu jokaiselle mekaaniselle ratkaisulle erikseen. Tulosten perusteella voidaan parantaa tuotantotesterin tarkkuutta ja saada näin todellista dataa antennin suorituskyvystä sekä varmistetaan, että sormus toimii niin kuin on suunniteltu, jotta asiakkaille päätyy vain hyviä laitteita.

3 SÄHKÖMAGNETISMIN TEORIAA

Sähkömagnetismi on fysiikan osa-alue, joka käsittelee sähkön ja magnetismin suhdetta. Niiden sulautuminen yhdeksi kokonaisuudeksi on seurausta muutamasta historiallisesta tapauksesta. Hans Christian Ørsted huomasi vahingossa vuonna 1820, että johtimessa kulkeva sähkövirta muuttaa kompassin suuntaa. Eli toisin sanoen sähkövirta aiheuttaa magneettikentän muutoksen. Tästä innostuttiin kokeilemaan, voisiko magneettikentän muutoksella luoda sähkövirtaa. Michael Faraday osoitti vuonna 1831, että muuttuva magneettikenttä voi indusoida eli aiheuttaa virran virtapiiriin. Kun James Clerk Maxwell vuonna 1861 ennusti, että muuttuva sähkökenttä luo muuttuvan magneettikentän, ja tämä pystyttiin käytännössä todistamaan, sähkövoiman ja tietoliikenteen vallankumous alkoi.

3.1 Sähkö ja magnetismi

Sähkövaraus on aineen ominaisuus, joka kuvaa, kuinka voimakkaasti kappale vuorovaikuttaa sähkömagneettisen kentän kanssa. Tunnuksena käytetään yleensä kirjainta Q tai q ja yksikkö on SI-järjestelmässä coulombi (C). Sähkövarausta on kahdenlaista, positiivista ja negatiivista varausta. Protonit ovat positiivisia (+q) ja elektronit negatiivisia (-q). Varauksen suuruus on noin $1,6 \times 10^{-19}C$ ja tätä määrää kutsutaan alkeisvaraukseksi. Varaukset vetävät toisiaan puoleensa, jos ne ovat erimerkkisiä, ja hylkivät toisiaan ollessaan samanmerkkisiä. Näitä sähköisiä voimia välittää sähkökenttä E . Voima F voidaan laskea Coulombin lain avulla (kaava 1). (5)

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad (\text{Kaava 1})$$

jossa

k on coulombin vakio $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$, ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys

q_1, q_2 ovat sähkövarauksia, joiden välistä voimaa tarkastellaan

r on varausten välinen etäisyys

Staattista sähköä saadaan hankaamalla kahta eri materiaalista valmistettua ainetta toisiinsa. Aineisiin muodostuu yhtä suuret, mutta vastakkaismerkkiset varaukset.

Jokainen varaus luo ympärilleen sähkökentän, jonka muut varaukset havaitsevat Coulombin voimana. Sähkökenttä on voimakkaimmillaan varauksen lähellä ja heikkenee etääntyessään äärettömyyteen asti. Kaikki muut kentässä olevat varaukset kokevat kentän aiheuttavan voiman ja muuttavat suuntaa tai lähtevät liikkeelle, mikäli voima on riittävän suuri. Suuntaa ja voimakkuutta sähkökentässä kuvataan kenttäviivoilla. Sähkökentän voimakkuus voidaan laskea kaavalla 2. (5)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (\text{Kaava 2})$$

jossa

F on sähkökentän kohdistama voima hiukkaseen

q on sen hiukkasen varaus, johon voima kohdistuu

Positiivisia varauksia (+q) kutsutaan sähkökentän lähteiksi, koska kenttäviivat lähtevät sieltä ja negatiivisia varauksia (-q) nieluiksi, ne ikään kuin "nielevät" kenttäviivat. Varausten voimakkuuksia kuvataan usein vektoreilla, joka on jana, jonka toisessa päässä on nuoli. Vektoreita käytetään kuvaamaan suureita, joilla on suunta ja suuruus. Vektorin nuoli osoittaa suuntaa ja janan pituus suureen, esimerkiksi sähkökentän varauksen, suuruutta. Yksi arkielämän esimerkki vektoreiden käytöstä on sääkartat, joissa tuulen suuntaa ja nopeutta kuvataan vektorinuolilla.

Kun varaus lähtee liikkeelle, se luo ympärilleen magneettikentän B, joka aiheuttaa voimia muihin kentässä oleviin liikkuviin varauksiin.

Magnetismia esiintyy luonnossa niin sanotuissa kestopagneeteissa, joiden magneettisuus johtuu elektronien "pyöriessä" itsensä ympäri, englanniksi spin. Tätä pyörimistä tapahtuu kaikissa aineissa, mutta yleensä pyörimissuunnat ovat satunnaisia ja magneettikentät kumoavat toisensa. Joissain aineissa ne ovat asettuneet yhdensuuntaisesti ja näin vahvistavat toisiaan. Näitä aineita kutsutaan magneettisiksi aineiksi. Magneettinen aine pystyy magneettikentän välityksellä indusoimaan toisiakin aineita magneettisiksi, esimerkiksi rautaa, mutta useimmat aineet eivät magnetisoidu. (4, s. 52–55)

3.2 Sähkömagneettisen säteilyn perusteet

Sähkömagneettinen säteily koostuu sähkömagneettisen kentän aalloista, jotka kuljettavat energiaa. Sähkömagneettisen aallon perusominaisuudet ovat taajuus, aallonpituus, nopeus ja polarisaatio. (4, s. 58)

Tässä yhteydessä taajuus f kuvaa, kuinka monta aaltoa ohittaa tietyn paikan tietyssä ajassa. Taajuuden käänteislukuna saadaan aallonpituus.

Aallonpituus λ kertoo esimerkiksi kahden peräkkäisen huippukohdan välisen etäisyyden (kuva 1).

Aallonpituus pienenee taajuuden kasvaessa. $\lambda = \frac{c}{f}$. Esimerkiksi aallonpituus Bluetooth-

taajuudella on $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299\,792\,458 \frac{m}{s}}{2\,400\,000\,000 \frac{1}{s}} \approx 0,1249 \text{ m} \approx 12,5 \text{ cm}$.

Sähkömagneettisen aallon nopeus tyhjiössä on $c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$. Väliaineessa nopeus

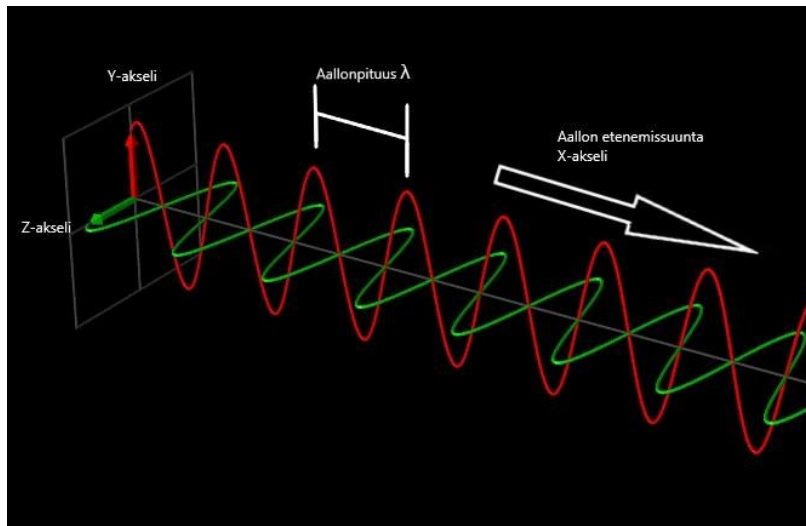
muuttuu yhtälön $v = \frac{c}{n}$ mukaan, jossa n on aineen taitekerroin. Tyhjiön taitekerroin on 1 ja kaikilla muilla aineilla sitä suurempi. Esimerkiksi ilman taitekerroin on 1,00029 ja veden 1,33. Ilmassa

nopeus on siis noin $v = \frac{c}{n} = \frac{299\,792\,458 \frac{m}{s}}{1,00029} = 299\,705\,543 \frac{m}{s} \approx 3 * 10^8 \frac{m}{s}$. (8, s. 42)

Polarisaatio kertoo mihin suuntaan sähkömagneettisen aallon sähkökentän värähtely tapahtuu.

Erilaisia polarisaatioita on pysty- (horisontaali), vaaka- (vertikaali) ja ympyräpolarisaatiot. (8, s. 43)

Polarisaatiolla on merkitystä vastaanotossa, sillä vastaanottoantennin täytyy olla samassa suunnassa sähkökentän kanssa, jotta vastaanotto on mahdollista. Tämän vuoksi esimerkiksi monissa liikkuvissa laitteissa, kuten matkapuhelimissa, käytetään ympyräpolarisaatiota, koska niiden antennien täytyy kyetä vastaanottamaan säteilyä joka suunnasta.



Kuva 1 Sähkömagneettisen säteilyn etenemistä

3.3 Maxwellin yhtälöt

Skotlantilainen fyysikko James Clerk Maxwell esitti vuonna 1861 sähköön ja magnetismiin liittyviä teorioita. Niistä Oliver Heaviside kokosi neljä yhtälöä, jotka kuvaavat sähkö- ja magnetismin perusominaisuuksia.

3.3.1 Gaussin laki sähkökentille

Tämä laki kertoo, että ”sähkövuo suljetun pinnan läpi on yhtä suuri kuin kokonaisvaraus pinnan sisällä.” (9, s. 20) Toisin sanoen, jos sähkökentän lähteen ympärille piirretään pallo (suljettu pinta), niin pinnasta ulospäin suuntautuvien vektoreiden kokonaisvaraus on yhtä suuri kuin lähteen kokonaisvaraus. Ja jos sähkökentän nielun ympärille piirretään suljettu pinta, sähkövuo nielua kohti on yhtä suuri kuin nielun kokonaisvaraus. Missä tahansa mielivaltaisella sähkökentän alueella suljetun pinnan kokonaisvaraus on nolla, jos pinnan alueelle tuleva sähkövuo on sama kuin siitä poistuva vuo. Tässä vuolla tarkoitetaan vektorikentän kulkeutumista tietyn pinnan läpi.

Yksinkertaistettuna tämä laki siis kertoo, kuinka sähkövaraus tuottaa sähkökentän. Positiivinen varaus (lähde) tuottaa itsestään pois päin etenevän sähkökentän ja negatiivinen varaus (nielu) itseään kohti tulevan sähkökentän. Kaikki varaukset vaikuttavat toisiinsa muuttaen sähkökenttää voimakkuutensa ja etäisyytensä mukaan.

Differentiaalimuodossa tämä esitetään seuraavalla tavalla:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho,$$

Tässä on nablooperaattorin (∇) ja sähkövuon tiheyden (D) pistetulo, tuloksena on varaustiheys ρ . Pistetulomerkintä $\nabla \cdot$ (nabla piste) tarkoittaa divergenssiä. Divergenssi kuvaa vektorikentän lähteisyyttä, eli tietyistä pisteistä lähtevän tai siihen päättyvän vektorikentän tiheyttä. (9, s. 18)

3.3.2 Gaussin laki magnetismille

Tämä laki kertoo, että magneettivuo suljetun pinnan läpi on nolla. Se saadaan laskemalla yhteen magneettisten napojen voimakkuudet, jotka jäävät pinnan sisälle. Differentiaalimuodossa tämä esitetään seuraavalla tavalla:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0,$$

Tässä on nablooperaattorin (∇) ja magneettivuon tiheyden (B) pistetulo. Kun pistetulo on 0, se tarkoittaa, että tietyn suljetun pinnan läpi tulee yhtä paljon magneettikenttäviivoja kuin siitä poistuu. Tämä pätee missä tahansa magneettikentän pisteessä. Tästä seuraa, että magneettisia monopoleja tai varauksia ei ole olemassa. (9, s. 18-21)

3.3.3 Faradayn laki

Faradayn laki kertoo kuinka muuttuva magneettivuo synnyttää sähkökentän. Differentiaalimuodossa laki on seuraavanlainen:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

Kaavassa on nablooperaattorin (∇) ja sähkökentän voimakkuuden (E) ristitulo, jonka tulos $-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ kuvastaa magneettivuon negatiivista aikaderivaattaa. Ristituloa $\nabla \times$ käytetään roottorin symbolina.

Roottori kuvaa vektorikentän pyörteisyyttä. Esimerkiksi staattisessa sähkökentässä oleva pistevaraus muodostaa pyörteettömän alueen, sillä vuo on täysin vastakkaiseen suuntaan

varauksesta. Roottori on siinä tilanteessa 0. Roottorin ollessa nollaa suurempi vektorikenttä pyörii myötäpäivään ja nollaa pienempi, vastapäivään. Pyörteisyyttä voi aiheuttaa esimerkiksi se, että kaksi lähekkäin olevaa kenttää ovat menossa vastakkaisiin suuntiin. Näiden välille syntyy silloin roottori. Roottori voi myös syntyä yhdensuuntaiseen vektorikenttään, jos esimerkiksi tietyn alueen yläosassa on suurempi vuo kuin alaosassa. Tämä aiheuttaa myötäpäiväisen pyörrekentän.

Tietyn piirin, esimerkiksi kuparilangasta tehdyn silmukan läpi kulkeva magneettivuo aiheuttaa muuttuessaan pyörteisyyttä kohtisuoraan omaan kulkusuuntaansa nähden. Tämä pyörteisyys kuvastaa sähkökenttää, joka indusoituu silmukkaan. Roottorin suunta voidaan päätellä ”oikean käden säännön” avulla, kun tiedetään magneettivuon kulkusuunta. Oikean käden säännössä oikean käden peukalo laitetaan osoittamaan magneettivuon kulkusuuntaa kohti, jolloin muut sormet näyttävät roottorin suunnan. Jos magneettivuo liikkuu x-akselin suuntaan (\vec{I}), roottorin suunta on kierteisesti y- ja z-akselien suuntainen. Yksinkertaistaen tämä tarkoittaa, että muuttuva magneettivuo luo ympärilleen sähkökentän, eli muuttuvan sähkövuon. (12)

3.3.4 Ampèren-Maxwellin laki

Ampèren laki Maxwellin lisäyksellä kertoo, kuinka liikkuva varaus, eli virta ja muuttuva sähkövuo synnyttävät magneettikentän. Differentiaalimuodossa laki on seuraavanlainen:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

Kaavassa on nabraoperaattorin (∇) ja magneettikentän voimakkuuden (\vec{H}) ristitulo, jonka tulos $\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ kertoo sähkövirran tiheyden \vec{J} sekä sähkövuon tiheyden \vec{D} aikaderivaatan $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$. Ristituloa $\nabla \times$ käytetään roottorin symbolina.

Liikkuva varaus aiheuttaa magneettikentän, joten johtimessa kulkeva tasavirta aiheuttaa ympärilleen staattisen magneettikentän. Jos johtimen ympärille piirretään kehä, jonka läpi virta kulkee, Ampèren lain mukaan magneettikenttä syntyy kehälle. Magneettikenttä pyörii kehää pitkin ”oikean käden säännön” mukaisesti (kuva 6). Jos johdin katkaistaan jostain kohdasta ja paikalle laitetaan kondensaattori, tasavirran kulku lakkaa ja näin magneettikenttä häviää. Kun johtimeen kytketään vaihtovirta, sähkövirta johtimessa liikkuu kondensaattorin molemmilla puolilla ja myös

sähkökenttä kondensaattorin sisällä muuttuu. Muuttuva sähkökenttä luo pyörivän magneettikentän kuvitellulle kehälle kondensaattorin kohdalla, kuten johtimen ympärilläkin. Tämän vuoksi magneettikenttä jatkuu yhtenäisenä koko johtimen matkalta ja mahdollistaa sähkövirran kulun kondensaattorin läpi. Tätä kutsutaan siirrosvirraksi eli kenttävirraksi.

Muuttuva sähkökenttä aiheuttaa ympärilleen muuttuvan magneettikentän, joka taas luo ympärilleen muuttuvan sähkökentän. Nämä kentät ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan, mutta myös kohtisuorassa kulkusuuntaansa nähden. Tämä sähkömagneettinen energia etenee tyhjiössä valonnopeudella siniaaltomuotoisena äärettömyyteen asti. (12)

3.4 Aallon vuorovaikutus aineen kanssa

Sähkömagneettisen aallon kohdatessa väliainetta, sähkö- ja magneettikentät vuorovaikuttavat aineen atomien kanssa. Aaltoon vaikuttavia aineen ominaisuuksia ovat muun muassa permeabiliteetti, permittiivisyys, absorptio, sironta, taittuminen, taipuminen ja heijastuminen. (8, s. 45)

Permeabiliteetti kuvaa aineen reagoitua ulkoiseen magneettikenttään, eli kuinka hyvin magneettikenttä läpäisee ainetta. Tyhjiön permeabiliteetti on $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{H}{m} \approx 1,2566371 \frac{\mu H}{m}$.

Permittiivisyys eli sähkövakio kuvastaa kuinka aine vastustaa sähkökentän etenemistä sen läpi, tai toisin sanoen kuinka helposti sähkökenttä läpäisee ainetta. Tyhjiön permittiivisyys on $\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \approx 8,854 * 10^{-12} F/m$.

Absorptiolla tarkoitetaan imeytymistä, eli tässä tapauksessa radioaallon energian ”imeytymistä” väliaineeseen, koska radioaallon sähkö- ja magneettikentät vuorovaikuttavat aineen atomeihin ja se kuluttaa energiaa. Energiaa menettäessään säteily vaimenee.

Kun absorptiossa aiheutunut väliaineen atomien ja molekyylien virittyminen purkautuu, emittoituu säteilyä, joka yleensä on sama absorpoituneen säteilyn kanssa. Tätä joka suuntaan etenevää säteilymekanismia kutsutaan sironnaksi. Sirontaa aiheutuu myös, kun säteily kohtaa esteen tai tiheyden muutoksen. (8, s. 45–48)

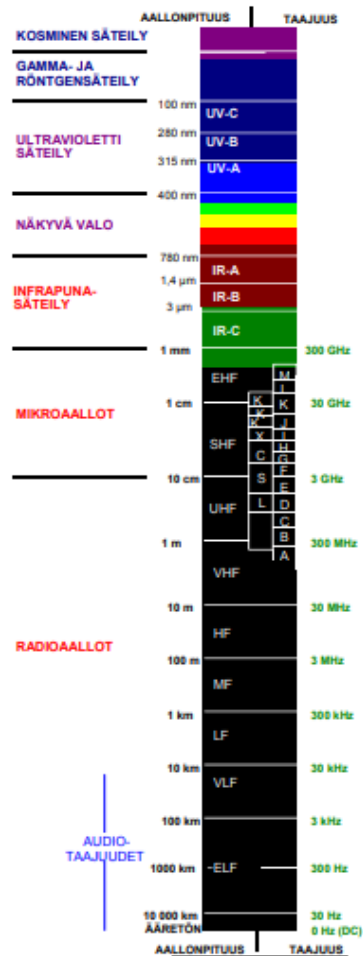
Sähkömagneettisen aallon heijastuminen tapahtuu aallon kohdatessa tasaisen pinnan. Aallon heijastuessa tulo- ja heijastuskulmat ovat samoja. Heijastumisessa säteilyn ominaisuudet eivät muutu. Myös sähköisesti johtava pinta aiheuttaa heijastumisen, koska sähkömagneettinen säteily ei läpäise sitä. (4, s. 61) (8, s. 46)

Väliaineiden rajapintaan osuessa se osa säteilystä, joka ei heijastunut tai sironnut, taittuu. Silloin säteilyn nopeus muuttuu. Nopeus riippuu permittiivisyydestä ja permeabiliteetista. Säteily taittuu aina kohti optisesti tiheämpää ainetta, eli sitä, jossa aallon etenemisnopeus on pienempi. Taitekerroin kuvaa sitä, kuinka aine vaikuttaa sähkömagneettiseen säteilyyn. Taitekerroin riippuu materiaalista ja säteilyn aallonpituudesta. Taitumisessa säteilyn aallonpituus ja nopeus voivat muuttua, mutta taajuus pysyy samana. (4, s. 64–65) (8, s. 46–47)

Taipuminen eli diffraktio tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn kohdatessa reunan. Aallon muoto muuttuu, esimerkiksi tasoallon kohdatessa raon se diffraktoituu pallomaiseksi aaltolähteeksi. Taipuminen riippuu aallonpituudesta, esimerkiksi radioaalto taipuu enemmän kuin valo. (4, s. 62–63) (8, s. 47)

3.5 Sähkömagneettisen säteilyn eri muodot

Sähkömagneettista säteilyä on monenlaista. Tutuin näistä meille on valo, sillä se on ihmissilmille näkyvää. Näkyvä valo on kuitenkin vain pienen pieni osa sähkömagneettista spektriä. Spektrin eri osat jaotellaan yleensä taajuuden tai aallonpituuden mukaan, ja eri osilla on eri käyttökohteet. Joissain tapauksissa spektrin eri osat ovat hieman päällekkäin. Taajuuden mukaan pienemmästä suurempaan jaoteltuna järjestys on seuraava: radioaallot, infrapunasäteily, näkyvä valo, ultraviolettisäteily (UV), röntgensäteily ja gammasäteily. Säteilysfysiikka on kaikissa ryhmissä sama, vain taajuus ja aallonpituus muuttuvat.



Kuva 2 Radiotaajuusspektrin jaottelu (8, s. 39)

3.5.1 Radioaallot

Radioaalloiksi lasketaan sähkömagneettisen säteilyn taajuudet 30 Hz – 300 GHz. Aallonpituutena tämä on noin 1 mm – 10 000 km. Siihen sisältyy siis myös mikroaallot, vaikka usein ne mainitaan omana joukkonaan. (4, s. 68) Radioaallot jaetaan vielä tarkemmin kuvan 2 mukaisesti.

Radioaaltojen tärkein sovelluskohde on tietoliikenne, kuten matkapuhelinverkot ja yleisradioliikenne.

Mikroaaltoihin luetaan yleensä kuuluvaksi radioaaltojen taajuudet 1 GHz – 300 GHz, aallonpituutena 0,1 cm – 30 cm, mutta rajat vaihtelevat. Tutuin esimerkki mikroaaltojen hyödyntämisestä on ruoan lämmitys mikroaaltouunissa. Muita käyttökohteita ovat esimerkiksi satelliittikommunikaatio, tutkat ja suuri osa maanpäällisestä radiotietoliikenteestä.

Millimetriaallot kattavat taajuusalueen 30–300 GHz, eli 1–10 mm. (4, s. 69)

3.5.2 Infrapunasäteily

Infrapunasäteilyn taajuusalue on 300 GHz – 400 THz ja aallonpituus noin 750 nm – 1 mm. Infrapuna on lämpösäteilyä ja kaikki kappaleet säteilevät sitä jonkin verran, riippuen kappaleen lämpötilasta. Koska ihmisen iho aistii infrapunasäteilyn lämpönä niin sitä hyödynnetään esimerkiksi lämmityslaitteissa. Infrapunasäteilyä käytetään myös lämpökameroissa, pimeänäkölaitteissa ja monissa kaukosäätimissä. (4, s. 71)

3.5.3 Näkyvä valo

Näkyvän valon taajuusalue on 400 THz – 800 THz. Yleensä näkyvän valon alueella käytetään taajuuden sijasta aallonpituutta, joka on noin 375–750 nm. Tietty aallonpituus vastaa tiettyä väriä, mutta esimerkiksi auringosta tuleva valo on ”valkoista”, eli sisältää kaikkia näkyvän valon aallonpituuksia. Näkyvän valon spektriä hyödynnetään esimerkiksi sykkeen sekä veren happipitoisuuden mittaamiseen ja tiedonvälitykseen valokuitukaapeleissa.

3.5.4 Ultraviolettisäteily

Ultraviolettisäteilyn (UV) taajuusalue on noin 800 THz – 3 PHz, aallonpituus 100–375 nm. Ultraviolettisäteily muun muassa lämmittää, aiheuttaa geenivaurioita sekä vanhentaa ja haurastuttaa monia materiaaleja, esimerkiksi ihoa. Ultraviolettisäteilyä hyödynnetään esimerkiksi liimojen kovettamisessa sekä juomaveden ja sairaalavälineiden puhdistuksessa. (4, s. 71)

3.5.5 Röntgensäteily

Röntgensäteilyn taajuusalue on 30 PHz – 30 EHz, aallonpituus 0,01–10 nm. Röntgensäteilyn hyödyntäminen on varmasti tutuin lääketieteellisestä kuvantamisesta, mutta sitä käytetään myös esimerkiksi metallirakenteiden laadunvarmistuksessa, turvatarkastuksissa ja elintarvikkeiden laadunvalvonnassa. Röntgensäteily on ionisoivaa, eli syöpää aiheuttavaa. (4, s. 71)

3.5.6 Gammasäteily

Gammasäteilyn taajuusalue on 30 exahertsistä ylöspäin ja aallonpituus 10 pikometristä alaspäin. Se on kaikkein suurienergistä sähkömagneettista säteilyä. Röntgensäteilyn tapaan gammasäteily on vaarallista eläville soluille. Sitä käytetään muun muassa metalliesineiden läpivalaisuun. (4, s. 71)

4 ANTENNI

Antenneja on hyvin monen kokoisia, näköisiä ja moneen eri tarkoitukseen tehtyjä, pienestä sormuksen antennista aina suuriin radioteleskooppiiryhmiin. Antennien käyttötarkoitus ja taajuusalue vaikuttaa siihen, millainen antennin täytyy rakenteeltaan olla. Yleisimmät antennityypit ovat monopoli-, dipoli-, yagi-, peili- ja mikroliuska-antennit. Yhteistä kaikille antennille on kuitenkin se, että niillä vastaanotetaan ja lähetetään sähkömagneettisia aaltoja. Tässä kappaleessa käydään läpi hieman antennin peruskäsitteistöä.

4.1 Resiprookkisuus

Antennien yhteydessä resiprookkisuudella eli vastavuoroisuudella tarkoitetaan kykyä vastaanottaa ja lähettää radioaaltoja samalla antennilla. Antennin ominaisuudet, kuten suuntakuvio, vahvistus ja polarisaatio, ovat siis samat molempiin suuntiin. Jos antennissa on komponentteja, kuten vahvistimia tai ferriittejä, se on silloin epäresiprookkinen. (9, s. 159)

4.2 Lähi- ja kaukokentät

Antennin ympärillä olevassa tilassa säteilyn ominaisuudet eivät ole kaikkialla samanlaiset, vaan muuttuvat vähitellen etäännyttäessä antennista. Tila voidaan ajatella jakautuvan kolmeen osaan, reaktiiviseen lähikenttään, säteilevään lähikenttään ja kaukokenttään, vaikkakaan tarkkoja rajoja ei voida määrittää.

Reaktiivisella lähikentällä tarkoitetaan välittömästi antennista alkavaa aluetta yleensä noin $0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ asti. Bluetooth taajuudella (2.4 GHz) aallonpituus λ on noin 12,5 cm, ja tämän alueen etäisyys antennista on noin 2 cm, jos antennin säteilevän elementin mitta (D) on 5 cm. Erittäin lyhyelle dipolille tämä etäisyys on $\lambda/2\pi$. Tällä alueella kyseessä ei vielä ole etenevä sähkömagneettinen aalto, vaan sähkö- ja magneettikentät syntyvät suoraan antennielementin vaikutuksesta ja ne voivat kytkeytyä suoraan kentän alueella. Kytkeytyminen voi olla kapasitiivista (sähkökenttä) tai induktiivista (magneettikenttä). Säteilyn vuorovaikutus väliaineen kanssa saa

energian taipumaan takaisin antennia syöttävään lähteeseen. Esimerkiksi kosketusnäytöissä hyödynnetään tätä kapasitiivista vaikutusta. Muuntajassa tapahtuva magneettinen induktio on myös reaktiivisen lähikentän sähkömagneettista vuorovaikutusta, siinä energia kytkeytyy kelalta toiselle muuntumatta välissä sähkömagneettiseksi säteilyksi.

Säteilevällä lähikentällä eli Fresnelin alueella tarkoitetaan noin $0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ alkavaa aluetta $\frac{2D^2}{\lambda}$ asti.

Yllä olevien arvojen mukaan laskettuna säteilevä lähikenttä olisi antennista noin 2–4 cm välisellä alueella. Tällä alueella kaikki energia ei enää kytkeydy suoraan säteilylähteestä kohteeseen, vaan osa muodostuu sähkömagneettiseksi aalloksi, joka kuitenkin poikkeaa merkittävästi vapaassa tilassa etenevästä aallosta, sillä sähkö- ja magneettikentät eivät ole kohtisuorassa toisiaan vastaan.

Lähikentässä sähkö- ja magneettikenttien suuntia ja voimakkuuksia voidaan mitata spektrianalysaattorilla, käyttäen erityisiä mittavälineitä.

Lähikentästä kaukokenttään siirryttäessä on alue, jota kutsutaan siirtymävyöhykkeeksi (transition zone). Tällä alueella erivoimakkuuksiset ja erillään olleet sähkö- ja magneettikentät yhdistyvät sähkömagneettiseksi aalloksi. Lineaarisen antennin sähkökenttään yhdistyy magneettikenttä ja silmukka-antennin magneettikenttään sähkökenttä. Sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksien suhde etenevässä sähkömagneettisessa aallossa riippuvat sen väliaineen ominaisimpedanssista, jossa aalto etenee.

Kaukokentän eli Fraunhoferin alueen ajatellaan alkavan etäisyydestä $\frac{2D^2}{\lambda}$, eli tässä tapauksessa 4 cm eteenpäin. Kaukokenttä on alue, jossa yleensä tapahtuu antennin mittaaminen ja toiminnallisuuden todentaminen, sillä sähkökenttä ja magneettikenttä ovat muotoutuneet sähkömagneettiseksi kentäksi ja ne tuottavat etenevän sähkömagneettisen aallon. Alueella säteilyominaisuuteen ei juuri vaikuta etäisyys ja sähkömagneettinen kenttä pienenee kääntäen verrannollisesti etäisyyteen $\frac{1}{r}$, ja teho $\frac{1}{r^2}$. Mittaaminen tällä alueella kertoo laitteen mahdollisista muista laitteita kohtaan aiheuttavista häiriöistä. (9. s. 159–160) (10, s. 34-36)

4.3 Suuntakuvio

Antennin suuntakuvio (tai säteilykuvio) kuvaa alaa, jolle antenni säteilee tai josta vastaanottaa. Suuntakuvio kertoo, kuinka tehokkaasti antenni säteilee mihinkin suuntaan eli tehotiheyden tai kentänvoimakkuuden kulmariippuvuutta. Tehontiheydellä kuvataan, kuinka paljon säteilytehoa tiettyä aluetta kohti tulee. Yleensä suuntakuvio on resiprookkinen, eli vastaanotto tapahtuu samoista suunnista samoilla vahvistuksilla kuin lähetyskin. (9, s. 160)

Isotrooppinen antenni on sellainen, joka säteilee joka suuntaan yhtä voimakkaasti eli täydellisen pyöreä pallo. Se on teoreettinen ja sitä käytetäänkin vain verrokkina. Isotrooppisen antennin vahvistus on 0 dBi. Yksikkönä on dBi eli desibeliä suhteessa isotrooppiseen anteeniin. Antennivahvistus siis kertoo, kuinka paljon antenni säteilee pääkeilan suuntaan verrattuna isotrooppiseen anteeniin. Pääkeila on se suunta, johon on suurin antennivahvistus, ja sivukeilat ovat heikompia maksimeja. (9, s. 160–162)

Lähimpänä isotrooppista antennia on ympärisäteilevä antenni, joka säteilee kaikkialle muualle paitsi suoraan antennin z-akselin suuntaan. Sen antennivahvistus on tavallisesti muutamia desibelejä suhteessa isotrooppiseen anteeniin.

Yagi-antenni on taas hyvin vahvasti suuntaava ja siitä on yleensä havaittavissa selkeästi pääkeilat ja sivukeilat. Yagi-antennilla vahvistus on tyypillisesti 12 dBi. (4, s. 140–141)

4.4 Hyötysuhde

Hyötysuhde kertoo, kuinka paljon syötetystä tehosta säteilee antennista ulos. Isotrooppisen antennin hyötysuhde on 100 %. Reaalimaailman antennilla tähän ei päästä muun muassa metallipintojen tai dielektristen aineiden häviöiden takia. Jos hyötysuhde on esimerkiksi 50 %, 50 % tehosta muuttuu muun muassa kaapeleiden lämmöksi. Tässä tapauksessa, jos suuntaavuus on 12 dBd ja hyötysuhde sama kuin yllä (50 % häviö on -3 dB), vahvistus on $12 \text{ dBd} - 3 \text{ dB} = 9 \text{ dBd}$. (9, s. 162) (11, s. 5)

4.5 Säteilyresistanssi ja impedanssi

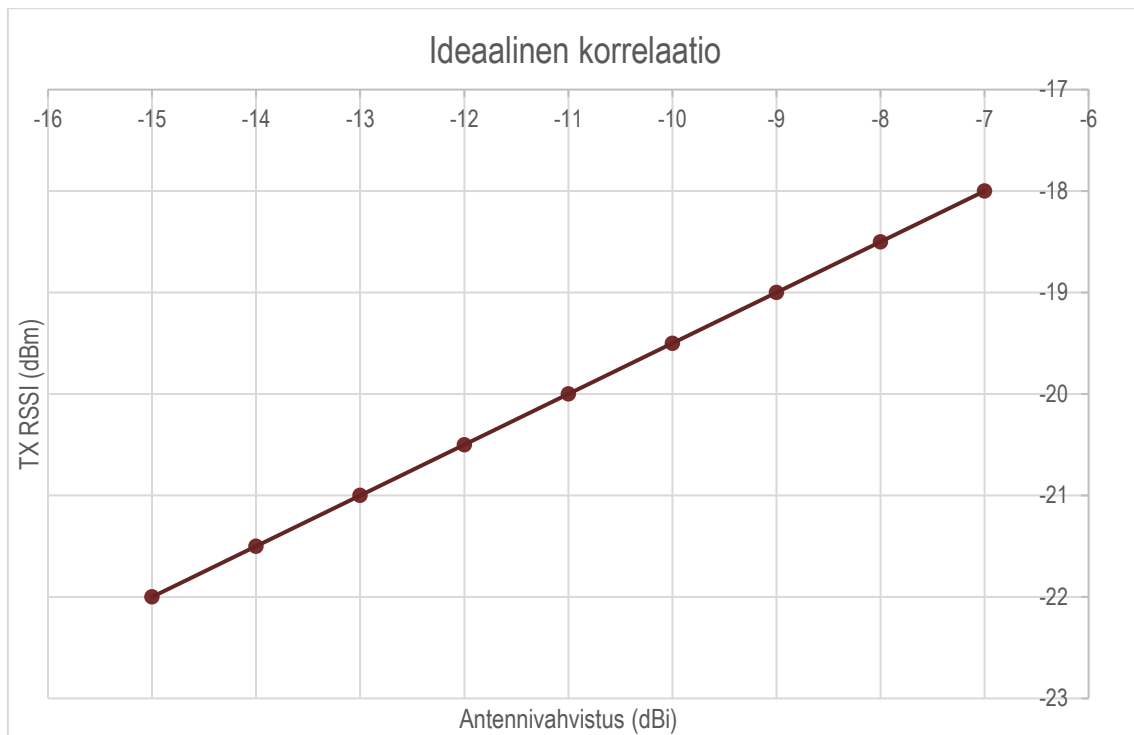
Säteilyresistanssi kuvaa, millaisena kuormana antenni näyttäytyy sitä syöttävään lähettimeen. Antenni näyttää resistiiviseltä, koska se säteilee tehoa pois. (9, s. 163–164). Säteilyresistanssin lisäksi lähetinvastaanotin näkee myös antennin häviöt, eli kokonaisresistanssi koostuu näistä kahdesta osasta.

Antennin sovittaminen on merkittävässä osassa antennin toimintaa. Tavoitteena on, että antennin impedanssi on mahdollisimman lähellä lähetinvastaanotin -komponentin impedanssia, joka yleensä on 50Ω (ohmia). Impedanssi on piirissä kulkevan sähkövirran aiheuttamaa vastusta. Jos impedanssit eroavat toisistaan, osa tehosta heijastuu takaisin ja näin hyötysuhde kärsii. (11, s. 2) Kapealle taajuuskaistalle tämä impedanssien erotus sovitetaan sovituskomponenteilla, jotka yleensä ovat keloja ja kondensaattoreita. Laajalla taajuusalueella ja varsinkin matalilla taajuuksilla käytetään myös esimerkiksi radiotaajuusmuuntajia.

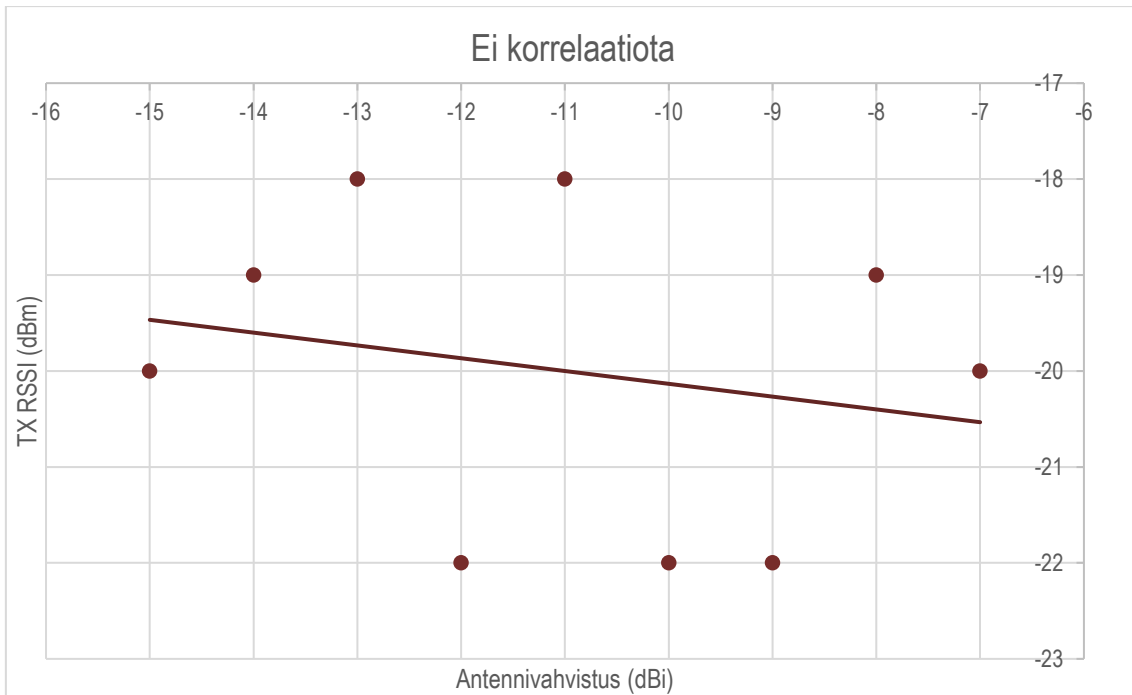
5 MITTAUKSET JA TULOKSET

5.1 Testerin ja kammion korrelaatio

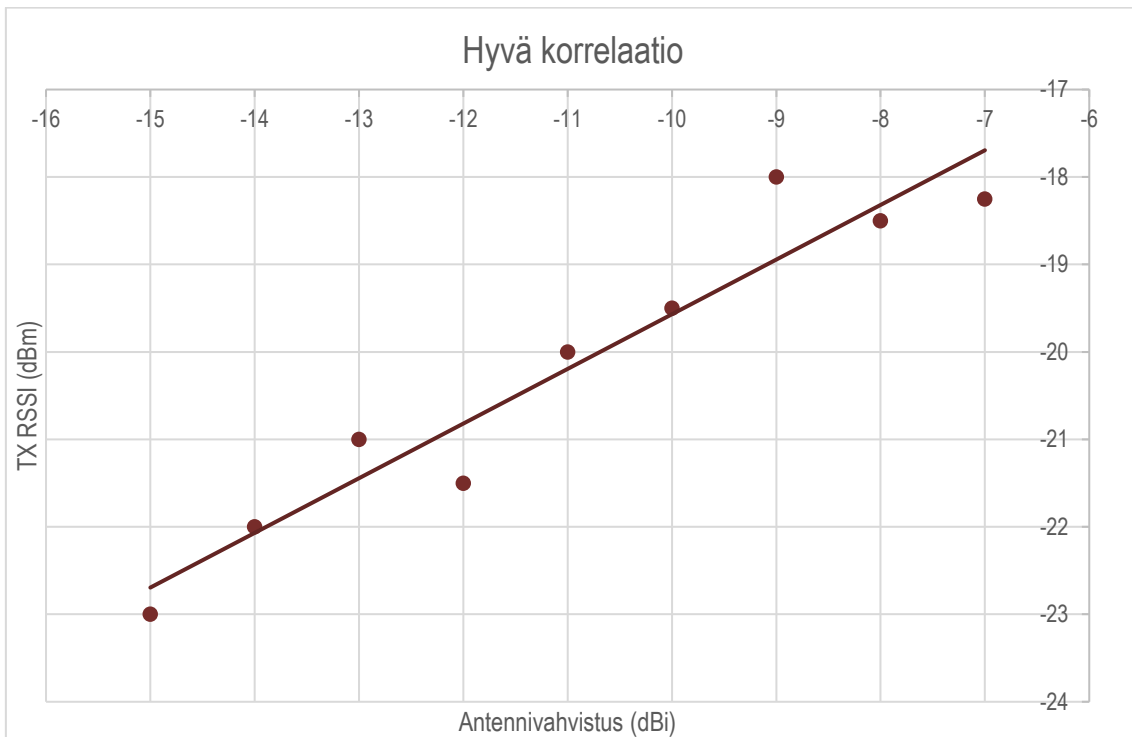
Tässä tutkitaan, kuinka hyvin mittakammiossa mitattu antennivahvistus korreloi testerissä tehdyn TX RSSI -mittauksen kanssa. Korrelaatio olisi ideaalinen (kuva 3) silloin, kun antennivahvistus on ennustettavissa mitatun RSSI:n perusteella. Esimerkiksi vahvistuksen parantuessa myös RSSI-arvo paranisi. Korrelaatio on kuitenkin harvoin ideaalinen, joten olennaista on kuitenkin se, että antennivahvistus ja RSSI-arvo noudattaisivat samaa linjaa (kuva 5).



Kuva 3 Ideaallinen korrelaatio, kaavio tehty vain havainnollistamista varten



Kuva 4 Korrelaatiota ei ole havaittavissa, kaavio tehty vain havainnollistamista varten



Kuva 5 Realistinen korrelaatio, kaavio tehty vain havainnollistamista varten

Korrelaatio mittaustuloksissa testerin ja kammion välillä ei yleisesti ollut hyvä, johtuen tiettyjen varianttien muuttuneesta mekaniikasta testerin suhteen. Joissain varianteissa korrelaatiota

kuitenkin hieman löytyi. Tässä variantilla tarkoitetaan tietynlaista mittasarjaa, jossa sormukset ovat samanlaisia, eli ei vain yhtä sormusta. Toimeksiantajan pyynnöstä kuvaajia korrelaatioista ei voitu lisätä opinnäytetyöhön, joten tässä käydään eri varianttien korrelaatiot läpi sanallisesti. Kuvaajat löytyvät liitteinä toimeksiantajalta.

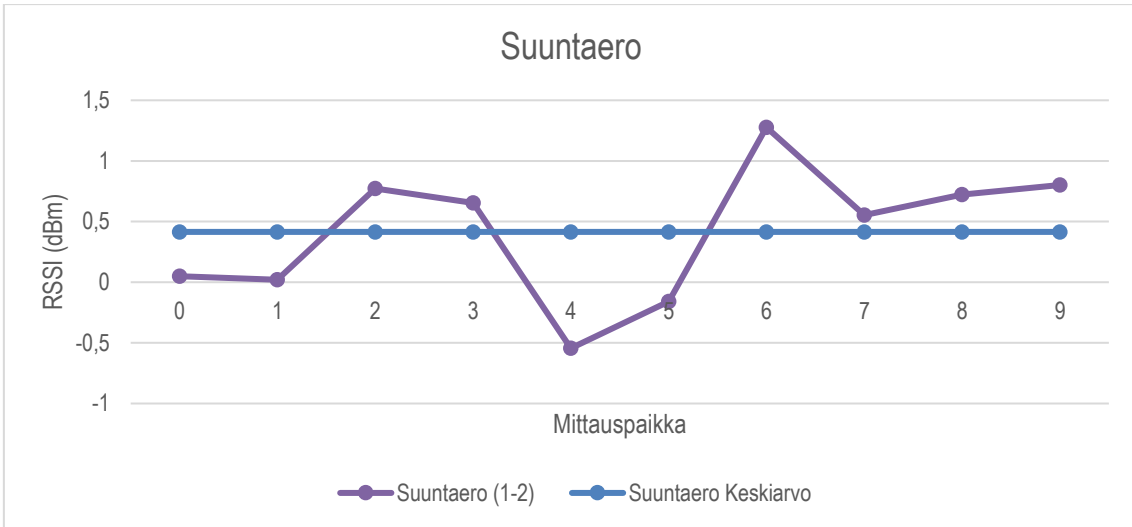
Korrelaatio varianteissa A, G, H, I, J ja L oli lähes vaakasuora, eli antennivahvistuksen kasvaessa RSSI-arvo pysyi keskimäärin samana. Variantissa B korrelaatio laski alaspäin, eli antennivahvistuksen kasvaessa RSSI-arvo keskimäärin laski. Varianteissa D ja F löytyi lievää RSSI-arvon paranemista antennivahvistuksen kasvaessa. Selkeä korrelaatio löytyi varianteissa C ja E. Antennivahvistuksen kasvaessa RSSI-arvo parani selvästi ja aika lineaarisesti.

Sormuksen suunnalla ei ollut suurta merkitystä, iso osa tuloksista asettuikin päällekkäin. Suuntaeroista lisää kappaleessa 5.2.

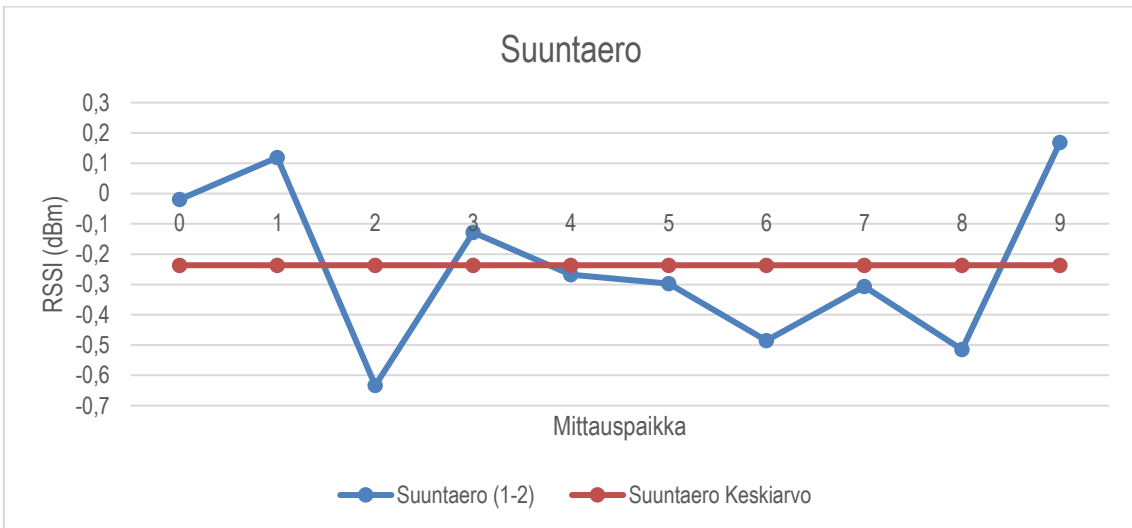
5.2 Suuntaerot

Sormus on mahdollista mitata testerissä kahdelta eri puolelta ja tässä tutkittiin, onko näiden kahden mittaustavan välillä eroja. Tutkimus tehtiin vertailemalla molemmilta puolilta saatuja TX RSSI tuloksia keskenään.

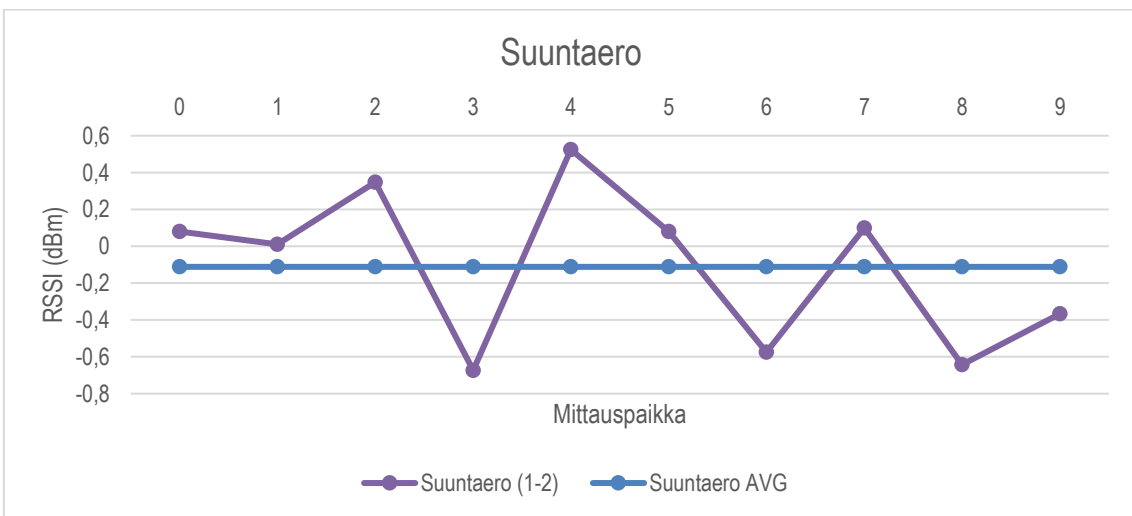
Suuntaerot olivat hyvin sormuskohtaisia, eivätkä näyttäneet riippuvan mittauspaikasta. Keskiarvallisesti suuntaerot olivat aika pieniä, joten ei ole väliä kummin päin sormuksen asettaa testeriin.



Kuva 6 Variantti B



Kuva 7 Variantti C

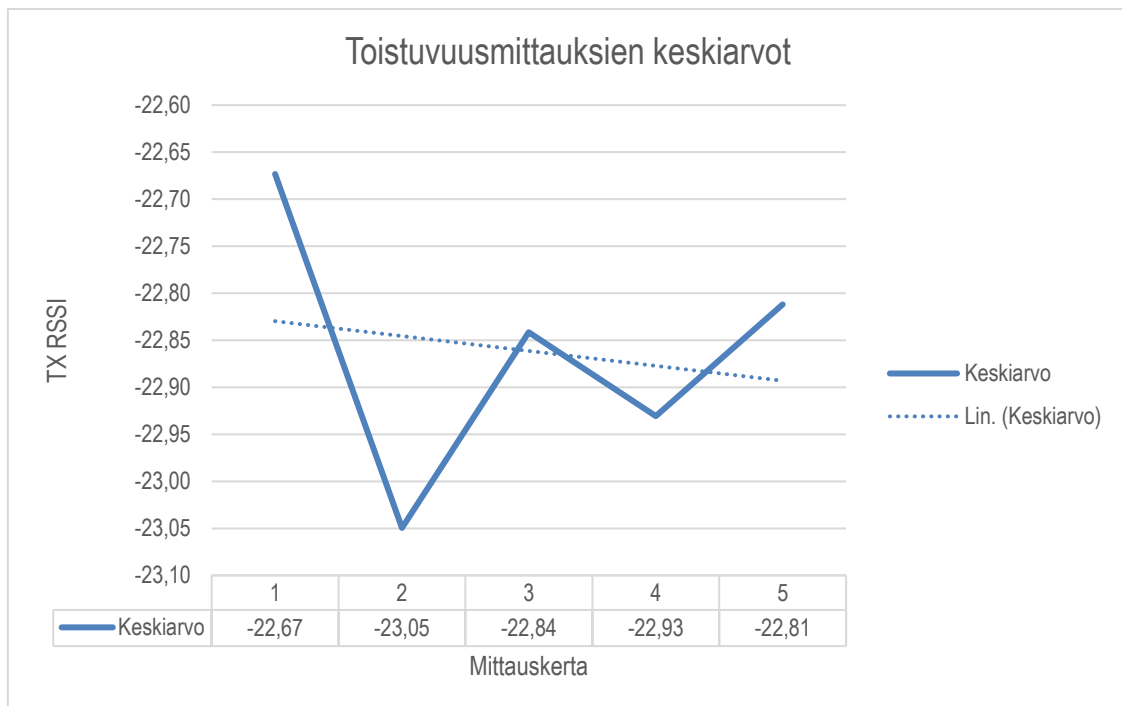


Kuva 8 Variantti D

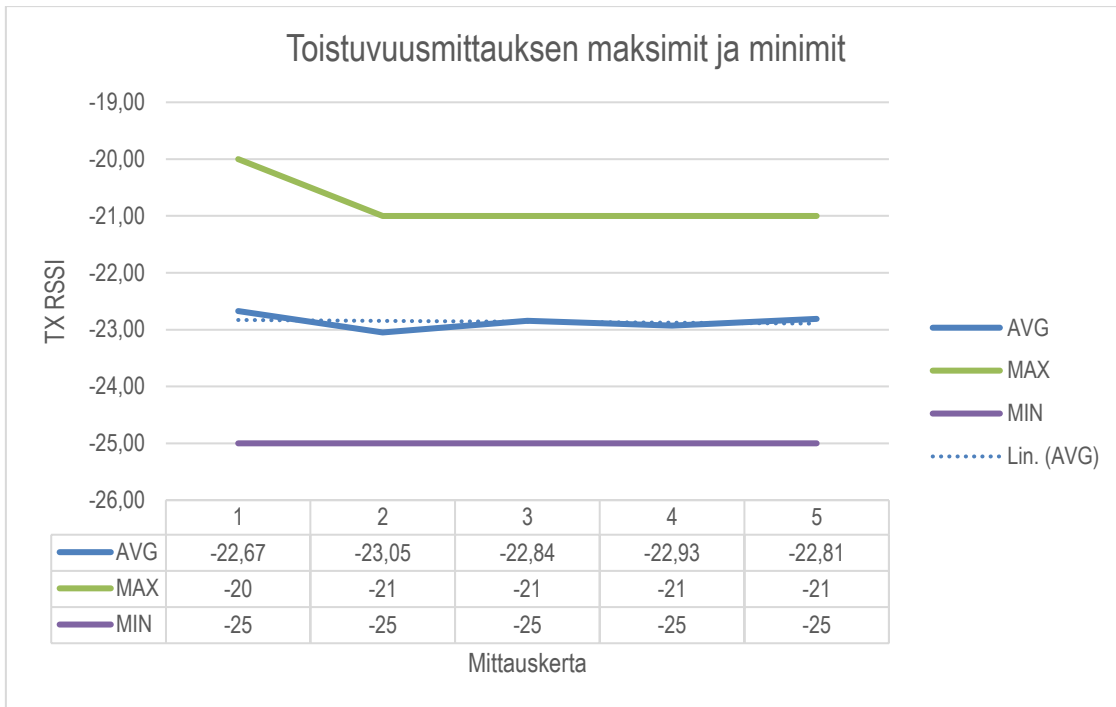
5.3 Tulosten vaihtelevuus samalla paikalla

Tällä testillä havainnointiin testerin mittaustuloksien vaihtelevuutta. Sama sormus mitattiin viisi kertaa peräkkäin samalla paikalla (mittauspaikka 0) samoin päin 10 minuutin aikana. Mittauksia tehtiin 100 kpl per kerta, ja niiden TX arvoista otettiin keskiarvo.

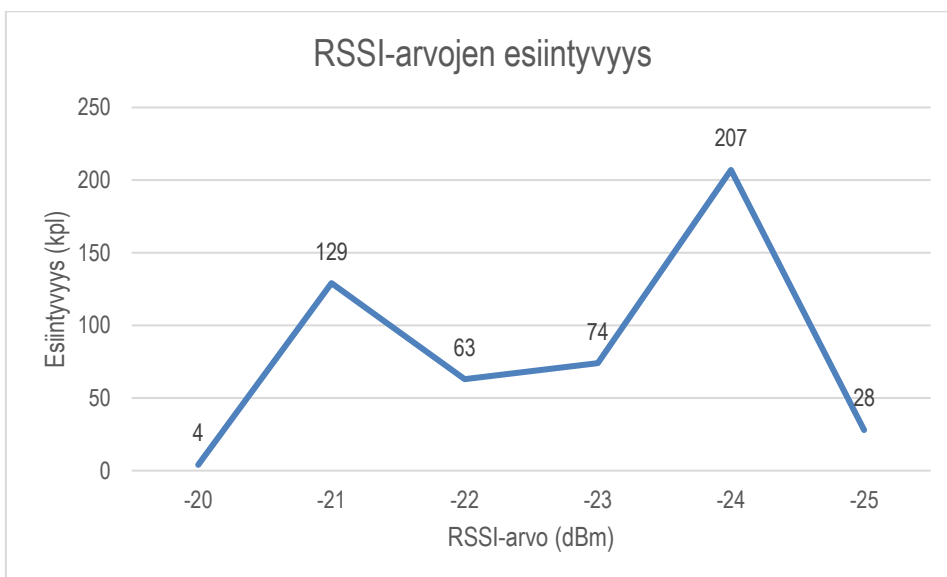
Keskiarvomittaustuloksissa (kuva 9) ei esiinny kovin merkittävää eroa, suurimmillaan alle 0,4 dB. Maksimin ja minimin (kuva 10) ero on suurimmillaan 5 dB, mikä ei kuitenkaan ole huolestuttavaa, sillä määrällisesti vain muutamat tulokset ovat minimissä ja maksimissa (kuva 11). Eli käytännössä ero on 3 dB.



Kuva 9 Kuvaaja mittauskertojen keskiarvoista



Kuva 10 Kuvaaja mittauskertojen maksimeista ja minimeistä

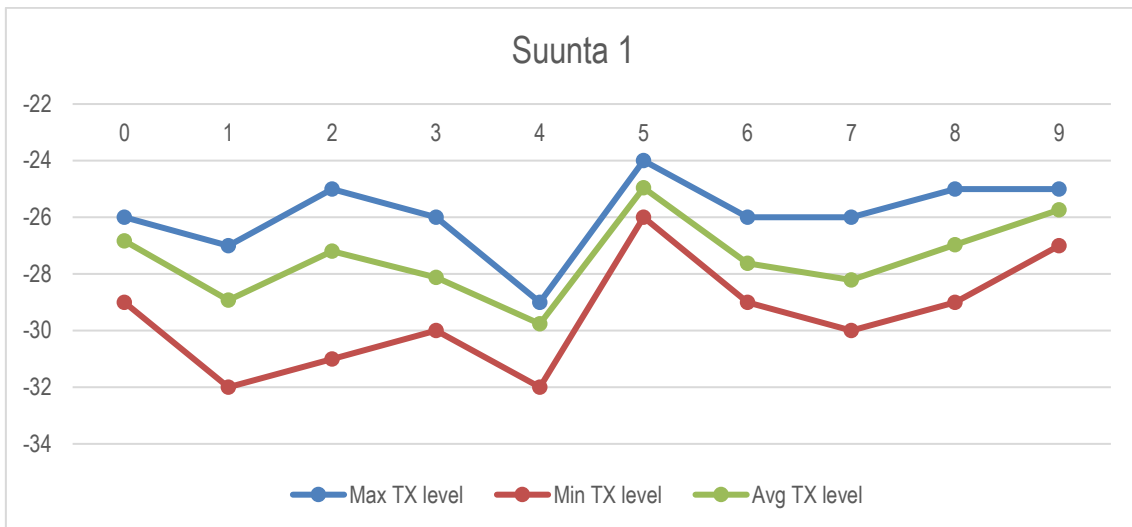


Kuva 11 Kuvaajassa kunkin RSSI-arvon esiintyvyyssmäärät toistuvuusmittauksissa

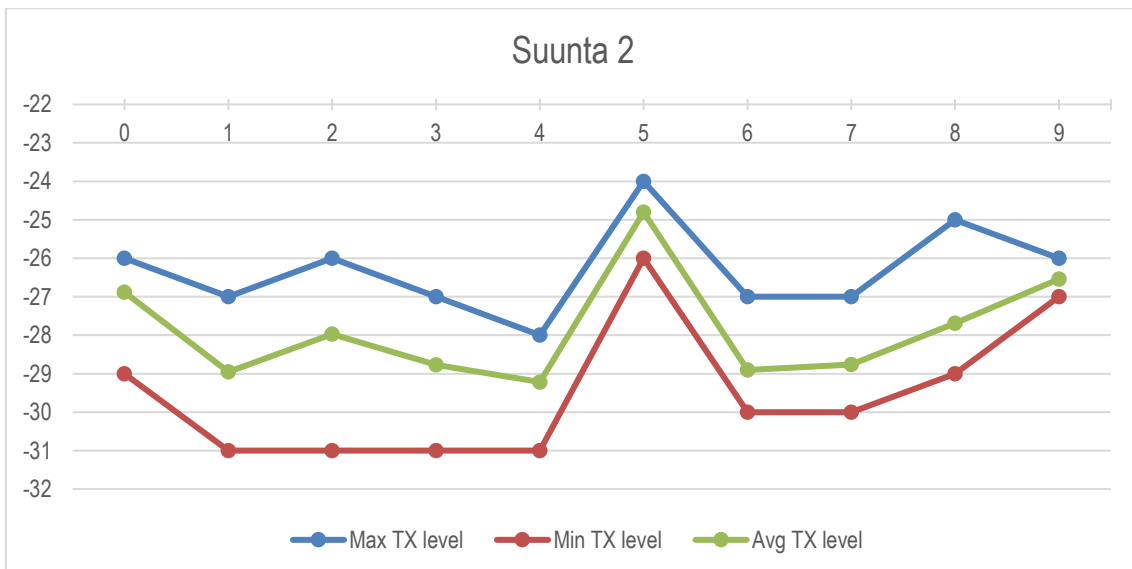
5.4 Paikkaerot

Tämä testi kertoo, kuinka paljon mittauspaikkojen väliset tulokset eroavat toisistaan. Samaa sormusta mitattiin jokaisella paikalla 100 kertaa molemmin päin.

Sama sormusvariantti mitattu joka paikalla molemmin päin (kuvat 12 ja 13). Mahdollisia syitä tulosten vaihtelevuudelle on useita, muun muassa testerin lähikenttäilmaisimen paikoitus, kaikille ilmaisimille sama antennisovitus sekä RSSI:n raportoinnin tarkkuus, joka oli mittalaitteessamme 1 dB. Tämä aiheuttaa pyöristämisvirhettä.



Kuva 12 Mittauspaikkojen väliset TX-arvojen eroavaisuudet suunnassa 1



Kuva 13 Mittauspaikkojen väliset TX-arvojen eroavaisuudet suunnassa 2

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia korrelaatiota antennimittauksissa tuotantotesterin ja laboratorioissa olevan kaiuttoman mittakammion välillä sekä varmentaa sormuksen toimivuus. Opinnäytetyö koostui teoriaosuudesta ja käytännön osuudesta. Teoriaosuudessa käsiteltiin sähkömagnetismin perusteita. Käytännön osuudessa mitattiin sormuksia tuotantotesterillä ja mittakammiolla eri variaatioin, koostettiin tästä saatua dataa ja vertailtiin korrelaatiota. Tavoitteena oli myös tutkia, onko testerillä mahdollista havaita erilaisia valmistusvirheitä, mutta tätä ei ehditty tehdä työpaikan vaihtumisen vuoksi.

Korrelaatiota tuotantotesterin ja mittakammion välisistä tuloksista löytyi muutamissa varianteissa selkeästi, osassa heikohkosti ja muutamissa ei lainkaan. Tarkempia tuloksia ei tuotesalaisuuden vuoksi voi esittää tässä työssä, mutta jokaisesta variaatiosta laadittiin korrelaatiokuvaaja.

Laadukkaampia tuloksia voitaisiin saada lisäämällä elektronista vaihtelua mittauksessa käytettäviin variantteihin. Antennivahvistusmittauksessa käytettyjen sormusten dBi -arvojen vaihteluväli oli pieni, joten korrelaatio ei tullut niin selkeästi ilmi. Mittauksissa olisi pitänyt olla mukana myös joitain erityisen huonoja ja hyviä yksilöitä, jotta olisi voitu varmistaa testerin herkkyys äärituloksille.

Toinen kehityskohde olisi testerin RSSI-arvon laskenta, jonka laskentatapa vähensi tuloksissa havaittuja vaihteluita. Myös mittalaitteen RSSI-arvon tarkkuutta tulisi parantaa nykyisestä, joka on 1 dB, sillä siinä tulokseen vaikuttaa liikaa pyöristäminen lähimpään kokonaislukuun.

Kolmas kehityskohde olisi mekaanisten variaatioiden (esimerkiksi koko, materiaali, pinnoitus tai rakenne) minimointi mittasarjassa. Tulosten vertailtavuuden kannalta olisi ollut hyvä, että kaikki variantit olisivat mekaanisesti samanlaisia, mutta mahdollisesti elektroniikan osalta erilaisia. Testerin täytyisi olla myös aina yhteensopiva jokaisen mekaanisen variaation kanssa, joka aiheuttaa haasteita, kun esimerkiksi eri sormusvariantteja on niin monta. Myös testerin eri paikkojen mekaanista eroavaisuutta täytyy tutkia lisää ja korjata mahdolliset poikkeamat, muun muassa kompensoimalla absoluuttivirhe pois mittapaikkojen väliltä.

7 LÄHTEET

- (1) Oura Health Oy. Luettavissa: <https://ouraring.com/fi/about-us>. Luettu: 16.2.2024.
- (2) Finder. Luettavissa: <https://www.finder.fi/Tuotekehitys+tutkimus+ja+suunnittelupalvelut/Oura+Health+Oy/Oulu/yhteystiedot/2792854>. Luettu: 16.2.2024.
- (3) Oura Health Oy, "Koe kokonaisvaltainen Oura". Luettavissa: <https://ouraring.com/fi/oura-experience>. Luettu: 16.2.2024.
- (4) A. Lehto, Radioaaltojen maailma, Helsinki: Otatieto, 2006.
- (5) Openstax, "Key Equations". Luettavissa: <https://openstax.org/books/physics/pages/18-key-equations>. Luettu: 1.3.2024.
- (6) Tuiton Physics, "Electromagnetic Waves: Definition, Applications & Concepts" 2020. Luettavissa: <https://tuitonphysics.com/oct-2020/electromagnetic-waves-definition-applications-concepts>. Luettu 16.2.2024.
- (7) NASA, "The Electromagnetic Spectrum," 2024. Luettavissa: <https://science.nasa.gov/ems/>. Luettu: 16.2.2024.
- (8) J. Kosola ja T. Solante, Digitaalinen taistelukenttä, Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos, 2013.
- (9) A. Lehto ja A. Räisänen, Radiotekniikan perusteet, Helsinki: Otatieto, 2003.
- (10) C. A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, Hoboken: John Wiley & Sons. Inc. , 2005.
- (11) T. Kellomäki. Luettavissa: <https://oh3tr.fi/suomi/kurssi/antennit-handout.pdf>. Luettu: 31.8.2024.
- (12) Maxwell Equations. 2012. Luettavissa: <https://maxwells-equations.com/>. Luettu: 31.8.2024].