

Jussi Glad

Referenssiantennien suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

insinööri (amk)

sähkötekniikka / elektroniikka

insinöörityö

25.11.2014

| | |
|--|--|
| Tekijä Otsikko | Jussi Glad Referenssiantennien suunnittelu ja toteutus |
| Sivumäärä Aika | 32 sivua + 1 liite 25.11.2014 |
| Tutkinto | insinööri (amk) |
| Koulutusohjelma | sähkötekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | elektroniikka |
| Ohjaaja | yliopettaja Matti Fischer |
| <p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa kahdet erityyppiset antennit kahdelle eri taajuudelle. Antennien on tarkoitus toimia referenssiantenneina automatisoidussa antennien säteilysuuntakuvion mittausjärjestelmässä radiokaiuttomassa tilassa. Antennien on tarkoitus toimia em. järjestelmässä opetus- ja mittauskäytössä.</p> <p>Käytännön työssä opiskeltiin antennien valmistusta ja niiden käyttäytymistä eri parametrien muuttuessa. Tässä työssä on esitetty antennien perustietoja sekä suunnittelu-, valmistus- ja mittausmenetelmiä. Työtä tehtäessä on otettu huomioon materiaalikustannukset.</p> <p>Käytännön työssä onnistuttiin hyvin, vaikka yhtä antennia ei pystytty valmistamaan. Kaikkia antennia valmistettiin kaksi kappaletta, jotta ne pystyttäisiin mittaamaan luotettavasti ja jotta ne voisivat toimia antenniparina mitattaessa.</p> | |
| Avainsanat | antenni, maatasoantenni, neljännesaaltomonopoli, mikroliuskajohto, mikroliuska-antenni, antennimittaus |

| | |
|---|--|
| Author Title | Jussi Glad Design and Production of Reference Antennas |
| Number of Pages Date | 32 pages + 1 appendice 25 November 2014 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Electrical Engineering |
| Specialisation option | Electronics |
| Instructor | Matti Fischer, Principal Lecturer |
| <p>The target of this thesis was to design and produce two different antennas for two different frequencies. The antennas were designed to act as reference antennas for an automated radiation pattern measuring system. Furthermore, the antennas were designed to be used for education and measuring purposes for that system.</p> <p>In the practical part of thesis many prototype antennas were produced and the behavior of antennas was studied as different parameters were changed. In this thesis, basic knowledge of antennas is introduced, as well as how to design, produce and measure them. In the making of this thesis, production and material costs have been taken into account.</p> <p>The production of the antennas was a success, even though one of the antenna pairs could not be produced, since it would have significantly increased the production costs. For every antenna that was produced, a second identical one was created, in order for them to be measured reliably and accurately and for them to be used as a pair for education and measurement reference.</p> | |
| Keywords | Antenna, groundplane antenna, microstrip antenna, microstrip line, antenna measurement, antenna design |

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Radioaallot | 1 |
| 3 | Mikroliuskajohto | 5 |
| 4 | Työssä käytetyt antennit | 6 |
| 4.1 | Maatasoantenni | 7 |
| 4.2 | Dipoliantenni | 8 |
| 4.3 | Mikroliuska-antenni | 9 |
| 5 | Antennien mitoitus | 11 |
| 5.1 | Maatasoantennin mitoitus | 11 |
| 5.2 | Mikroliuska-antennin mitoitus | 13 |
| 6 | Antennien valmistus | 16 |
| 6.1 | Maatasoantennin valmistus | 16 |
| 6.2 | Mikroliuska-antennin valmistus | 18 |
| 7 | Antennien sovituksen ja säteilysuuntakuvion mittaus | 19 |
| 8 | Lopullisten antennien mittaustulokset | 23 |
| 9 | Yhteenveto | 31 |
| | Lähteet | 32 |
| | Liitteet | |
| | Liite 1. Prototyyppiantennien mittauksia | |

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on suunnitella ja valmistaa kahdentyyppiset antennit kahdelle eri taajuudelle opetus- ja mittauskäyttöön. Työn tavoitteena on saada lopulta hyvät referenssiantennit valmiille järjestelmälle.

Metropolia Ammattikorkeakoululle on aiemmin tehty opinnäytetyönä automatisoitu antennien säteilysuuntakuvion mittaussysteemi. Tässä insinööriyössä on täydennetty em. systeemiä tuomalla referenssiantennit mittaus- ja opetuskäyttöön. Antennien mittaamisen ja tutkimisen ohella tuodaan esille huomioita sekä johtopäätöksiä kyseisistä antennityypeistä ja niiden käyttäytymisestä eri parametrien muuttuessa.

Tässä työssä perehdytään radiotekniikan välttämättömiin osa-alueisiin ja käytännön työssä käytettyjen antennien suunnitteluun, mitoittamiseen, mittaamiseen ja testaukseen. Teoriaosassa käydään läpi sähkömagneettisten aaltojen eteneminen tyhjiössä sekä radioaaltojen taajuusalueet ja työssä käytettyjen antennien teoriaa.

2 Radioaallot

Radioaallot ovat sähkömagneettisia aaltoja, joilla on aallonpituus, etenemisnopeus, polarisaatio ja taajuus. Sähkömagneettinen aalto muodostuu sähkö- ja magneettikentästä, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan sekä kohtisuorassa aallon etenemissuuntaan nähden. Sähkö- ja magneettikentän voimakkuudet vaihtelevat ajan ja paikan suhteen sinimuotoisesti.

Aallonpituus on se matka, jonka aalto etenee väliaineessa kerran itsensä toistaen. Aallonpituus ja taajuus ovat toistensa käänteislukuja, kuitenkin verrannollisia aallon etenemisnopeuteen väliaineessa. Tyhjiössä aallonpituus ratkeaa kaavalla:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

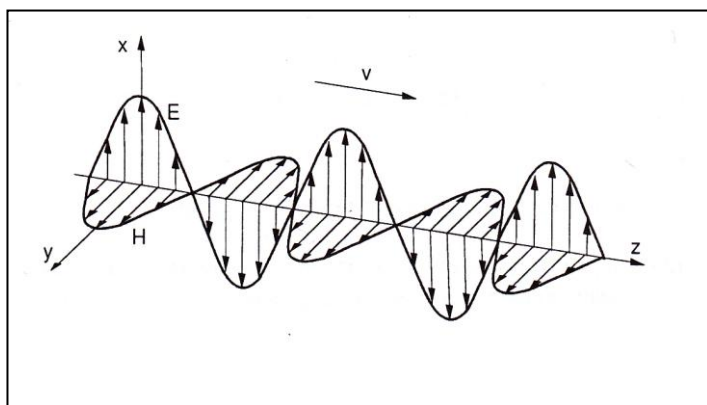
jossa λ on aallonpituus metreinä [m], $c \sim 2,99 \cdot 10^8$ m/s, eli valonnopeus tyhjiössä ja f aaltoliikkeen taajuus Hertseinä [Hz]. Aallonpituus kuitenkin vaihtelee väliaineesta

riippuen. Väliaineella tarkoitetaan ainetta, jossa sähkömagneettinen aalto etenee. Väliaineessa etenevän aallon pituus saadaan kaavasta:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2)$$

jossa λ_o on aallonpituus tyhjiössä ja ϵ_{reff} on väliaineesta riippuva tehollinen suhteellinen dielektrisyysvakio. (1, s. 52 - 56; 2, s. 300 - 317; 3, s. 174 - 188.)

Kuvassa 1 esitetään vektoreina sähkökentän voimakkuuden E vaihtelua x-akselin suuntaisesti sekä magneettikentän voimakkuuden H vaihtelua y-akselin suuntaisesti. Sähkömagneettinen aalto etenee z-akselin suuntaan. Vektorisuure v ilmaisee aaltoliikkeen etenemissuuntaa. (1, s. 25 - 26; 2, s. 307 - 313; 3, s. 334 - 341.)



Kuva 1. Sähkömagneettisen aallon eteneminen (1, s. 25)

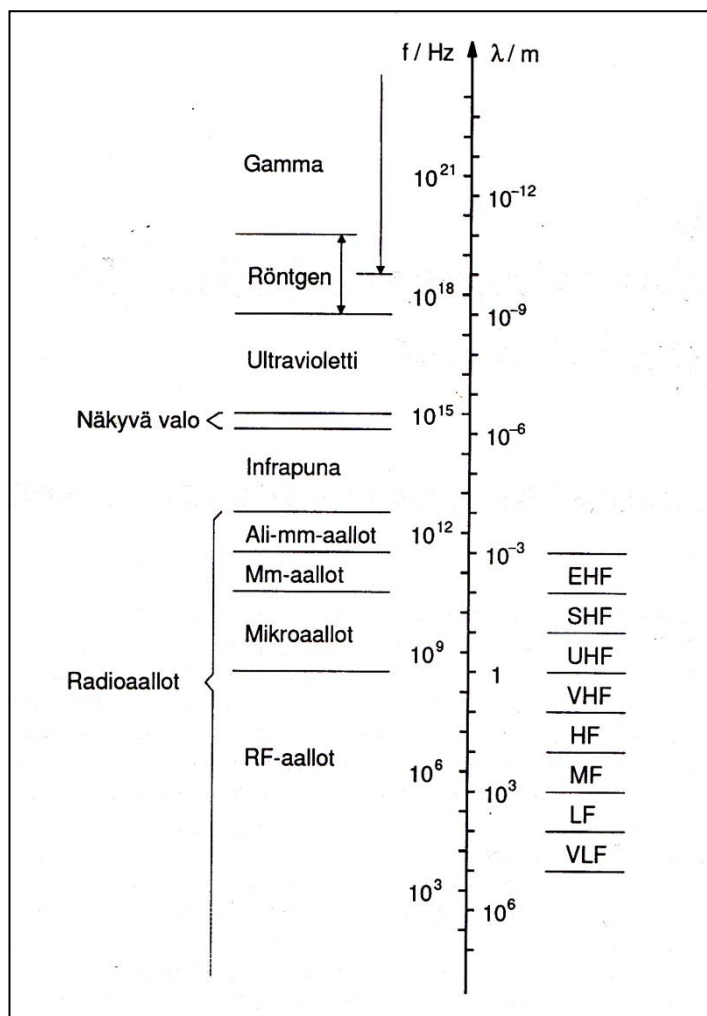
Sähkömagneettista säteilyä on maailmassa kaikilla mahdollisilla taajuuksilla. Radioaalloista puheen ollen oletetaan sähkömagneettisen säteilyn toimivan radioaalloille varatuilla taajuuskaistoilla.

Taulukko 1. Radiotaajuusalueet (1, s. 10)

| | | |
|-----|----------------------------|--------------|
| 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 |

Taulukossa 1 on esitetty tarkalleen rajatut radioaaltojen taajuusalueiden nimet.

Radioaalloista puhuttaessa tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä, jonka avulla siirretään tietoa tai dataa. Radiotekniikasta puhuttaessa on aina olemassa lähetin ja vastaanotin. Kuvassa 2 esitetään sähkömagneettisen säteilyn kansainvälisesti nimetyt taajuusalueet eli sähkömagneettinen spektri.



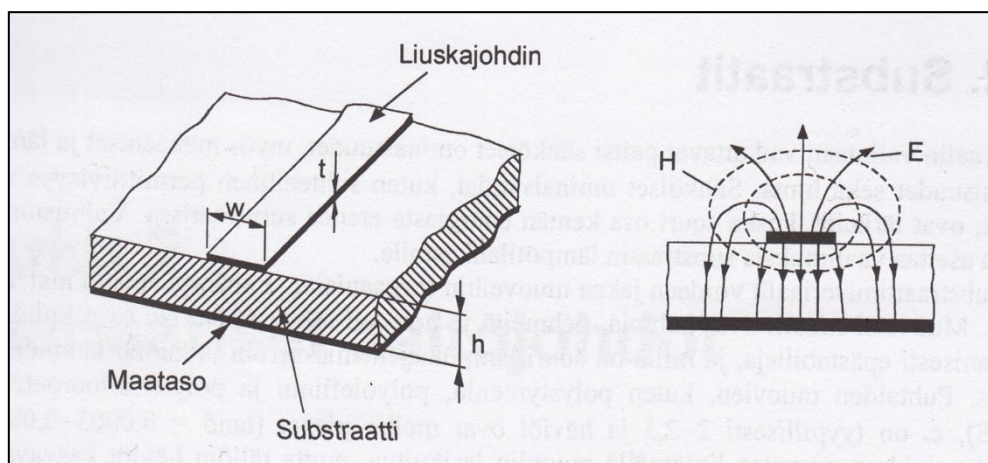
Kuva 2. Sähkömagneettinen spektri (1, s. 10)

Kuvassa 2 ilmenee myös taulukossa 1 ilmoitetut tiedonsiirrossa käytetyt radiotaajuusalueet. Tämän yleisesti käytetyn sähkömagneettisen spektrin mukaan radioaaltojen taajuudet yltyvät hieman yli terahertsiin, jossa aallonpituus on alle yhden millimetrin. (1, s. 10; 2, s. 313 - 317.)

3 Mikroliuskajohto

Mikroliuskajohto muodostuu liuskamaisesta johtimesta, substraatista ja maatasosta. Johtimessa kulkeva sähköinen signaali, joka vaihtelee ajan funktiona (eli sillä on taajuus), muodostaa etenemissuuntaan nähden poikittaiset sähkö- ja magneettikentät. Mikroliuskajohtimessa kulkevan ajan funktiona muuttuvan signaalin muodostamat sähkö- ja magneettikentät ovat kvasi-TEM -muotoisia aaltoja, sillä sähkömagneettiset kentät kulkevat osittain ilmassa ja osittain substraatissa. Kentät ovat lähes kokonaan johdon poikittaistason suuntaisia, mutta niillä on myös etenemissuuntainen komponentti. TEM-aaltomuotoisilla kentillä ei ole pitkittäistä eli etenemissuuntaista komponenttia. Täysin ilmaeristeinen aaltojohto kuljettaa TEM-aaltomuotoista signaalia.

Substraatilla tarkoitetaan mekaanista, eristävästä materiaalista valmistettua täyteainetta, jolla on sähkö- ja magneettikenttiin vaikuttavia ominaisuuksia. Tämä tarkoittaa, että substraattina käytetyllä aineella on suhteellinen dielektrisyysvakio, joka on tässä käytännön työssä käytetyllä FR4-tyyppisellä komposiittimateriaalilla $4,3 \pm 10\%$ ja sitä merkitään yleisesti ϵ_r :ksi. Mikroliuska-antenni on mikroliuskajohdon kaltainen, mutta antenni on suunniteltu säteilemään maksimiteholla kohtisuoraan johtimen tasoon nähden ja tästä syystä antennijohdin, eli säteilijä, on suurempi kuin siirtolinjoissa käytetty mikroliuskajohdin.



Kuva 3. Mikroliuskajohdon 3D-projisio sekä päätypoikkileikkaus (4, s. 18)

Kuvasta 3 ilmenee mikroliuskajohtimen rakenne. Kuvassa 3 w ilmoittaa liuskajohtimen leveyttä (engl. *width*), t liuskajohtimen paksuutta (engl. *thickness*) ja h substraatin paksuutta ja samalla johtimen korkeutta maatasoon nähden (engl. *height*).

Kuvan 3 poikkileikkauskuva esittää magneetti- ja sähkökentän käyttäytymistä.

Magneettikenttää kuvataan H:lla ja sähkökenttää E:llä. (1, s. 36 - 40; 2, s. 9 - 28; 4, s. 17 - 26.)

4 Työssä käytetyt antennit

Antennilla tarkoitetaan laitetta, jolla lähetetään ja vastaanotetaan radioaaltoja.

Antenneja on monenlaisia ja ne vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi tässä työssä käytettiin resiprookkisia antenneja, mikä tarkoittaa antennien ominaisuuksien olevan samat lähettimessä ja vastaanottimessa isotrooppisessa väliaineessa.

Tärkeimmät antennien suunnitteluun liittyvät muuttujat ovat säteilyominaisuudet, piiriominaisuudet ja muut ominaisuudet, kuten paino, koko, muoto ja hinta.

Säteilyominaisuuksilla tarkoitetaan kenties tärkeintä antennien ominaisuutta, säteilyn kaistanleveyttä taajuustasossa, suuntaavuutta, keilanleveyttä ja polarisaatiota. Vastaanotossa säteilyominaisuuksiin lukeutuu myös sieppauspinta ja efektiivinen pituus.

Piiriominaisuudet voivat myös olla lähtökohtana antennin suunnittelulle.

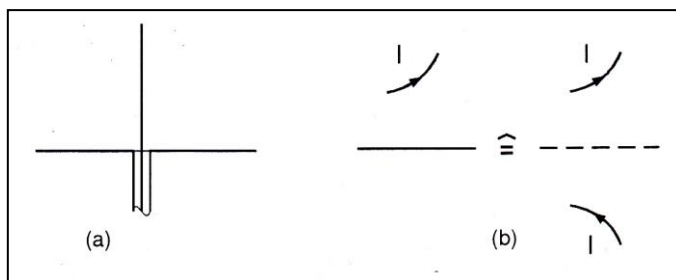
Piiriominaisuuksilla tarkoitetaan antennin signaalisyötön kompleksista sovitusta syöttöpiiriin. Syöttöpiirinä toimiva laite, kuten radiolähetin, on sovitettava antennin syöttöimpedanssiin tai antenni sovitettava lähettimeen. Antennin syöttönavat näkyvät signaalia syöttävälle piirille taajuusriippuvaisena impedanssina, jolloin antenni on suunniteltava halutulle taajuudelle tai taajuusalueelle.

Muut ominaisuudet tulee ottaa huomioon antennin käyttötarkoituksen ja käyttöpaikan mukaan. Esimerkiksi ulos sijoitettava antenni on syytä tehdä kestävästä metallista ja tukiranka rakentaa asianmukaisesti. Sisätiloissa käytettävän ja liikuteltavan antennin tulee olla kevyt, kestävä ja pienehkö. Siis helposti liikuteltavissa oleva antenni. Nämä ominaisuudet huomioiden, materiaalien ja valmistuksen hinta on myös varsin olennainen osa lopullista ratkaisua. (1 s. 156 - 159.)

4.1 Maatasoantenni

Maatasoantenni toimii peilikuvaperiaatteen mukaan dipolin tavoin, mutta on toteutettu neljännesaaltomonopolina johtavan tason päällä, kuten kuvassa 4 esitetään. Dipolin suuntakuviot eroaa käytännössä hieman teoreettisesta suuntakuviosta, mihin yksi tekijöistä on antennijohtimen paksuus. Maatasoantenneja käytetään muun muassa autoissa. Auton metallinen kori toimii maatasona ja antennijohdin on usein selkeästi nähtävissä, usein katolla tai auton perässä. (1, s. 166 - 167.)

Maatasoantenni toimii dipoliantennin tavoin resonaattorina. Tämä resonointi saadaan aikaan mitoittamalla antennijohdin väliaineessa (ilmassa) kulkevan aallonpituuden mukaan. Maatasoantennin antennijohdin on dipoliantennista poiketen neljännesaallon pituinen eli $\lambda/4$. Maataso on levymäisenä tasona ja antennijohdin eli säteilijä kohtisuoraan siihen. Tällä perusteella maatasoantenni on neljännesaaltomonopoli. Käytännössä antennijohtimen sähköinen pituus ja fyysinen pituus eivät ole yhtä suuret. Säteilyresistanssiltaan ja syöttöimpedanssiltaan optimaalinen fyysinen säteilijän pituus on yleensä noin 90 - 96 % sen sähköisestä pituudesta riippuen säteilijän materiaalin ominaisuuksista ja paksuudesta. (1, s. 165 - 167.)



Kuva 4. A-kohdassa maatasoantennin poikkileikkaus ja b-kohdassa peilikuvaperiaate (1, s. 167)

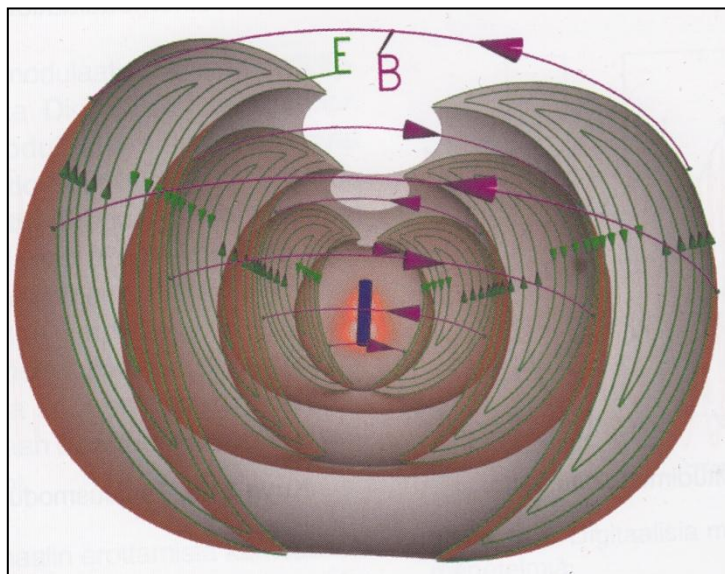
Kuvan 4 a-kohdassa ilmenee maatasoantennin rakenneperiaate ja viittaa siihen, miten se tehtiin tähän työhön. Lisäksi b-kohta esittää, miksi maatasoantenni toimii dipolin tavoin. Peilikuvaperiaatteen mukaan fyysinen maataso aiheuttaa virtuaalisen toisen maatasoantennin varsinaisen antennin säteilijättömälle puolelle, jolloin

maatasoantennin suuntakuvio ja ominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset dipoliantennin kanssa.

Erona maatasoantennissa ja dipoliantennissa on käytännön mitat ja syöttöimpedanssi. Hyvällä maatasoantennilla kaistanleveys on noin kymmenesosa mitoitetusta resonanssitaajuudesta.

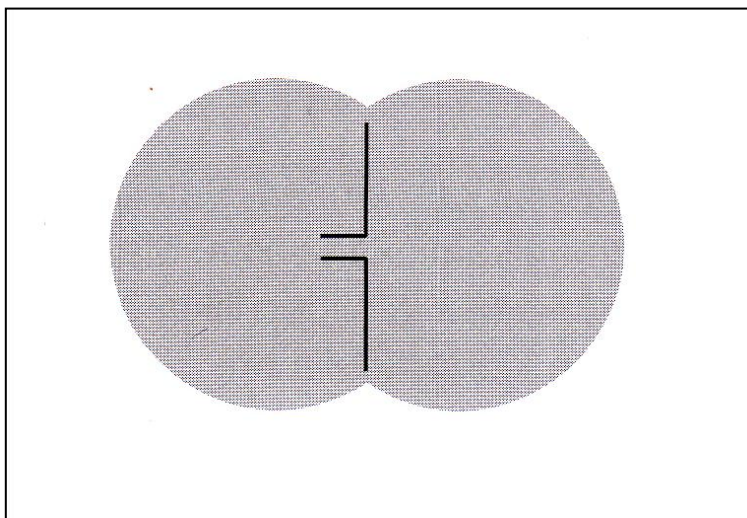
4.2 Dipoliantenni

Dipoliantenni on resonaattorityyppinen ympärisäteilevä antenni, jonka pituus on noin puoli aallonpituutta. Dipoliantennin säteilijä on yleensä metallilanka tai -tanko mekaanisista ominaisuuksista ja käyttökohteesta riippuen. Dipoliantennin säteilijä on yleensä katkaistu keskeltä siten, että sitä voidaan syöttää koaksiaalikaapelista. Kuvissa 5 ja 6 esitetään dipoliantennin teoreettinen säteilykuvio. Lisäksi kuvassa 5 esitetään dipoliantennin sähkömagneettisen säteilyn kentät.



Kuva 5. Dipoliantennin suuntakuvio kolmiulotteisena projektiona (3, s. 333)

Kuvassa 5 esitetään dipoliantennin säteilykuviota, jossa keskellä oleva ”palkki” on pystyssä oleva dipoliantenni. E ilmoittaa sähkökentän liikehdintää ja B esittää muuttuvan sähkökentän synnyttämän muuttuvan magneettikentän magneettivuon suuntaa.



Kuva 6. Dipoliantennin säteilykuvion sivusta kuvattu poikkileikkaus. (3, s. 341)

Kuvassa 6 esitetään puolialtodipoliantennin poikkileikattua teoreettista suuntakuviota yksinkertaistetusti. Kuvassa on kaksi erillistä antennijohdinta, joista molemmat ovat neljännesaallon pituisia, eli yhteensä puoli aallonpituutta. Toinen antennijohdin on kytketty liittimen maatasoon ja toinen johtimeen. Nämä kaksi erillistä antennijohdinta muodostavat yhdessä säteilijän. Kuvassa 6 voitaisiin kuvitella, että maatasoon kytketty antennijohdin korvattaisiin levymäisellä maatasolla, siten saataisiin neljännesaaltomonopoli maatasoantenni. (1, s. 156 - 168; 3, s. 331 - 341.)

4.3 Mikroliuska-antenni

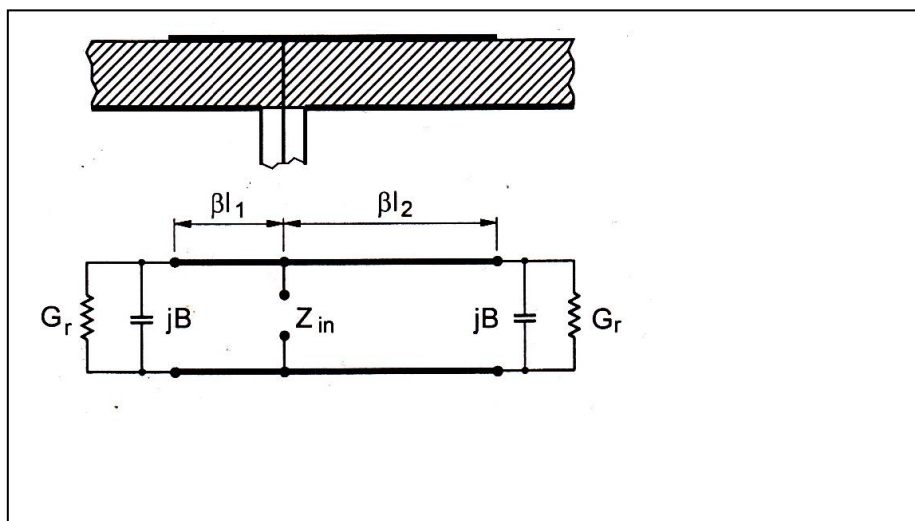
Mikroliuska-antenni on levymäinen antenni, joka koostuu kahdesta ohuesta metallilevystä ja niiden välisestä eristeaineesta. Mikroliuska-antenni on myös resonaattori-tyyppinen antenni, jossa on antennijohtimena levymäinen metalli ja antennijohtimen levyn toisella puolella on eristeaine ja maatasolevy eristeen toisella puolella.

Tässä työssä on käytetty FR4-tyyppistä komposiittisubstraattillista piirilevyä mikroliuska-antennin valmistukseen. Substraatin eli piirilevyn eristeaineen paksuus on noin 1,5 - 1,6 mm ja sen molemmiin puoliin 35 µm paksu kuparointi.

Käytännön työssä signaali antennijohtimelle syötettiin maatason ja substraatin läpi. Näin saatiin helppo käytettävyys, hyvä kestävyys ja edullisesti valmistettava sekä tarvittaessa helposti huollettava antenni. Mikroliuska-antenni voi olla myös reunasta

syötettävä, jolloin signaali syötetään säteilijälle metallilevyn reunasta mikroliuskajohdolla, jonka toisessa päässä koko antennin reunassa on syöttöpiste. Reunasta syötettävällä mikroliuska-antennilla on yleensä antennin reunan mikroliuskajohdon toiseen päähän kiinnitetty (yleensä juottamalla) koaksiaaliliitin.

Mikroliuska-antennien tasomaisuus tekee niistä helposti muihin laitteisiin sulautettavia tai upotettavia sekä helposti varastoitavia. Huonona puolena näissä antenneissa on niiden kapeakaistaisuus. Mikroliuska-antennit perustuvat resonaattorityyppiseen antenniin, joten kaistanleveys on hyvin pieni ja sillä pienellä kaistalla on suurehko paluuvaimennus.



Kuva 7. Läpisyötettävän mikroliuska-antennin poikkileikkaus ja sähköinen sijaiskytkentä. (4, s. 109)

Kuvassa 7 esitetään tavanomaisen, tässä työssä käytetyn, läpisyötettävän mikroliuska-antennin poikkileikkaus sekä sen sähköinen sijaiskytkentä, joka auttaa ymmärtämään, miten eriste ja sen sähköiset ja magneettiset ominaisuudet vaikuttavat antennin ominaisuuksiin ja miten ne pitää huomioida suunnittelussa. (4, s. 107 - 110.)

Mikroliuska-antennien signaalin polarisaatio määräytyy syöttöpisteen sijainnin mukaan. Syötetyn signaalin sähkökenttä on yhden suuntainen säteilijän pituuden kanssa. Mikroliuska-antennin säteilijän leveys vaikuttaa antennin säteilyhyötysuhteeseen.

5 Antennien mitoitus

Antennien mitoitus aloitetaan mitoittamalla antennin säteilijä ja sitten maataso, minkä jälkeen antennit mitataan ja hienosäädetään halutulle taajuudelle. Ensin mitoitetaan maatasoantenni, joka on yksinkertaisempaa kuin mikroliuska-antennin mitoittaminen.

5.1 Maatasoantennin mitoitus

Maatasoantenni mitoitetaan neljännesaaltomonopoliksi laskemalla kaavan 1 avulla puolen aallon mitta ja puolittamalla vielä se, jolloin saadaan neljännesaallon mitta. Lasketaan ensin molempien taajuuksien ($f_1 = 600$ MHz ja $f_2 = 900$ MHz) neljännesaaltojen mitat (vrt. Kaava 1). Kaavassa 1 ilmoitettu c on siis valonnopeus tyhjiössä.

$$\frac{\lambda_1}{4} = \frac{c}{4 * f_1} = \frac{c \text{ [m/s]}}{4 * 600 \text{ MHz}} = 124,9 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda_2}{4} = \frac{c}{4 * f_2} = \frac{c \text{ [m/s]}}{4 * 900 \text{ MHz}} = 83,3 \text{ mm}$$

Seuraavaksi rakennetaan antennijohtimet näihin mittoihin. Työssä käytettiin antennijohtimena alumiiniputkea, jonka ulkohalkaisija on 5 mm ja seinämän paksuus 0,45 mm, joten putken sisähalkaisija on 4,1 mm. Antennijohtimet mitoitettiin aluksi 125 mm:iin ja 85 mm:iin. 900 MHz:n maatasoantennin maatasoan sivujen pituudet olivat 260 mm, ja 600 MHz:n maatasoantennin maatasoan sivujen pituudet olivat 400 mm.

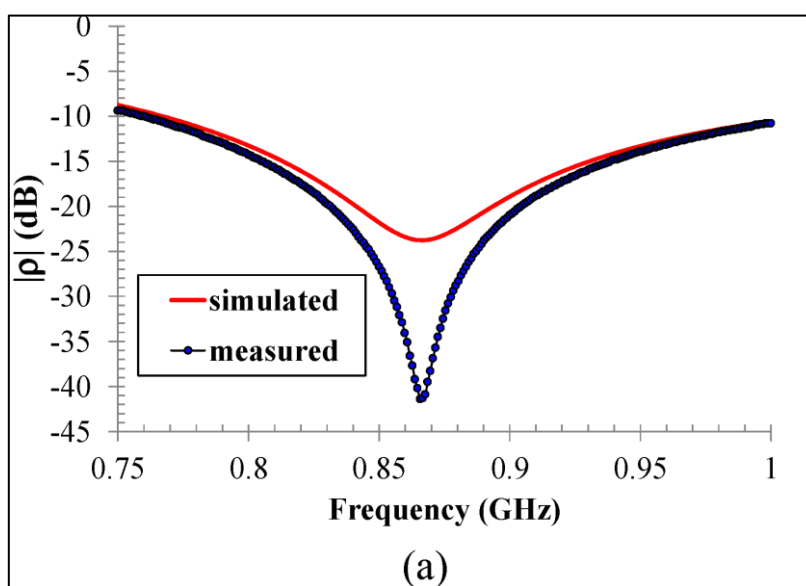
Työssä käytettiin maatasoantennin liittimenä N-tyyppistä koaksiaaliliitintä (engl. Type N Connector). Antennin säteilijään kiinnitettävän johtimen paksuus liittimessä on noin 3,5 mm. Liittimen johtimen ja alumiiniputken väliin jäi siis mukavasti tilaa juotostahnalta, jolla alumiiniputki liitettiin liittimen johtimeen. Kannattavaa on tehdä ensin prototyyppiantenni ja tutkia, miten antenni toimii ja siten saada selville, miten antennia mitataan ja miten resonanssitaajuutta voidaan muuttaa antennin säteilijää lyhentämällä (ns. hienosäätö).

Seuraavaksi hienosäädettiin antennin resonanssitaajuus (ks. luku 6.1, kpl 5), sillä antennijohtimen fyysinen mitta ei ole sama kuin sähköinen mitta. Tähän tarvitaan piirianalysaattoria, jolla pystytään mittaamaan antennin taajuusvaste riittävän tarkasti. Piirianalysaattorilla mitataan siis paluuvaimennusta ja syöttösovitusta.

Paluuvaimennuksella (engl. Reflection Coefficient) tarkoitetaan antenniin syötetyn signaalin suhteellista heijastumista takaisin syöttölaitteeseen. Spektrissä tulee näkyä nyt palautuvan signaalin vaimennusta joillakin taajuuksilla. Tärkein taajuus, jota tulee tarkastella tarkemmin on haluttu perustaajuus eli 600 MHz tai 900 MHz. Näiden taajuuksien lisäksi spektrissä pitäisi näkyä, mittalaitteen toimintataajuusalueesta riippuen, ainakin kolmas kerrannaistaajuus.

Kolmas kerrannaistaajuus on aina kolminkertainen perustaajuuteen verrattuna. Jos perustaajuus on 900 MHz, on silloin spektrissä näkyvä kolmas kerrannaistaajuus 2,7 GHz. Tämä on radiotekniikassa luonnollinen ilmiö, joka yleensä suodatetaan pois.

Paluuvaimennusta mitattaessa nähdään tehotason suhteen spektrissä kuoppa, ja kuopan pohja on resonanssitaajuus eli paluuvaimennuksen maksimi (antennista heijastuneen signaalin tehotason minimi). Tämän tyyppisessä antennissa spektrissä näkyvä matalimman taajuuden kuoppa on perustaajuus. Kuopan pohjaa saadaan siirrettyä korkeammalle taajuudelle lyhentämällä (eli hienosäätämällä) antennijohdinta. Tässä on hyvä olla varovainen, sillä liiallinen säteilijän lyhentäminen nostaa antennin resonanssitaajuuden liian korkealle.



Kuva 8. Tyypillinen antennin paluuvaimennus (5)

Kuvassa 8 esitetään tyypillinen antennin paluuvaimennuksen simulointi ja mittaus. Kuva 8 ei liity työhön, sen on tarkoitus havainnollistaa paluuvaimennusmittausta. Kuvan mitattu antenni on todella hyvä, mikäli kapeakaistaisuutta on tavoiteltu. Todennäköisesti simuloitu (punainen ehjä käyrä) olisi parempi useampaan sovellukseen, sillä todellinen säteilyhyötysuhteen ero simuloitulla ja mitatulla paluuvaimennuksella on noin 1%. Sillä paluuvaimennuksen (R_L) kaava on:

$$R_L = 10 \lg \left(\frac{1}{|\rho|^2} \right) \quad (3)$$

Kaavassa 3 esiintyvä ρ tarkoittaa heijastuskerrointa.

5.2 Mikroliuska-antennin mitoitus

Mikroliuska-antennin mitat riippuvat käytetyistä materiaaleista ja niiden sähköisistä ominaisuuksista. Tässä työssä käytettiin läpisyötettävää mikroliuska-antennityyppiä, jolloin sisäänmenoimpedanssi riippuu syöttöpisteen paikasta. Puhuttaessa neliskulmaisesta mikroliuska-antennista saadaan maksimi sisäänmenoimpedanssi eli toiselta nimeltään syöttöimpedanssi, sijoittamalla syöttöpiste antennijohtimen eli säteilijän reunaan. Minimi syöttöimpedanssi saadaan sijoittamalla syöttöpiste keskelle säteilijää, jolloin syöttöimpedanssi on lähes nolla.

Käytännön työssä käytetystä materiaalista tiedetään valmistajan ilmoittama suhteellinen dielektrisyysvakio $\epsilon_r = 4,3 \pm 10\%$, substraatin paksuus $h=1,5$ mm ja kuparoinnin paksuus $t=35$ μm . Pieni substraatin paksuuden vaihtelu ei vaikuta merkittävästi tuloksiin. Tässä työssä tehtiin vain $f_r = 900$ MHz:n mikroliuska-antenni, sillä 600 MHz:n antennin valmistaminen olisi vaatinut erityisjärjestelyjä kokonsa puolesta ja näin tuonut huomattavan nousun valmistuskustannuksiin.

Mikroliuska-antennin säteilijän leveys vaikuttaa eniten syöttösovitukseen ja sitä kautta säteilyhyötysuhteeseen, joten se on hyvä mitoittaa optimaalisesti. Säteilijän pituus vaikuttaa suoraan resonanssitaajuuteen, joten se on hyvä tehdä käytännössä hieman laskettua pidemmäksi, sillä työssä käytetyn piirilevyn substraatin suhteellinen permittiivisyys vaihtelee hieman.

Mitoittaminen on hyvä aloittaa laskemalla johdon leveyden matemaattinen alkuarvaus seuraavalla kaavalla:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \quad (4)$$

Sijoittamalla tähän numeeriset tunnetut arvot saadaan vastaukseksi:

$$W = \frac{2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 900 \text{ MHz} \cdot \sqrt{(4,3 + 1)/2}} = 80,1 \text{ mm}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea suhteellinen tehollinen dielektrisyysvakio seuraavasti:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}} \quad (5)$$

Sijoittamalla tähän kaavaan 5 tunnetut arvot, saadaan tulokseksi:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{4,3 + 1}{2} + \frac{4,3 - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot 1,5 \text{ mm} / 80,1 \text{ mm}}} = 4,14$$

Tämän jälkeen voidaan aloittaa laskemaan johdon todellista optimaalista leveyttä.

Aloitetaan laskemalla aallonpituus käytetyssä materiaalissa seuraavasti:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} = \frac{0,3322 \text{ m}}{\sqrt{4,14}} = 0,1633 \text{ m} \quad (6)$$

Jaetaan tämä vielä kahdella, niin saadaan mikroliuskajohdon optimaalinen leveys:

$$W_{\text{opt}} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{0,1633 \text{ m}}{2} = 81,6 \text{ mm} \quad (7)$$

Seuraavaksi voidaan laskea avoimen johdon pidennys, joka perustuu mikroliuskajohdon sähköiseen toimintaan (vrt. 4.1 Maatasoantenni: sähköinen ja fyysinen pituus):

$$\frac{\Delta l_0}{h} = 0,412 \frac{(\varepsilon_{reff}+0,3) * \left[\left(\frac{w}{h}\right)+0,262\right]}{(\varepsilon_{reff}-0,258) * \left[\left(\frac{w}{h}\right)+0,813\right]} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \Delta l_0 = \frac{\Delta l_0}{h} * h.$$

Sijoitetaan numerot kaavaan 8:

$$\frac{\Delta l_0}{h} = 0,412 \frac{(4,14+0,3) * \left[\left(\frac{80,1\text{mm}}{1,5\text{mm}}\right)+0,262\right]}{(4,14-0,258) * \left[\left(\frac{80,1\text{mm}}{1,5\text{mm}}\right)+0,813\right]} = 0,4665$$

$$\Rightarrow \Delta l_0 = 0,4665 * 1,5\text{mm} = 0,7\text{mm}$$

Nyt voidaan laskea mikroliuska-antennin pituus:

$$l = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{reff}}} - 2\Delta l_0 \quad (9)$$

Asettamalla em. kaavaan nyt tunnetut arvot, saadaan mikroliuska-antennin säteilijän todellinen pituus:

$$l_{tod} = \frac{2,99 * 10^8 \text{ m/s}}{2 * 900 \text{ MHz} \sqrt{4,14 \text{ F/m}}} - 2 * 0,7 \text{ mm} = 80,2 \text{ mm}$$

Mikroliuska-antennin säteilijän leveys on siis 81,6 mm ja pituus 80,2 mm. Ulkomitat ja maatasan mitat voivat vaihdella käyttökohteesta ja halutuista antennin ominaisuuksista riippuen. Läpisyötettävän mikroliuska-antennin ulkomitat, sekä tässä tapauksessa samalla maatasan mitat on hyvä mitoittaa noin 1,5-kertaiseksi säteilijän mittoihin nähden, eli tässä tapauksessa ulkomitat ovat kantiltaan noin 120 mm. (4, s. 33 - 34 & 107 - 110.)

6 Antennien valmistus

Luvussa 5 laskettiin antennien olennaisimmat mitat. Seuraavaksi rakennettiin antennit käytäntöön. Valmistuksessa käytettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun materiaaleja ja välineitä. Jokaiselle antennille tehtiin mahdollisimman identtinen pari, jotta saatiin antennien suuntakuviot mitattua ja jotta ne voivat toimia referenssinä eli vertailukohtana opetus- ja mittauskäytössä.

6.1 Maatasoantennin valmistus

Maatasoantennin mitat on laskettu työn kohdassa 5.1. Ensin tehtiin maatasoantenni taajuudelle 900 MHz. Tämän taajuuden neljännesaallon mitta oli siis 83,3 mm. Säteilijän resonanssitaajuus oli noin 850 MHz, sillä säteilijä mitoitettiin 85 mm:iin. Säteilijän resonointitaajuus hienosäädettiin varovasti lyhentämällä säteilijää. Maatasoantennin maatason mitoituksesta oli vaikea löytää tietoja tai kaavoja kirjallisuudesta, joten tässä käytettiin työn ohjaajan osaamista ja tietoja, sekä omatoimista tutkimista ja opiskelua antenniprototyyppien kanssa.

Tekemisen ohessa huomattiin, että maatason on parempi olla suurempi kuin pienempi. Suuremmalla maatasolla saatiin syöttösovitus lähemmäksi 50 Ω :a (ks. Liite 1). 900 MHz:n maatasoantennille tehtiin nelikulmainen maataso 2 mm paksusta ja pinnoittamattomasta alumiinilevystä, jonka kaikkien sivujen pituudet olivat 26 cm.

Keskelle maatasoa tehtiin liittimelle ja kiinnitysruuveille sopivat reiät. Parhaaksi liittimeksi tämän tyyppiselle suhteellisen raskaalle kokonaisuudelle valittiin messinkinen hopeoitu N-tyyppinen koaksiaaliliitin (engl. Type N connector), jossa eristeenä on teflonia tai vastaavaa ainetta. Liittimessä oleviin reikiin kävi hyvin M3-kokoiset pultit ja mutterit. Seuraavassa kuvassa on em. liitin:



Kuva 9. Työssä käytetty N-tyypin koaksiaaliliitin (5)

Antennin rakentaminen tapahtui juottamalla ensin kohdassa 5.1 mitoitettu alumiiniputki, eli säteilijä kiinni liittimen johtimeen juotospastalla kuumailmajuotinta käyttäen (kuumailmapuhallin käy myös, sillä juotospastan sulamislämpötila on noin 140-160° C, kun taas liittimen eristeen sulamislämpötila on noin 280° C). Seuraavaksi ruuvattiin liitin kiinni maatasoon ja sovitettiin siihen tehtyihin reikiin. Maataso ruuvattiin kiinni liittimeen M3-kokoisilla pulteilla ja muttereilla. Muttereiden ja maatasoon, sekä pulttien kantojen ja liittimen väliin tuli saman kokoiset tähtialuslaatat. Käytännössä ei ole väliä miten päin pultit laitetaan. Tärkeimpänä tässä on laittaa pultit ja mutterit tiukalle sekä asettaa aluslaatat, jotka rikkovat mahdollista oksidikerrosta metallien pinnoista paremman sähköisen kontaktin saamiseksi.

Antennin sähköiset kontaktit liittimen kanssa varmistettiin yleismittarilla. Tämän jälkeen mitattiin antennin paluuvaimennus, joka alkuun näytti resonanssitaajuuden olevan noin 850 MHz. Tästä johtuen antennin säteilijää piti lyhentää vähän kerrallaan, jotta saatiin antennin resonanssitaajuus mahdollisimman tarkasti 900 MHz:iin. Säteilijän lyhentämiseen käytettiin tavallista metalliviilaa. Tätä toimenpidettä kutsutaan muualla tässä työssä säteilijän lyhentämiseksi tai hienosäätämiseksi.

Paluuvaimennusmittauksessa on yleensä mittalaitteen näytössä vaaka-akselilla taajuudet ja pystyakselilla tehotasot desibeleinä [dB] milliwattia [mW] kohti, eli lyhyesti dBm. Paluuvaimennuksesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä antenniin syötetyn signaalin heijastumista takaisin syöttölaitteeseen. Antennin resonanssitaajuudella

paluuvaimennus on siis suurehko. Tämä tarkoittaa syöttölaitteeseen palaavan signaalin olevan pienempi resonanssitaajuudella kuin muilla taajuuksilla. Muilla taajuuksilla lähes kaikki syötetty signaali heijastuu antennista takaisin mittalaitteeseen.

Resonanssitaajuudella on suurempi paluuvaimennus, sillä antenni säteilee sille syötetyn signaalin ulos eikä heijasta siitä takaisin kuin murto-osan.

600 MHz:n maatasoantennin valmistamiseen käytettiin täsmälleen samoja menetelmiä, laitteita ja materiaaleja. Neliskulmaisen maataso sivujen pituuksiksi päätettiin 40 cm ja antennin säteilijän pituudeksi 125 mm (ks. kohta 5.1). Antenni hienosäädettiin siten, että lyhennettiin säteilijää vähän kerrallaan kunnes paluuvaimennusmittauksessa resonanssitaajuus osui 600 MHz:iin.

6.2 Mikroliuska-antennin valmistus

Kohdassa 5.2 tehtiin mitoitus 900 MHz:n mikroliuska-antennille. Ensin tehtiin PADS piirilevysuunnitteluohjelmalla niin sanottu piirilevyn layout, eli miltä piirilevyn pitäisi näyttää valmiina. Piirilevylle tehty mikroliuska-antenni eli patch-antenni on kantiltaan 120 mm, ja kohdassa 5.2 laskettiin säteilijän mitat, jotka olivat siis 81,6 x 80,2 mm. Layouttia tehtäessä olisi hyvä mitoittaa pituus hieman laskettua suuremmaksi, sillä substraatin suhteellinen permittiivisyys voi heitellä enintään 10 %. Piirilevyn suunnittelussa mitoitettiin säteilijän pituus 82 mm:iin. Layoutin tekemisen jälkeen tehtiin PADS:lla tarvittavat tiedostot prototyypipiirilevyjen tekemiseen tarkoitettua jyräintä varten.

Päätettiin tehdä valmiille piirilevylle käsin Dremel-merkkisellä käsikäyttöisellä poralla halkaisijaltaan 1,5 mm reikä puoleenväliin nelikulmaisen piirilevyn keskipistettä ja leveyssuuntaista reunaa. Liittimen reikä tuli siis säteilijän pituussuunnassa keskipisteen ja päädyn puoleenväliin sekä säteilijän leveyssuunnassa keskelle. Tällä reiän sijainnilla saatiin paras mahdollinen syöttösovitus 50 Ω :iin. Reikä tehtiin siten, että maataso puolella kuparin reuna oli kauempana reiästä, eli reikä oli hieman suurempi maataso puolella kuin säteilijän puolella.

Liittimenä käytettiin tässä antennityypissä pientä messinkistä SMA-tyyppistä koaksiaaliliitintä. Liittimen maataso juotettiin kiinni patch-antennin maatasoon. Liittimen

johdin vietiin antennin säteilijälle piirilevyyn tehdystä reiästä ja juotettiin kiinni. Patch-antennissa käytettiin seuraavassa kuvassa esitettyä SMA-liitintä:



Kuva 10. SMA-naaras koaksiaaliliitin (5)

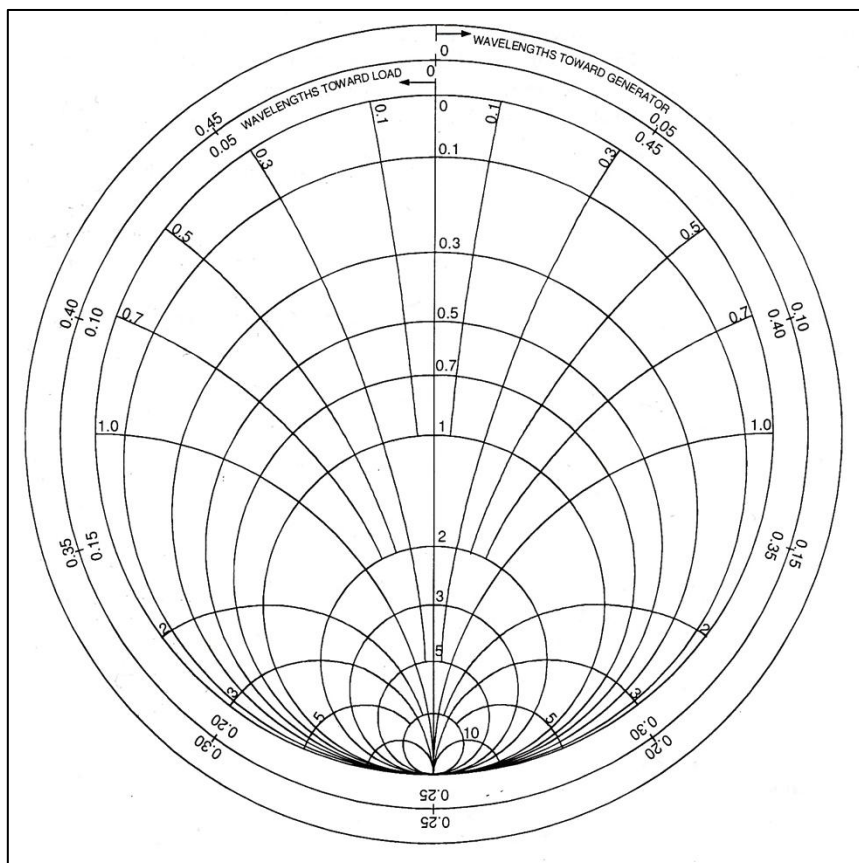
Kuvassa 10 esitetyn naaraspuolisen SMA-liittimen 4 jalkaa katkaistiin pois ja hiottiin pinta mahdollisimman tasaiseksi, jotta liittimessä oleva levy saatiin juotettua hyvin antennin maatasoon. Liittimen johdin tuli hieman yli antennin säteilijän pinnasta, joten johdin lyhennettiin samaan tasoon säteilijän pinnan kanssa ja juotettiin kiinni.

Seuraavaksi antennista mitattiin paluuvaimennus. Varmuusmitoituksesta johtuen antenni resonoi hieman liian alhaisella taajuudella. Säteilijän pituutta lyhennettiin hiomalla kuparointia vähän kerrallaan kunnes resonanssitaajuus saavutti 900 MHz. Säteilijää lyhennettiin molemmista päistä siten, että läpisyöttöreian paikka pysyi mahdollisimman lähellä alkuperäistä sijaintia (käytännössä syöttöpisteen ja säteilijän lähimmän reunan välinen etäisyys lyheni hieman), eli säteilijän keskipiste ei vaihtanut paikkaa.

7 Antennien sovituksen ja säteilysuuntakuvion mittaus

Paluuvaimennusmittausten ollessa valmiina ja, kun antennit on todettu oikealla taajuudella toimiviksi yksilöiksi, voidaan tehdä antenneille syöttösovitusmittaukset, eli lyhyesti sanottuna sovitusmittaukset. Sovitusmittaus mittaa antennin sisäänmenoimpedanssin eli syöttöimpedanssin taajuuden funktiona. Monilla

piirianalysoijilla voidaan mitata myös kompleksiset sovitukset signaalin siirrossa. Sovitusmittauksessa käytetään usein Smithin karttaa (engl. Smith Chart) havainnollistamaan visuaalisesti sovituksen laatu. Smithin kartalla näkyy syöttöimpedanssin reaali- ja imaginääriosat tarkasteltavalla taajuusalueella. Liitteessä 1 esitetään tässä työssä tehtyjen prototyypiantennien mittaustulokset, ja liitteessä 2 lopullisten antennien mittaustulokset.



Kuva 11. Smithin diagrammi (1, s. 63)

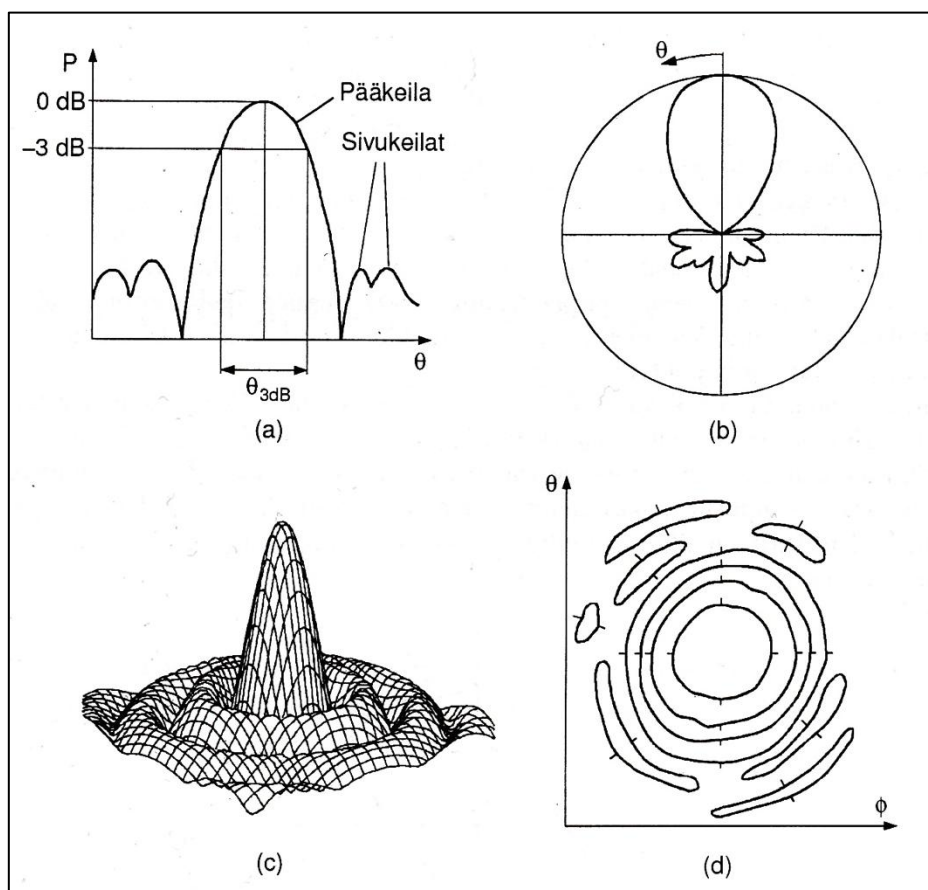
Kuvassa 11 esitetään Smithin diagrammi, toiselta nimeltään Smithin kartta, jota käytetään yleisesti sovitusten havainnollistamiseen sekä hyvänä apukeinona aaltojohtoja suunniteltaessa ja testattaessa. Smithin kartan alareunassa on ääretön impedanssi ja yläosassa olematon (0) impedanssi. Keskellä olevan pysty akselin, eli reaali akselin (puhdas resistanssi), vasemmalla puolella on kapasitiivinen impedanssi ja oikealla puolella induktiivinen impedanssi. Sovitettaessa antenni tai aaltojohto 50 Ω :iin pyritään Smithin kartalla keskipisteeseen. Kuvassa 12 esitetään erään prototyypimaatasoantennin sovitus Smithin kartalla. Kyseistä antennia käytettiin automatisoidun suuntakuviomittausjärjestelmän testaamiseen.



Kuva 12. Erään prototyypiantennin sovitus

Näiden mittausten jälkeen mitataan vielä antennien säteilysuuntakuviot.

Säteilysuuntakuviot mitataan asettamalla antennit ensin samaan asentoon, jonka jälkeen mitataan siirretyn signaalin (engl. transmission) vastaanotettu maksimitehotaso, käännetään antenna tietyn verran ja mitataan vastaanoton maksimi uudestaan. Helpoiten tämä hoituu automatisoidulla systeemillä, jossa systeemi piirtää valmiiksi suuntakuviot. Suuntakuvioista tulee selvitä signaalin suhteellinen teho, ja suunta alkutilanteeseen verrattuna, eli montako astetta antenna on käännetty ja mikä on siirretyn signaalin tehotaso siinä antennien asennossa. Suuntakuviot voidaan esittää suorakulmaisesti, polaarisesti, kolmiulotteisesti tai vakioarvokäyrästä. Kuvassa 13 on esimerkit jokaisesta em. suuntakuviot esitystavasta.



Kuva 13. Säteilysuuntakuvioiden esitystavat: a) suorakulmainen, b) polaarinen, c) kolmiulotteinen ja d) vakioarvokäyrästä (1, s. 159)

Kuvassa 13 nähdään myös havainnollistava esimerkki pääkeilan määrittämisestä ja 3-dB:n rajoista. Kuvan 13 a- ja b-kohdissa esiintyvä θ tarkoittaa kulma-asteita. Tässä työssä tehtyjen antennien suuntakuviot esitetään polaarisisessä muodossa. Antenneja on käännetty eri suuntakuviomittauksien välissä siten, että saadaan suuntakuviot kaikista mahdollisista suunnista kääntämällä antennia 90 astetta mittauksien välissä. Patch-antennien tapauksessa ensin mitattiin suuntakuviot vaakapolarisaation suuntaan täysi kierros, minkä jälkeen mittaus tehtiin pystypolarisaation suuntaan. Näin saatiin mitattua täydet 360 astetta niin sanotusti pystysuunnassa ja vaakasuunnassa. Liitteessä 2 on esitetty lopullisten antennien mittaukset ja säteilysuuntakuviot.

Suuntakuviomittaukset tehtiin radiokaiuttomassa tilassa, jossa ei ollut muita sähkölaitteita kuin toista antennia pyörittävä sähkömoottorilla toimiva laite. Mittaukset toteutettiin asettamalla toinen antenni paikoilleen ja kiinnittämällä toinen pyörittäjälaiteeseen. Toiseen antenniin kytkettiin syöttösignaali ja toisella otettiin vastaan signaali ja mitattiin sen voimakkuus jokaisen 3 asteen käännön jälkeen.



Kuva 14. Suuntakuviomittausasettelu radiokaiuttomassa tilassa

Kuvassa 14 esitetään suuntakuviomittausjärjestelmää radiokaiuttomassa tilassa.

Kuvan 14 oikeassa reunassa näkyy mikroliuska-antenni pystypolarisaatio-asennossa automatisoidun pyörityslaitteen varressa kiinnitettynä. Vasemmassa reunassa näkyy toinen samanlainen antenni samassa asennossa vastakkain valmiina pystypolarisaatio suuntakuviomittaukseen (ks. liite 2 s. 5).

8 Lopullisten antennien mittaustulokset

900 MHz:n maatasoantennit

900 MHz:n maatasoantennit saatiin toimimaan riittävän hyvin, kun siihen laitettiin maatasoksi alunperin 600 MHz:n antennille suunniteltu maataso, joiden sivujen mitat ovat 260 mm. Taulukoissa 1 ja 2 ilmenevät molempien 900 MHz:n antennien mitatut arvot. Antennit on numeroitu selkeästi 1 ja 2. Nämä paluuvaimennus- ja syöttösovitusmittausten tulokset eivät ole absoluuttisia, sillä ne on mitattu elektroniikkalaboratoriossa, jossa on sekä staattisia että liikkuvia häiriötekijöitä, mutta niiden merkitys mittaustuloksissa ei ole kriittistä. Maatasoantenni nro **1**:n mitatut arvot: Resonanssitaajuus $f_{res} \approx 900$ MHz, puolentehon kaistanleveys $B_{3dB} = 130$ MHz, jonka alaraja on 840 MHz ja yläraja 970 MHz sekä paluuvaimennus resonanssitaajuudella $L_{ret}(f_{res}) = 15$ dB.

Taulukko 2. 900 MHz:n maatasoantenni nro **1**:n syöttösovitus

| Taajuus [MHz] | Syöttöimpedanssin reaaliosa [Ω] | Syöttöimpedanssin reaktiivinen osa |
|---------------|--|------------------------------------|
| 900 | 50 | 11 pF |
| 939 | 37 | 0 |
| 877 | 75 | 0 |

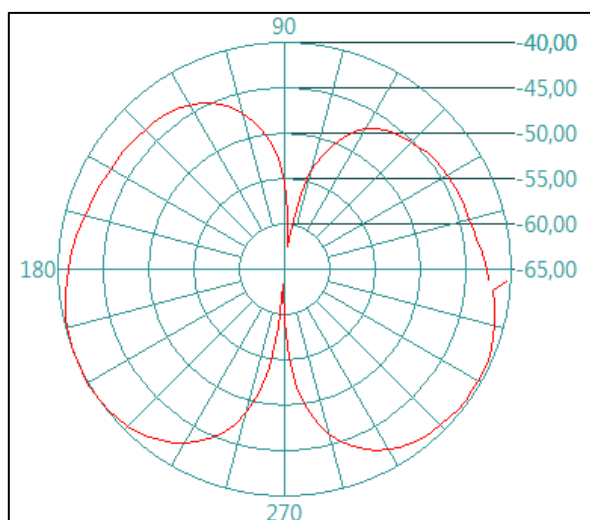
Taulukossa 2 sovituksen sarakkeessa esiintyvät nollat kertovat viereisten sarakkeiden ja saman rivin lukujen olevan Smithin kartan reaaliakselilla.

900 MHz:n maatasoantennin nro **2** mittaustulokset: $f_{res} \approx 900$ MHz, $f_{-3dB} = 820 \dots 980$ MHz, $B_{3dB} = 160$ MHz, $L_{ret}(f_{res}) = 16$ dB.

Taulukko 3. 900 MHz:n maatasoantenni nro **2**:n syöttösovitus

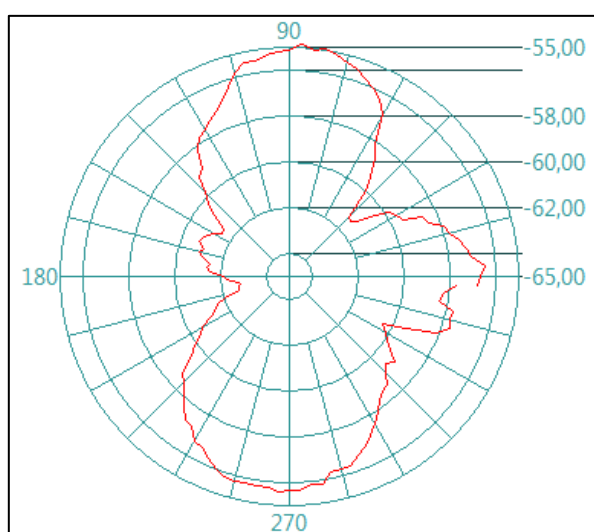
| Taajuus [MHz] | Syöttöimpedanssin reaaliosa [Ω] | Syöttöimpedanssin reaktiivinen osa |
|---------------|--|------------------------------------|
| 900 | 45 | 10 pF |
| 950 | 34 | 0 |
| 880 | 80 | 0 |

Kuvissa 15 ja 16 esitetään edellä olevien 900 MHz maatasoantennien suuntakuviot pystysuuntaisessa suorapolarisaatiossa ja ristipolarisaatiossa. Pystysuuntaisella polarisaatiolla tarkoitetaan tässä, että mittauksessa antennien säteilijät osoittivat alkutilanteessa samaan suuntaan, ja kun toista pyöritettiin, osoitti sen säteilijä pyörimissuunnan suuntavektorin suuntaan. Vaakapolarisaatiota ei mitattu, sillä pystypolarisaation suuntakuvion perusteella vaakapolarisaation suuntakuvion olisi pitänyt olla lähes tasainen ympyrä.



Kuva 15. 900 MHz:n maatasoantennien pystysuuntakuvio

Kuvasta 1 nähdään antenneilla olevan puolentehon keilanleveys noin 100 astetta.



Kuva 16. 900 MHz:n maatasoantennien ristipolarisaatio suuntakuvio

Kuvan 16 ristipolarisaatiolla tarkoitetaan staattisen antennin säteilijän osoittavan ylöspäin pyöritettävän antennin säteilijän osoittaessa vaakasuuntaan, ja sitä pyöritettiin molemmissa mittauksissa 3 astetta kerrallaan vaakasuunnassa. Jokaisen 3 asteen käännön jälkeen laitteisto mittasi vastaanotetun signaalin voimakkuuden (engl. transmission). Suuntakuvioissa esitetään kääntöasteet ympyrän reunoilla sekä

signaalin tehotaso desibeleinä sisäkkäisillä ympyröillä, joiden asteikko on nähtävissä kuvan oikeassa reunassa. Suuntakuvioissa suurin signaalin tehotaso on ulkoreunalla ja keskellä pienin. Suuntakuviomittaukset on tehty automatisoidulla suuntakuvion mittausjärjestelmällä, joka kalibroi itsensä aina mittauksen alussa.

600 MHz:n maatasoantennit

600 MHz:n maatasoantenneille tehtiin samat mittaukset, kuin 900 MHz:n maatasoantenneille. Näihin antenneihin tehtiin neliskulmaiset maatasot, joiden sivujen mitat olivat 400 mm.

600 MHz:n maatasoantenni nro **1**: $f_{res} \approx 590$ MHz, $f_{-3dB} = 570 \dots 630$ MHz, $B_{3dB} = 60$ MHz, $L_{ret}(f_{res}) = 20$ dB.

Taulukko 4. 600 MHz:n maatasoantennin nro **1:n** syöttösovitus

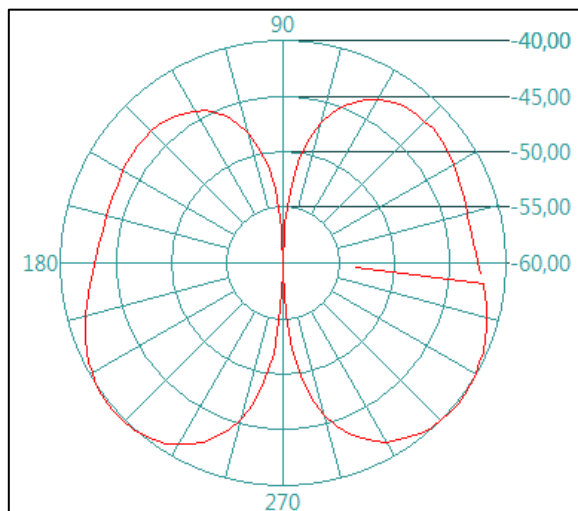
| Taajuus [MHz] | Syöttöimpedanssin reaaliosa [Ω] | Syöttöimpedanssin reaktiivinen osa |
|---------------|--|------------------------------------|
| 620 | 50 | 4 nH |
| 593 | 40 | 0 |
| 645 | 84 | 0 |

600 MHz:n maatasoantenni nro **2**: $f_{res} \approx 606$ MHz, $f_{-3dB} = 590 \dots 635$ MHz, $B_{3dB} = 45$ MHz, $L_{ret}(f_{res}) = 20$ dB.

Taulukko 5. 600 MHz:n maatasoantenni nro **2:n** syöttösovitus

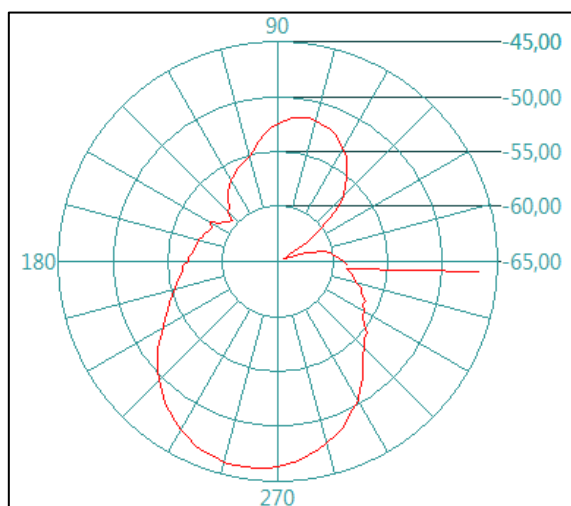
| Taajuus [MHz] | Syöttöimpedanssin reaaliosa [Ω] | Syöttöimpedanssin reaktiivinen osa |
|---------------|--|------------------------------------|
| 620 | 50 | 3,5 nH |
| 594 | 43 | 0 |
| 650 | 80 | 0 |

Kuvissa 17 ja 18 esitetään näiden kahden 600 MHz:n maatasoantennin suuntakuviomittaukset.



Kuva 17. 600 MHz:n maatasoantennien pystypolarisaatio suuntakuvio

Kuvasta 17 nähdään antenneilla olevan puolentehon keilanleveys noin 110 astetta.



Kuva 18. 600 MHz:n maatasoantennien ristipolarisaatio suuntakuvio

Kuvien 15 - 18 perusteella voidaan todeta molempien maatasoantenniparien maksimi lähetytshon olevan kohtisuoraan säteilijän pintaan nähden. Lisäksi on todettu puolentehon keilan leveyden olevan noin 100 astetta molemmille taajuuksille rakennettujen antennien tapauksessa.

Mikroliuska-antennit

Mikroliuska-antenneille, eli patch-antenneille tehtiin samat mittaukset, kuin maatasoantenneille. Patch-antennien suuntakuviomittauksessa oli hieman eroja maatasoantennien suuntakuviomittauksessa. Patch-antennien suuntakuviot mitattiin seuraavasti:

Pystypolarisaatio suuntakuviomittaus tehtiin asettamalla antennit vastakkain signaalin syöttöpisteet antennien keskipisteiden yläpuolelle ja pyörittämällä toista sivusuunnassa.

Vaakapolarisaatio suuntakuviomittaus tehtiin asettamalla antennit vastakkain signaalin syöttöpisteet samansuuntaisesti vaakatasossa, toisin sanoen antennit asetettiin toistensa peilikuvaksi ja pyörittämällä toista antennia sivusuunnassa.

Ristipolarisaatio suuntakuviomittaus tehtiin asettamalla toinen antenni signaalin syöttöpiste ylös ja toinen antenni syöttöpiste sivulle ja pyörittämällä toista antennia.

Taulukoissa 6 ja 7 ei esitetä Smithin kartan reaaliakselin tuloksia, sillä patch-antennien sovitukset eivät leikanneet sitä niiden toimintataajuuksialueella.

Patch-antenni nro **1**:n mittaustulokset: $f_{res} \approx 900,8$ MHz, $f_{-3dB} = 899 \dots 902$ MHz, $B_{3dB} = 3$ MHz, $L_{ret}(f_{res}) = 24$ dB.

Taulukko 6. Patch-antenni nro **1**:n mittaustulokset

| Taajuus [MHz] | Syöttöimpedanssin reaaliosa [Ω] | Syöttöimpedanssin reaktiivinen osa |
|---------------|--|------------------------------------|
| 900,8 | 50 | 1,1 nH |
| 899 | 46 | 1,3 nH |
| 902 | 60 | 1,2 nH |

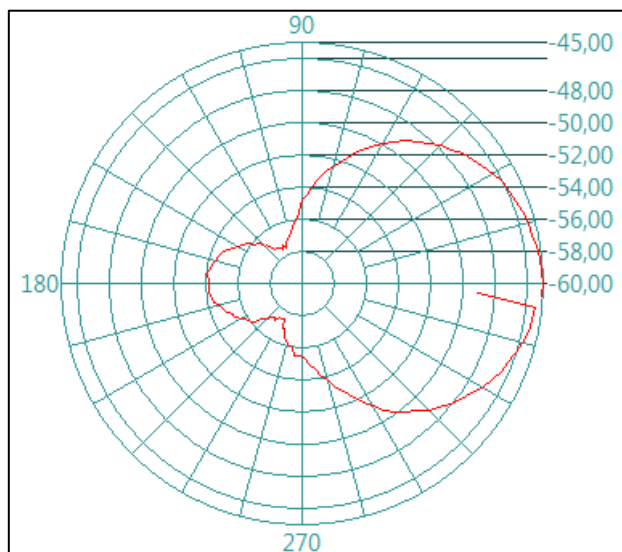
Patch-antenni nro **2**:n mittaustulokset: $f_{res} \approx 900$ MHz, $f_{-3dB} = 899 \dots 901,2$ MHz,

$$B_{3dB} = 2,1 \text{ MHz}, L_{ret}(f_{res}) = 26 \text{ dB}.$$

Taulukko 7. Patch-antenni nro 2:n mittaustulokset

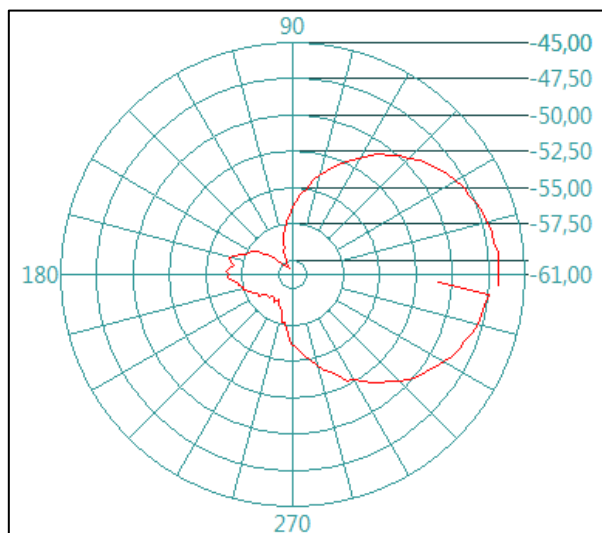
| Taajuus [MHz] | Syöttöimpedanssin reaaliosa [Ω] | Syöttöimpedanssin reaktiivinen osa |
|---------------|--|------------------------------------|
| 900 | 50 | 800 pH |
| 899 | 58 | 750 pH |
| 901,2 | 47,5 | 900 pH |

Taulukossa 7 sovitussarakkeessa esiintyvät alle 1 nano Henryn [nH] induktanssit eivät ole täsmällisiä mittalaitteesta johtuen. Katsottiin mittalaitteessa vaihtelevan induktanssiarvon suuripiirteinen keskiarvo.



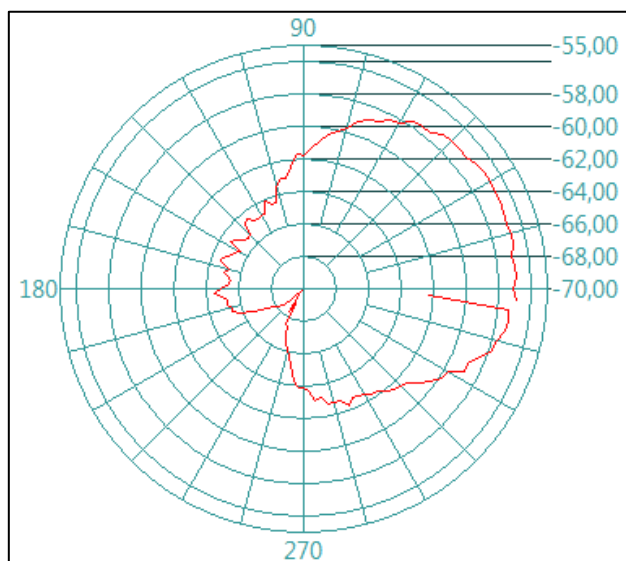
Kuva 19. Patch-antennien pystypolarisaatio suuntakuviot

Kuvasta 19 nähdään patch-antenneilla pystypolarisaatiossa puolentehon keilanleveyden olevan noin 80 astetta. Kuvasta 19 nähdään patch-antennin maatasen vaikutus säteilysuuntakuviot. Patch-antenni säteilysuuntakuviot muistuttaisi dipoliantennin säteilysuuntakuviota, jos patch-antennissa ei olisi maatasoa.



Kuva 20. Patch-antennien vaakapolarisaatio suuntakuviio

Kuvasta 20 nähdään patch-antenneilla vaakapolarisaatio suuntakuviiossa puolentehon keilanleveyden olevan noin 80 astetta.



Kuva 21. Patch-antennin ristipolarisaatio suuntakuviio

Kuvien 19 - 21 perusteella voidaan todeta patch-antennien säteilyn maksimitehon olevan kohtisuoraan säteilijän pinnasta. Kuitenkin hyvän signaalitehon alue on puolentehon keilan alueella, joka näiden antennien tapauksessa on kuvien 5 ja 6 perusteella noin 80 astetta.

9 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli tehdä hyvät referenssiantennit automatisoidulle suuntakuvion mittausjärjestelmälle Metropolia Ammattikorkeakoulun radiokaiuttomaan tilaan. Lopulliset maatasoantennit tehtiin alumiinista. Maatasoantennien maatasot tehtiin 2 mm paksusta alumiinilevystä ja säteilijät alumiiniputkesta. Mikroliuska-antennit tehtiin piirilevystä, jonka substraattina oli FR4-tyyppinen komposiittimateriaali.

Lopputuloksena saatiin 900 MHz:n maatasoantennit, joiden paluuvaimennuksen tehotasot eivät nousseet yli -14 dBm:n toistetuissa mittauksissa. 600 MHz:n maatasoantennien paluuvaimennuksen tehotasot eivät nousseet yli -18 dBm:n. Mikroliuska-antennien paluuvaimennuksen tehotasot eivät nousseet yli -20 dBm:n. Saatiin toimivat ja tarkat referenssiantennit radiokaiuttoman tilan automatisoidulle säteilysuuntakuvion mittausjärjestelmälle taajuuksille 600 MHz (vain maatasoantenni) ja 900 MHz.

Työtä voisi viedä eteenpäin tekemällä erityyppisiä antennoja samoille taajuuksille tai vaihtamalla tässä työssä tehtyjen antennien valmistusmateriaalit kestävämpiin ja sähköisesti parempiin. Vaihtamalla maatasoantennien materiaalit esim. kupariin saataisiin liittimet juotettua kiinni, jolloin liittimien ja antennien välinen sähköinen kontakti paranisi.

Paluuvaimennus- ja sovitustulosten osalta mittaustuloksista oltaisiin saatu tarkemmat, jos ne olisi tehty radiokaiuttomassa tilassa. Radiokaiuttomassa tilassa ulkoiset häiriöt saadaan vaimennettua merkityksettömäksi.

Lähteet

- 1 Lehto, Arto & Räisänen, Antti: Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto Oy, 2007.
- 2 Suvanto, Kari & Laajalehto, Kari: Tekniikan Fysiikka 2. Helsinki: Edita Publishing Oy, 2008
- 3 Peltonen, Hannu & Perkkiö, Juha & Vierinen, Kari: Insinöörin (AMK) Fysiikka osa II. Lahden Teho-Opetus Oy, 2007
- 4 Lehto, Arto & Räisänen, RF- ja mikroaaltotekniikka. Helsinki: Otatieto Oy, 2006
- 5 <http://www.mdpi.com/2079-9292/3/3/474/hm>, Luettu 18.11.2014
- 6 <http://www.mediaplazashop.com>, Luettu 12.11.2014

Prototyypiantennien mittauksia

Antenneja tehtäessä on hyvä tehdä myös prototyypiantenneja, jotta saadaan selville, miten antennit toimivat ja miten niiden käyttäytyminen muuttuu eri parametrien muuttuessa. Tässä vaiheessa on tehty jo monta prototyyppiä. Seuraavaksi näytetään prototyypiantennin mittauksen ohella tehtyjä muistiinpanoja ja mittaustuloksia.

Tämän prototyypimaatasoantennin maatasona käytettiin A4-kokoista yksipuolista piirilevyä ja säteilijänä liittimeen juotettua pystyssä olevaa rautalankaa. Mittaustulokset taulukoissa 1 ja 2 kertovat antennin toimivan hyvin. Tätä antennia kutsutaan jatkossa A4-antenniksi.

Taulukko 1. A4-maatasoantennin paluuvaimennusmittauksen tulokset

| Taajuus [MHz] | Paluuvaimennus [dB] |
|---------------|---------------------|
| 894,6 | 21,5 |
| 874,4 | 18,5 |
| 908,1 | 18,5 |

Taulukon 1 ylimmällä rivillä on resonanssitaajuus, ja kaksi alinta riviä muodostavat 3 dB:n rajan.

Taulukko 2. A4-antennin syöttösovitussmittauksen tulokset

| Taajuus [MHz] | Impedanssi [Ω] | Sovitus |
|---------------|-------------------------|---------|
| 894,6 | 52 | 22 pF |
| 874,1 | 64 | 0 |
| 908,1 | 32 | 0 |

Taulukossa 2 esitetään ylimmällä rivillä resonanssitaajuus ja sen impedanssisovitus. Alemmat rivit kertovat Smithin kartan reaaliakselin leikkaavien ääripäiden muodostavan sisäänmenoimpedanssin sovituksen alueen.

Tätä em. antennia ei koskaan mitoitettu tarkasti, sillä maatason koko oli reilusti suurempi, kuin mitä sen tarvitsisi olla. Tämä kokeilu johti siihen johtopäätökseen, että mitä suurempi on maatason pinta-ala, sitä parempi on antennin sovitus 50 Ohmin koaksiaalikaapeliin. Hyvällä sovituksella myös antennin paluuvaimennus resonanssitaajuudella kasvaa, joten puolentehon taajuusalue pienenee. Samat mittaukset toistettiin jokaiselle antennille ja niiden pareille. Vaikka nämä A4-antennit olivat hyviä, rakenteiden laatu ei riitä lopulliseksi versioksi.