

Antti Pääkkönen

LabVIEW-ohjelmointisovelluksella kehitetty automaattinen antennimittausjärjestelmä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

11.4.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Antti Pääkkönen LabVIEW-ohjelmointisovelluksella kehitetty automaattinen antennimittausjärjestelmä 35 sivua + 3 liitettä 11.4.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikan koulutusohjelma
Ohjaaja	yliopettaja Matti Fischer
<p>Tässä insinööriyössä on kehitetty tietokoneohjattu antennimittausjärjestelmä, jonka avulla voidaan mitata ja esittää graafisesti heijastuksettomassa huoneessa erilaisten mittausantennien keräämiä tietoja.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä antennien ominaisuuksiin, antennien mittaamisen teoriaan sekä tehtiin taustatutkimusta yleisimmistä mittausympäristöistä. Tämä osuus oli hyvin pitkälle radiotekniikan alan kirjalliseen aineistoon syventymistä, jonka pohjalta lopputyön sovellusta tulitaisiin kehittämään.</p> <p>Mittausjärjestelmä koodattiin ja toimintaa ohjataan National Instrumentsin LabVIEW-ohjelmalla kehitetyllä ohjainsovelluksella, johon on kytketty piirianalysointilaite sekä pyörityskone, johon mittaava antenni on kiinnitetty.</p> <p>Mittausjärjestelmä piirtää mitattavan antennin säteilykuvion polaarisenä kuviona tietokoneen näytölle. Ohjainkäyttöliittymät ja sen ohjekirja on kehitetty yhteistyössä Metropolian opiskelijan Antti Lehtisen kanssa, joka myös teki opinnäytetyönsä samasta aiheesta.</p> <p>Lopputuloksena syntyi nopea ja helppokäyttöinen antennimittausjärjestelmä, joka soveltuu useille eri antennityypeille, mittausympäristöille ja sitä on mahdollista kehittää laajemmaksi toimintojen ja esitystapojen osalta.</p>	
Avainsanat	Antenni, LabVIEW, piirianalysointilaite, häiriötön huone

Author Title	Antti Pääkkönen An Automated Antenna Measurement System Developed Using LabVIEW Programming Application
Number of Pages Date	35 pages + 3 appendices 11 April 2014
Degree	Bachelor of Electronics Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructor	Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>In this thesis, a computer controlled antenna measurement system, which can be used to measure and graphically express the gathered data from different sorts of antennas in an undisturbed room, was developed.</p> <p>The work was started by getting familiar with attributes of different antenna types, theory of antenna measurements and most common measurement surroundings. This stage was consisted mostly of reading literature on radio technology in depth, which would become the basis for the development of the thesis' practical application.</p> <p>The measurement system was coded and is controlled with software called LabVIEW, developed by National Instruments. The application is implemented with a network analyzer and a turntable holding the measuring antenna.</p> <p>The measurement system draws the measured antenna as a polar graph on the computer screen. The controller interfaces and the user's manual were developed in cooperation with Antti Lehtinen, who is a Metropolia student making his thesis on the same subject.</p> <p>As a result of this project was an automated antenna measurement system that is fast and easy to use. It also holds a possibility for further development regarding more complex features and presentation formats.</p>	
Keywords	Antenna, LabVIEW, network analyzer, undisturbed room

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Radiotekniikan perusteet	2
2.1	Radioaaltojen ominaisuudet	2
2.2	Aallonpituus	3
2.3	Radioaaltojen taajuusalueet	4
2.3.1	RF-aallot	4
2.3.2	Mikroaallot	5
2.3.3	Millimetriaallot	5
2.4	Radioaaltojen eteneminen	6
3	Antennit	8
3.1	Antennien sähköiset ominaisuudet	8
3.1.1	Säteilykuvio eli suuntakuvio	8
3.1.2	Antennin vahvistuksen parametrit	10
3.1.3	Antennin suuntaavuuden parametrit	11
3.1.4	Polarisaatio ja ristipolarisaatio	12
3.1.5	Impedanssi ja kaistanleveys	13
3.2	Antennityypit	13
3.2.1	Lanka-antennit	13
3.2.2	Apertuuriantennit	16
3.2.3	Mikroliuska- ja rakoantennit	17

4	Antennien mittaaminen	18
4.1	Mittauspaikat	18
4.1.1	Heijastukseton huone	18
4.1.2	Vapaantilan mittauspaikka	19
4.1.3	Maaheijastusmittauspaikka	20
4.1.4	Kompakti mittauspaikka	20
4.1.4	Lähikenttämittauspaikka	20
4.2	Antennin säteilykuvion mittaus	21
4.3	Antennin vahvistuksen mittaus	21
4.4	Antennin polarisaation mittaus	21
4.5	Antennin impedanssin mittaus	22
5	Laitteisto ja ohjelmisto	23
5.1	Hewlett-Packard Company ja Agilent Technologies -yritykset	23
5.2	Agilent 8714ET RF Network Analyzer -piirianalysaattori	23
5.3	Brüel & Kjær -yritys	24
5.4	Brüel & Kjær Turntable System Type 9640 -pyörityskone	24
5.5	National Instruments Corporation -yritys	25
5.5.1	NI GPIB-USB-HS -kontrolleri	25
5.5.2	LabVIEW -ohjelmointisovellus	26
6	Antennimittausjärjestelmän ympäristö, kehitys ja testaus	27
6.1	Mittausympäristö	27
6.2	Antennimittausjärjestelmän rakenne ja ohjelmointi	27
6.3	Antennimittausjärjestelmän testaus ja tulokset	30
7	Yhteenveto	33
	Lähteet	34
	Liitteet	
	Liite 1. Polaarisen säteilykuvion mittaussovelluksen LabVIEW-koodi	
	Liite 2. Antennimittausjärjestelmän ohjauspaneelit	
	Liite 3. Automated Antenna Measurement System -ohjekirja	

Lyhenteet ja käsitteet

DAQ	<i>Data Acquisition</i> , tiedonkeruu.
FM	<i>Frequency Modulation</i> . ULA-taajuusalueella (Suomessa 87,5 - 108MHz) lähetettyjä radiolähetyksiä kutsutaan usein FM-radiolähetyksiksi.
GPIO	<i>General Purpose Interface Bus</i> , yleisesti käytetty liitäntä digitaalisten laitteiden välillä. Viralliselta standardinimeltään IEEE-488.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä ja rahoittama satelliittipaikannusjärjestelmä.
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> , kansainvälinen televiestintäliitto.
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i> , graafista G-kieltä käyttävä ohjelmointisovellus.
RF	<i>Radio Frequency</i> , radiotaajuudet alle 300 MHz.
MV	<i>Machine Vision</i> , konenäkö. Teknologiaa ja toimintatapoja, joita käytetään teollisuudessa kuvapohjaisessa automaatiotarkastuksessa, analyyseissa, prosessinhallinnassa ja robottien ohjauksessa.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen.
UV	<i>Ultraviolet</i> säteily, sähkömagneettisen säteilyn taajuusaste.
ULA	Suomenkielinen lyhenne sanoista <i>ultralyhyet aallot</i> . Tarkoittaa radioaaltojen taajuusaluetta, joilla lähetetään kaupallista ja yleisradio-ohjelmaa taajuuksilla 87,5 - 108 MHz.

1 Johdanto

Tässä Metropolia Ammattikorkeakoululle tehdyssä insinööriyössä käsitellään LabVIEW-ohjelmalla kehitettyä yksinkertaista tietokoneohjattua antennimittausmittausjärjestelmää. Mittaustulokset halutaan saada helposti ja vaivattomasti sellaisessa muodossa, että niiden käsittely on sujuvaa.

Antennimittaukset suoritetaan tietokoneen, piirianalysaattorin ja pyörityskoneen avulla. Mittaustulokset saadaan tietokoneen näytölle selkeänä kuvaajana, josta ne on helppo lukea ja tulostaa.

Työssä selostetaan radiotekniikan perusteita ja antennien sähköisiä ominaisuuksia. Työssä käydään läpi yleisimmät antennityypit sekä kuvataan antennin mittaamista, jossa pitää huomioida mittaustaikat ja mitä ominaisuuksia halutaan mitata.

Lisäksi selostetaan, miten suunniteltu mittausjärjestelmä luotiin, havainnollistetaan järjestelmän käyttöä sekä näytetään, missä muodossa mittaustulokset voidaan esittää. Mittausjärjestelmää ohjelmoitaessa panostettiin siihen, että sitä voidaan pitää pohjana myös muille laitekoonpanoille yksinkertaisilla muokkauksilla.

2 Radiotekniikan perusteet

Radiotekniikka tutkii radioaaltojen ominaisuuksia, minkä tarkoituksena on mitata, tuottaa ja hyödyntää niitä. Sillä tarkoitetaan menetelmiä, joilla tietoa voidaan siirtää eri ympäristöissä. Se käsittää sähkömagneettisten aaltojen lähettämisen, vastaanottamisen, mittaamisen sekä näihin käytettävät laitteet.

2.1 Radioaaltojen ominaisuudet

Sähkömagneettinen radioaalto etenee suoraviivaisesti poikittaisena värähtelyliikkeenä vapaassa tilassa valon nopeudella. Se voi edetä myös vähähäviöisessä eristeaineessa, jolloin sen nopeus hidastuu. Radioaalto voi taipua, taittua, heijastua ja kuljettaa energiaa. Liikemäärästään johtuen ne aiheuttavat säteilypainetta.

Radioaallon mitattavia ominaisuuksia ovat voimakkuus, amplitudi, vaihe, aallonpituus, polarisaatio, taajuus ja etenemisnopeus. Se muodostuu sähkö- ja magneettikentästä, jotka ovat toisiaan vastaan ja aallon etenemissuuntaan nähden kohtisuorassa. Kenttien voimakkuudet muuttuvat sinimuotoisesti ajan ja paikan suhteen. Aallonpituus on kahden huipun välinen etäisyys, joka voidaan laskea kaavasta 1:

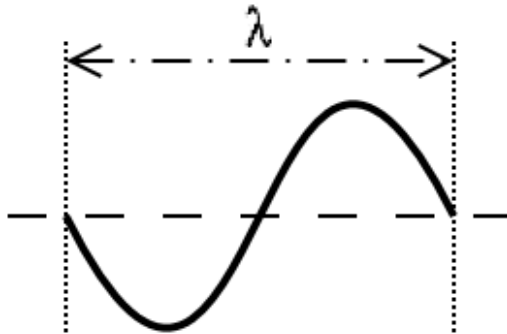
$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1}$$

jossa $c = 2,998 \cdot 10^8 m/s$ ja $f =$ taajuus (Hz).

Radiotekniikan sovelluksissa käytetään eniten sinimuotoisia aaltoja, jotka ovat lineaarisesti tai ympärilinarisoituneita. Ympärilinarisoitunut aalto muodostuu yhdistämällä kaksi yhtä voimakasta lineaarisesti polarisoitunutta aaltoa. Tällaisen aallon kentän suunta kääntyy jatkuvasti samalla, kun aallon voimakkuus pysyy samana.

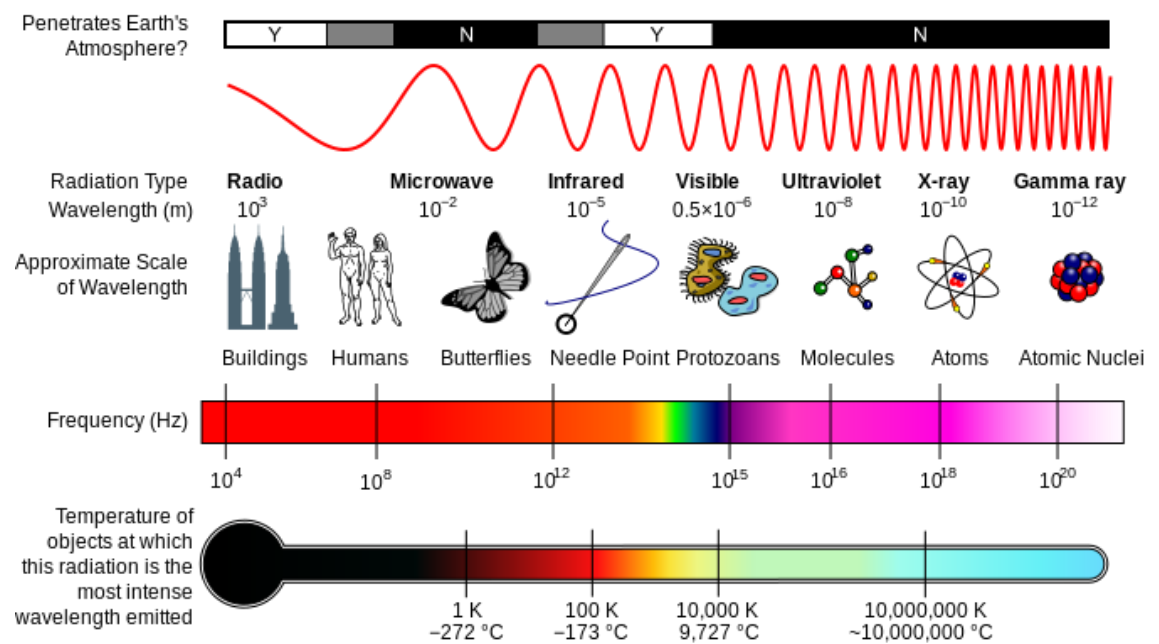
2.2 Aallonpituus

Aallonpituus on matka, jonka aalto kulkee yhden jakson aikana (kuva 1).



Kuva 1. Yhden radioaallon pituus kuvallisesti havainnollistettuna [1]

Sähkömagneettisen säteilyn spektri jaetaan osa-alueisiin aallonpituuden tai taajuuden perusteella. Pituudet ovat mitaltaan tuhansista kilometreistä millimetrien osiin, eli ne ovat spektrin matalataajuisimpia aaltomuotoja (kuva 2).



Kuva 2. Sähkömagneettisen spektrin kuvaus [2]

Elektronikvanttien koko pienenee aallonpituuden kasvaessa. Radioaaltojen kvantit ovat niin pieniä, että ne eivät pysty irrottamaan elektroneja radaltaan. Tästä syystä ne eivät aiheuta sähkövarausta atomeille tai molekyyliille, eli ne ovat ionisoimatonta säteilyä.

2.3 Radioaaltojen taajuusalueet

Yleinen radiotekniikassa käytettävä taajuusalue on 3 kHz - 300 GHz. Se on jaettu eri alueisiin käyttötarkoituksensa perusteella, jotka on määritellyt kansainvälinen televiestintäliitto ITU (taulukko 1). Alle 300 MHz:n taajuuksia kutsutaan RF-aalloiksi. Aallot taajuudella 1 - 30 GHz ovat mikroaaltoja ja taajuusalueet 30 - 300 GHz millimetriaaltoja. RF- ja mikroaaltojen raja ei ole tarkka. Usein mikroaalloiksi luetaan 1 GHz:n ja sen yläpuolella olevat taajuudet.

Taulukko 1. Radiotekniikassa käytettävät taajuusalueet [3]

Lyhenne	Nimi	Taajuus	Aallonpituus	Käyttöesimerkki
VLF	Very Low Frequency	3 - 30 kHz	10 - 100 km	Radionavigointi
LF	Low Frequency	30 - 300 kHz	1 - 10 km	Pitkän matkan radioyhteydet
MF	Medium Frequency	300 - 3000 kHz	100 - 1 000 m	Yleisradio
HF	High Frequency	3 - 30 MHz	10 - 100 m	Yleisradio, radioamatöörit
VHF	Very High Frequency	30 - 300 MHz	1 - 10 m	Televisio, ULA-radio
UHF	Ultra High Frequency	300 - 3000 MHz	100 - 1 000 mm	Radiolinkit, televisio, tutka
SHF	Super High Frequency	3 - 30 GHz	10 - 100 mm	Mikroaaltouuni
EHF	Extremely High Frequency	30 - 300 GHz	1 - 10 mm	Tutka, radiolinkit

Taulukkoon 1 on tiivistetty radioaaltojen lyhenteet, taajuudet, pituudet ja esimerkkejä niiden käyttötavoista (ks. 2.3.1 - 2.3.3).

2.3.1 RF-aallot

VLf-taajuusalue on 3 - 30 kHz, ja sen aallonpituus on 10 - 100 km. Aallot etenevät pääasiassa pinta-aaltona lähes maapallon ympäri ionosfäärin ja maanpinnan välisellä alueella. Aallot etenevät myös jonkin verran merivedessä ja siksi niitä käytetäänkin maa-asemien ja sukellusveneiden välisessä viestinnässä. Aluetta käytetään myös radionavigoinnissa.

LF-taajuusalue on 30 - 300 kHz, ja sen aallonpituus on 1 - 10 km. Aallot etenevät pinta-aaltona ja öisin ionosfäärissä. Eteneminen on mahdollista myös suoraan näköyhteyksireittiä pitkin. Aluetta käytetään yleisradiotoiminnassa, radionavigoinnissa ja etätunnistuksessa.

MF-taajuusalue on 300 - 3 000 kHz, ja sen aallonpituus on 100 - 1 000 m. Aallot etenevät pinta-aaltona ja öisin ionosfäärissä. Aluetta käytetään yleisradio- ja radioamatööri-toiminnassa sekä radionavigoinnissa.

HF-taajuusalue on 3 - 30 MHz, ja sen aallonpituus on 10 - 100 m. Aallot etenevät ionosfäärissä. Pinta-aallot vaimenevat nopeasti. Aluetta käytetään yleisradio- ja radioamatööri-toiminnassa sekä meri- ja sotilasradioliikenteessä.

VHF-taajuusalue on 30 - 300 MHz, ja sen aallonpituus on 1 - 10 m. Aallot etenevät suoraan sekä heijastumalla rakennuksista ja maan pinnasta. Ilmakehässä sääolosuhteet vaikuttavat etenemiseen ja aallot taipuvat hiukan alaspäin. Tälle taajuusalueelle tietoliikennetyhdellä tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Aluetta käytetään FM-radiolähetyksissä, langattomissa mikrofoneissa ja kauko-ohjauslaitteissa.

UHF-taajuusalue on 300 - 3 000 MHz, ja sen aallonpituus on 10 - 100 cm. Aallot etenevät suoraviivaisesti ilmakehässä, mutta puusto ja maastoesteet lisäävät vaimennusta. Tälle taajuusalueelle tietoliikennetyhdellä tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Aluetta käytetään yleisradio- ja digitaalisissa TV-lähetyksissä matkapuhelinverkoissa, mikroaaltouuneissa ja GPS-järjestelmässä. UHF-alue on lähes varattu, sillä melkein koko taajuusalue on allokoitu ja käytössä eri sovelluksissa ympäri maailmaa. [4, s. 28 - 29.]

2.3.2 Mikroaallot

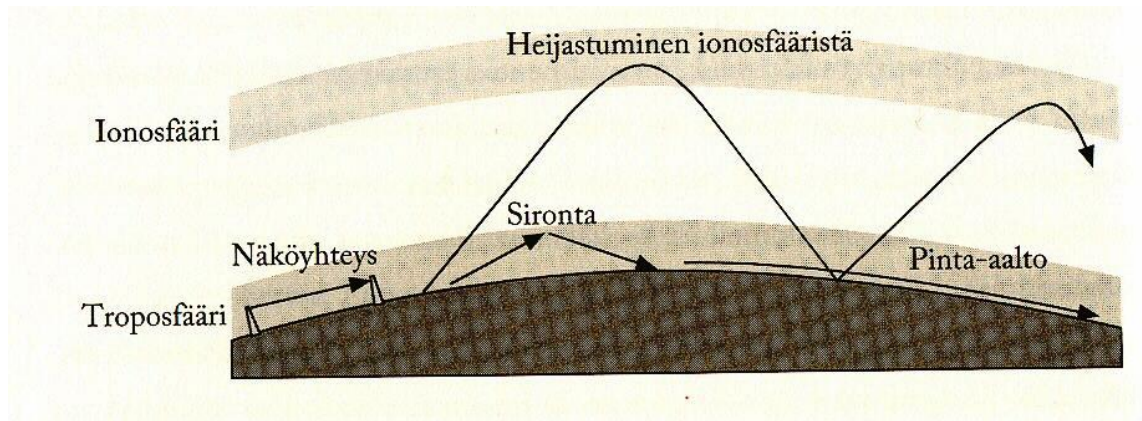
SHF-taajuusalue on 3 - 30 GHz, ja sen aallonpituus on 1 - 10 cm. Aallot etenevät suoraviivaisesti ilmakehässä, mutta sääolosuhteet, puusto ja maastoesteet lisäävät huomattavasti vaimennusta. Tälle taajuusalueelle tietoliikennetyhdellä tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Antenniratkaisuja suunniteltaessa pitää ottaa huomioon aaltojen diffraktio, eli taipumisilmiö. Aluetta käytetään tutka- ja radionavigointijärjestelmissä, sekä kiinteiden televerkkojen radio- ja satelliittilinkeissä. [4, s. 29.]

2.3.3 Millimetriaallot

EHF-taajuusalue on 30 - 300 GHz, ja sen aallonpituus on 1 - 10 mm. Aallot etenevät suoraviivaisesti, ja yhteydet ovat hyvin lyhyitä. Ilmakehässä on neljä kapeaa ikkunaa 34, 94, 142 ja 214 GHz:n taajuuksilla, joissa lyhyen kantaman tiedonsiirtojärjestelmien käyttö on mahdollista. Muilla taajuuksilla ilmakehän vaimennus on liian suuri. Aluetta käytetään sotilaskäytössä, radiopaikannuksessa, radioastronomiassa ja 60 GHz:n langattomissa lähiverkoissa. [4, s. 29 - 30.]

2.4 Radioaaltojen eteneminen

Radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat ilmakehän ionosfääri, troposfääri ja maaston ominaisuudet. Ionosfääri sijaitsee 60 - 1 000 km korkeudessa ja sisältää useita aurinгон ja kosmisen säteilyn synnyttämiä kerroksia. Näissä kerroksissa on UV- ja hiukkas-säteilyn ionisoimia vapaita elektroneja ja ioneja. Radioaallot aiheuttavat vapaiden elektronien värähtelyn, joka tuottaa sekundäärisiä radioaaltoja. Primääriset ja sekundaariset aallot muodostavat yhdessä ionosfäärissä etenevän aallon. Aallot vaimenevat, kun vapaat elektronit törmäävät varauksettomiin molekyyliin. Tällöin värähdysenergia muuttuu stokastiseksi liike-energiaksi, eivätkä elektronit enää emittoi sekundäärisiä aaltoja. Ionosfäärissä tapahtuu heijastumista vapaiden elektronien esiintymistiheyden ollessa riittävän suuri ja elektronien ja molekyylien törmäyksien ollessa vähäisiä. Radioaalto heijastuu ionosfääristä taajuuden ollessa alle n. 30 MHz (kuva 3, ks. seur. s.).



Kuva 3. Radioaaltojen eteneminen ja heijastuminen [5, s. 84]

Troposfääri on ilmakehän alin kerros ja ulottuu 10 km:n korkeuteen. Monet troposfäärissä tapahtuvat sääilmiöt vaikuttavat radioaaltojen etenemiseen. Näitä ovat esimerkiksi sade, sumu, ilman kosteus, ilmanpaine ja lämpötila. Tässä kerroksessa radioaallot voivat kaartua, sironta, vaimentua ja heijastua. Kaartuminen johtuu troposfäärin diffraktiokertoimesta, eli taitekertoimesta, joka pienenee korkeuden kasvaessa. Heijastusta ja sirontaa ilmenee äkillisistä taitekertoimen muutoksissa. Sirontaa aiheuttava pyörteet, joissa on eri kosteus ja lämpötila ympäristöön nähden. Heijastusta aiheuttavat horisontaaliset rajapinnat.

Aallon kulkuun vaikuttavat maasto, maaperän sähköisyys, kasvillisuus ja rakennukset. Pitkillä etäisyyksillä maanpinnan kaarevuus estää suoran näköyhteyden lähettimen ja vastaanottimen välillä. Rakennuksista ja maanpinnasta aiheutuvat heijastukset voivat olla haitallisia tai hyödyllisiä. Aalto voi vaimentua pois, mutta heijastuminen voi myös saada signaalin kuulumaan paikoissa, joihin ei ole suoraa yhteyttä. Mitä johtavampi pinta ja matalampi taajuus, sitä paremmin aalto etenee. Kuivalla maalla vaimennus on suurempaa kuin meren ja kostean maanpinnan päällä. Taajuuden kasvaessa myös maanpinnan vaimennus kasvaa, joten radioaallon etenemisellä pinta-aaltona on merkitystä alle 10 MHz:n taajuudella. Korkeimmat taajuudet (UHF, SHF, EHF) vaativat etenemistä varten näköyhteyttä. [4, s. 32 - 35; 5, s. 79 - 84; 6, s. 189 - 205.]

3 Antennit

Lähetysantenni tuottaa sähkömagneettista säteilyä virran avulla. Se säteilee lähettimen signaalin sähkömagneettisena aaltona, josta vastaanottoantenni yrittää siepata mahdollisimman suuren tehon. Kun lähetysantennijohteen pinnalle tuotetaan vaihtovirtaa, syntyy sen pinnalla nopeudeltaan vaihtelevia sähkövarauksia, jotka säteilevät pois päin johteesta. Sähkömagneettisen säteilyn osuessa vastaanottoantenniin, sen johteen pinnalle syntyvä sähkövirta kuljettaa signaalitehon siirtojohdon kautta vastaanottimeen.

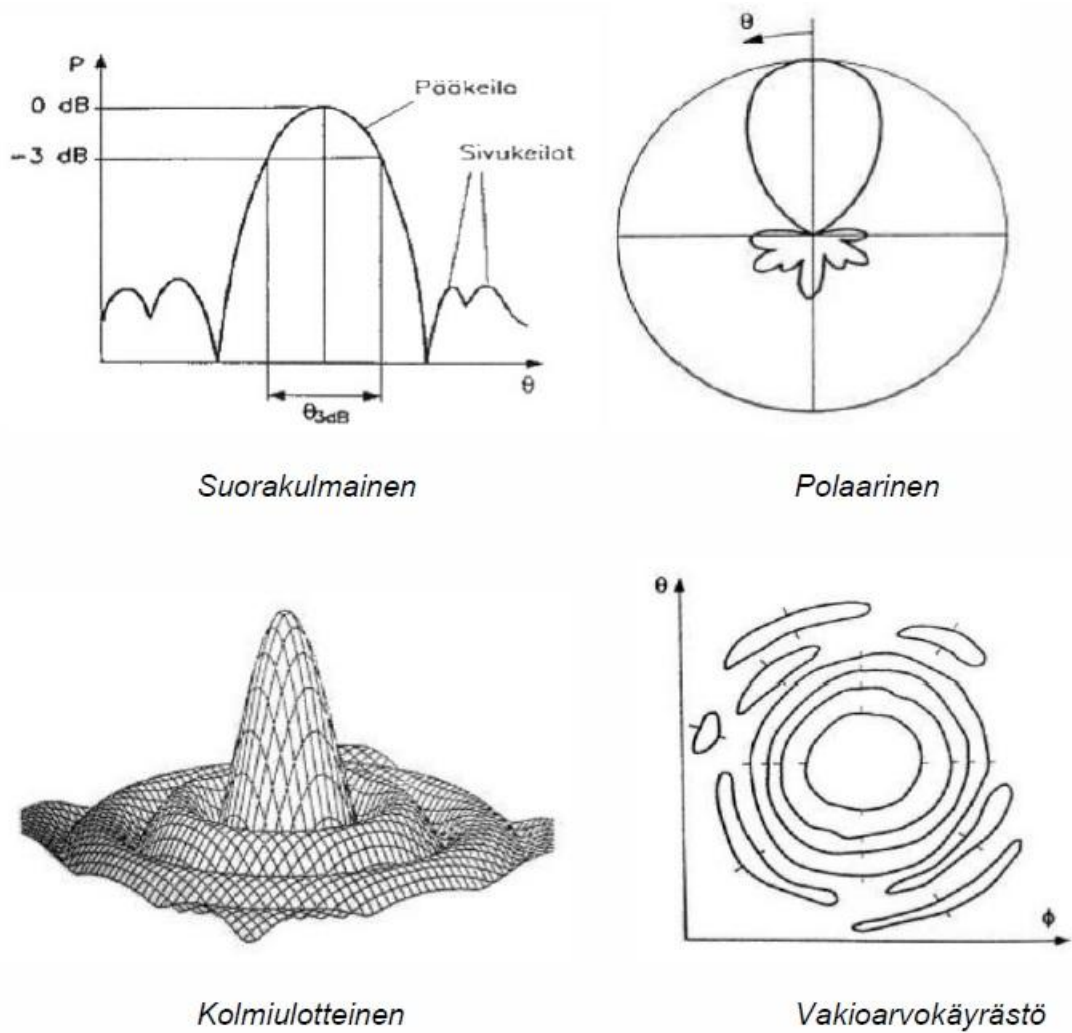
3.1 Antennien sähköiset ominaisuudet

Tärkeimmät sähköiset ominaisuudet, joiden perusteella antennin käyttötarkoitusta sovelletaan, ovat säteilykuvio, vahvistus, suuntaavuus, keilan leveys, polarisaatio, ristipolarisaatio, kaistanleveys, hyötysuhde, sivukeilataso, impedanssi ja häviöt. Antennin ominaisuudet eivät riipu siitä, käytetäänkö sitä signaalin lähettämiseen tai vastaanottamiseen.

3.1.1 Säteilykuvio eli suuntakuvio

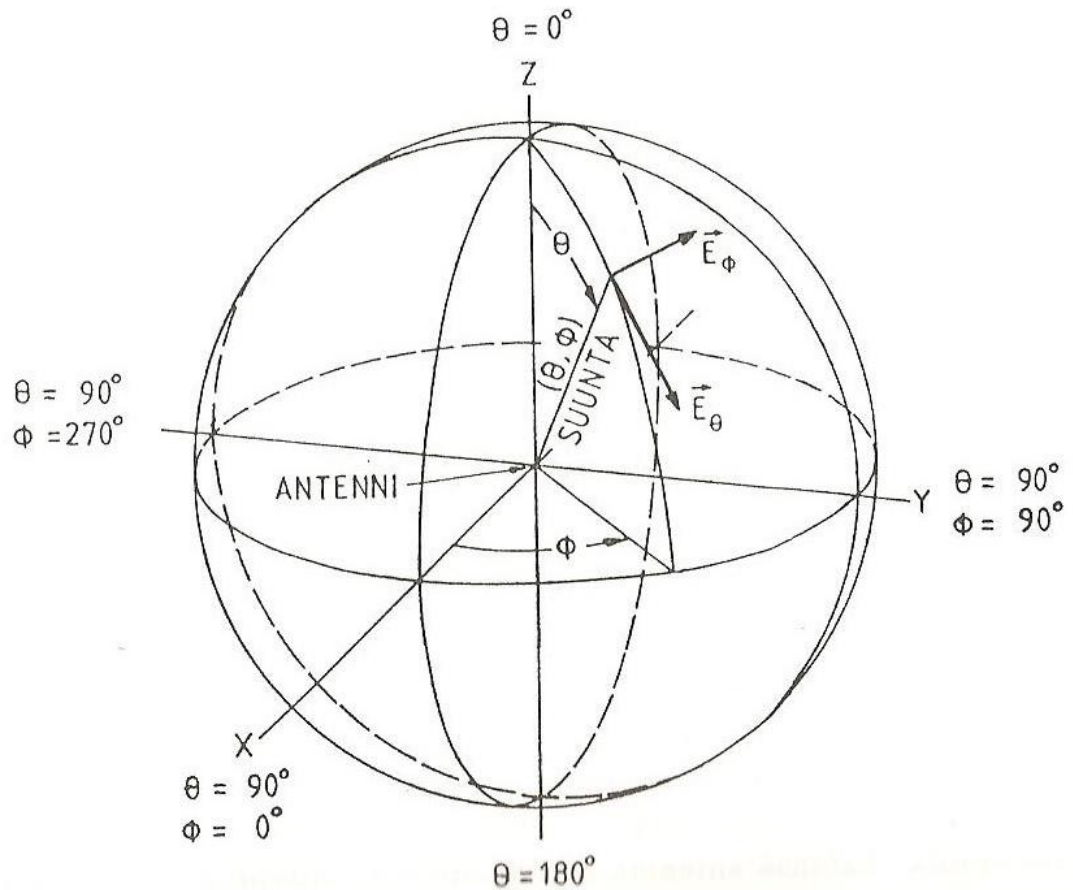
Säteilykuviolla tarkoitetaan suuntakuviota, josta saadaan selville sähkömagneettisen kentän polarisaatio, tehotiheys, kentänvoimakkuus ja vaihe. Lähetysantennin säteilykuvioista nähdään lähetetyn signaalin jakautuminen avaruuteen. Vastaanottoantennin säteilykuvioista nähdään antennin kyky vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä eri suunnista. Yleensä kuvioista erottuu pääkeila ja pienempiä sivukeiloja. Takakeila on pääkeilaa vastapäätä. Nollakohdissa antenni ei säteile tai vastaanota säteilyä. Pääkeila on leveä antennin ollessa kooltaan aallonpituutta pienempi. Kokosuhteiden ollessa päinvastaiset pääkeila on kapea.

Kuvassa 4 on säteilykuvion erilaisia esitystapoja.



Kuva 4. Säteiläkuvion esitystapoja [6, s. 162]

Tehotiheyttä kuvataan määreellä $P(\theta, \phi)$, kentänvoimakkuutta vastaavasti $E(\theta, \phi)$. Kuvan 5 (ks. seur. s.) koordinaatistossa esiintyvät symbolit θ ja ϕ ovat elevaatio- ja atsimuuttikulmat.



Kuva 5. Antennimittauksien yhteydessä käytetty pallokoordinaatisto [7, s. 154]

Elevaatio θ kasvaa isoympyrää pitkin 0 asteesta 180 asteeseen. Atsimuutti ϕ saadaan projisoimalla suuntaa osoittava vektori xy -tasoon, ja se kasvaa positiivisen z -akselin suunnasta katsottuna vastapäivään 0 asteesta 360 asteeseen. [5, s. 137 - 146; 6, s. 159 - 164; 7, s. 154.]

3.1.2 Antennin vahvistuksen parametrit

Antennin vahvistus on pääkeilan suuntaan säteilemän tehotiheyden (S) suhde häviöttömän isotrooppisen antennin säteilemänä tehotiheyteen (S_0) molempien lähtötehon ollessa sama. Se voidaan laskea kaavasta 2:

$$G = \frac{S}{S_0} \quad (2)$$

Kaava 2 pätee vain ideaaliseen, häviöttömään anteeniin. Hyötysuhde, eli säteilyn tehon suhde anteeniin syötettyyn tehoon on η . Kun antenni on häviöllinen, tämä hyötysuhde vähennetään vahvistuksesta kaavassa 3:

$$G = \eta \frac{S}{S_0} \quad (3)$$

Lopullinen vahvistus ilmoitetaan usein desibeliarvona. Tämä arvo voidaan laskea kaavasta 4:

$$G_{dB} = 10 \log G \quad (4)$$

Desibeliyksikkö on dBi referenssiantennin ollessa isotrooppinen. Alle 1 GHz:n taajuudella vahvistusta verrataan dipolianteeniin ja vahvistus ilmoitetaan yksiköllä dBd. Näiden yksiköiden välinen suhde on $0 \text{ dBd} = 2,15 \text{ dBi}$. [4, s. 214 - 219; 6, s. 159 - 163; 8.]

3.1.3 Antennin suuntaavuuden parametrit

Suuntaavuus ilmoittaa antennin kyvyn keskittää säteilyn annettuun suuntaan. Suuntaavuus on maksimitehotiheyden (S) suhde keskimääräisen tehotiheyteen (S_0). Se voidaan laskea elevaatio- ja azimuuttikulmien (θ, ϕ) funktiona kaavasta 5:

$$D = \frac{4 \cdot \pi}{\iint_{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (5)$$

Kaavassa $d\Omega$ on keilan avaruuskulman alkio ja 4π on täysi avaruuskulma. Avaruuskulma Ω lasketaan kaavalla 6:

$$\Omega_A = \int |P(\theta, \phi)|^2 d\Omega \quad (6)$$

Suuntaavuus on riippuvainen pelkästään säteilykuviosta. Se mainitaan usein yhtenä lukuna funktion sijaan. Silloin kyseessä on suuntaavuuden maksimiarvo, joka saadaan kaavasta 7:

$$D = \frac{4 \cdot \pi}{d\Omega} \quad (7)$$

Suuntaavuuden kaava etäisyyden suhteen saadaan kaavasta 8:

$$D = 4\pi r^2 \frac{S}{S_0} \quad (8)$$

Lähetysantennin aiheuttaman tehotiheyden laskemiseen määrättyllä etäisyydellä käytetään kaavaa 9:

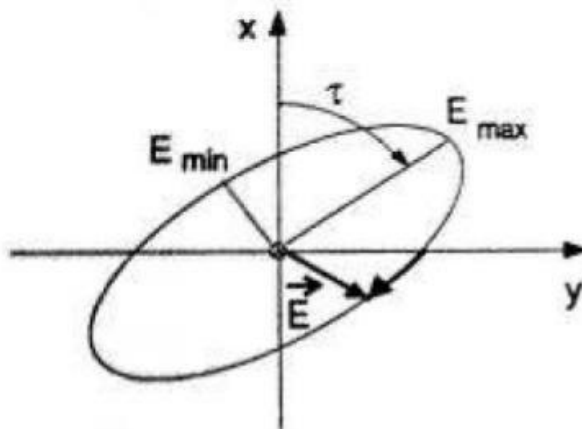
$$S = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (9)$$

G_T on lähetysantennin vahvistus ja P_T lähetysteho. [4, s. 214 - 219; 5, s. 137 - 146; 6, s. 159 - 164.]

3.1.4 Polarisaatio ja ristipolarisaatio

Polarisaatio on suuntakulman (θ, ϕ) funktio. Se ilmaisee sähkömagneettisen kentän kulkusuunnan, eli vektorin suunnan muutoksia. Vektori ilmaisee itsensä ellipsinä, joka piirtyy sen kärjestä värähtelyjakson aikana. Erikoistapauksissa siitä voi muodostua myös jana tai ympyrä. Janaa kutsutaan lineaariseksi polarisaatioksi ja ympyrää ristipolarisaatioksi.

Kuvassa 6 kuvataan elliptinen polarisaatio akselisuhteella E_{MAX}/E_{MIN} . Määre τ on pyörimissuunta ja kallistuskulma.



Kuva 6. Elliptinen polarisaatio [9, s. 28]

Antenni on tarkoitettu toimimaan tietyllä polarisaatiolla, jota kutsutaan pääpolarisaatioksi. Radioaalto sovituu vastaanottavaan antenniin, jos sekä aallon että antennin polarisaatiot ovat samat. Jos polarisaatiot poikkeavat, syntyy antennien epäsovitusta, mitä ilmaistaan hyötysuhteella η_p . [6, s. 159 - 164; 9, s. 27 - 28.]

3.1.5 Impedanssi ja kaistanleveys

Antennin impedanssi on impedanssi, joka näkyy antennin syöttönavoista. Sen resistiivinen osa liittyy antennin säteilemään tehoon ja antennirakenteen ohmisiin häviöihin. Reaktiivinen osa syntyy lähikentän energiaa varastoivasta ominaisuudesta. Impedanssi on matemaattisesti laskettuna jännitteen ja virran suhde antennin syötössä. Kaistanleveys on taajuusalue, jolla antenni toimii valittujen suoritusarvojen mukaan. [10, s. 36.]

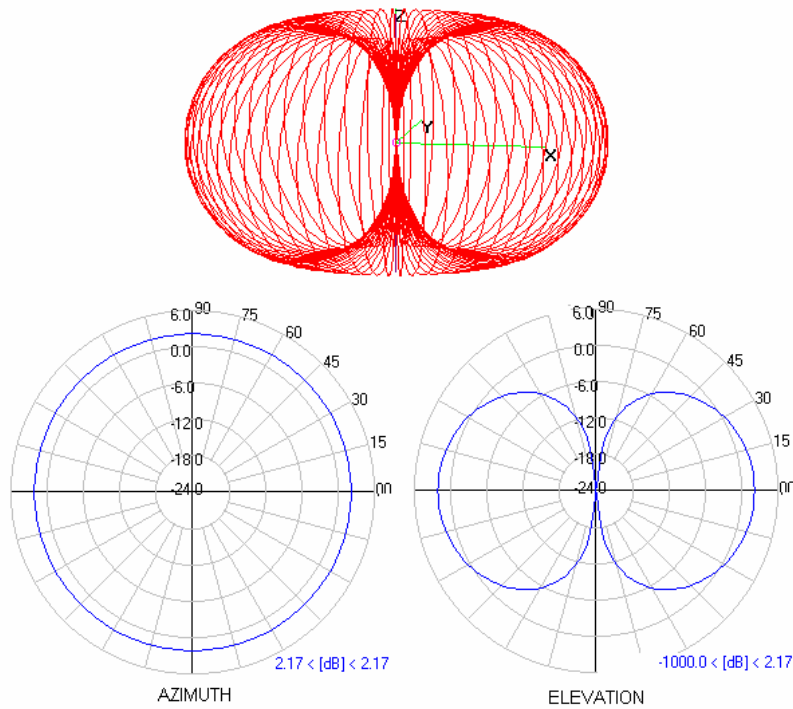
3.2 Antennityypit

Antennit voidaan jakaa moniin ryhmiin usealla eri tavalla. Jakoperuste voi olla esimerkiksi ominaisuudet, käyttötarkoitus tai toteutustapa. Antennit voidaan jakaa alaryhmiin ominaisuuksien puolesta polarisaation, kaistanleveyden tai säteilytavan mukaan. Säteilytavat voidaan jakaa virtaelementti-, apertuuri- tai kulkuaaltoantenneihin. Toteutustavan mukaan antennit voidaan luokitella lanka-, heijastin-, mikroliuska-, ja rakoantenneihin. Antennit voidaan myös luokitella sen mukaan, miten niiden toiminta muuttuu ajan funktiona. Kaikkia hyviä ominaisuuksia ei voi saada yhteen antenniin, joten käyttötarkoitus ratkaisee valinnan ja suunnittelussa joudutaan tekemään kompromisseja.

3.2.1 Lanka-antennit

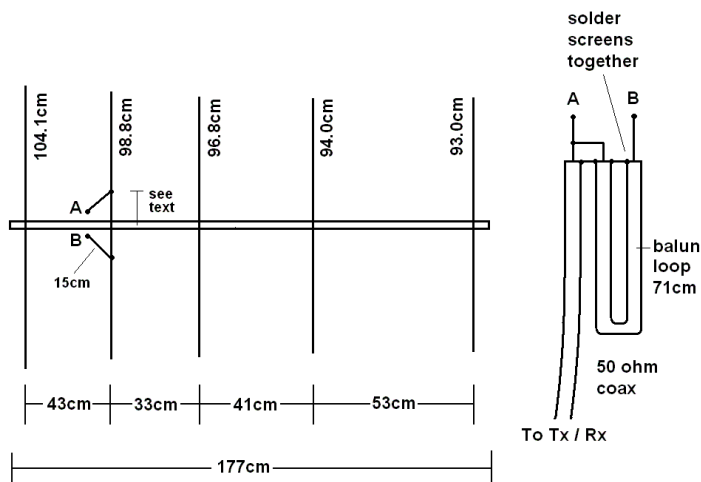
Lanka-antenneja käytetään paljon alle 1 GHz:n taajuusalueella. Tavallisin antennimalli on dipoli, eli keskeltä katkaistu suora johdin, jota voidaan syöttää aaltojohtona. Muita lanka-antennimalleja ovat Yagi-antennit, log-periodiset antennit ja heliksiantennit.

Dipoliantenni on ympärisäteilevä ja sillä on pieni suuntaavuus. Kuvassa 7 (ks. seur. s.) on dipoliantennin ideaalinen säteilykuvio. Kolmiulotteisen kuvan alla ovat pystytason ja vaakataso poikkileikkaukset.



Kuva 7. Dipoliantennin ideaalinen säteilykuvio [11]

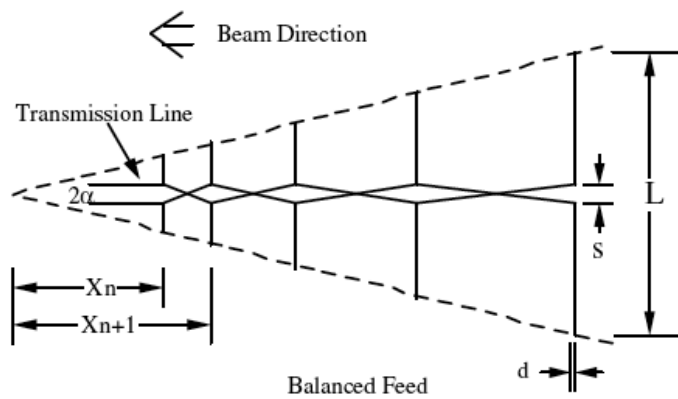
Yagi-antenni (kuva 8) on voimakkaasti suuntaava ja vahvistava antenni. Se tuottaa melko hyvän yhteyden vaatimattomillakin lähetystehoilla. Tarkka suuntaavuus vaatii sen, että pienillä taajuuksilla ja suurilla aallonpituuksilla antenni pitää mitoittaa suureksi ja korkealle.



Kuva 8. 5-elementtinen Yagi-antenni [12]

Yagi-antenni on ehkä tavallisin suunta-antenni. Yleisin sovellus on television VHF- ja UHF-antennit.

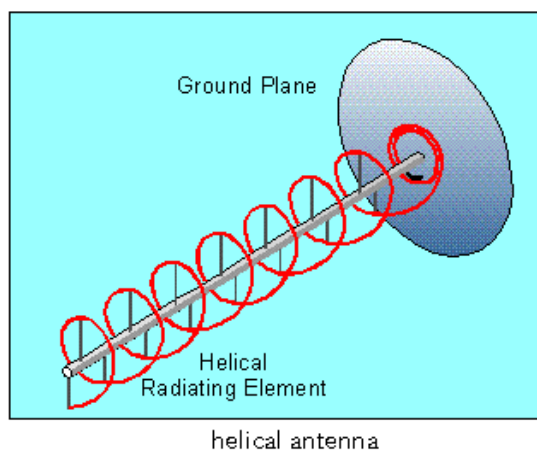
Log-periodinen antenni (kuva 9) on Yagi-antennin tavoin hyvin yleinen suunta-antenni. Toisin kuin Yagi-antennilla, sillä on laaja kaistanleveys, mutta huonompi vahvistus.



Kuva 9. Log-periodinen antenni [13]

Antennin elementit on kytketty vaiheistettuna rinnakkain. Säteilijänä toimii elementti, joka on resonanssissa eli suunnilleen puolen aallon pituinen. Taaempi, pidempi elementti toimii heijastimena. Loput elementit eivät erityisemmin vaikuta kyseisellä taajuudella antennin toimintaan.

Heliksiantenni (kuva 10) on säteilevän elementin ympärille spiraaliksi kierretty johdin.



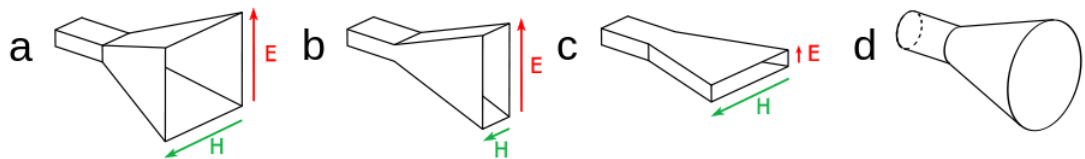
Kuva 10. Heliksiantenni [14]

Johdinkierroksen pituus ollessa alle puoli aaltoa, kentän suuntakuviot ovat kohtisuorassa akselia vasten. Antennin heliksi säteilee aksiaalimuodossa, kun pituuden suhdeterroin on 0,75 - 1,25. Silloin pääkeilan on akselin suuntaan ja aalto ympäriläpolarisoitunut. [6, s. 167 - 171; 10, s. 185 - 187, s. 304 - 306; 15.]

3.2.2 Apertuuriantennit

Apertuuri tarkoittaa aukkoa, avautumaa tai pintaa. Tämän mallin antennissa säteily tulee siirtojohtosta aukon kautta avaruuteen. Apertuuriantenneja ovat mm. torviantennit ja heijastinantennit.

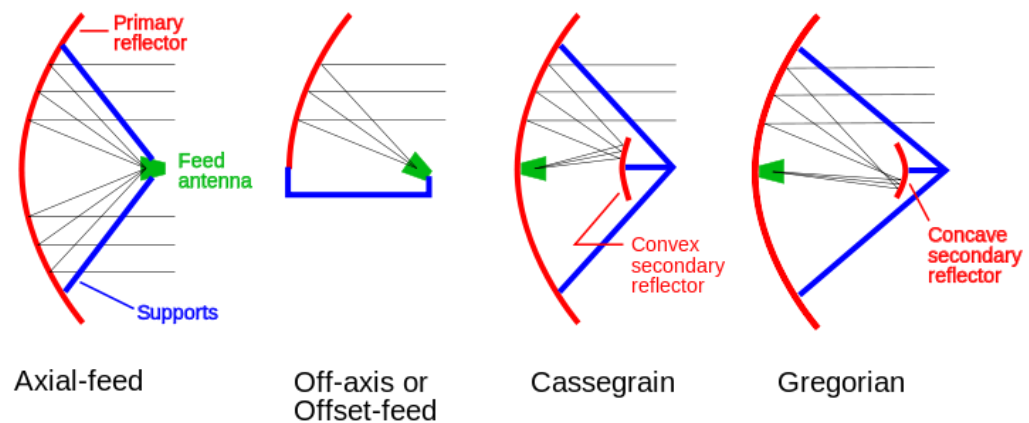
Torviantennissa (kuva 11) avoin putken pää toimii torvena. Sen ominaisuuksia voidaan parantaa, kun putken päätä laajennetaan. H-tason torvea on levennetty leveän sivun ja E-tason torvea kapean sivun suunnassa. Pyramidissa laajennus on molemminsuuntaista.



Kuva 11. Vasemmalta oikealle: Pyramidi-, E-taso-, H-taso-, ja kartiotorviantenni [16]

Signaalin vaihe on jäljessä torven reuna-alueilla, joten syntyy vaihevirhettä. Apertuuria leventämällä saadaan suuntaavuutta kasvatettua tiettyyn rajaan asti. Torviantennien häviöt ovat yleensä pienet, eli vahvistus ja suuntaavuus ovat lähellä toisiaan. Niitä käytetään mikroaaltotaajuuksilla ja heijastinantennin syöttöantenneina.

Heijastinantenneista yleisin on paraboliantenni (kuva 12, ks. seur. s.). Se kerää säteilyä optisen akselinsa suunnalta ja ohjaa sädekimpun polttopisteeseen. Pisteeseen kulkevat säteet vahvistavat toisiaan, koska ne ovat samanvaiheisia ja kulkevat yhtä pitkän matkan. Syöttöantenni, apuheijastin ja niiden tukirakenteet peittävät apertuuria, joka pienentää hyötysuhdetta ja nostaa ensimmäistä sivukeilatasa.



Kuva 12. Paraboloidiantennien signaalien syöttötapoja [17]

Heijastinantennien käyttösovelluksia löytyy suuren suuntaavuuden tarpeen omaavilta aloilta, kuten esimerkiksi radioastronomiasta, satelliittitietoliikenteestä ja tutkatekniikasta. [10, s. 73 - 77, s. 263 - 280; 16.]

3.2.3 Mikroliuska- ja rakoantennit

Mikroliuska koostuu kahdesta johdeliuskasta, joiden välillä on eristekerros. Sen rakenne toimii resonanssiantennina, joka säteilee molemmista päistään ja jonka aalto on lineaarisesti polarisoitunut. Mikroliuska-antennin etuja ovat pieni koko ja halvat valmistuskulut. Samalle mikroliuskalle pystytään rakentamaan myös muita elektronisia sovelluksia, esimerkiksi syöttöpiiri. Haittapuolia ovat kapea taajuuskaista, pieni vahvistus ja suuret häviöt.

Rakoantenni on molemmin puolin säteilevä aukollinen metallilevy, joka vastaa ominaisuuksiltaan aukon pituista dipoliantennia. Signaali syötetään joko koaksaalikaapelilla tai aaltoputkella. Sovelluksia käytetään mikrotaajuuksilla mm. lentokoneissa. [6, s. 182 - 186; 10, s. 219 - 225.]

4 Antennien mittaaminen

Antennien mittaustekniikka on laaja ala, jonka toimintatavat riippuvat erilaisista mittauspaikoista, antenneista, niiden sovelluksista ja mitattavista ominaisuuksista. Mittaus voi olla hyvin yksinkertaista tai hyvin vaikeaa.

Antennien mittauksessa hyödynnetään niiden resiprookkisuuutta, koska osa mittauksista on helpompi ja edullisempi suorittaa lähetysantennille ja osa taas vastaanottoantennille. Resiprookkisen antennin ominaisuudet eivät riipu siitä, käytetäänkö sitä lähetys- tai vastaanottoantennina.

Antennimittauksessa mitattavia ominaisuuksia ovat polarisaatio, tehotiheys, kentänvoimakkuus, vaihe, impedanssi, taajuuskaista, keilanleveys, sivukeilat ja vahvistus. Usein riittää pelkästään suuntakuvion mittaus päätasoissa ja vahvistuksen mittaaminen.

4.1 Mittauspaikat

Antennin mittauspaikan valintaan vaikuttavat antennin sijainti, koko ja taajuus. Antennien mittauspaikkoja ovat heijastukseton huone, vapaantilan ja kompakti mittauspaikka sekä lähikenttä- ja maaheijastusmittauspaikat. [18, s. 175 - 176.]

4.1.1 Heijastukseton huone

Heijastuksettomassa huoneessa mittaukset voidaan suorittaa hallituissa olosuhteissa ilman ympäristön ja sääolojen aiheuttamia häiriöitä. Huone on eristetty aaltoja absorboivalla materiaalilla (kuva 13, ks. seur. s.) ja vaimennusmateriaalin alle on sijoitettu tiivis metallikerros, jolloin tila jäljittelee vapaata avaruutta. Huoneen pituuden ja leveyden suhteen pitäisi olla 2:1, sillä huomattavasti suurempi huone kasvattaa tulokulmaa ja heijastuskerrointa.



Kuva 13. Heijastukseton huone Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa

Suorakaiteen muotoisessa huoneessa kriittisimmät kohdat ovat pitkien seinien kohdalla, joista aalto voi tulla yhdellä heijastuksella vastaanottoantenniin. Nämä kohdat on päällystettävä mahdollisimman hyvälaatuisella vaimennusmateriaalilla. Antennien tukirakenteet on suojattava hyvin, ettei seisovia aaltoja synny niiden välille. Vaimennusmateriaalin paksuus määrittää huoneen taajuusalueen ja kaukokentän vaatimus rajoittaa mitattavan antennin kokoa. Lähetysantenni suunnataan siten, ettei pääkeila valaise sivuseiniä. Mittaukset tehdään ns. hiljaisella alueella, jossa heijastukset on pyritty minimoimaan. [18, s. 178 - 179.]

4.1.2 Vapaantilan mittauspaikka

Vapaantilan mittauspaikka voidaan toteuttaa korkeisiin torneihin tai vuoren huipulle asennetuille antennille, joiden etäisyys toteuttaa kaukokentälle asetetut vaatimukset. Mittausympäristöstä pyritään poistamaan esteet ja heijastavat kohteet sekä valitsemaan sellainen lähetysantenni, jonka pääkeila ei valaise heijastavia kohteita. Esteet, joita ei voida siirtää, pyritään eliminoimaan antennin suuntaamisella tai absorboimalla

esteestä heijastunut teho. Maaheijastusta vähennetään metalliverkoista tehdyillä diffraktioaidoilla tai mittaamalla vain puolet säteilykuvioista kerrallaan kääntämällä antennia elevaatio suunnassa niin, että pääkeila osoittaa taivaalle.

Heijastukset, joiden kulku aika eroaa riittävästi suoran signaalin kulkuajasta, voidaan erottaa mitattavasta signaalista lähettämällä lyhyitä pulsseja ja pitämällä vastaanotinta auki vain mitattavan signaalin saapuessa. Toinen keino on pyyhkäistä mitattavaa lähetimen taajuutta ja tehdä mitatulle taajuusvasteelle käänteinen Fourier-muunnos. Näin saadulle aika-alueen vasteelle ei-toivottujen osien matemaattisen poistamisen jälkeen tehdään Fourier-muunnos ja saadaan korjattu taajuusvaste. [18, s. 176 - 177.]

4.1.3 Maaheijastusmittauspaikka

Maaheijastusmittauspaikalla antennien välisen pinnan pitää olla tasainen ja hyvin johdettava, jotta suoraan edennyt ja heijastunut signaali yhdistyvät muodostaen interferenssikuvion. Lähetysantenni ja sen peilikuva muodostavat kentän. Sopivalla korkeudella interferenssikuvion ensimmäinen ja amplitudiltaan laakein keila osuu mitattavan antennin kohdalle. Taajuutta muutettaessa korkeutta on säädettävä. Heijastuskulman ollessa pieni heijastuskertoimen itseisarvo on lähes 1 ja vaihe melkein 0° vertikaalisella polarisaatiolla ja 180° horisontaalisella polarisaatiolla. [18, s. 177 - 178.]

4.1.4 Kompakti mittauspaikka

Kompaktissa mittauspaikassa sivusta syötetyllä torvella heijastetaan lähteen kaukokenttää muistuttava tasoaalto mitattavalle antennille. Heijastimena voidaan käyttää paraboloidiheijastinta. Tasoaalto saadaan myös linssin tai hologrammin avulla. Heijastimen reunoista ylimääräinen säteily voidaan eliminoida muotoilemalla reunat sahalaitaisiksi tai kaareviksi. [18, s. 179 - 181.]

4.1.5 Lähikenttämittauspaikka

Lähikenttämittauksessa mitataan tunnetulla leveäkeilaisella näytteenottoantennilla testattavan antennin aiheuttaman sähkökentän amplitudi ja vaihe ortogonaalisella polarisaatiolla muutaman aallonpituuden päästä pinnasta, jolloin reaktiivisella kentällä ei ole enää merkitystä.

Mittauspintana voi käyttää taso-, sylinteri- tai pallokoordinaatistoa. Tasokoordinaatiomittaus soveltuu yhteen suuntaan säteileville antennille ja pallokoordinaatiomittaus soveltuu ympärisäteileville antennille. Lähikenttämittauksia häiritsevät antennin ja mitatapään monikertaheijastukset. [18, s. 181 - 182.]

4.2 Antennin säteilykuvion mittaus

Säteilykuviot mitataan usein antennin päätasossa. Lineaarissa polarisaatiossa valitaan antennin päätasoksi sähkökentän suuntainen H-taso. Lähetys- ja vastaanottoantennien kenttävektorit ovat yhdensuuntaisia. Elliptisessä polarisaatiossa antennin päätasot määritellään antennin rakenteen perusteella. Pääpolarisaation säteilykuvion mittauksessa polarisaatiot asetetaan pääkeilan suunnassa yhdensuuntaisiksi. Ristipolarisaatiossa lähetysantenni käännetään 90° vastaanottoantenniin nähden. [10, s. 31 - 33.]

4.3 Antennin vahvistuksen mittaus

Vahvistuksen mittausmenetelmät ovat absoluuttinen mittaus ja vertailumittaus. Absoluuttisen vahvistuksen mittauksessa antennien pääkeilat suunnataan mahdollisimman tarkasti toisiaan kohti. Jos mittaukseen on käytettävissä kaksi mahdollisimman samantyyppistä antennia, mitataan vastaanotettu teho ja lähetysteho. Vahvistus voidaan sitten laskea vapaan tilan etenemiskaavalla. Mittauksessa voidaan myös käyttää kolme erilaista antennia, jolloin ne mitataan pareittain. Jokaisen antennin vahvistukset voidaan laskea mittauksista saaduista yhtälöryhmistä.

Vertailumittauksessa on tunnettava yhden antennin vahvistus, jolloin mitattavan antennin vahvistus voidaan mitata tarkkuusvaimentimella. Vastaanottimen epälineaarisuus ei vaikuta mittaustulokseen. [10, s. 33 - 36; 18, s. 193 - 195.]

4.4 Antennin polarisaation mittaus

Absoluuttinen polarisaation kalibrointi voidaan suorittaa mittaamalla kolme antennia pareittain. Jokaiselle parille suoritetaan kaksi mittausta kääntämällä vastaanottoantennia 90° lähetysantenniin nähden, jolloin polarisaatiot saadaan lasketua mitatuista amplitudiarvoista.

Lähetysantennin polarisaatio mitataan kaksikanavaisella vastaanottimella, jonka kanavat toimivat ortogonaalisilla (suorakulmaisilla) polarisaatioilla. Kanavien polarisaatioiden ollessa vertikaalinen ja horisontaalinen lineaaripolarisaatio, kanavien amplitudit mitataan, ja vaihe-ero voidaan laskea sen yhtälöstä. [10, s. 33 - 36; 18, s. 192 - 193.]

4.5 Antennin impedanssin mittaus

Antennin sisäänmenoimpedanssin mittauksessa voidaan käyttää impedanssiltaa, piirianalysointia tai urajohtoa. Ylimääräiset heijastukset voidaan eliminoida suorittamalla mittaus heijastuksettomassa tilassa. Niiden aiheuttamia virheitä voidaan vähentää mittaamalla tuloskeskiarvo eri paikoissa. Rakenteiden aiheuttamat heijastukset eivät ole ylimääräisiä heijastuksia. [10, s. 36; 18, s. 93 - 100, s. 195.]

5 Laitteisto ja ohjelmisto

Antennimittausjärjestelmän kehittämiseen tärkeimmät käytetyt työkalut olivat piirianalysaattori, pyörityskone ja ohjelmointisovellus. Tämä luku esittelee käytetyn laitteiston, ohjelmiston ja niiden valmistajat.

5.1 Hewlett-Packard Company ja Agilent Technologies -yritykset

Hewlett-Packard Company (yleisesti tunnettu lyhenteellä HP) on maailmanlaajuinen teknologiayhtiö. Yhtiö on perustettu vuonna 1939. Sen pääkonttori sijaitsee Kaliforniassa Yhdysvalloissa ja keskittyy tuotteiltaan tietotekniikan, tulostuksen ja kuvankäsittelyn aloille. Sillä oli vuonna 2012 noin 331 800 työntekijää maailmanlaajuisesti. HP oli vuonna 2012 Fortune-talouslehdessä liikevaihdoltaan sijalla 10 Yhdysvaltojen 500 suurimman pörssiyrityksen listalla. Agilent Technologies on Hewlett-Packardista vuonna 1999 eriytetty mittalaitteiden valmistajayritys. Se on alallaan maailman suurin. [19; 20.]

5.2 Agilent 8714ET RF Network Analyzer -piirianalysaattori

Agilent 8714ET RF Network Analyzer (kuva 14) on insinööriyössä käytetty piirianalysaattori.



Kuva 14. Agilent 8714ET RF Network Analyzer -piirianalysaattori

Piirianalyssaattorissa on sisäänrakennettu mittauslaitteisto. Kaksi itsenäistä kanavaa voivat mitata ja esittää samanaikaisesti kahden eri laitteen parametreja eri formaateissa, esimerkiksi signaalin lähetystä ja heijastuksen vastaanottoa. [21.]

5.3 Brüel & Kjær -yritys

Brüel & Kjær on vuonna 1942 perustettu monikansallinen insinööriyön ja elektroniikan yhtiö. Sen pääkonttori sijaitsee Kööpenhaminassa, Tanskassa. Se on maailman suurin äänen ja värähtelyn mittaukseen käytettyjen laitteiden, järjestelmien ja sovellusten valmistaja. [22.]

5.4 Brüel & Kjær Turntable System Type 9640 -pyörityskone

Brüel & Kjær Turntable System Type 9640 (kuva 15) on projektissa käytetty pyörityskone.



Kuva 15. Brüel & Kjær Turntable System Type 9640 -pyörityskone [23]

Antenni asennetaan laitteen pyörivään alustaan, jota voidaan suoraan ohjata laitteen mukana tulevan kauko-ohjaimen avulla. Tässä työssä ohjauskomennot syötetään LabVIEW-ohjelmalla kaukosäätimeen ja edelleen alustalle, eli kauko-ohjain toimii välikätenä tietokoneen ja pyörityskoneen välillä. Piirianalyssaattori ja LabVIEW rekisteröivät antennin lähettämän ja vastaanottaman signaalin.

5.5 National Instruments Corporation -yritys

National Instruments Corporation (tunnetaan myös lyhenteellä NI) on Yhdysvaltalainen, kansainvälinen yhtiö, joka erikoistuu virtuaalisiin instrumentteihin ja automaatiotestilaitteistoihin. Sen yleisimpiä sovelluksia ovat tiedonkeruu (DAQ), instrumenttihakinta, ja konenäkö (MV). [24.]

5.5.1 NI GPIB-USB-HS -kontrolleri

NI GPIB-USB-HS (kuva 16) on projektissa käytetty National Instrumentsin valmistama kontrolleri, joka muuttaa tietokoneen USB-liitännän yhteensopivaksi piirianalysaattorin ja pyörityskoneen GPIB-liitäntöihin.



Kuva 16. NI GPIB-USB-HS -kontrolleri [25]

Päälle kytkettynä laite pystyy luomaan kommunikointiyhteyden LabVIEW'n ja tässä työssä LabVIEW'illä ohjattavien laitteiden välille.

5.5.2 LabVIEW -ohjelmointisovellus

LabVIEW on projektissa käytetty National Instrumentsin kehittämä ohjelmointiympäristö, joka perustuu graafiseen G-kieleen. Se on lähes standardi mittaus- ja testaussovelluksissa, mutta soveltuu helppokäyttöisyytensä puolesta myös yleisohjelmointikieleksi. Muita tyypillisiä käyttökohteita ovat mm. teollisuusautomaatiosovellukset ja laajat, hajautetut tiedonvarastointi- ja analysointisovellukset. Tehokkuudessaan se on kilpailukykyinen C- ja C++-ohjelmoinnin kanssa. LabVIEW-ohjelmat ovat suoraan siirrettäviä eri käyttöjärjestelmien välillä. [26.]

6 Antennimittausjärjestelmän ympäristö, kehitys ja testaus

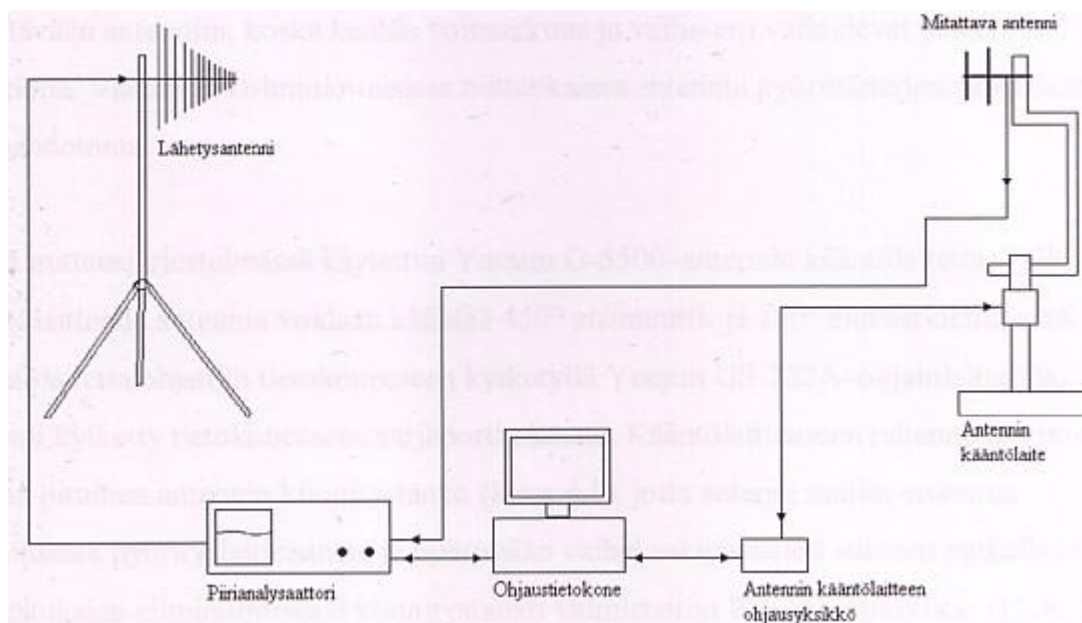
Mittausjärjestelmä toimii nopeana ja yksinkertaisena instrumenttina antennimittauksissa. Mittauksissa keskityttiin antennien säteilykuvioiden $P(\theta, \phi)$ mittaukseen. Tehokuviot mitattiin toisiaan vastaan horisontaalisesti kohtisuorassa tasossa. Järjestelmää ei ole tarkoitettu spesifikaatiomittauksiin tai tarkkuusvaatimuksiltaan hyvin tarkkoihin mittauksiin.

6.1 Mittausympäristö

Mittausjärjestelmä on tarkoitettu ensisijaisesti käytettäväksi heijastuksettomassa huoneessa, mutta myös muut ympäristöt sopivat. Ympäristön mahdolliset virhetekijät pitää silloin osata ottaa huomioon. Kaikki antennimittaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Albertinkadun toimipisteen heijastuksettomassa huoneessa tai luokahuoneessa. Luokahuone oli epäideaalinen antennimittausympäristöön muista sähkölaitteista, ihmisistä ja ympäristön epätasaisuuksista johtuen, mutta siellä pystyi testaamaan, että järjestelmä tulostaa kuviollisesti haluttua mittaustulosta. Heijastuksettomassa huoneessa saadut mittaustulokset olivat luotettavampia kuin luokahuoneessa, koska tilat on luotu tämän kaltaisia mittauksia varten.

6.2 Antennimittausjärjestelmän rakenne ja ohjelmointi

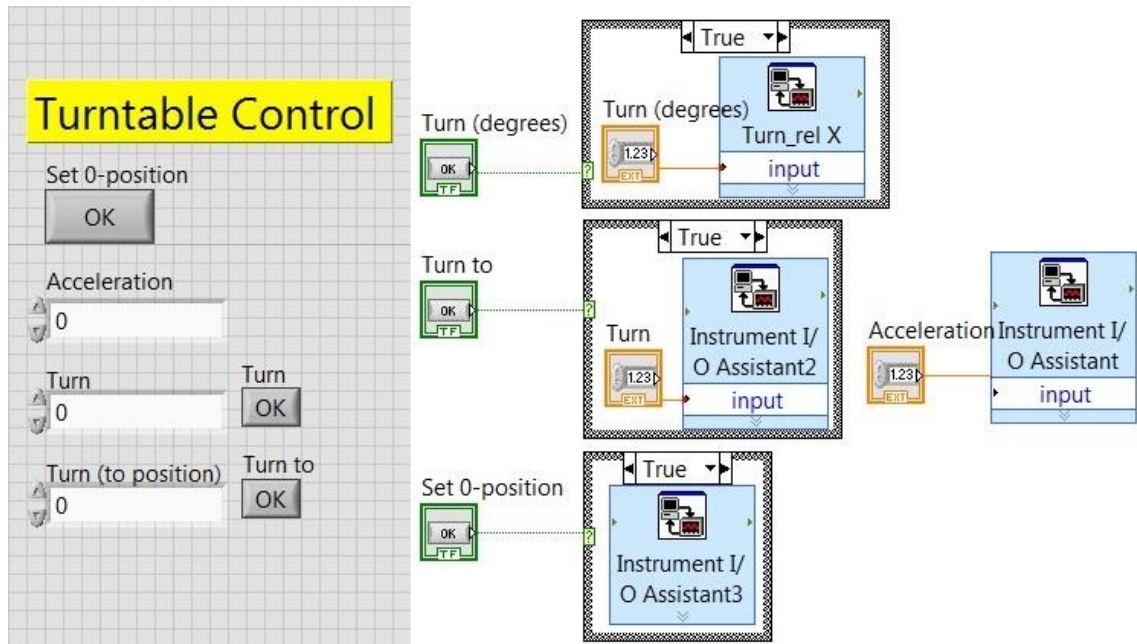
Tässä insinööriyössä mittausjärjestelmä koostuu ohjaustietokoneesta, piirianalysointilaitteesta ja antennin kääntölaitteesta. Ohjaustietokone voi ohjata piirianalysointilaitetta ja antennin kääntölaitetta sekä piirtää antennista mitatun suuntakuvion polaarikoordinaatistoon. Muutaman tarvittavan alkuasetuksen jälkeen järjestelmä toimii hyvin yksinkertaisilla komennoilla. Kuvassa 17 (ks. seur. s.) esitetään mittausjärjestelmän lohkokaavio.



Kuva 17. Lohkokaavio antennimittausjärjestelmästä [27, s. 38]

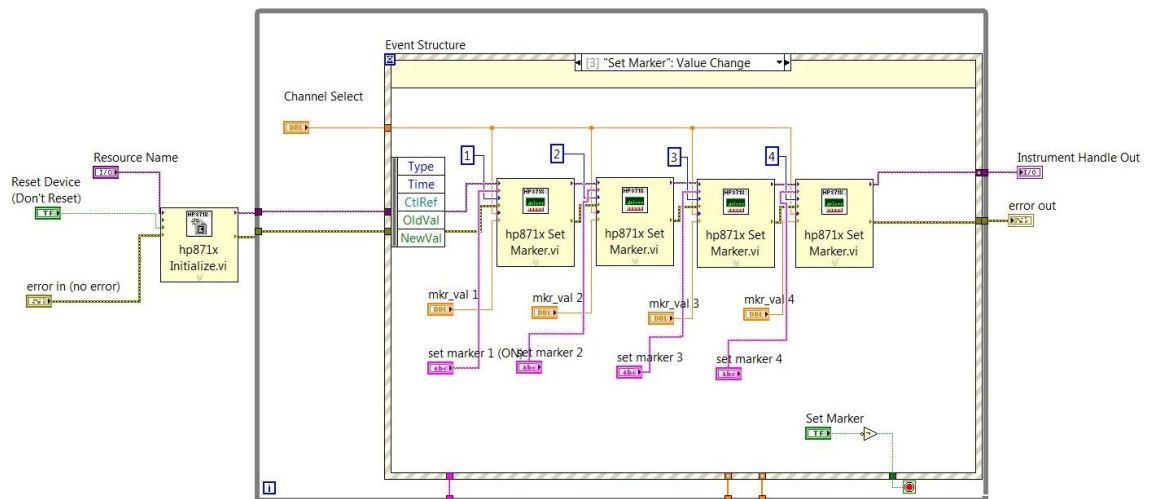
LabVIEW'llä ohjelmointi on graafisesta käyttöliittymästään johtuen yksinkertaista verrattuna perinteisempiin ohjelmointikieliin, kuten esimerkiksi C-kieli tai Java. Koodaaminen tapahtuu ikoneilla ja niiden sisään- ja ulostulojen kytkemisellä toisiinsa. Ohjelmointi helpottuu entisestään, jos ohjattaville laitteille löytyy yhteensopiva ajurituki LabVIEW'n kanssa. Tässä työssä piirianalysaattorille löytyi ajurit, mutta pyörityskoneelle ei. Onneksi pyörityskoneelle ei ollut tarpeen ohjelmoida montaa komentoa, joten ajurien tekeminen täysin alusta itse ei ollut vaikeaa. Pyörityskoneen ohjeista löytyivät koodit komennoille, jotka pystyttiin kirjoittamaan LabVIEW'n omiin virtuaalisiin instrumentteihin ja syöttämään komennot niiden kautta pyörityskoneelle. Kuvassa 18 (ks. seur. s.) esitetään pyörityskoneen LabVIEW-koodi ja sen ohjauspaneeli.

Piirianalysaattorin ohjelmointi oli huomattavasti vaativampi osuus siitä huolimatta, että sen toiminnoille löytyi säteilykuvion piirtoa lukuun ottamatta LabVIEW'n tukemat ajurit. Komennot olivat monimutkaisempia ja pelkästään erilaisille toiminnoille ajureita oli n. 250 kappaletta, joista oli karsittava ne jotka tähän työhön tarvittiin. Tämä vaati kaikkien ajurien käyttöohjeiden läpi lukemista ohjekirjasta, että tarpeelliset ajurit osattiin valikoida.



Kuva 18. Pyörityskoneen ohjauspaneeli ja LabVIEW-koodi

Kun tarvittavat ajurit oli seulottu, piirianalysaattorin toimintojen koodaamiseen löytyi auttavia esimerkkejä muista samankaltaisista järjestelmistä Internetin avulla. Esimerkit olivat vain suuntaa antavia, mutta helpottivat ymmärtämään miten ohjauspaneelia pitäisi lähteä rakentamaan. Kuvassa 19 on esimerkki piirianalysaattorin yhden toiminnon koodista. Ajureista valittiin tähän työhön yhteensä n. 20 ajuria, joista puolelle tehtiin ohjelmaan omat rakennevälilehdet.



Kuva 19. Esimerkkiosa piirianalysaattorin LabVIEW-koodista

Koska piirianalysoijan ajureista ei löytynyt suoraa tukea mittauksen graafiselle esittämiselle, oli tämä sovellus tehtävä itse kokonaan itse (liite 1). LabVIEW'n omista instrumenteista löytyy useita pohjia erilaisille graafisille virtuaali-instrumenteille, mutta tähän työhön tarvittiin vain polaariset esitystapa. LabVIEW'n omat instrumentit saatiin muutamien vastoinkäymisten jälkeen piirtämään haluttu kuvio käytettävien laitteiden mittauksista.

Kaikki kolme ohjelmoitua käyttöliittymää olisi käyttömukavuuden kannalta ollut hyvä saada yhdistettyä yhden ajettavan ohjelmistopakettien sisään, mutta valitettavasti LabVIEW'n oma muistikapasiteetti ei riittänyt suorittamaan niin montaa sovellusta samanaikaisesti. Käyttöliittymät on tästä johtuen suoritettava erillisinä sovelluksina (liite 2). Jokaiselle ohjelmalle on kirjoitettu englanninkielinen ohjekirja (liite 3).

6.3 Antennimittausjärjestelmän testaus ja tulokset

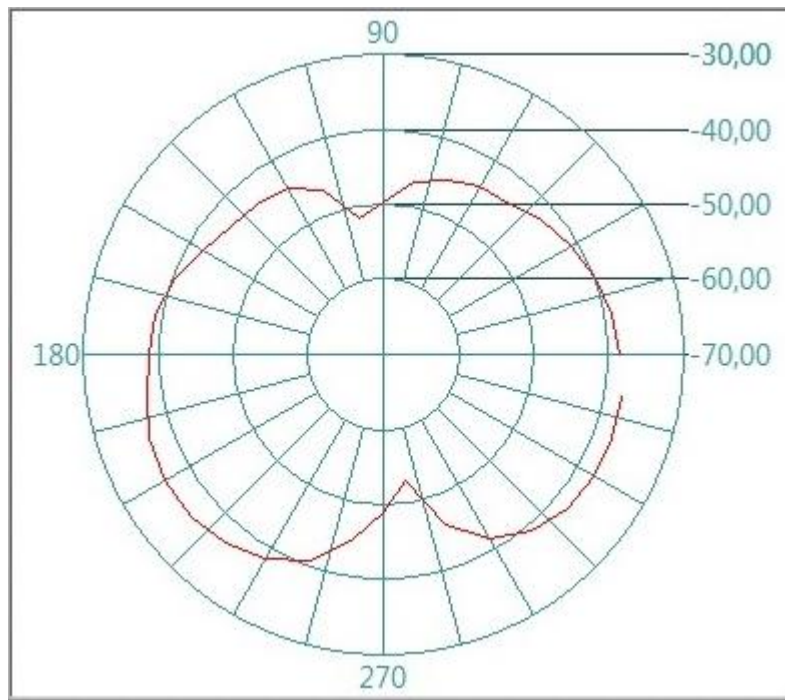
Antennimittausjärjestelmän testauksessa käytettiin kahta horisontaalisesti samaan tasoon asetettua lanka-antennia, jotka tarjottiin oppilaitoksen puolesta. Antennin suuntakuviot ovat tunnettuja. Jos suuntakuviot eivät olisi odotetun kaltaisia, voitaisiin olettaa että syynä on jokin ympäristöstä aiheutuva voimakas häiriö.

Ensimmäiset mittaukset suoritettiin luokkahuoneessa. Mittauksia tehdessä kuvanpiirto oli mahdollista vain piirianalysoijan omalla näytöllä ja niillä testattiin, että koodia on lähdetty rakentamaan oikealla tavalla. Piirianalysoijan mittaustulokset ja kuvat eivät kuitenkaan koodin virheistä johtuen antaneet kovinkaan luotettavia lukuja.

Koodin virheellisyyttä ei ensimmäisillä mittauskerroilla kuitenkaan osattu sanoa varmaksi syyksi, joten uusintamittaukset suoritettiin häiriöttömässä huoneessa. Valitettavasti myös tällä piirianalysoijan antaessa näytölle edelleen epämääräisiä tuloksia, jolloin vika jäljitettiin koodin virheellisyyteen. Piirianalysoijan ohjainkoodi saatiin korjattua, ja se alkoi tottelemaan kunnolla sille annettuja komentoja.

Ensimmäiset polaariset mittausohjaimien testit suoritettiin myös luokkahuoneessa, koska ennakoitiin, että koodin toimiessa oikein polaarinen suuntakuviot olisi ympäröivistä häiriötekijöistä huolimatta kuvan 7 kaltainen (ks. s. 14).

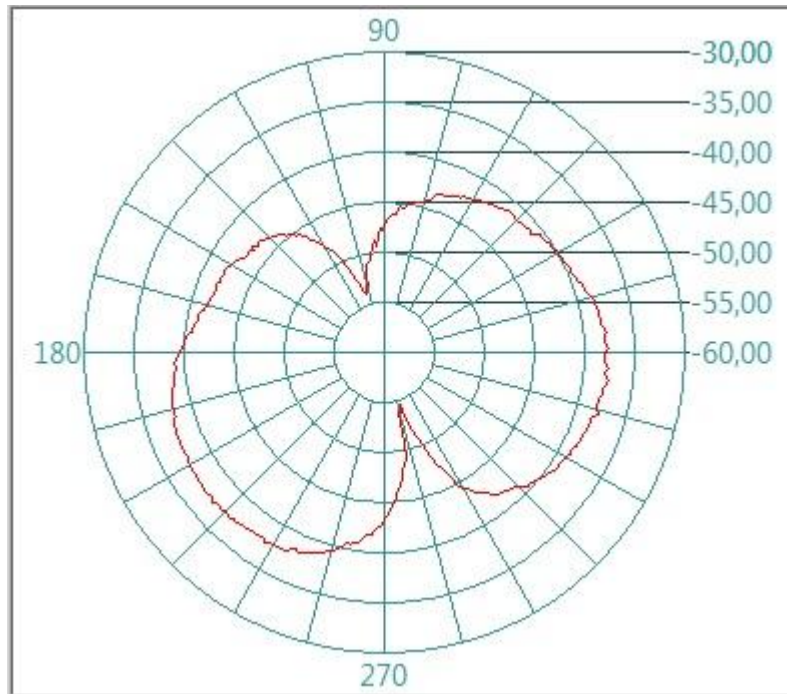
Muutamit ohjaimen koodissa olleet virheet kuitenkin aiheuttivat testimittauksissa (kuva 20) sen verran epätarkkoja lukuja, että niissä nähtiin varaa parantaa.



Kuva 20. Polaariset mittausohjaimen epätarkka suuntakuviot mittausulos.

Suurimmaksi ongelmaksi ilmeni pyörityskoneen ja LabVIEW'n tekemien mittausten nopeuden epäsuhtaiseksi. Pyörityskone ei ehtinyt pyöriä ohjainpaneelin nopean mittaustahdin mukana ajoissa seuraavalle mittauskulmalle, joten koodiin ohjelmoitiin mahdollisuus asettaa viive, jonka välein LabVIEW suorittaa mittauksen ja pyörityskone ehtii helposti kääntyä oikeaan asentoon ennen seuraavaa mittausta.

Muutaman päivän aktiivisella paneutumisella epätarkkuuksia aiheuttaneet virheet onnistuttiin löytämään ja korjaamaan kokonaan koodista, jonka jälkeen jo pelkästään julkisessa luokkahuoneessa tehdyt koemittaukset tarkentuivat huomattavasti (kuva 21).



Kuva 21. Polaarisen mittausohjaimen tarkempi suuntakuvion mittaustulos.

Koemittauksien perusteella mittausjärjestelmä toimii luotettavasti. Luokkahuoneessa mitattujen antennien etäisyys toisistaan oli noin 50 cm. Polaarinen kuvaaja näyttää hyvältä avoimessa luokkahuoneessa tehdyistä mittauksista huolimatta. Muut huoneessa olevat sähkölaitteet, seinien rakenteet ja ihmiset aiheuttavat häiriöitä, mutta mittaus tulokset paranevat entisestään häiriöttömässä tilassa.

7 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä kehitettiin antennin polaarisen suuntakuvion mittausjärjestelmä, jota voidaan pitää nopeana, yksinkertaisena ja helppokäyttöisenä instrumenttina erilaisten antennien mittaamiseen. Mittausjärjestelmän käyttöympäristön tulisi olla heijastukseton huone häiriöiden minimoimiseksi.

Mittausjärjestelmä koostui tietokoneesta, piirianalysoitsijasta ja antennin pyörityskoneesta. Ohjaustietokoneella ohjattiin piirianalysoitsijaa ja antennin kääntölaitetta ja piirrettiin niistä kuvaajat polaariseksi kuvaajaksi. Ohjaustietokoneen käyttöliittymä ohjelmoitiin LabVIEW-ohjelmistolla. Koemittauksissa mitattiin referenssiantennia, jonka suuntakuviot on tunnettu.

Tehtyjen koemittausten perusteella mittausjärjestelmä on vakaa ja se toimii. Mittauksien toistettavuus oli hyvä, koska eri mittauskertojen tulokset olivat identtisiä. Mittaus-tarkkuudet ovat hyväksyttäviä ottaen huomioon käytetyn laitteiston ja mittaustilat. Suurimmat mittausvirheet saatiin häiriöttömän huoneen ulkopuolella tehdyistä mittauksista. Häiriöistä, jossa häiriötekijöihin voitiin vaikuttaa hyvin minimaalisesti. Mittausvirheet johtuivat ympäristön epätasaisuudesta ja muista sähkölaitteista.

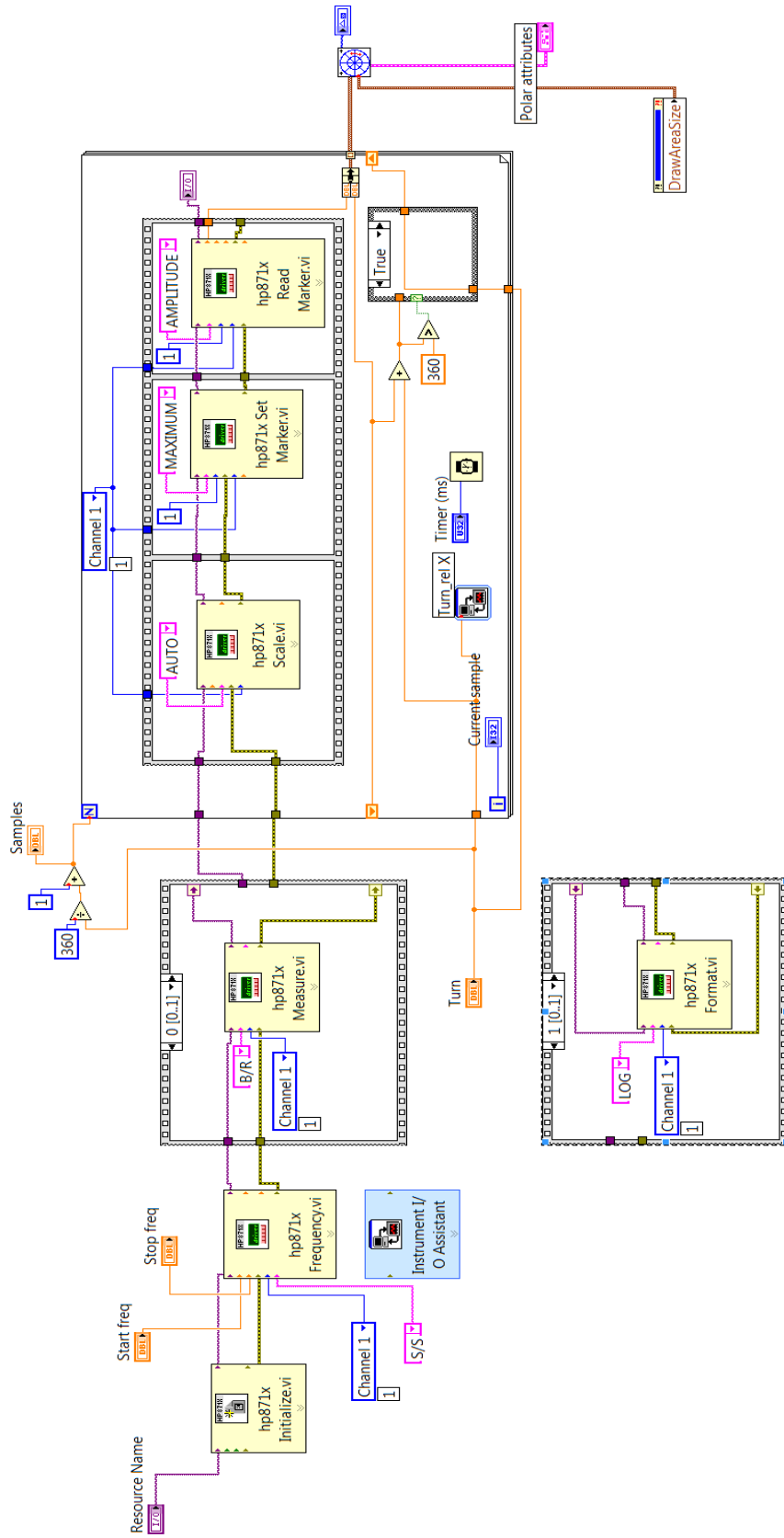
Mittausjärjestelmää voidaan sellaisenaan käyttää antennien suuntakuvioiden mittaamiseen, mutta järjestelmää pitää vielä testata myös ulkotiloissa ja erilaisissa olosuhteissa. Mittausjärjestelmä voidaan laajentaa suhteellisen vaivatta kattamaan muita laitekoonpanoja, jos niihin on saatavilla LabVIEW'ta tukevat ajurit. Käyttöliittymään on piirianalysoitsijassa olevien ajurien määrän ansiosta mahdollista lisätä ominaisuuksia, joita ajanpuutteesta johtuen ei ehditty implementoimaan tähän työhön. Myös muita graafisia esitystapoja on mahdollista luoda (esim. xy-koordinaatisto ja 3D-kuva).

Lähteet

- 1 Wiki.ham.fi. 2013, luettu 14.11.2013. Aallonpituus. Verkkodokumentti. <<http://wiki.ham.fi/Aallonpituus>>
- 2 Wikipedia. 2013, luettu 14.11.2013. Sähkömagneettinen spektri. Verkkodokumentti. <http://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6magneettinen_spektri>
- 3 Korpela, Jukka. 27.10.2006, luettu 1.11.2013. Datatekniikka ja viestintä, Sähkömagneettinen spektri. Verkkodokumentti. <<http://www.cs.tut.fi/~jkorpela/smag.html>>
- 4 Eklöf, Kalevi - Markku, Arto - Railo, Kaarlo, I - Vehvasvuori, Jukka. 2001. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.
- 5 Lehto, Arto. 2006. Radioaaltojen maailma. Helsinki: Otatieto.
- 6 Räisänen, Antti - Lehto, Arto. 2003. Radiotekniikan perusteet. 11. painos. Helsinki: Otatieto.
- 7 Räisänen, Antti - Lehto, Arto. 1993. Radiotekniikka. 3. painos. Espoo: Otatieto.
- 8 Wikipedia. 2013, luettu 21.11.2013. Antenni. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Antenni>>
- 9 Räisänen, Antti - Lehto, Arto. 1996. Radiotekniikka. 6. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
- 10 Lindell, Ismo - Nikoskinen, Keijo. 1997. Antenniteoria. 4. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
- 11 Marshall, Trevor. 1.10.2001, luettu 4.11.2013. Antennas Enhance WLA Security. Verkkodokumentti. <http://www.trevormarshall.com/byte_articles/byte1.htm>
- 12 Hare, Jonathan. 2013, luettu 21.11.2013. Tube-Yagi for Portable Work on 144MHz. Verkkodokumentti. <<http://www.creative-science.org.uk/tubeyagi.html>>
- 13 Wikibooks. 2013, luettu 21.11.2013. Antennas. Verkkodokumentti. <http://en.wikibooks.org/wiki/Communication_Systems/Antennas>
- 14 Antennitaulukko. 10.2003, luettu 4.11.2013. Verkkodokumentti. <<http://oh3tr.ele.tut.fi/suomi/kurssi/antennitaulu.html>>
- 15 Wikipedia. 2013, luettu 21.11.2013. Jagiantenni. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Jagiantenni>>
- 16 Wikipedia. 2013, luettu 22.11.2013. Horn Antenna. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Horn_antenna>
- 17 Wikipedia. 2013, luettu 22.11.2013. Parabolic Antenna. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna>

- 18 Räsänen, Antti - Lehto, Arto. 2001. Mikroaaltomittaustekniikka. 5. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
- 19 Wikipedia. 2013, luettu 26.11.2013. Hewlett-Packard. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Hewlett-Packard>>
- 20 Wikipedia. 2013, luettu 27.11.2013. Agilent Technologies. Verkkodokumentti. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Agilent_Technologies>
- 21 Agilent Technologies. 2013, luettu 27.11.2013. Verkkodokumentti. <<http://www.home.agilent.com>>
- 22 Wikipedia. 2013, luettu 26.11.2013. Brüel & Kjær. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Br%C3%BCel_%26_Kj%C3%A6r>
- 23 Brüel & Kjær. 2013, luettu 26.11.2013. Verkkodokumentti. <<http://www.bksv.com>>
- 24 Wikipedia. 2013, luettu 26.11.2013. National Instruments. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/National_Instruments>
- 25 National Instruments. 2013, luettu 27.11.2013. Verkkodokumentti. <<http://sine.ni.com>>
- 26 Wikipedia. 2013, luettu 27.11.2013. LabVIEW. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>>
- 27 Mikko Liimatainen. 8.5.2007. Automaattinen antennin suuntakuvion mittaussjärjestelmä. Insinööriyö. EVTEK.

Polaarisen säteilykuvion mittaussovelluksen LabVIEW-koodi



Antennimittausjärjestelmän ohjauspaneelit

The screenshot displays the 'Network Analyzer Control' software interface, which is divided into several functional panels. A yellow highlight is placed over the 'Network Analyzer Control' title bar.

- Instrument Handle:** Includes fields for 'Resource Name' (with a percentage symbol), 'Channel Active' (set to 0), and 'Channel Select' (with a dropdown menu showing 1 and 2).
- Freq Control:** Features 'START/STOP' buttons, 'freq1' and 'freq2' input fields (both set to 1), and 'Format' (set to LOG).
- BW control:** Contains 'SET BW' and 'bandwidth' input fields (set to 4000).
- read marker 1-4:** A table for reading marker data. Each row has an 'AMPLITUDE' label and a 'read marker' label. The 'AMPLITUDE' column contains 'mkr_result' values, and the 'read marker' column contains 'mkr_result' values. A 'SET' button is located to the right.
- set marker 1-4:** A table for setting marker data. Each row has an 'ON' label and a 'set marker' label. The 'ON' column contains 'mkr_val' values, and the 'set marker' column contains 'mkr_val' values. A 'SET' button is located to the right.
- Polar attributes:** A panel for configuring polar plot settings, including 'maximum', 'minimum', 'clip to min', 'log', 'grid color', 'plot color', 'Start freq', 'Stop freq', 'Turn', 'Timer (ms)', and 'Current sample'.
- Turntable Control Panel:** A panel for controlling the turntable, including 'Set 0-position', 'Acceleration', 'Turn', and 'Turn (to position)' buttons.

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

User's Guide:

Automated Antenna Measurement System

Metropolia University of Applied Sciences

Written By: Antti Lehtinen & Antti Pääkkönen

Print Date: 1 April 2014

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

Authors Title	Antti Lehtinen & Antti Pääkkönen User's Guide: Automated Antenna Measurement System
Number of Pages Print Date	6 pages + Cover, Introduction and Table of Contents. 1 April 2014
<p>This manual is written as part of a thesis made for Metropolia University of Applied Sciences. It will guide you to operate the automated antenna measurement system created for the thesis by Antti Lehtinen and Antti Pääkkönen.</p> <p>The system's control interface was built using LabVIEW, a system design platform and development environment using a visual programming language called "G".</p> <p>The system at its current state is primarily designed for Agilent 8714ET RF network analyzer and Brüel & Kjær Turntable System Type 9640 turntable, both of which are controller with the interfaces built using LabVIEW.</p> <p>This instrument is well suited for simple antenna measurement for various environments and antenna types, but to get the most accurate result it is recommended that you will perform your measurements in an undisturbed space.</p>	

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

Table of Contents	1
1 Setting Up The System	2
2 Turntable Control Interface	2
3 Polar Drawing Interface	2
4 Network Analyzer Control Interface	2
3.1 Getting Started	2
3.2 Frequency Control	2
3.3 BW Control	3
3.4 Format	3
3.5 Scale Factor	3
3.6 Measure	4
3.7 Read Marker	4
3.8 Set Marker	5

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

1 Setting Up the System

- Plug in and connect National Instruments USB-GPIB-HS controller between computer, network analyzer and turntable control unit.
- Connect turntable control unit of the turntable.
- Attach antenna on the turntable and another one to a fixed position.
- Connect antennas to Agilent 8714ET RF network analyzer.
- Decide the frequency range for your antennas.

2 Turntable Control Panel

- *Acceleration*: Sets the turning speed of the turntable.
- *Turn*: Turns the turntable X degrees
- *Set 0-position*: This sets the turntable's current position as 0-position in the turntable's memory, once you have aligned the antennas.
- *Turn (to position)*: Uses the 0-position in turntable's memory as a reference point when turning the turntable to a specific degree angle.

3 Polar Drawing Control Panel

- Set *Resource Name* to "**GPIB0;;16;;INSTR**".
- *Start Freq* sets starting frequency.
- *Stop Freq* sets stopping frequency.
- *Turn* sets the turning degree interval.
- *Timer (ms)* needs to be set so that turntable has time to turn to the next measurement point.
 - o For example 100 ms per degree, but **no less than 400ms in total**.
- *Samples* shows how many measurement points there are in total.
- *Current sample* shows the current measurement point in progress.
- *Polar Attributes*: Used to control the attributes used in polar drawing.
 - o *Maximum/Minimum* sets the range for drawing.
 - o *Visible Section* sets which section will be drawn.

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

- Rest of the functions are mostly for cosmetic modification for your amusement.
- Once all settings are to your liking, click "Run" in LabVIEW (single run, no continuous) to make one full polar measurement.

4 Network Analyzer Control Panel

4.1 Getting Started

- Set *Resource Name* to "GPIB0;;16;;INSTR"
- Set *Channel Control* into "STATUS?"
 - "Channel?" inquires the status of the channel and gives its result on *Active* indicator.
 - On *Active* indicator "0" means inactive and "1" means active.
 - "On" Sets selected channel into active state
 - "Off" Sets selected channel into inactive state
- Press *SET* button in the same box as other changes are made.
 - **Whenever changes are made in any of the function boxes, the SET button of that box activates the changes.**
- Using the *Channel select* set analyzer channels into wanted settings
 - When changing channels it's safest to use "Status?" setting

4.2 Frequency Control

- *Frequency Control*: Sets how the frequency is set.
 - "S/S?":
 - *freq1* sets starting frequency.
 - *freq2* sets stopping frequency.
 - "CW?":
 - *freq1* sets center frequency.
 - *freq2* sets frequency range.

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

4.3 BW Control

- *BW Control*: Selects if bandwidth is on "SET" or "QUERY".
 - o **Using *Frequency Control* instead of *BW Control* is recommended.**

4.4 Format

- *Format*: Sets format for active channel
 - o "LIN": Linear format.
 - o "LOG": Logarithmic format.
 - o "PHASE": Phase format
 - o "SMITH": Smith format
 - o "SWR": SWR format.
 - o "DELAY": Electrical delay format
 - o "POLAR": Polar format.
 - o "REAL": Real format.
 - o "IMAG": Imag format.
 - o "IMP": Impedance format

4.5 Scale Factor

- *Scale Factor*: Sets the scale for the network analyzer on selected channel.
 - o "SCALE": Sets scale/division. If 0, then autoscale.
 - o "POSN": Set reference position. Must be from 1 - 10.
 - o "AUTO": Performs autoscale (recommended).
 - o "DELAY": Sets electrical delay in seconds.
 - o "PHASE": Sets phase offset in degrees.
 - o "SCALE?": Queries scale factor.
 - o "POSN?": Queries reference position.
 - o "REF?": Queries reference level.
 - o "PHASE?": Queries phase offset.
 - o "DELAY?": Queries electrical delay.

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

4.6 Measure

- *Measure*: Sets what the network analyzer measures on selected channel.
 - "A": Selects detector A.
 - "B": Selects detector B.
 - "R": Selects detector R.
 - "A/R": Selects A/R measurement (same as reflection).
 - "B/R": Selects B/R measurement (same as transmission).
 - "B*": Selects diode detector B* (same as power).
 - "R*": Selects diode detector R*.
 - "B*/R*": Selects diode detector B*/R* (same as conversion loss).
 - "X": Selects external diode detector X.
 - "Y": Selects external diode detector Y.
 - "X/Y": Selects external diode detector X/Y.
 - "Y/X": Selects external diode detector Y/X.
 - "Y/R*": Selects diode detector Y/R*.
 - "*AUX": Selects AUX input.
 - "STATUS?": Queries current measurement selection.

4.7 Read Marker

- *Read Marker*: Reads marker results and gives them in *mkr_result*.
 - "AMPL?": Reads marker amplitude.
 - "POSN?": Reads marker axis position.
 - "REF X?": Reads frequency of reference marker.
 - "REF Y?": Reads amplitude of reference marker.
 - "INDUCTANCE?": Reads inductance when in Smith format.
 - "REACTANCE?": Reads reactance when in Smith format.
 - "RESISTANCE?": Reads resistance when in Smith format.
 - "PHASE?": Reads phase when in polar format.
 - "MAGNITUDE?": Reads magnitude when in polar format.
 - "DELAY?": Reads marker group delay value in seconds.

Automated Antenna Measurement System -ohjekirja

- "FUNCTION?": Reads all four marker function values.

4.8 Set Marker

- Set Marker.

- "ON": Turn specified marker on.
- "OFF": Turn specified marker off.
- "FREQ": Sets marker to X axis frequency specified by *mk_r_value*.
- "POINT": Sets marker to X axis point number.
- "MIN": Sets marker to trace minimum.
- "MAX": Sets marker to trace maximum.
- "MINLEFT": Sets marker to next left minimum.
- "MINRIGHT": Sets marker to next right minimum.
- "MAXLEFT": Sets marker to next left maximum.
- "MAXRIGHT": Sets marker to next right maximum.
- "ALLOFF": Turns all markers off.
- "BANDWIDTH": Performs bandwidth search. BW target = *mk_r_value*.
- "DELTA_ON": Turns marker delta mode on.
- "DELTA_OFF": Turns marker delta mode off.
- "REF Y?": Reads amplitude of reference marker.
- "STATISTICS": Sets active marker function to statistics.
- "FLATNESS": Sets active marker function to flatness.
- "FST": Sets active marker function to filter statistics.
- "TO_CENTER": Sets center frequency to active marker.
- "TO_DELAY": Sets electrical delay to active marker value.
- "TO_REF": Sets reference offset to active marker value.
- "SET_ABS": Sets marker to absolute value.
- "TRACK_ON": Turns marker tracking on.
- "TRACK_OFF": Turns marker tracking off.