



**TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA**

**Tietotekniikka**

**Tietoliikennetekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**TIETOKONEOHJATTU ANTENNIMITTAUSJÄRJESTELMÄ**

**Työn tekijä: Soile Sallinen  
Työn valvoja: Antti Koivumäki  
Työn ohjaaja: Antti Koivumäki**

**Työ hyväksytty: \_\_. \_\_. 2008**

**Antti Koivumäki  
yliopettaja**



## **ALKULAUSE**

Tämä insinöörityö tehtiin Stadian tietotekniikan osastolle tietoliikennetekniikan yksikölle. Kiitän työni ohjaajaa ja valvojaa yliopettaja Antti Koivumäkeä mielenkiintoisesta ja opettavaisesta projektista sekä hänen opastuksestaan ja neuvoistaan työn aikana.

Helsingissä 25.4.2008

Soile Sallinen

## INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Soile Sallinen	
Työn nimi: Tietokoneohjattu antennimittausjärjestelmä	
Päivämäärä: 25.4.2008	Sivumäärä: 53 s. + 4 liitettä
Koulutusohjelma: Tietotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tietoliikennetekniikka
Työn valvoja: yliopettaja Antti Koivumäki	
Työn ohjaaja: yliopettaja Antti Koivumäki	
<p>Tässä insinööriyössä kehitettiin Agilent VEE -ohjelmaan pohjautuva tietokoneohjattu antennimittausjärjestelmä, joka mittaa ja piirtää tutkittavan antennin säteilykuvion.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä radioaaltojen ja antennien ominaisuuksiin sekä antennien mittauspaikkoihin ja siihen, miten antennien ominaisuuksia mitataan. Näiden lisäksi kartoitettiin markkinoilla olevia valmiita mittausjärjestelmiä, selvitettiin niiden laajuutta, ominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia sekä selvitettiin vielä, minkälaiseen käyttöympäristöön ja tilanteeseen ne soveltuvat.</p> <p>Mittausjärjestelmä tehtiin liittämällä graafiseen Agilent VEE -ohjelmaan mittauksessa käytettävät laitteet ja ohjelmoimalla ne mittaamaan ja piirtämään tutkittavan antennin säteilykuviot. Lopuksi ohjelmaan liitettiin tulosten esittäminen, tulostaminen ja tallentaminen Adobe Acrobat -ohjelman avulla.</p> <p>Työn tuloksena syntyi yksinkertainen, nopea ja helppokäyttöinen antennimittausjärjestelmä, joka soveltuu antennin säteilykuvion mittaamiseen ja graafiseen esittämiseen. Ohjelmien päivityksellä saadaan mittausjärjestelmää kehitetyksi monipuolisemmaksi, etenkin graafisten tulosteiden osalta.</p>	
Avainsanat: antennimittausjärjestelmä, säteilykuvio, Agilent VEE, GPIB-väylä	

## ABSTRACT

Name: Soile Sallinen	
Title: Computer Controlled Antenna Measurement System	
Date: 25.4.2008	Number of pages: 53
Department: Information Technology    Study Programme: Telecommunications	
Instructor: Antti Koivumäki, Senior Lecturer	
Supervisor: Antti Koivumäki, Senior Lecturer	
<p>An Antenna Measurement System based on Agilent VEE -program was developed in this Graduate Study and the said system will calculate and plot the radiation pattern of the antenna under test.</p> <p>The work was started by familiarizing with the characteristics of the radio waves and antennas as well as measuring sites of the antennas and with the procedures, how the characteristics of the antennas would be measured. In addition to previous, a survey was carried out to find out the available measuring systems. Their coverage, characteristics and operational possibilities were studied and their operational suitability with reference to the operational environment were cleared and the situations into which they may be applied.</p> <p>The measurement system was made by connecting the equipment to be used in the measurements to the Graphic Agilent VEE -software and a program was made to measure and plot the radiation pattern of the antenna under test. Finally the display, printing and the saving was included to the software by help of the Adobe Acrobat -program.</p> <p>A simple, fast and easy-to-use antenna measuring system was completed as a result of the study and will adapt to the measuring and displaying graphically a radiation pattern. By updating the programs it is possible to develop the measurement system more versatile, especially the graphical printout material.</p>	
Keywords: Antenna Measurement System, Radiation pattern, Agilent VEE, GPIB	

# SISÄLLYS

## ALKULAUSE

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## LYHENTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>RADIOTEKNIIKAN TEORIAA</b>	<b>2</b>
2.1	Radioaaltojen ominaisuuksia	2
2.2	Aallonpituus	3
2.3	Radioaaltojen taajuusalueet	4
2.3.1	<i>RF-aallot</i>	4
2.3.2	<i>Mikroaallot</i>	5
2.3.3	<i>Millimetriaallot</i>	5
2.4	Radioaaltojen eteneminen	6
<b>3</b>	<b>ANTENNIT</b>	<b>9</b>
3.1	Antennien sähköiset ominaisuudet	9
3.1.1	<i>Säteilykuvio eli suuntakuvio</i>	9
3.1.2	<i>Vahvistus</i>	11
3.1.3	<i>Suuntaavuus</i>	11
3.1.4	<i>Polarisaatio ja ristipolarisaatio</i>	12
3.1.5	<i>Impedanssi ja kaistanleveys</i>	13
3.2	Antennityypit	14
3.2.1	<i>Lanka-antennit</i>	14
3.2.2	<i>Apertuuri-antennit</i>	20
3.2.3	<i>Mikroliuska-antennit ja rakoantennit</i>	23
<b>4</b>	<b>ANTENNIEN MITTAAMINEN</b>	<b>24</b>
4.1	Mittauspaikat	24
4.1.1	<i>Vapaantilan mittauspaikka</i>	24
4.1.2	<i>Maaheijastusmittauspaikka</i>	25
4.1.3	<i>Heijastukseton huone</i>	25
4.1.4	<i>Kompakti mittauspaikka</i>	25
4.1.5	<i>Lähikenttämittauspaikka</i>	26
4.2	Säteilykuvion mittaus	26
4.3	Vahvistuksen mittaus	26

4.4	Polarisaation mittaus	27
4.5	Impedanssin mittaus	27
5	ANTENNIEN MITTAUSJÄRJESTELMÄT	28
5.1	Antennin kaukokenttämittaus ilman heijastumatonta tilaa	29
5.2	Diamond Engineering DAMS x100 -sarjan antennimittausjärjestelmä	29
5.3	ETS-Lindgren AMS-8050 -antennimittausjärjestelmä	31
5.4	Muita markkinoilla olevia antennimittausjärjestelmiä	33
6	GPIB-VÄYLÄN KÄYTTÖ	34
7	MITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN	35
8	MITTAUSJÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN	43
9	TULOKSET	47
10	YHTEENVETO	49
	VIITELUETTELO	51

## LIITTEET

Liite 1. Signaalianalysoitsattorin ja spektrianalysoitsattorin ohjaukaskäskyt ja kytkennät

Liite 2. Pyörityskoneen ohjaukaskäskyt ja kytkennät

Liite 3. Mittaustulosten muunnoskäskyt

Liite 4. Ristipolarisaatiomittauksen kuvat

## LYHENTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ

EHF	Extremely High Frequency
FDM	Frequency Domain Measurement
GPIB-väylä	General Purpose Interface Bus
HF	High Frequency
IEEE 488	Institute of Electrical and Electronics Engineers 488
ITU	International Telecommunication Union
LF	Low Frequency
LXI	LAN extensions for Instrumentation
MF	Medium Frequency
RF	Radio Frequency
SFS	Suomen standardisoimisliitto ry
SHF	Super High Frequency
TDM	Time Domain Measurement
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
VHF	Very High Frequency
VLf	Very Low Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave ratio
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave access
WLAN	Wireless Local Area Network

## 1 JOHDANTO

Radiotekniikan laboratoriossa suoritetaan antennimittaukset säätämällä käsin signaaligeneraattoria, spektrianalysaattoria ja pyörityskonetta mittaustilanteessa sekä kirjaamalla jokainen yksittäinen mittaustulos erikseen muistiinpanoihin. Mittauksen jälkeen tulokset siirretään tietokoneelle, jossa ne tekstinkäsittely- ja taulukko-ohjelmien avulla muunnetaan tarkoituksenmukaiseen muotoon taulukoiksi, kaavioiksi ja kuviksi.

Tämän työn tavoitteena on kehittää Agilent VEE -ohjelmalla helppokäyttöinen, nopea ja edullinen tietokoneohjattu mittaussjärjestelmä, jossa mittaustulokset saadaan valmiiksi taulukoituna ja kuvina. Mittaustulokset halutaan saada myös sellaisessa muodossa, että niiden tulostaminen, kopioiminen ja edelleen lähettäminen on mahdollista.

Mittaussjärjestelmää kehitettäessä pidetään tavoitteena myös sitä, että ohjelmaa voidaan käyttää useimpien laboratoriossa olevien antennimittauksessa tarvittavien laitteiden kanssa, vaihtamalla käytettävät laitteet ohjelmassa olevien laitteiden tilalle.

Työn alussa selostetaan radioaaltojen ominaisuuksia, selvitetään niiden taajuusalueet käyttötarkoituksen mukaan ja kerrotaan antennien sähköisistä ominaisuuksista, joista tämän työn kannalta merkittävin on säteilykuvio. Työssä käydään läpi yleisimmät antennityypit sekä kuvataan antennin mittaamista, jossa pitää huomioida mittauspaiikat ja se mitä ominaisuuksia halutaan mitata.

Työssä kerrotaan myös markkinoilla olemassa olevien antennimittausmittausjärjestelmien laitekoonpanoista, ohjelmista, toiminnoista ja ominaisuuksista.

Lopuksi selostetaan tarkemmin, miten mittaussjärjestelmä tehdään, kuvataan järjestelmän testaamista sekä näytetään, missä muodossa mittaustulokset voidaan esittää ja tulostaa.



## 2 RADIOTEKNIIKAN TEORIAA

Radiotekniikassa tieto siirtyy sähkömagneettisena aaltona, joka etenee suoraviivaisesti poikittaisena värähtelyliikkeenä vapaassa tilassa valon nopeudella. Aalto voi edetä myös vähäviivisessä eristeaineessa, jolloin etenemisnopeus laskee. Radiotekniikassa tutkitaan radioaaltojen ominaisuuksia, jotta niitä voidaan mitata, tuottaa ja hyödyntää. Radiotekniikalla tarkoitetaan menetelmää, jolla tietoa voidaan siirtää ilmakehässä, avaruudessa sekä aaltojohdossa sähkömagneettisena aaltona. Radiotekniikka käsittää myös sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen, vastaanottamiseen sekä mittaamiseen käytettävät laitteet ja menetelmät.

### 2.1 Radioaaltojen ominaisuuksia

Radioaallot ovat sähkömagneettisia aaltoja, joilla on aallonpituus, etenemisnopeus, polarisaatio ja taajuus. Ne ovat hiukkasia, ja ne voivat heijastua, taipua ja taittua. Sähkömagneettiset aallot kuljettavat myös energiaa, ja niillä on liikemäärä, joka aiheuttaa säteilypaineen.

Sähkömagneettinen aalto muodostuu sähkö- ja magneettikentästä, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan ja kohtisuorassa myös aallon etenemissuuntaan nähden. Sähkö- ja magneettikentän voimakkuudet muuttuvat ajan ja paikan suhteen sinimuotoisesti. Kentän suurin arvo eli aallon huippujen korkeus on kentän amplitudi, ja aallon huippujen välinen etäisyys on aallonpituus, joka voidaan laskea kaavasta 1:

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

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

Radiotekniikan sovelluksissa aallot ovat usein sinimuotoisia ja lineaarisesti polarisoituneita. Ympäripolarisaatiota käytetään myös paljon. Kun yhdistetään kaksi yhtä voimakasta lineaarisesti polarisoitunutta aaltoa, esimerkiksi vaakapolarisoitunut ja pystypolarisoitunut aalto, joiden välillä on neljännesjakson vaihe-ero, saadaan ympäripolarisoitunut aalto. Ympäripolarisoituneen aallon sähkökentän voimakkuus pysyy samana, mutta kentän suunta kääntyy jatkuvasti.

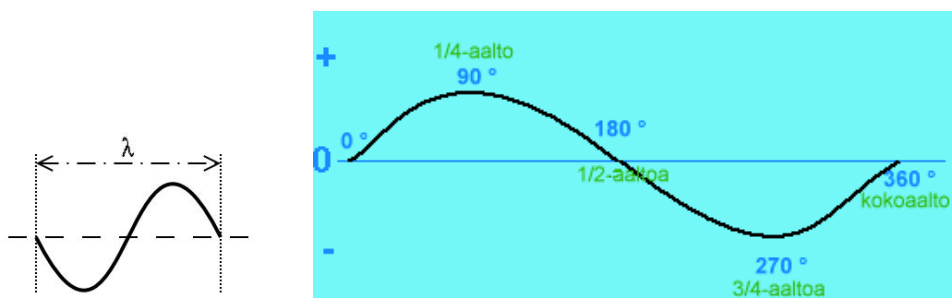
## 2.2 Aallonpituus

Sähkömagneettisen säteilyn spektri jaetaan osa-alueisiin aallonpituuden tai taajuuden perusteella. Sähkömagneettisella säteilyllä on myös hiukkasluonne, eli se ei ole jatkuvaa vaan kvantittunutta. Säteily koostuu energiakvanteista eli fotoneista, jotka pysähtyvät törmätessään elektroniin ja luovuttavat sille koko energiansa. Sähkömagneettisen säteilyn energia  $E$  voidaan laskea kaavasta 2:

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

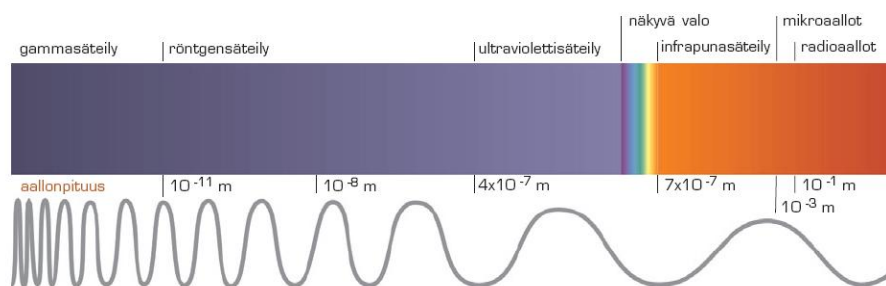
jossa  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  on Planckin vakio.

Aallonpituus on matka, jonka aalto kulkee yhden jakson aikana (kuva 1). Aallonpituuden kasvaessa elektronikvanttien koko pienenee, joten radioaaltojen kvantit ovat jo niin pieniä, etteivät ne pysty irrottamaan elektroneja radaltaan eivätkä siten ionisoi ainetta eli eivät aiheuta atomeille tai molekyyille sähkövarausta. Tästä johtuen radioaallot ovat ionisoimatonta säteilyä.



Kuva 1. Aallonpituus [1;18]

Radioaaltojen aallonpituus on tuhansista kilometreistä millimetrien osiin, eli ne muodostavat spektrin pitkäaaltoisimman eli matalataajuisimman osan (kuva 2).



Kuva 2. Sähkömagneettisten aaltojen spektri [1]

## 2.3 Radioaaltojen taajuusalueet

Radioaaltojen taajuusalue käsittää 3 kHz - 3000 GHz:n taajuusalueet ja ne jaetaan eri alueisiin käyttötarkoituksen mukaan. Käyttösuunnitelma perustuu kansainvälisen televiestintäliiton ITU:n (International Telecommunication Union) päätöksiin.

Eri aallonpituusalueista käytetään monia nimityksiä, sillä mitään vakiintunutta käytäntöä ei ole. Esimerkiksi tutkatekniikassa käytetään P-, C-, K-alueita. Alle 300 MHz:n taajuuksia kutsutaan RF (Radio Frequency) -aalloiksi. Radioaaltoja, joiden taajuus on 1 - 30 GHz kutsutaan mikroaalloiksi. Millimetriaalloiksi kutsutaan taajuusaluetta 30 - 300 GHz ja alimillimetriaalloiksi taajuusaluetta 300 - 3000 GHz. RF-aaltojen ja mikroaaltojen raja ei ole tarkka, ja usein vain 1 GHz:n yläpuolella oleva osa luetaan mikroaalloiksi.

### 2.3.1 RF-aallot

VLF (Very Low Frequency) -taajuusalue on 3 - 30 kHz, ja sen radioaallon pituus on 100 - 10 km. Aallot etenevät pääasiassa pinta-aaltona lähes maapallon ympäri ionosfäärin ja maanpinnan välisellä alueella. Aallot etenevät myös jonkin verran merivedessä, ja siksi niitä käytetäänkin maasemien ja sukellusveneiden välisessä viestinnässä. Tätä aluetta käytetään myös radionavigoinnissa. [2.]

LF (Low Frequency) -taajuusalue on 30 - 300 kHz, ja sen radioaallon pituus on 10 - 1 km. Aallot etenevät pinta-aaltona ja öisin ionosfäärissä. Eteneminen on mahdollista myös suoraan näköyhteysreittiä pitkin. Aluetta käytetään yleisradiotoiminnassa, radionavigoinnissa ja etätunnistuksessa. [2.]

MF (Medium Frequency) -taajuusalue on 300 - 3000 kHz, ja sen radioaallon pituus on 1000 - 100 m. Aallot etenevät pinta-aaltona ja öisin ionosfäärin rietenemisenä. Aluetta käytetään yleisradio- ja radioamatööritoiminnassa sekä radionavigoinnissa. [2.]

HF (High Frequency) -taajuusalue on 3 - 30 MHz, ja sen radioaallonpituus on 100 - 10 m. Aallot etenevät ionosfäärin kautta. Pinta-aallot vaimenevat nopeasti. Aluetta käytetään yleisradio- ja radioamatööritoiminnassa sekä meri- ja sotilasradioliikenteessä. [2.]

VHF (Very High Frequency) -taajuusalue on 30 - 300 MHz, ja radioaallonpituus on 10 - 1 m. Aallot etenevät suoraan sekä heijastumalla rakennuksista ja maan pinnasta. Ilmakehässä sääolosuhteet vaikuttavat etenemiseen ja aallot taipuvat hiukan alaspäin. Tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Aluetta käytetään FM-radiolähetyksissä, langattomissa mikrofoneissa ja kauko-ohjauslaitteissa. [2.]

UHF (Ultra High Frequency) -taajuusalue on 300 - 3000 MHz, ja sen radioaallonpituus on 100 - 10 cm. Aallot etenevät suoraviivaisesti ilmakehässä, mutta puusto ja maastoesteet lisäävät vaimennusta. Tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Aluetta käytetään yleisradio- ja digitaalisissa TV -lähetyksissä, matkapuhelinverkoissa, mikroaaltouuneissa ja GPS-satelliittinavigointijärjestelmässä. UHF-alue on lähes varattu, sillä melkein koko taajuusalue on allokoitu ja käytössä eri sovelluksissa ympäri maailmaa. [2.]

### 2.3.2 Mikroaallot

SHF (Super High Frequency) -taajuusalue on 3 - 30 GHz, ja sen radioaallonpituus on 10 cm - 1 cm. Aallot etenevät suoraviivaisesti ilmakehässä, mutta sääolosuhteet (sadevaimennus), puusto ja maastoesteet lisäävät huomattavasti vaimennusta. Tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Antenniratkaisuja suunniteltaessa pitää ottaa huomioon aaltojen diffraktio eli taipumisilmiö. Aluetta käytetään tutka- ja radionavigointijärjestelmissä sekä kiinteiden televerkkojen radio- ja satelliittilinkeissä. [2.]

### 2.3.3 Millimetriaallot

EHF (Extremely High Frequency) -taajuusalue on 30 - 300 GHz, ja sen radioaallonpituus on 10 - 1 mm. Eteneminen on suoraviivaista, ja yhteydet ovat hyvin lyhyitä. Ilmakehän vaimennus on suurta, ja tämän takia aallot kulkevat ilmakehän vaimennusikkunoissa. Ilmakehässä on neljä kapeaa ikkunaa 34, 94, 142 ja 214 GHz:n taajuuksilla, joissa lyhyen kantaman tiedonsiirtojärjestelmien käyttö on mahdollista. Aluetta käytetään sotilaskäytössä, radiopaikannuksessa, radioastronomiassa ja 60 GHz:n langattomissa lähiverkoissa. [2.]

Taulukkoon 1 on koottu radioaaltojen lyhenteen ja nimen lisäksi taajuudet, aallonpituudet ja esimerkkejä käytöstä.

Taulukko 1. Radioaaltojen taajuusalueet [3]

lyhenne	nimi	taajuus	aallonpituus	käyttöesimerkki
<b>VLF</b>	hyvin pitkät aallot	3 - 30 kHz	10 - 100 km	Radionavigointi
<b>LF</b>	pitkät aallot	30 - 300 kHz	1 - 10 km	Pitkän matkan radioyhteydet
<b>MF</b>	keskipitkät aallot	300 - 3000 kHz	100 - 1000 m	Yleisradio
<b>HF</b>	lyhyet aallot	3 - 30 MHz	10 - 100 m	Yleisradio, radioamatöörit
<b>VHF</b>	hyvin lyhyet aallot	30 - 300 MHz	1 - 10 m	Televisio, ularadio
<b>UHF</b>	ultralyhyet aallot eli ula	300 - 3000 MHz	100 - 1000 mm	Radiolinkit, televisio, tutka
<b>SHF</b>	mikroaallot	3 GHz - 30 GHz	10 - 100 mm	Mikroaaltouuni
<b>EHF</b>	erikoislyhyet aallot	30 - 300 GHz	1 - 10 mm	Tutka, radiolinkit

## 2.4 Radioaaltojen eteneminen

Radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat ionosfääriin, troposfääriin ja maaston ominaisuudet. Ionosfääri on 60 km:stä 1000 km:iin ulottuva ilmakehän alue, joka sisältää useita auringon ja kosmisen säteilyn aiheuttamia ionisoituneita kerroksia ja jossa on auringon ultravioletti- ja hiukkassäteilyn ionisoimia vapaita elektroneja ja ioneja. Radioaalto saa nämä vapaat elektronit värähdysliikkeeseen, joka tuottaa uusia sekundäärisiä radioaaltoja. Nämä aallot yhdessä alkuperäisen radioaallon kanssa muodostavat ionosfäärissä etenevän aallon. Vaimenemista tapahtuu silloin, kun vapaat elektronit törmäävät neutraaleihin molekyyliin, jolloin niiden värähdysliikkeen energia muuttuu stokastiseksi liike-energiaksi eivätkä elektronit enää emittoi sekundäärisiä aaltoja.

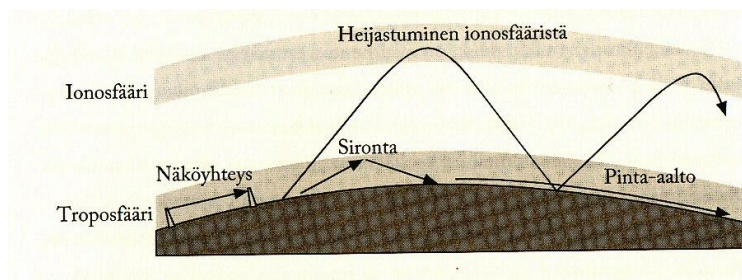
Ionosfäärissä tapahtuu heijastumista silloin, kun vapaiden elektronien esiintymistiheys on riittävän suuri eikä alueella tapahdu liikaa elektronien ja molekyylien välisiä törmäyksiä.

Radioaalto ei läpäise ionosfääriä tietyn rajataajuuden alapuolella (n. 30 MHz), vaan se heijastuu siitä. Heijastuminen johtuu aaltojen taitumisesta (kuva 3).

Troposfääri on ilmakehän alin kerros ja ulottuu 10 km:n korkeuteen. Siellä tapahtuvat sääilmiöt ja säästä johtuvat muutokset kuten kosteus, lämpötila, paine, sade ja sumu vaikuttavat radioaaltojen etenemiseen. Troposfäärissä aalto kaartuu, siroaa, vaimenee ja voi heijastua. Troposfäärin taitekerroin pienenee korkeuden kasvaessa, ja tämän takia radioaallot kaartuvat. Äkilliset taitekertoimen muutokset saattavat aiheuttaa myös sirontaa ja heijastuksia. Sirontaa tapahtuu pyörteissä, joissa on eri kosteus ja lämpötila kuin ympäristössä. Heijastuksia syntyy ilmakehässä olevista horisontaalisista rajapinnoista. Sumu, sade ja pilvet aiheuttavat vaimennusta, joka johtuu pääasiassa sironnasta. Vaimennuksen suuruus riippuu veden määrästä ja pisaroiden koosta.

Maaston muodot, maaperän sähköisyys, kasvillisuus ja rakennukset vaikuttavat aallon kulkuun. Maanpinnan kaarevuus estää suoran näköyhteyden lähettimen ja vastaanottimen välillä pitkillä etäisyyksillä. Maanpinnan ja rakennuksien aiheuttamat heijastukset voivat olla haitallisia ja hyödyllisiä, sillä monitie-etenemisen takia radioaalto voi häipyä mutta radio voi kuulua paikoissa, joihin aalto ei suoraan pääse. Monitie-etenemisessä vastaanottimeen tulee suoraan edenneen aallon lisäksi maanpinnasta tai rakennuksista heijastuneita aaltoja. Diffraktion takia aallot voivat päästä näköesteen taakse ja voivat myös jonkin verran läpäistä esteitä. Pinta-aalto etenee sitä paremmin, mitä matalampi taajuus on ja mitä johtavampi pinta on. Vaimennus onkin pienempää meren ja kostean maanpinnan päällä kuin kuivalla maalla.

Kuvassa 3 nähdään radioaaltojen erilaiset etenemistavat yksinkertaisena piirroksena.



Kuva 3. Radioaaltojen eteneminen [4, s. 84]

Radioaallon etenemisellä maapinta-aaltona on merkitystä alle 10 MHz:n taajuisilla aalloilla, sillä taajuuden kasvaessa kasvaa myös maanpinta-aallon vaimennus.

Ionosfäärietenemisessä aalto voi heijastua ionosfääristä alle 30 MHz:n taajuudella, ja radioaallon heijastuminen vuoronperään ionosfääriin ja maanpinnan välillä mahdollistaa radioyhteyden maapallon ympäri. Yhdellä ionosfääri- hypyllä radioaalto siirtyy noin 3000 km.

Tärkein UHF-, SHF- ja EHF-taajuusalueiden etenismekanismi on eteneminen näköyhteysreittiä pitkin. Näköyhteyseteneminen muistuttaa vapaantilan etenemistä. Radioaallot etenevät pyörähdysellipsoidin sisällä pisteestä toiseen. Tätä ellipsoidia kutsutaan Fresnelin ellipsoidiksi.

### 3 ANTENNIT

Lähetysantennin tehtävänä on säteillä lähettimen muodostama signaali sähkömagneettisena aaltona ulos antennilta, ja vastaanottoantennin tehtävänä on siepata mahdollisimman suuri teho vastaanotettavasta radioaallostasta. Lähetysantennin toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn tuottamiseen virran avulla. Kun antennijohteen pinnalle tuotetaan vaihtovirtaa, aiheuttaa se johteen pinnalla varauksia, joiden nopeus vaihtelee. Tällöin johteen pinnasta lähtee sähkövarauksia pois päin johteesta. Vastaanottoantenni toimii päinvastoin, eli kun antennijohteen pintaan osuu sähkömagneettista säteilyä, aiheuttaa se johteen pinnalle sähkövirtaa, joka kuljettaa signaalitehon antennin siirtojohdon kautta vastaanottimeen. [4.]

#### 3.1 Antennien sähköiset ominaisuudet

Antennien tärkeimpiä sähköisiä ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan arvioida antennin sopivuus tiettyyn käyttötarkoitukseen, ovat säteilykuvio, vahvistus, suuntaavuus, keilan leveys, polarisaatio, ristipolarisaatio, kaistanleveys, hyötysuhde, sivukeilataso, impedanssi ja häviöt. Antenni on resiprookkinen laite, eli antennin ominaisuudet eivät riipu siitä, käytetäänkö sitä lähetys- vai vastaanottoantennina, ja sen takia antennin ominaisuuksia mitattaessa saadaan oikea mittaustulos riippumatta siitä, onko mitattava antenni mittauskytkennässä lähettävänä vai vastaanottavana antennina.

##### 3.1.1 Säteilykuvio eli suuntakuviot

Antennin säteilykuviota voidaan kuvata pallopinnalla, jossa kaukokenttien amplitudin suuruus vaihtelee ja amplitudin maksimiarvo on normalisoitu, eli pääkeilan arvoksi on muunnettu 1.

Säteilykuvioilla tarkoitetaan suuntakuviota, joka kuvaa antennin säteilemän kentän tehotiheyden  $P(\theta, \Phi)$  tai kentänvoimakkuuden  $E(\theta, \Phi)$  kulmariippuvuutta. Elevaatio ( $\theta$ ) ja atsimuutti ( $\Phi$ ) on saatu pallokoordinaatiosta.

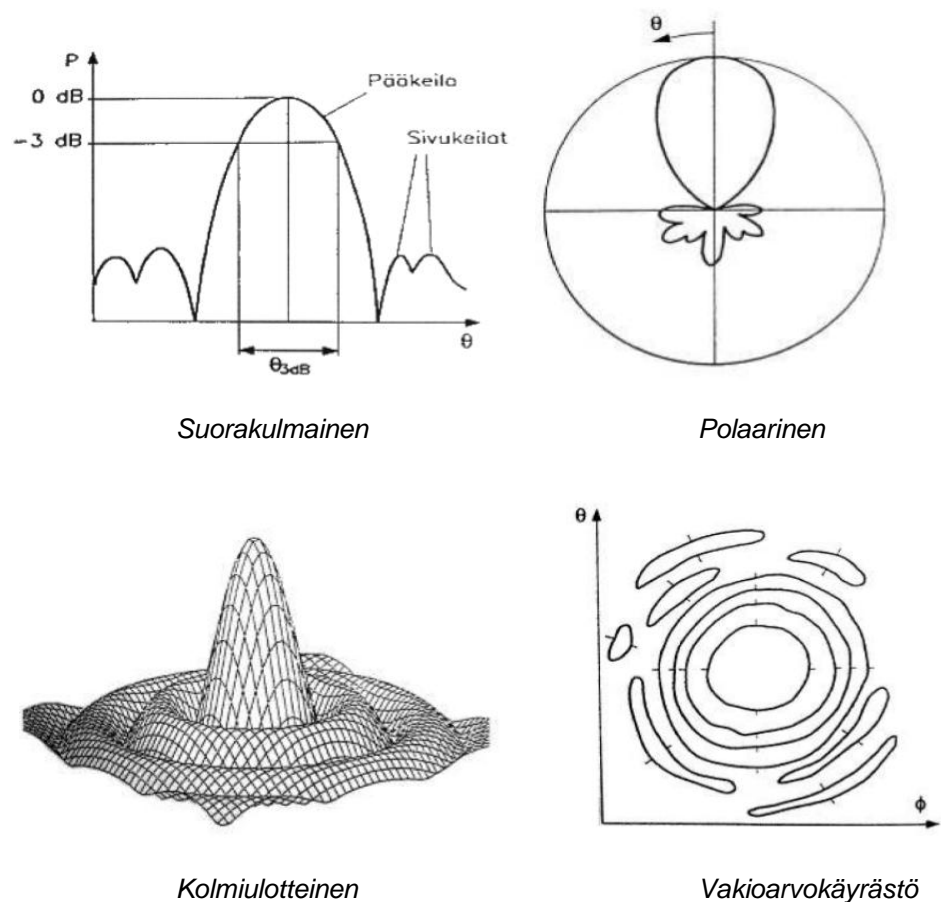
Lähettävän antennin säteilykuvioista nähdään, miten antennin lähettämä signaaliteho jakautuu avaruuteen. Vastaanottoantennin säteilykuvio kertoo puolestaan sen, miten hyvin antenni vastaanottaa eri suunnista tulevaa sähkömagneettista säteilyä. Säteilykuviossa on yleensä erotettavissa selkeä pääkeila sekä useita pienempiä sivukeiloja. Pääkeilaa vastapäätä on



usein takakeila. Säteilykuviossa on myös nollakohtia, joiden suuntaan antenni ei säteile lainkaan ja joista se ei vastaanota mitään säteilyä. Jos antenni on kooltaan aallonpituutta pienempi, on sen pääkeila leveä. Vastavasti jos antenni on kooltaan aallonpituutta suurempi, on pääkeila kapea. [4.]

Antennin säteilykuvio ilmoittaa suhteellisen kentänvoimakkuuden suunnan funktiona, ja yleensä ne normalisoidaan siten, että maksimiarvoksi laitetaan 1, eli 0 dB.

Säteilykuvion esitystapoja on monenlaisia. Katso kuva 4.



Kuva 4. Suuntakuvion esitysmuotoja [6, s. 162]

Säteilykuvioista saadaan selville siis polarisaatio, tehotiheys, kentänvoimakkuus tai vaihe. [4.]

Keilanleveys on säteilykuvion nollakohtien kulma tai 3 dB:n pisteiden väli (näky kuvan 4 suorakulmaisessa esitysmuodossa), sivukeilatase on si-

vukeilojen maksimin arvo verrattuna pääkeilaan. Suuntaavassa antennissa pitää yleensä olla pienet sivukeilat.

### 3.1.2 Vahvistus

Antennin vahvistus on pääkeilan suuntaan säteilemän tehotiheyden ( $S$ ) suhde häviöttömän isotrooppisen antennin säteilemään tehotiheyteen ( $S_0$ ), kun molempiin antenneihin on syötetty sama lähtöteho.

Vahvistus saadaan lasketuksi kaavasta 3:

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

Vahvistus ilmoitetaan usein desibeliarvona, joka saadaan kaavasta 4:

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

Vahvistuksen kaava pätee vain ideaaliselle, häviöttömälle antennille. Jos antennin hyötysuhde, eli säteilyn tehon suhde antenniin syötettyyn tehoon on  $\eta$ , on häviötehon osuus vähennettävä antenniin syötetystä tehosta. Häviöllisen antennin vahvistus lasketaan kaavasta 4:

$$G = \eta \frac{S}{S_0} \quad (4)$$

Referenssiantennin ollessa isotrooppinen käytetään desibeliyksikkönä dBi. Alle 1 GHz:n taajuudella käytetään usein referenssiantennina puolialtodi-poliantennia ja tällöin käytetään yksikkönä dBd. Desibeliyksiköiden välillä on yhteys  $0 \text{ dBd} = 2,15 \text{ dBi}$ . [5.]

### 3.1.3 Suuntaavuus

Suuntaavuus ilmoittaa antennin kyvyn keskittää säteily annettuun suuntaan. Antennin suuntaavuus on maksimitehotiheyden ( $S$ ) suhde keskimääräiseen tehotiheyteen ( $S_0$ ), ja se voidaan laskea kaavalla 5, kun antennin säteilykuvio on  $P(\theta, \Phi)$ .

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

jossa  $d\Omega$  on keilan avaruuskulman alkio ja  $4\pi$  on täysi avaruuskulma. [5.] Keilan avaruuskulma  $\Omega_A$  saadaan lasketuksi kaavalla 6:

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

Suuntaavuus riippuu siis pelkästään antennin säteilykuviosta. Suuntaavuus mainitaan usein yhtenä lukuna eikä kulmien funktiona. Tällöin on kyseessä suuntaavuuden maksimiarvo, joka lasketaan kaavasta 7: [6.]

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}, \quad (7)$$

Suuntaavuus voidaan laskea myös etäisyyden suhteen, jolloin käytetään kaavaa 8:

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

Kentän voimakkuus määrättyllä etäisyydellä eli lähetyksantennin aiheuttama tehotiheys saadaan lasketuksi kaavalla 9:

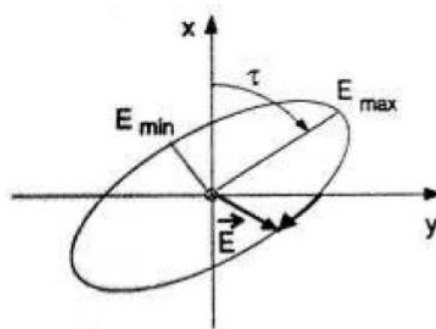
$$S = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (9)$$

jossa  $G_T$  = lähetyksantennin vahvistus ja  $P_T$  = lähetysteho.

### 3.1.4 Polarisaatio ja ristipolarisaatio

Polarisaatio on suuntakulman  $(\theta, \Phi)$  funktio. Antennin polarisaatio kertoo siitä lähtevän sähkömagneettisen säteilyn sähkökentän suunnan eli sähkökentän vektorin suunnan muutoksia. Vektori määrittelee ellipsin, jonka voidaan ajatella piirtyvän värähtelyjakson aikana vektorin kärjestä. Erikoistapauksina ellipsistä voi muodostua jana tai ympyrä. Janaa kutsutaan lineaariseksi polarisaatioksi ja ympyrää ympyräpolarisaatioksi. Lineaarinen polarisaatio voi olla vertikaalista tai horisontaalista ja ympyräpolarisaatio vasen- tai oikeakätistä.

Elliptistä polarisaatiota (kuva 5) kuvataan akselisuhteella  $E_{\max}/E_{\min}$ , pyörimissuunnalla ja kallistuskulmalla  $\tau$ .



Kuva 5. Elliptinen polarisaatio [8, s. 28]

Antenni on tarkoitettu toimimaan tietyllä polarisaatiolla, jota kutsutaan pääpolarisaatioksi. Pääpolarisaatiolle ortogonaalista polarisaatiota kutsutaan ristipolarisaatioksi. Lineaarisen vertikaalisen pääpolarisaation ristipolarisaatio on lineaarinen horisontaalinen polarisaatio. Vastaavasti oikeakätisen ympyräpolarisaation ristipolarisaatio on vasenkätinen ympyräpolarisaatio. Jos tulevan aallon polarisaatio on sama kuin antennin polarisaatio, aalto sovituu antenniin. Muussa tapauksessa syntyy epäsovitus, jota kuvataan polarisaatiohyötysuhteella  $\eta_p$ . Epäsovitus laskee antennin polarisaatiohyötysuhdetta. Ristipolarisaatio on tärkeä esimerkiksi tilanteissa, joissa samalla taajuudella siirretään kahta kanavaa ortogonaalisilla polarisaatioilla.

### 3.1.5 Impedanssi ja kaistanleveys

Antennin impedanssilla tarkoitetaan sitä impedanssia, joka näkyy antennin syöttönavoista. Impedanssin resistiivinen osa liittyy antennin säteilemään tehoon ja antennirakenteen ohmisiin häviöihin. Reaktiivinen osa syntyy antennin lähikentän energiaa varastoivasta ominaisuudesta. Impedanssi on jännitteen ja virran suhde antennin syötössä. Tavoitteena on sovittaa impedanssi siirtolinjan kanssa.

Kaistanleveys kuvaa taajuusaluetta, jolla antenni toimii hyväksyttävästi valittujen suoritusarvojen mukaan.

## 3.2 Antennityypit

Antennit voidaan jakaa eri ryhmiin monien erilaisten ominaisuuksien perusteella, eikä luokittelulle ole mitään vakiintunutta käytäntöä. Antennien luokitteluperusteina voidaan käyttää antennien ominaisuuksia, käyttötarkoitusta tai toteutustapaa. Ominaisuuksien perusteella antennien luokittelu voidaan tehdä polarisaation, kaistanleveyden tai säteilytavan mukaan. Säteilytavan mukaan antennit voidaan luokitella virtaelementti- apertuuri- tai kulkuaaltoantenneihin. Toteutustavan mukaan antennit voidaan luokitella lanka-, apertuuri-, heijastin-, mikroliuska- ja rakoantenneihin.

Antennit voidaan luokitella myös sen mukaan, miten niiden toiminta muuttuu taajuuden funktiona:

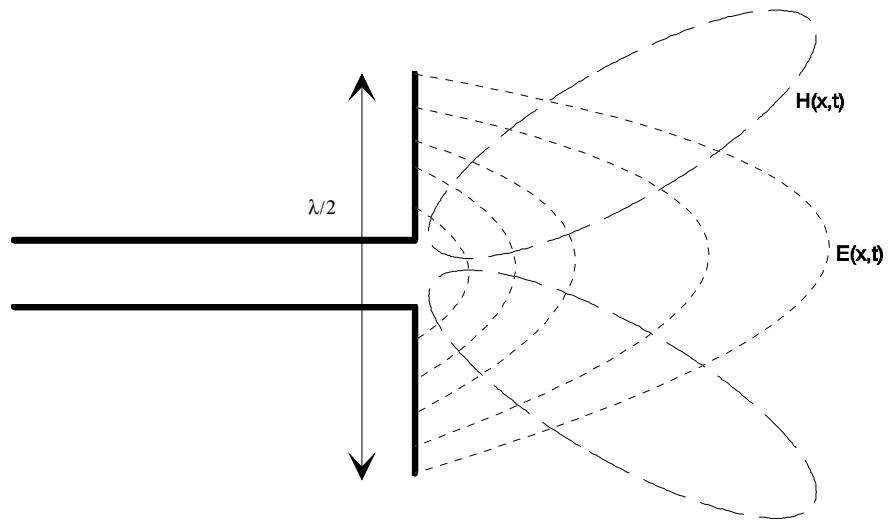
- Sähköisesti pienissä antenneissa käytettävä aallonpituus on huomattavasti suurempi kuin antennin koko. Tällainen antenni on edullinen ja koko pysyy pienenä matalillakin taajuuksilla.
- Resonanssiantennit toimivat yksittäisellä taajuudella tai kapealla taajuuskaistalla. Antennin impedanssi on reaalinen, ja antennilla on kohtalainen vahvistus. Antenni on myös edullinen.
- Laajakaista-antenneissa säteilyn tuottaa aktiivinen alue, joka on pieni osa koko antennista. Kooltaan se on aallonpituuden tai puolikaan kooka. Aktiivinen alue vaihtaa paikkaa antennissa taajuuden muuttuessa.
- Aukkoantenneissa on aukko, jonka läpi aalto kulkee. Tällaisella antennilla on suuri vahvistus.

Yhteen anteeniin ei saada kaikkia hyviä ominaisuuksia, joten antennin käyttötarkoitus ratkaisee antennin valinnan. Antennin suunnittelussa joudutaan tekemään kompromisseja eri ominaisuuksien välillä.

### 3.2.1 Lanka-antennit

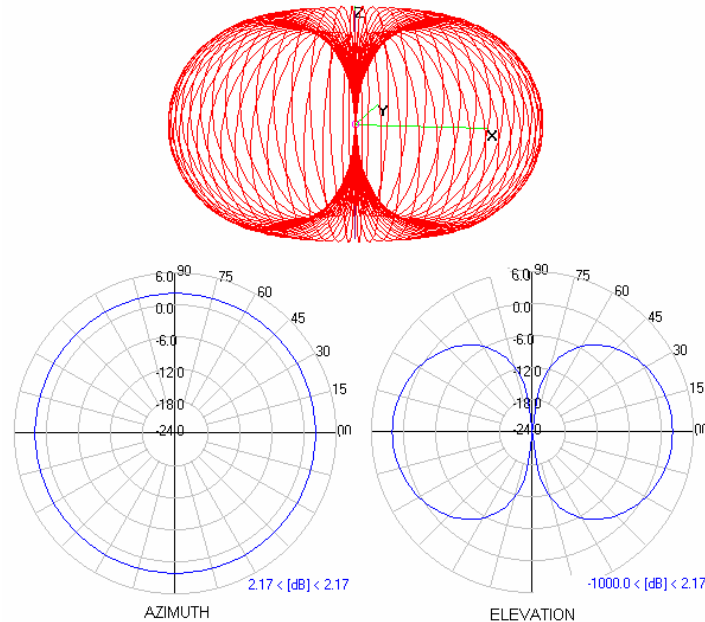
Lanka-antenneja käytetään paljon alle 1 GHz:n taajuuksilla. Tavallisin lanka-antenni on dipoli. Dipoli on suora johdin, joka on tavallisesti katkaistu keskeltä niin, että sitä voidaan syöttää aaltojohdolta. Dipoliantenni muodostuu peräkkäin sarjaan kytketyistä virtaelementeistä. Dipoliantenni on ympärisäteilevä, ja sen suuntaavuus on pieni. Dipoliantenneista tärkein on puolen aallon pituinen dipoli.

Puoliaaltodipolissa (kuva 6) sähkö- ja magneettikenttä leviävät kauemaksi avaruuteen. Sähköenergia leviää puoliaaltodipolista sähkömagneettisen säteilyn muodossa ympäröivään avaruuteen. Antenni muuttaa sähkölähteestä saatavaa sähköenergiaa sähkömagneettiseksi säteilyksi. Puoliaaltodipolin päissä virta on 0 ja jännite saavuttaa maksimiarvonsa. Virta on suurin siirtojohtojen ja puoliaaltodipolin liitännä- eli syöttöpisteessä. [9.]



Kuva 6. Puoliaaltodipoli [9]

Kuvassa 7 on dipoliantennin säteilykuvio esitetty myös kolmiulotteisena kuvana, jossa näkyy säteilykuvion rengasmaisen muoto. Säteilyenergia on keskittynyt renkaan sisempään aukkoon. Kolmiulotteisen kuvan alla on säteilykuvion pystytason ja vaakatason poikkileikkaukset.



Kuva 7. Dipoliantennin säteilykuviot [12]

Puoliaaltodipoliantennin vahvistus ja sieppauspinta ovat pienet, mikä johtaa pieneen antennijännitteeseen. Antennin sieppauspinta on antennin koosta ja muodosta riippuva alue, ja se on verrannollinen käytetyn aallonpituuden neliöön.

### Yagi-antenni

Yagi-antenni (kuva 8) saadaan, kun puolijohdedipolin taakse sijoitetaan yksi tai useampia heijastajia ja eteen sijoitetaan yksi tai useampia suuntaajia. Heijastajat ovat noin 5 % dipolia pidempiä ja suuntaajat ovat 5 % lyhempiä, ja ne lyhenevät vielä hiukan etäisyyden kasvaessa dipolista. Heijastajat ja suuntaajat ovat passiivisia elementtejä ja dipoli on puolestaan aktiivinen elementti. Dipoli toimii säteilijänä ja on resonanssissa silloin, kun sen pituus on  $0,45 - 0,48 \lambda$ . Heijastajia on tavallisesti yksi ja suuntaajia 3 -12. Taittodipolin käyttö puolijohdedipolin sijasta kasvattaa syöttöimpedanssia ja kaistanleveyttä. Yagi-antennin kaistanleveyttä voidaan kasvattaa paksuntamalla elementtejä. Syötettynä elementtinä käytetään yleisesti ns. taittodipolia, jonka tehollinen paksuus on suurempi kuin

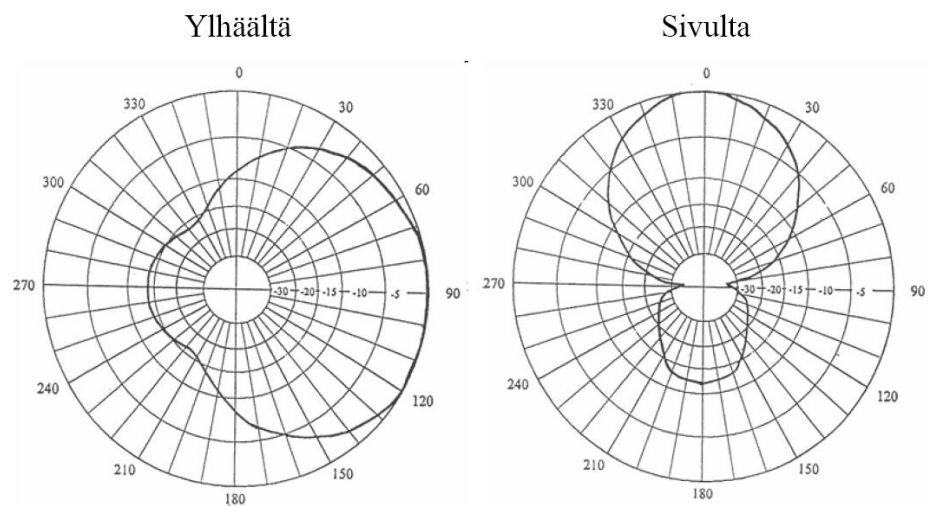
yksinkertaisen dipolin. Taittodipolin säteilyresistanssi on nelinkertainen yksinkertaiseen puoliaaltodipoliin verrattuna, eli noin  $300 \Omega$ . Elementtien lisääminen kasvattaa suuntaavuutta ja vahvistusta, mutta samalla kaistanleveys pienenee. Antennit, joilla on suuri vahvistus, sopivat vain yhden kaistan vastaanottoon. Tällaista antennia kutsutaan kanava-antenniksi. [11.]

Kuvassa 8 on 5-elementtinen Yagi-antenni, jonka taajuuskaista on 450 - 470 MHz, vahvistus on 11,4 dBi ja etu-takasuhde on 20 dB. [15.]



Kuva 8. 5-elementtinen Yagi-antenni [15, s.11]

Kuvassa 9 on Yagi-antennin suuntakuviot esitetty ylhäältä ja sivulta. Suuntakuviossa takakeila on pienempi kuin kuvan 7 suuntakuviossa.



Kuva 9. Yagi-antennin suuntakuviot [11, s.32]

Yagi-antennin ominaisuuksia (taulukko 2) ilmaistaan vahvistuksen, keilanleveyden ja etu-takasuhteen avulla. Keilanleveys kertoo sen keilakulman, missä vahvistus on pienentynyt 3 dB, eli vastaanotettava teho on pudonnut puoleen. Etu-takasuhde ilmaisee sen, miten paljon paremmin antenni vastaanottaa lähetysaseman suunnasta signaaleja kuin vastakkaisesta



suunnasta tulevia signaaleja. Syötettynä elementtinä käytetään yleisesti ns. taittodipolia, jonka tehollinen paksuus on suurempi kuin yksinkertaisen dipolin. Taittodipolin säteilyresistanssi on nelinkertainen yksinkertaiseen puolialtodipoliin verrattuna, eli n.  $300 \Omega$ . Standardi SFS 3319 määrittelee näkyvyysalueilla käytettävien antennien vaatimukset. [9.]

Taulukossa 2 on esitetty vaatimukset yagi-antennien ominaisuuksista VHF/I/II/III ja UHF näkyvyysalueilla.

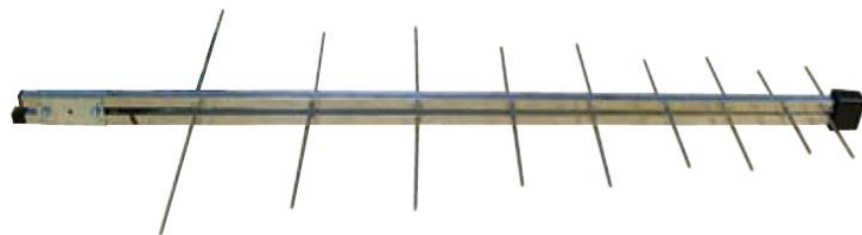
*Taulukko 2. Näkyvyysalueilla käytettävien antennien vaatimukset [9]*

	Vahvistus	Keilanleveys	Etu-takasuhde
VHF/I	5 dB	60°	12 dB
VHF/II	3 dB	65°	6 dB
VHF/III	9 dB	55°	20 dB
UHF	12 dB	50°	20 dB

Yagi-antenni on ehkä tavallisin suunta-antenni ja sillä on erittäin hyvä suuntaavuus, mutta kapea kaistanleveys.

#### *Log-periodinen antenni*

Log-periodinen antenni (kuva 10) on myös hyvin tavallinen suunta-antenni. Sillä on erittäin laaja taajuuskaista, mutta vähemmän vahvistusta kuin yagi-antennilla. Antennin elementit on kytketty vaiheistettuna rinnakkain, ja säteilijänä toimii se elementti, joka on resonanssissa eli on noin puolen aallon pituinen. Tämän elementin takana oleva pidempi elementti toimii heijastimena. Muilla elementeillä ei kyseessä olevalla taajuudella ole juuri vaikutusta toimintaan. Antennin runko-osa toimii siirtolinjana, joka syöttää aktiivisen alueen dipoleita. Antennissa impedanssi ja säteilyominaisuudet muuttuvat periodisesti taajuuden logaritmin funktiona. Antenni on rakenteeltaan kevyt, yksinkertainen ja sen valmistaminen on edullista.

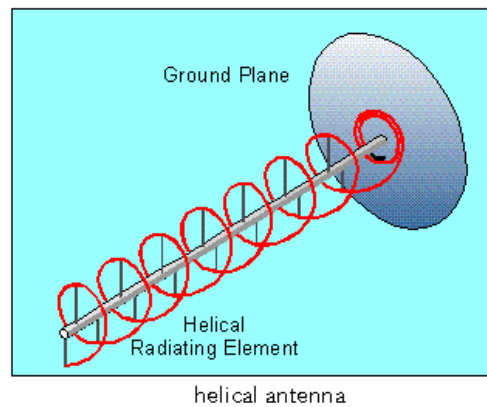


*Kuva 10. Log-periodinen antenni [15, s.11]*

Kuvassa 10 olevan antennin taajuuskaista on 380 - 500 MHz, vahvistus on 9,7 dBi ja etu-takasuhde on 20 dB.

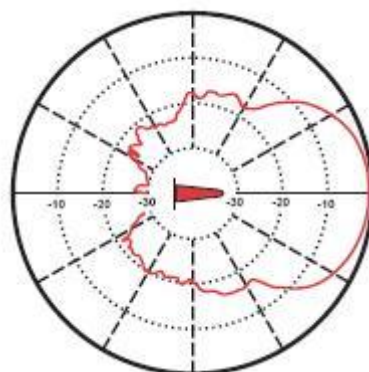
### *Heliksiantenni*

Heliksiantennissa (kuva 11) on säteilevän elementin ympärille spiraaliksi kierretty johdin vasen- tai oikeakätisesti. Jos johdinkierroksen pituus on alle puoli aaltoa, säteilee heliksi normaalimuodossa, eli suuntakuvion maksimi on kohtisuorassa akselia vasten. Silloin, kun johdinkierroksen pituuden suhde aallon pituuteen on 0,75 -1,25, säteilee heliksi aksiaalimuodossa. Pääkeila on tällöin akselin suuntaan ja aalto on ympäripolarisoitunut. Polarisaatio riippuu spiraalin suunnasta.



*Kuva 11. Heliksiantenni [17]*

Kuvassa 12 heliksiantennin säteilykuviossa pääkeila on akselin suuntainen.



*Kuva 12. Heliksiantennin säteilykuvio [21]*

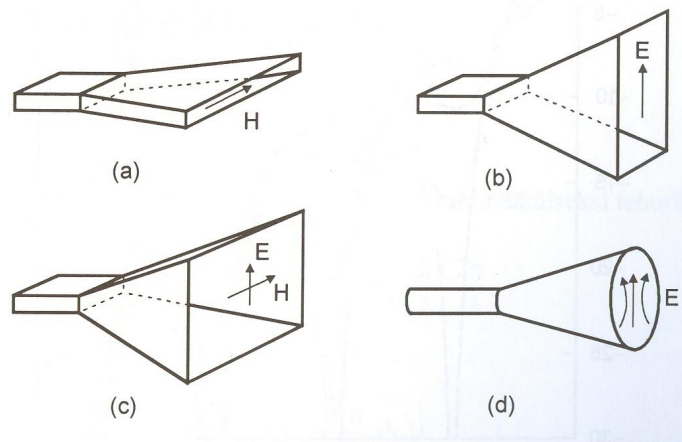
### 3.2.2 Apertuuri-antennit

Apertuuri tarkoittaa aukkoa, avautumaa tai pintaa. Antennissa säteilevä energia tulee siirtojohtosta aukon kautta avaruuteen. Apertuurin muoto vaikuttaa antennin säteilyominaisuuksiin.

#### Torviantennit

Avoin aaltoputken pää toimii torviantennina (kuva 13). Sen ominaisuuksia voidaan parantaa laajentamalla putken päätä torven avulla. H-tason torviantennissa on aaltoputkea levennetty leveän sivun suunnassa ja E-tason torviantennissa kapean sivun suunnassa. Pyramiditorvessa levennys tapahtuu molempiin suuntiin. Perusaaltomuodolla  $TE_{11}$  toimivaa pyöreää aaltoputkea leventämällä saadaan kartiotorvi.

Apertuurin kentänjakauma seuraa aaltoputken perusaaltomuodon  $TE_{10}$  kenttiä. E-tasossa kentän amplitudi on vakio, ja siksi sivukeilat ovat korkeat. H-tasossa amplitudi pienenee nollaan reunalla ja sivukeilat ovat pienempiä. Kuvassa 13 on esitetty erilaisia torviantennien profiileja.



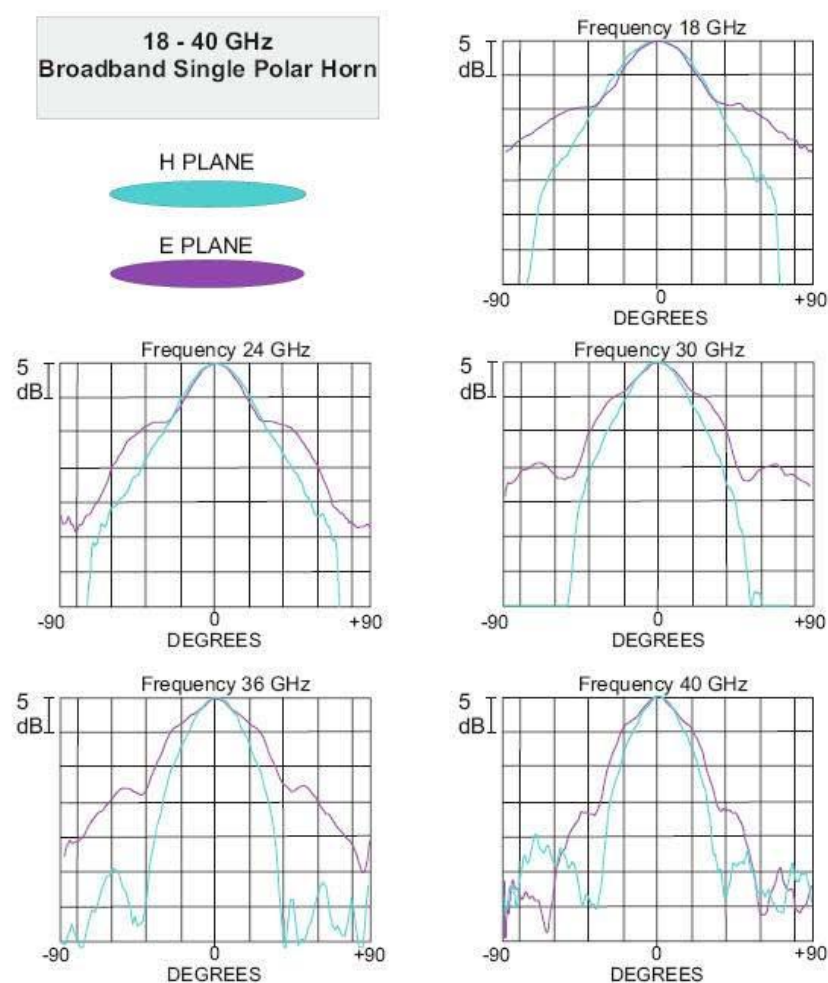
Kuva 13. H-tason, E-tason, pyramidi- ja kartiotorviantenni [6, s.178]

Torvessa syntyy vaihevirhettä, koska vaihe on jäljessä reunalla alueilla keskipisteeseen nähden. Tämä johtuu siitä, että aaltoputkesta on torven reunalle pidempi matka kuin keskelle. Apertuuria leventämällä saadaan torviantennin suuntaavuutta kasvatettua tiettyyn rajaan asti, jos pituus pidetään samana. Optimipisteen jälkeen kuitenkin vaihevirhe kasvaa niin suureksi, että suuntaavuus pienenee nopeasti. Torviantennien häviöt ovat yleensä pienet, eli vahvistus ja suuntaavuus ovat suunnilleen yhtä suuret.

Kartiotorven symmetrisestä rakenteesta huolimatta ei sen kenttäkuvio ole symmetrinen, joten E- ja H-tason suuntakuviot ovat erilaiset.

Torviantenneja käytetään mikroaaltotaajuuksilla, koska niillä on korkea vahvistus, matala VSWR (Voltage Standing Wave ratio) -jännitteen seisovan aallon suhde ja suhteellisen leveä kaistanleveys. Niitä käytetään myös heijastinantennin syöttöantenneina.

Kuvassa 14 on kuvattu suorakulmaisessa koordinaatistossa laajakaistaisen torviantennin säteilykuviot 18 - 40 GHz:n taajuuksilla H- ja E-tasossa.

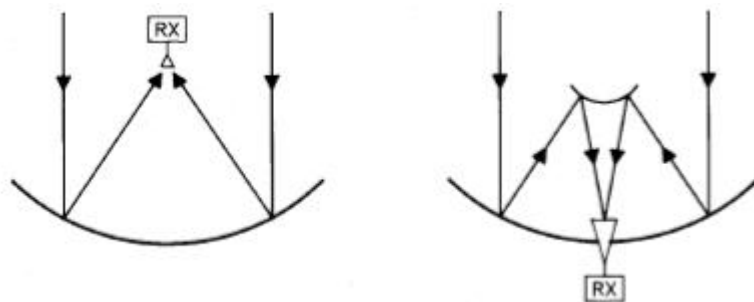


Kuva 14. Torviantennien suuntakuvioita [19]

### Heijastinantennit

Yleisin käytössä oleva heijastinantenni on paraboloidin muotoinen heijastin eli paraboloidiantenni. Sen kaksi eniten käytettyä muunnelmaa (kuva 15) ovat polttopisteestä syötetty paraboloidiantenni, jonka syöttö- tai vastaanottoantennina voi olla esimerkiksi dipoli tai torvi, sekä Cassegrainin antenni, jossa pääheijastimen edessä on hyperboloidin muotoinen apuheijastin. Paraboloidiantenni kerää säteilyä sen optisen akselin suunnalta ja ohjaa sädekimpun polttopisteeseen. Polttopisteeseen kulkevat säteet kulkevat yhtä pitkän matkan, joten aallot ovat polttopisteessä samanvaiheisia ja vahvistavat toisiaan. Syöttöantenni, apuheijastin ja niiden tukirakenteet peittävät apertuuria ja pienentävät näin apertuurihyötysuhdetta ja nostavat ensimmäistä sivukeilatasa. Syöttöantenni ja apuheijastin sijoitetaan usein sivuun pois paraboloidin edestä, jolloin nämä eivät häiritse aallon kulkua apertuurille. Tällä voidaan ohjata myös keilan suuntaa. Tästä aiheutuvia haittoja ovat epäsymmetrisen heijastimen aiheuttama ristipolarisaatio ja se, että rakenteet ovat usein monimutkaisia.

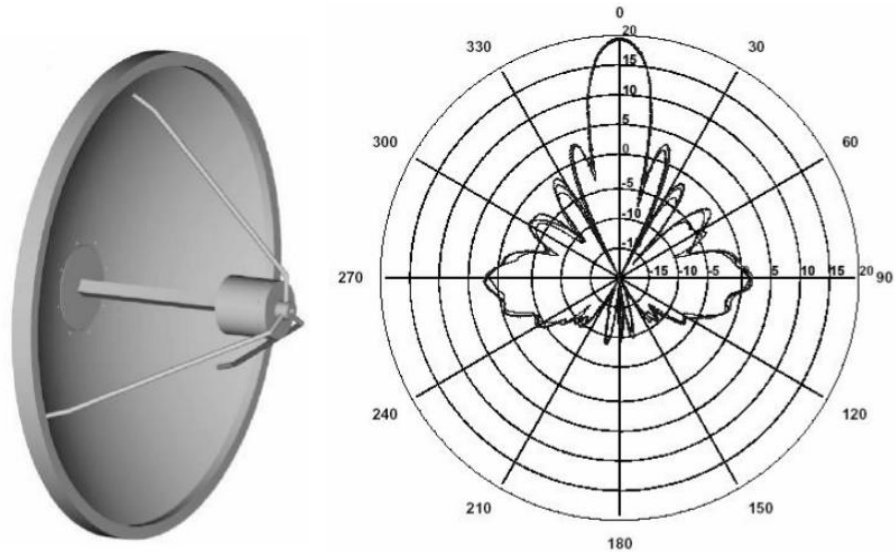
Kuvassa 15 näkyvät polttopisteestä syötetyn antennin säteilyn kulku ja apuheijastimesta säteilevän säteilyn kulku.



Kuva 15. Polttopisteestä syötetty antenni ja Cassegrainin antenni [20, s.3]

Heijastinantenneja käytetään esimerkiksi radioastronomiassa, satelliittitietoliikenteessä ja tutkatekniikassa, joissa tarvitaan suuri suuntaavuus.

Kuvassa 16 ovat polttopisteestä syötettävä heijastinantenni ja suuntakuvio, jossa näkyy kapea pääkeila ja useita sivukeiloja.



Kuva 16. Lautasantenni ja heijastinantennin suuntakuvio [11, s.35]

### 3.2.3 Mikroliuska-antennit ja rakoantennit

Mikroliuska koostuu kahdesta johdeliuskasta, joiden välillä on eristekerros. Jos ylempi johde muodostaa eristeaineen puolen aallonpituisen tilkun (patch), jota syötetään mikroliuskasiirtolinjalla, toimii rakenne resonansiantennina. Antenni säteilee avoimista päistään, ja aalto on lineaarisesti polarisoitunut. Pääkeila on kohtisuorassa antennin tasoa vastaan. Ympäripolarisoitunut aalto saadaan aikaiseksi, kun suorakaiteen muotoista mikroliuskaa syötetään kulmasta.

Mikroliuska-antennin etuna on pienuus, halpa valmistustekniikka ja se, että syöttöpiiri ja muu elektroniikka voidaan tehdä samalle mikroliuskalle. Haittana ovat kapea taajuuskaista, vaatimaton vahvistus ja suuret häviöt.

Rakoantenni on metallilevy, johon on tehty aukko. Antenni säteilee metallilevyn molemmin puolin. Säteilyominaisuuksiltaan antenni vastaa aukon pituista dipoliantennia. Syöttö tapahtuu koaksiaalikaapelilla tai aaltoputkella. Antennia käytetään mikroaaltotaajuuksilla esimerkiksi lentokoneissa. [22.]

## 4 ANTENNIEN MITTAAMINEN

Antennien mittaustekniikka on monimuotoista. Tähän ovat syynä erilaiset antennit, joiden sovelluksista riippuu, mitä ominaisuuksia halutaan mitata. Mittaus voi olla hyvin yksinkertaista tai osoittautua lähes mahdottomaksi. Mittauspaikat ja -menetelmät riippuvat antennien koosta ja taajuudesta.

Antennien mittauksessa hyödynnetään niiden resiprookkisuuutta, koska osa mittauksista on helpompi ja edullisempi suorittaa lähetysantennille ja osa taas vastaanottoantennille.

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 vapaantilan ja maaheijastusmittauspaikka, heijastukseton huone sekä kompakti ja lähikenttämittauspaikka.

#### 4.1.1 Vapaantilan mittauspaikka

Vapaantilan mittauspaikka voi muodostua korkeisiin torneihin tai vuoren huipulle asennetuista antennista, 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 diffraktioaidoilla, jotka ovat tavallisesti metalliverkkoja. Maaheijastuksia voidaan vähentää myös 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 lähettimen 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. [23.]

#### 4.1.2 *Maaheijastusmittauspaikka*

Maaheijastusmittauspaikalla pitää antennien välisen pinnan olla tasainen ja mahdollisimman hyvin johtava, jotta suoraan edennyt ja heijastunut signaali yhdistyvät muodostaen interferenssikuvion. Lähetysantenni ja sen peilikuva muodostavat kentän. Asettamalla antennit sopivalle korkeudelle osuu interferenssikuvion ensimmäinen ja samalla amplitudiltaan laakein keila mitattavan antennin kohdalle. Taajuutta muutettaessa pitää korkeutta myös säätää. Jos heijastus tapahtuu pienessä kulmassa, heijastuskertoimen itseisarvo on lähes 1 ja vaihe melkein  $0^\circ$  vertikaalisella polarisaatiolla ja  $180^\circ$  horisontaalisella polarisaatiolla.

#### 4.1.3 *Heijastukseton huone*

Heijastuksettomassa huoneessa mittaukset voidaan suorittaa hallituissa olosuhteissa ilman ympäristön ja sääolojen aiheuttamia häiriöitä. Huone on eristetty aaltoja absorboivalla materiaalilla, ja vaimennusmateriaalin alle on sijoitettu vielä tiivis metallikerros, jolloin tila jäljittelee vapaata avaruutta. Huoneen pituuden ja leveyden suhteen pitäisi olla 2:1, sillä huomattavasti suurempi suhde kasvattaa tulokulmaa ja heijastuserrointa.

Suorakaiteen muotoisessa huoneessa kriittisimmät kohdat ovat pitkien seinien kohdalla, josta aalto voi tulla yhdellä heijastuksella vastaanottoantenniin. Nämä kohdat pitää päällystää mahdollisimman hyvälaatuisella vaimennusmateriaalilla. Antennien tukirakenteet pitää myös suojata hyvin, ettei niiden välille synny seisovia aaltoja. Vaimennusmateriaalin paksuus määrittää huoneen taajuusalueen ja kaukokentän vaatimus rajoittaa mitattavan antennin kokoa. Lähetysantenni suunnataan siten, ettei pääkeila valaise sivuseiniä. Mittaukset tehdään niin sanotulla hiljaisella alueella, jossa heijastukset on pyritty minimoimaan.

#### 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 aiheutuva ylimääräi-



nen säteily voidaan eliminoida muotoilemalla reunat sahalaitaisiksi tai kaarviksi.

#### 4.1.5 Lähikenttämittauspaikka

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

Mittauspintoina voidaan käyttää taso-, sylinteri- tai pallokoordinaatistoa, joista tasokoordinaatiomittaus soveltuu yhteen suuntaan säteileville antenneille ja pallokoordinaatiomittaus soveltuu ympärisäteileville antenneille.

Lähikenttämittauksia häiritsevät antennin ja mittapään monikertaheijastukset. Mittaamalla antennin lähikenttä voidaan siitä laskea antennin kaukokentän ominaisuudet.

## 4.2 Säteilykuvion mittaus

Suuntakuviot mitataan usein antennin päätasoissa. Linearisessa polarisaatiossa valitaan antennin päätasoksi sähkökentän suuntainen E-taso ja magneettikentän suuntainen H-taso. Elliptisessä polarisaatiossa antennin päätasot määritellään antennin rakenteen perusteella. Linearisessa polarisaatiomittauksessa ovat lähetys- vastaanottoantennien kenttävektorit yhdensuuntaisia. Pää- ja ristipolarisaation säteilykuviot mitataan erikseen siten, että pääpolarisaatiossa polarisaatiot asetetaan pääkeilan suunnassa yhdensuuntaisiksi ja ristipolarisaatiossa lähetysantennia käännetään  $90^\circ$  vastaanottoantenniin nähden.

## 4.3 Vahvistuksen mittaus

Vahvistuksen mittausmenetelmät ovat vertailumittaus ja absoluuttinen mittaus, jota käytetään vertailuantennin kalibroinnissa. Absoluuttisen vahvistuksen mittauksessa antennien pääkeilat suunnataan mahdollisimman tarkasti toisiaan kohti. Jos mittaukseen on käytettävissä kaksi mahdollisimman samanlaista antennia, mitataan vastaanotettu teho ja lähetysteho, jolloin vahvistus voidaan laskea vapaan tilan etenemiskaavalla. Mittauksessa voidaan käyttää myös kolmea jonkin verran erilaista antennia, jolloin ne

mitataan pareittain. Kaikkien kolmen antennin vahvistukset voidaan laskea mittauksista saaduista yhtälöryhmistä.

Vertailumittauksessa pitää tietää yhden antennin vahvistus, jolloin mitattavan antennin vahvistus voidaan laskea molempien antennien vastaanotto-  
tehojen avulla. Tehosuhte voidaan mitata tarkkuusvaimentimella, jolloin vastaanottimen epälineaarisuus ei vaikuta mittaustulokseen.

#### **4.4 Polarisaation mittaus**

Absoluuttinen polarisaation kalibrointi voidaan suorittaa mittaamalla kolme antenna pareittain. Jokaiselle parille suoritetaan kaksi mittausta kääntämällä vastaanottoantennia  $90^\circ$  lähetyksentennin nähden, jolloin polarisaatiot voidaan laskea mitatuista amplitudiarvoista.

Lähetyksentennin polarisaatio voidaan mitata kaksikanavaisella vastaanottimella, jonka kanavat toimivat ortogonaalisilla polarisaatioilla. Kun kanavien polarisaatiot ovat vertikaalinen ja horisontaalinen lineaaripolarisaatio, saadaan kanavien amplitudit mittaamalla, ja vaihe-ero voidaan laskea sen yhtälöstä.

#### **4.5 Impedanssin mittaus**

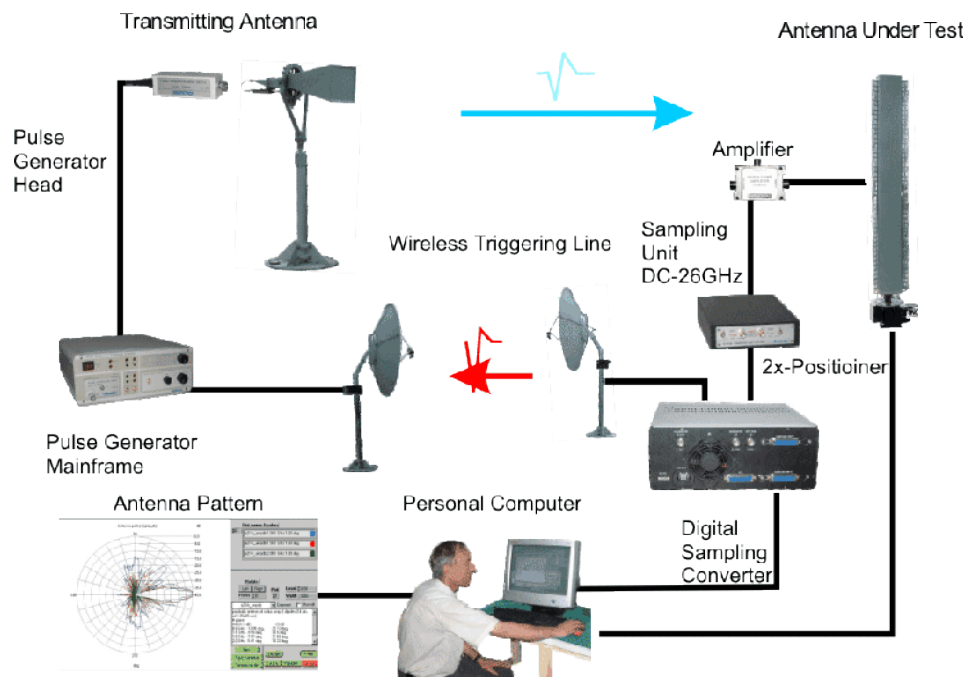
Antennin sisäänmenoimpedanssin mittauksessa voidaan käyttää impedanssisiltaa, piirianalysointia tai urajohtoa. Antenniin tulevien ylimääräisten heijastusten aiheuttamia virheitä voidaan vähentää toistamalla mittausta hieman eri paikoissa ja ottamalla tuloksista keskiarvo. Antennin yhteydessä käytettävien rakenteiden aiheuttamat heijastukset eivät ole ylimääräisiä heijastuksia. Ylimääräiset heijastukset voidaan eliminoida suorittamalla mittausta heijastuksettomassa tilassa.

## 5 ANTENNIEN MITTAUSJÄRJESTELMÄT

Antennimittausjärjestelmien kirjo on kasvanut antennien käyttötarkoituksen ja monipuolistumisen mukana. Mittausjärjestelmiä on kehitetty pelkästään tasoantennien tai WLAN- ja WiMAX-järjestelmissä käytettävien antennien mittaustarkoitukseen. Markkinoilta löytyy myös siirrettäviä ja kiinteitä järjestelmiä. Koot vaihtelevat hyvin pienistä massiivisiin, ja valittavissa on vielä lähikenttä-, kaukokenttä- tai molempien kenttien mittausjärjestelmiä. Lisäksi on olemassa mittausjärjestelmiä, joissa ei tarvita heijastusetonta tilaa. Mittausjärjestelmissä käytetään esimerkiksi Agilent VEE-, LabVIEW- ja EMQuest- pohjaisia ohjelmia omien ohjelmien lisäksi.

## 5.1 Antennin kaukokenttämittaus ilman heijastumatonta tilaa

Geozondas valmistaa antennimittausjärjestelmiä kahdelle eri menetelmälle: FDM (Frequency Domain Measurement) -mittaus taajuusalueella ja TDM (Time Domain Measurement) -mittaus aika-alueella. TDM-mittauksessa voidaan eliminoida vieressä olevien kohteiden aiheuttamat heijastukset käyttämällä riittävän kokoista aikaikkunaa. Tästä johtuen TDM-mittauksia ei tarvitse tehdä heijastuksettomassa huoneessa. FDM-mittauksessa saadaan parempi dynaaminen alue. FDM-mittaus onkin ainoa uskottava menetelmä kapeakaistaisen antennin mittauksessa. Järjestelmäkoonpano (kuva 17) sisältää antennisetin, 3-kanavaisen näyttötenottooskoopin, pulssigeneraattorin, mikroaaltogeneraattorin, asetintelineen (positioner), joka kääntyy vaakatasossa  $360^\circ$  ja pystytasossa  $90^\circ$ , sekä ohjelmiston. [25.]

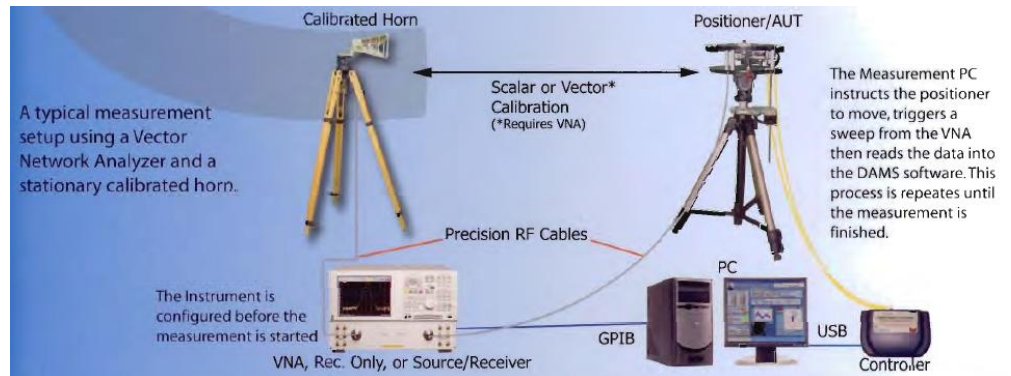


Kuva 17. Geozondasin antennimittausjärjestelmä [25]

## 5.2 Diamond Engineering DAMS x100 -sarjan antennimittausjärjestelmä

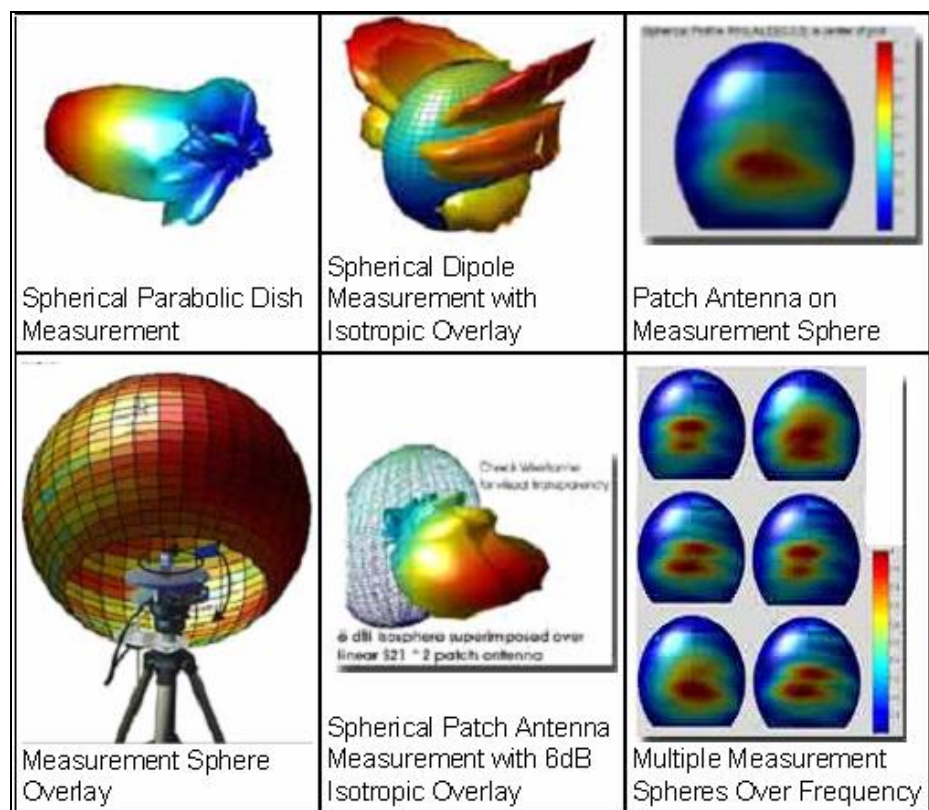
Valmistajalla on useita eri vaihtoehtoja, joita voidaan täydentää kannettavalla tai pöytätietokoneella ja joihin on valmiiksi asennettu käyttöohjelmat. Koonpano (kuva 18) käsittää asetintelineen (positioner), joka kääntyy vaakatasossa  $360^\circ$  ja pystytasossa  $90^\circ$  riippuen mallista. Asetintelineettä ohjataan tietokoneella. Laitteessa on USB- ja sarjaportti. Lähetinantennina on kalibroitu torviantenni. Tietokoneissa on valmiiksi asennettun ohjelman

lisäksi GPIB-väyläkortti kaapeleineen. Ohjelma toimii useimpien piirianalysointilaitteiden kanssa. Se suorittaa reaaliaikaista mittausta ja tulostaa myös kolmiulotteista grafiikkaa.



Kuva 18. DAMS x100 -sarjan antennimittausjärjestelmän lay out [26]

Kuvassa 19 on DAMS-antennimittausjärjestelmällä tuotettuja eri antennien kolmiulotteisia säteilykuvioita.



Kuva 19. DAMS- antennimittausjärjestelmällä tuotettuja kuvia [26]

### 5.3 ETS-Lindgren AMS-8050 -antennimittausjärjestelmä

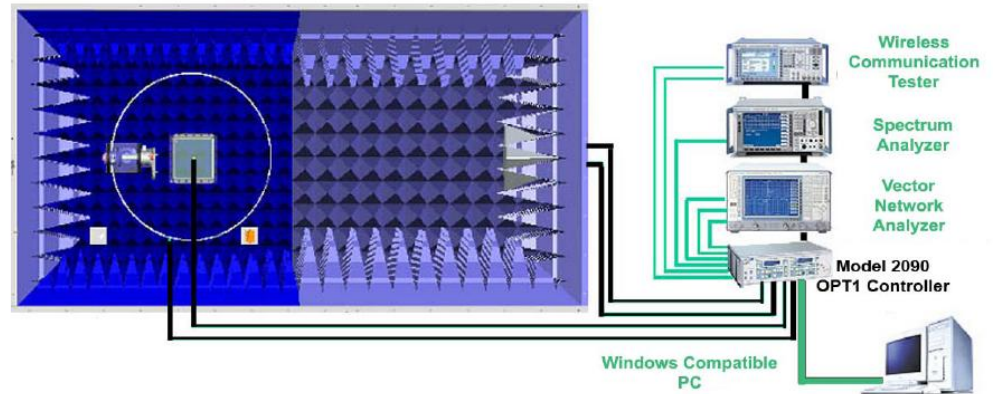
Mittausjärjestelmä sisältää vapaasti seisovan, kuljetusalustalle rakennetun (PxLxK) 2,5x1,4x1,9 -kokoisen ja 820 kg painavan heijastuksettoman ”kontin”. Järjestelmä soveltuu käytettäväksi, kun on rajoitetusti tilaa rakentaa erillinen heijastukseton huone tai mittauksia tehdään eri paikoissa. Kokoonpanoon sisältyy Controller-OPT1, kaapelit ja EQM 100 Antenna Pattern Measument -ohjelmisto, joka automaattisesti suorittaa aktiivisen ja passiivisen antenninsuuntakuvio- ja taajuusvastemittaukset. Mittauksiin sisältyvät vektori- ja skalaariominaisuudet lähetys- tai vastaanottotilassa. Ohjelmalla saadaan suuntaavuus, vahvistus, säteilytiheys, kokonaissäteilyteho ja kokonaisisostrooppinen herkkyys.

Kuvassa 20 on pyörillä oleva vapaasti liikuteltava heijastukseton huone, johon mittauksessa käytettävät kaapelit johdetaan seinissä olevien luukkujen kautta.



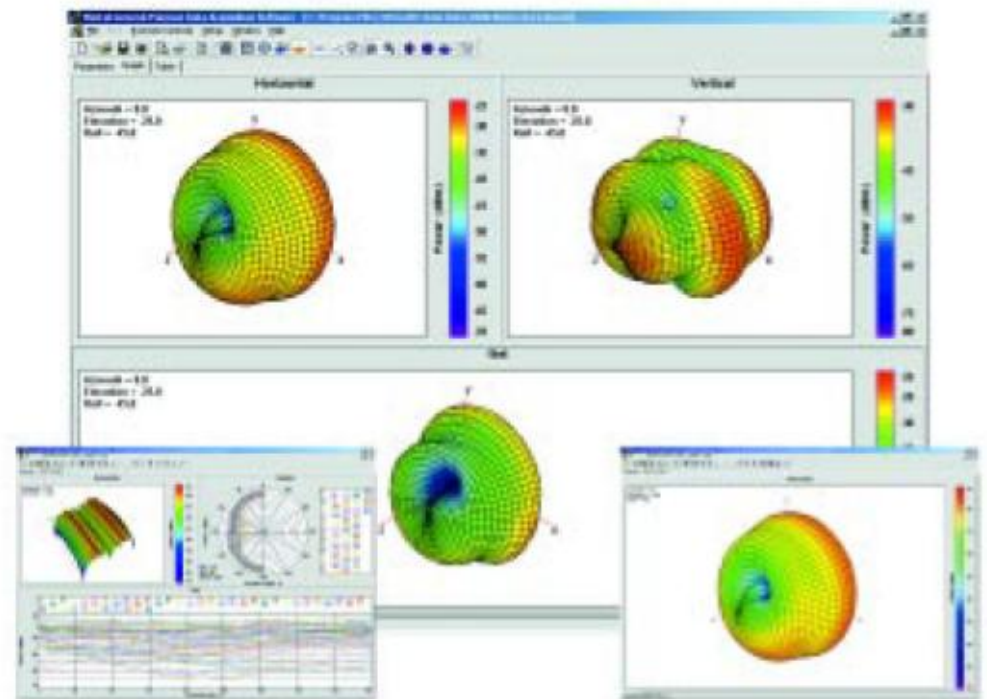
Kuva 20. ETS-Lindgren AMS-8050 siirrettävä, heijastukseton ”kontti” [27]

Kuvassa 21 oleva heijastukseton tila, Model 2090 Controller-OPT1 ja mustat kaapelit sisältyvät kokoonpanoon. Vihreällä merkityt laitteet ja kaapelit eivät kuulu valmiiseen kokoonpanoon.



Kuva 21. ETS-Lindgren AMS-8050 antennimittausjärjestelmän lay out [27]

Kuvassa 22 näkyvät graafisen ohjelman monipuoliset mahdollisuudet kuvata mittaustuloksia kaksi- ja kolmiulotteisena.



Kuva 22. EQM 100 Antenna Pattern Measurement ohjelmistolla tuotettuja kuvia [27]

#### 5.4 Muita markkinoilla olevia antennimittausjärjestelmiä

Kolmen edellä kuvatun järjestelmän lisäksi markkinoilla on lukuisa määrä eri valmistajien kokoonpanoja erilaisilla ominaisuuksilla varustettuna.

Antcom valmistaa lähikenttämittauksen antentennimittausjärjestelmää, joka voidaan muuntaa myös kaukokenttämittaukseen soveltuvaksi. Käyttöjärjestelmänä on Windows NT, ja järjestelmä soveltuu kaikenlaisten antennien mittaukseen. [28.]

MI Technologies valmistaa langattomien laitteiden antennien mittaukseen kehitetyn järjestelmän lisäksi myös muiden antennien mittaukseen kehitettyjä järjestelmiä, jotka soveltuvat lähi- ja kaukokenttämittaukseen. Järjestelmä on hyvin monipuolinen, ja tulosteet voidaan siirtää Microsoft Office:lle, kuten muidenkin valmistajien järjestelmissä. [29.]

Nearfield on johtava antennimittausjärjestelmien valmistaja, jolta löytyy myös kaukokenttämittaukseen tarkoitettuja järjestelmiä. Ne soveltuvat yliopistoille ja pienille yrityksille pienten, keveiden ja pienivahvistuksisten antennien testaukseen. [30.]

Orbit/FR valmistaa langattomien laitteiden antennien mittaukseen kehitetyn järjestelmän lisäksi minisarjaa pienille korkeataajuisille antennille sekä lähikenttämittaukseen soveltuvaa järjestelmää. [31.]



## 6 GPIB-VÄYLÄN KÄYTTÖ

Tietokoneohjatuissa antennimittausjärjestelmissä on yleisimpänä väyläratkaisuna käytetty GPIB (General Purpose Interface Bus) -väylää. Tämä johtuu siitä, että yhden väylän kautta voidaan tietokoneeseen liittää useita eri laitteita yhtä aikaa. Toisena syynä on se, että monissa vielä käytössä olevissa mittauslaitteissa ei ole USB (Universal Serial Bus) -porttia, joskin tämä puute voidaan helposti poistaa käyttämällä GPIB-USB sovitinta. GPIB-väylä on 8-bittinen rinnakkaisväylä, joka perustuu IEEE 488 -standardiin. Standardi on sähköinen eikä määrää protokollaa, ja näin ollen jokainen laite tarvitsee oman ajurin. Väylän nopeus on 1 Mbyte/s. Laitteiden välinen kaapelinmaksimipituus voi olla 4 m ja yhteensä 20 m. Väylään voidaan liittää yhtä aikaa 15 laitetta, joista 10 voi olla samaan aikaan käytössä. Väylässä käytetään kolmenlaisia laitteita:

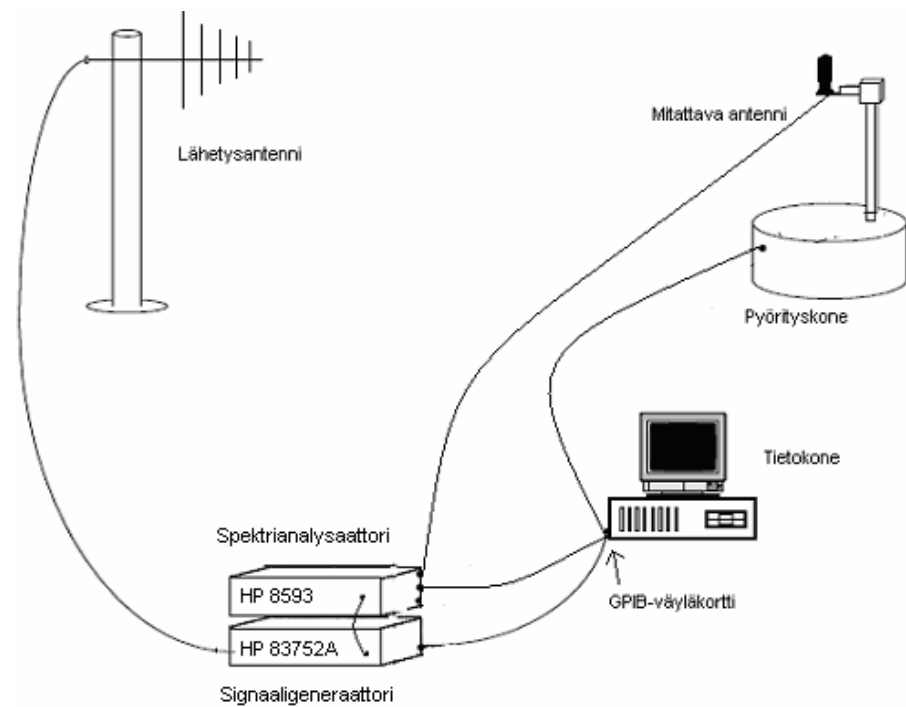
- Controller ohjaa liikennettä ja määrittelee laitteet, jotka kommunikoivat keskenään. Yksi laite voi olla Controller. Tietokone toimii yleensä Controllerina.
  - Talker lähettää dataa väylää pitkin. Yksi laite voi toimia kerrallaan Talkerina.
  - Listener ottaa vastaan dataa. Useampi laite voi toimia Listenerinä.
- [32.]

IEEE 488 -standardiin perustuva GPIB-väylä on hidas verrattuna uudempiin standardeihin ja tulee väistyään LXI (LAN extensions for Instrumentation) -standardiin pohjautuvien laitteiden yleistyessä.

## 7 MITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

Mittausjärjestelmän kehittämisen lähtökohtana ovat jo olemassa olevat laitteet ja ohjelmat. Ohjelmavaihtoehtoina ovat käytettävissä Agilent VEE- ja LabVIEW-grafiikkaohjelmat, joista tähän työhön soveltuu Agilent VEE, koska se on jo valmiiksi asennettuna tietokoneelle. Tutkittavan antennin suunnan kääntämiseen käytetään Brüel & Kjærin Turntable System -Type 9640, Controller Type 5949 ja Remote Control WB 1254 -pyörityslaitejärjestelmää. Signaaligeneraattoriksi valitaan HP 83752, spektrianalysaattoriksi HP 8593, tietokoneeksi kannettava Fujitsu Siemens Lifebook ja GPIB-väyläkortiksi Agilent 82350A.

Mittausjärjestelmän periaatekuva on esitetty kuvassa 23.

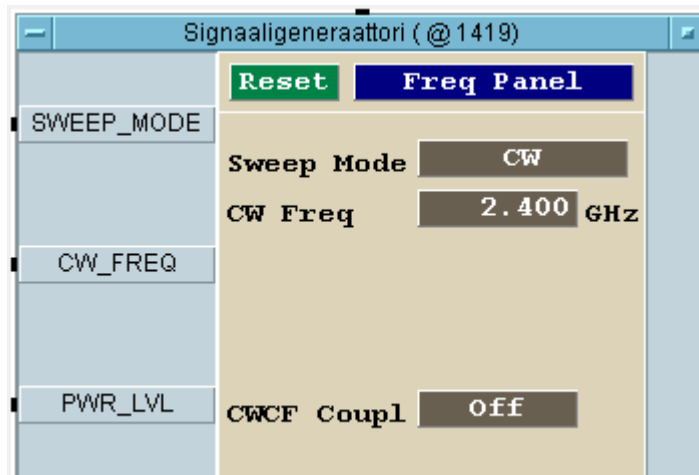


Kuva 23. Mittausjärjestelmä

Agilent VEE on graafinen ohjelmointikieli, jota on laajalti käytetty erilaisissa testaus- ja mittaussovelluksissa. Ohjelma luodaan valitsemalla menuvalikosta objektit ja liittämällä ne yhteen. Lopputulos muistuttaa tietovirta-kaaviota, jota on helpompi käyttää ja ymmärtää kuin perinteistä ohjelmakoodia.

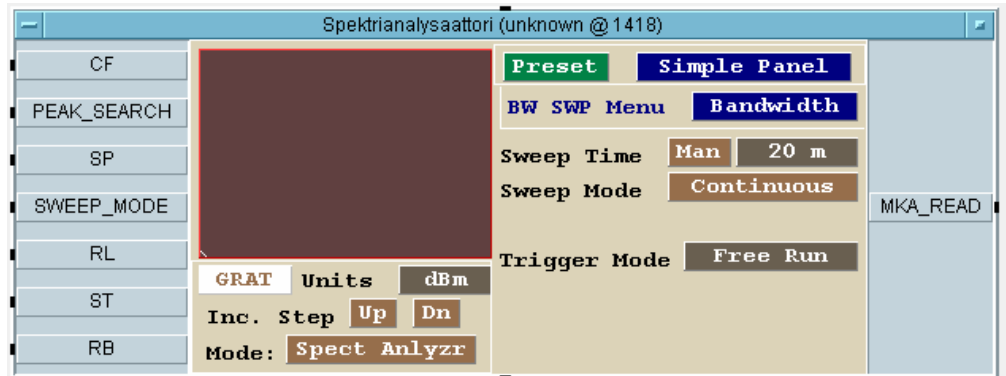
Mittausjärjestelmässä käytettävä signaaligeneraattori, spektrianalysaattori ja pyörityskone liitetään ohjelmaan valitsemalla Menusta I/O ja sieltä Instrument Manager. Instrument Managerissa Add-palkkia painamalla avautuu Instrument Properties -ikkuna, johon kirjoitetaan lisättävän laitteen nimi. Lisäksi tarkistetaan osoite ja väyläportti. Instrument Properties -ikkunan alareunassa olevaa Advanced-palkkia painamalla avautuu Advanced Instrument Properties -ikkuna. Tästä valitaan Panel Driver -sivu, josta ID Filenamea painamalla tulee esille ajurihakemisto. Hakemistossa on yleisimpien HP-mittalaitteiden ajurit. Laiteajurien valinnan jälkeen palataan takaisin Instrument Manageriin, painetaan Panel Driver ja save, jolloin Main-ikkunaan ilmestyy kuva laitteen paneelista. Paneeli saadaan pienennettyä paneelin oikeasta yläkulmasta.

Signaaligeneraattorin kuvaketta kaksoisnapauttamalla saadaan esille sen näyttöpaneeli (kuva 24). Paneelin vasenta yläkulmaa napauttamalla tulee näkyville valikko, jossa on Add Terminal. Sieltä Data Inputia painamalla tulee esille ikkuna, jossa näkyvät valittavissa olevat Inputit. Paneeliin lisätään SWEEP\_MODE, CR\_FREQ ja PWR\_LVL input -liitännät kuvan 24 mukaisesti.



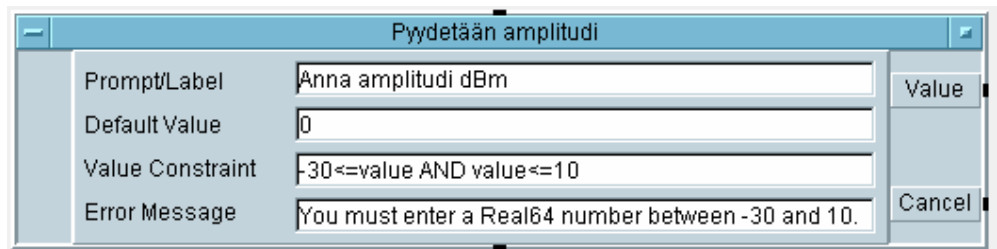
Kuva 24. Signaaligeneraattorin paneeli

Samat toimenpiteet tehdään spektrianalysaattorille (kuva 25), johon liitetään 7 Data Input -liitäntää ja 1 Data Output -liitäntä kuten kuvassa 25 näkyy. Pyörityskoneelle ei avaudu erillistä input-valikkoa, vaan pyörityskoneen paneeliin tulee esille ainoastaan input A, joka voidaan nimetä erikseen.



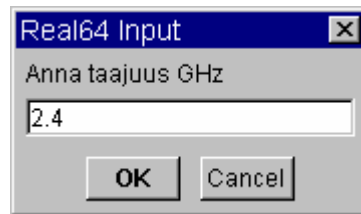
Kuva 25. Spektrianalysaattorin paneeli

Näiden jälkeen ohjelmoidaan laitteille ohjaukset noutamalla Data Dialog Boxista 2 Real64 Input- ja Constantista 3 Real64- ja 2 Int16 -objektia, jolloin ne automaattisesti ilmestyvät myös Main-ikkunaan. Real64 Inputin paneeli saadaan auki myös hiiren kaksoisnapautuksella. Avautuneeseen paneeliin kirjoitetaan kuvan 26 mukaiset tekstit. Real64 Inputissa olevien oletustekstien tilalle vaihdetaan otsikko napauttamalla hiiren oikeanpuoleista painiketta ja valitsemalla properties-valikko. Title-palkkiin kirjoitetaan otsikoksi: Pyydetään amplitudi. Prompt/Label-palkkiin kirjoitetaan kehote: Anna Amplitudi dBm. Sama kehote tulee näkyviin ponnahdusikkunaan (kuva 27) ohjelmaa käytettäessä. Default Value -palkkiin kirjoitetaan amplitudin oletusarvoksi 0, Value Constraint -palkissa ilmoitetaan amplitudiaalueen rajat ja Error Message -palkkiin kirjoitetaan amplitudiaalueen virherajat.



Kuva 26. Real64 Inputin paneeli, johon on vaihdettu uusi otsikko

Ohjelmaa käytettäessä ilmestyy kuvassa 27 oleva ponnahdusikkuna esille, johon kirjoitetaan mittauksessa käytettävä taajuusarvo.

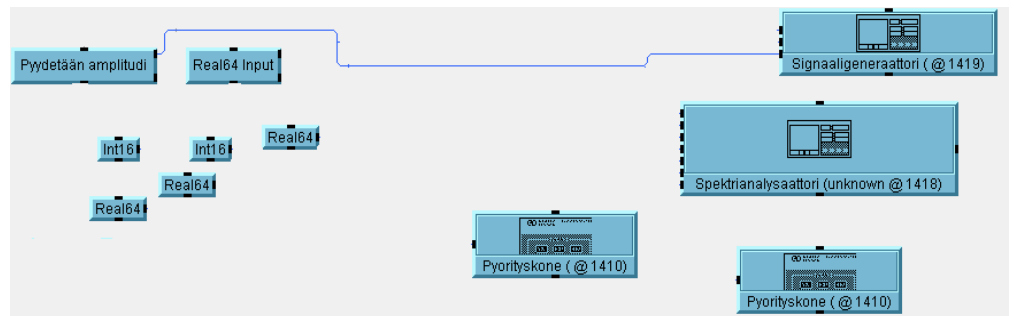


Kuva 27. Ponnahdusikkuna

Muiden objektien paneelit teksteineen ovat liitteessä 1.

Seuraavaksi johdotetaan objektit laitteisiin siirtämällä kohdistin objektin oikeassa reunassa olevaan Outputiin. Pitämällä hiiren vasenta näppäintä alhaalla viedään kohdistin laitteen vasemmassa reunassa olevaan Inputiin. Kuvassa 26 paneelin ulostulosta Value viedään kytkentä signaaligeneraattorin sisääntuloon PWR\_LVL (kuva 24). Näin saadaan pyydetyt arvot siirrettyä signaaligeneraattorille.

Kuvassa 28 näkyy kytkentä signaaligeneraattorille ja liitteessä 1 ovat ohjausobjektien ja laitteiden paneelit avattuna sekä niissä näkyvät yksityiskohtaiset tiedot kytkennöistä ja käskyistä.

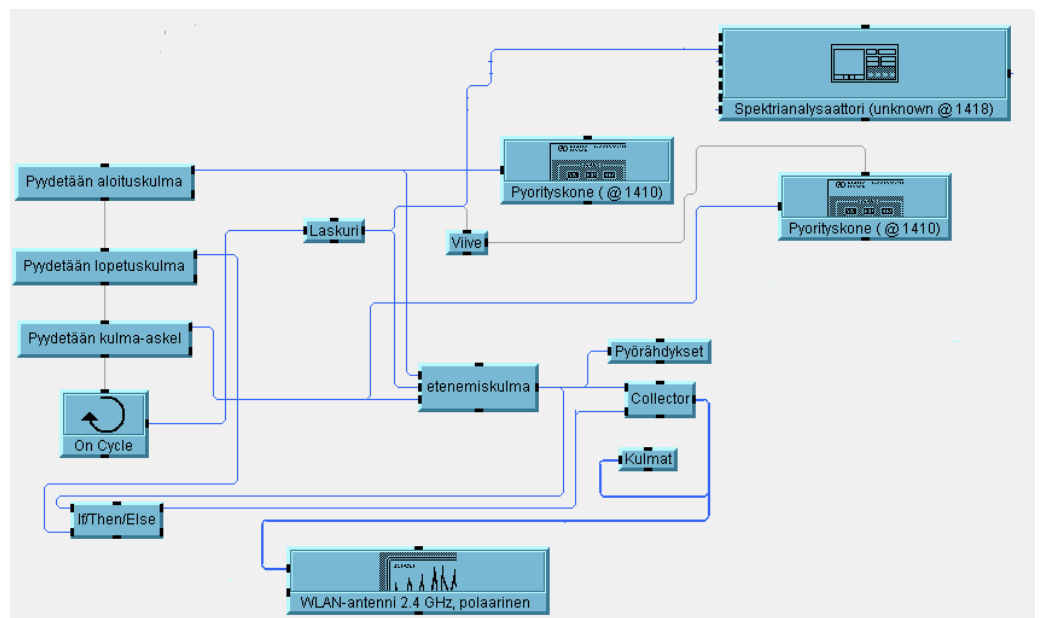


Kuva 28. Ohjauskäskyn kytkentä signaaligeneraattorille

Kun signaaligeneraattorin ja spektrianalysaattorin Input-kytkennät ovat valmiit, liitetään Output-kytkentä Polar Plot -piirturille. Tämän jälkeen ohjelmoidaan pyörityskoneelle käskyt aloitus- ja lopetuskulmasta, sekä kääntymiskulman suuruudesta Int32 Input -objekteilla. Käskyt saadaan toimimaan oikeassa järjestyksessä liittämällä ensimmäisenä halutun tehtäväobjektin sequence output seuraavaksi halutun tehtäväobjektin sequence

inputiin. Tässä samassa järjestyksessä ilmestyvät ponnausikkunat ohjelmaa suoritettaessa.

Pyörityskoneen (kuva 29) käskyt ajoitetaan valitsemalla Flow-valikon Repeat-valikosta On Cycle, jonka Sequence input liitetään Pyydetään kulma-askel -palkin Sequence outputiin. Alarm output liitetään laskurin kautta spektrianalysaattorin PEAK\_SEARS inputiin. Laskurin ja pyörityskoneen välille lisätään 1 sekunnin viive-objekti, jotta spektrianalysaattorin amplitudimarker ehtii siirtyä oikeaan mittauskohtaan ennen antennin seuraavaa kääntämistä. Etenemiskulmaobjekti kerää tiedot aloituskulmasta, pyörähdysten ja kulma-askelten määrästä sekä laskee niiden avulla, kuinka monta astetta antennin suunta on kääntynyt. Tätä tietoa verrataan ennakkoon määritetyn lopetuskulman suuruuteen, ja pyörityskone jatkaa antennin kääntämistä kunnes lopetuskulman suuruus saavutetaan. Tämä tieto etenemiskulmasta saadun tiedon kanssa ohjataan Collector-objektin kautta Alpha Numeric Kulmat -taulukkoon ja Polar Plot -piirturille. Etenemiskulma-objektin kautta saadaan tieto myös pyörähdysten määrästä Pyörähdykset-objektille. Yksityiskohtaiset kuvat ovat liitteessä 1. Kulmat-objekti taulukkoon tulostuu jokaisen mittauskohdan kulman suuruus asteina.

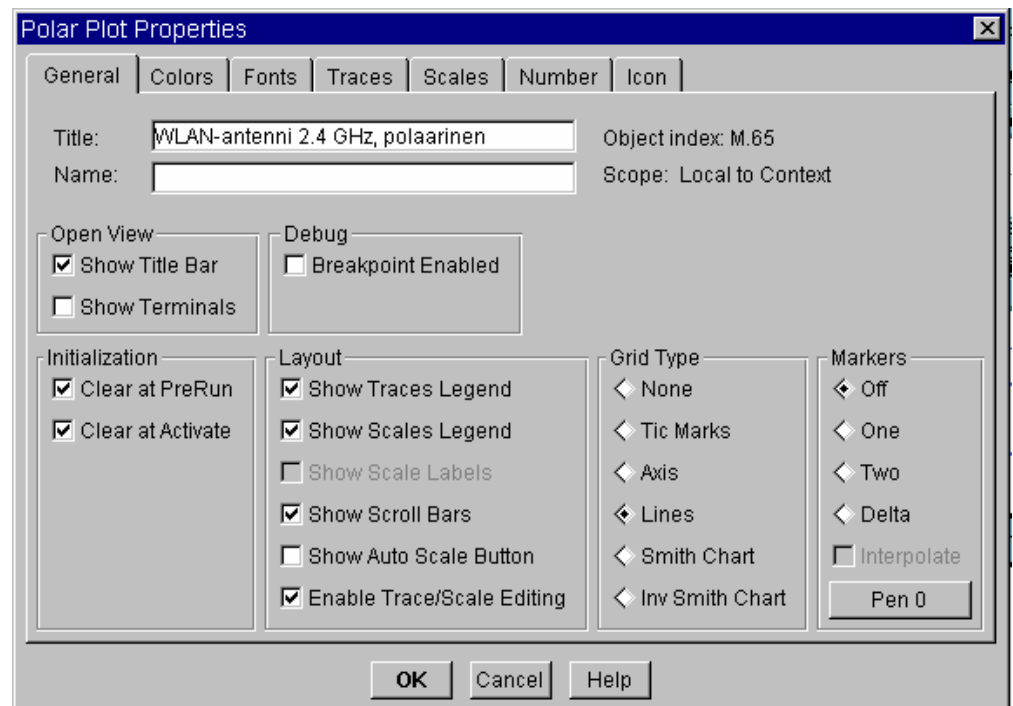


Kuva 29. Pyörityskoneen ohjaustoiminnot

Mittaustulosteita varten ohjelmoidaan spektrianalysaattorilta tiedot Polar Plot -piirturille, X vs Y Plot -koordinaatistopiirturille ja Alpha Numeric -taulukkoon, jotka saadaan esille Display-valikosta. Polar Plot on napa-

koordinaatiston graafinen piirturi, joka ohjelmoidaan esittämään mitattavan antennin säteilykuvio yksikköympyrässä. Piirturin ominaisuudet muutetaan napauttamalla kuvaketta hiiren oikeanpuoleisella painikkeella ja esille tulevasta valikosta avataan Properties-valikko. Siellä vaihdetaan otsikoksi WLAN-antenni 2.4 GHz, polaarinen. Grid Typestä valitaan Lines, jolloin kuvapohjaksi saadaan ympyräkoordinaatisto.

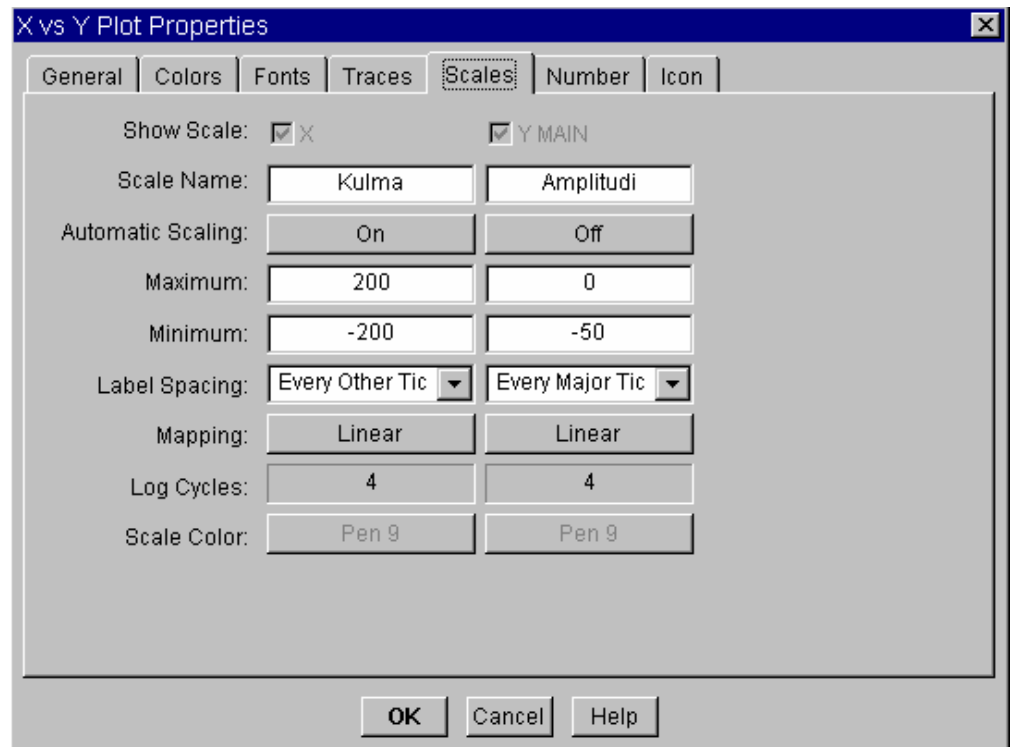
Kuvassa 30 näkyvät Polar Plot Propertiesin General -ikkunassa suoritettavat toimenpiteet.



Kuva 30. Polar Plot properties -ikkuna

X vs Y Plot on koordinaatistopiirturi, joka ohjelmoidaan esittämään mitattavan antennin säteilykuvio suorakulmaisessa koordinaatistossa. Piirturin ominaisuuksien muuttaminen tapahtuu samalla tavoin kuin Polar Plotissa. Scales-ikkunassa kirjoitetaan X:n Scales name -kohdalle Kulma ja Y:n kohdalle Amplitudi. Y-akselilla laitetaan automaattiskaalaus OFF-asentoon, minimiarvoksi asetetaan 0 ja maksimiarvoksi 50, jolloin Y-koordinaatisto pysyy koko ajan samana. X-akselilla pidetään automaattiskaalaus ON-asennossa, jolloin X-koordinaatiston arvot muuttuvat mittauksien mukaan.

X vs Y Plot Propertiesin Scales -ikkunassa suoritettavat toimenpiteet näkyvät kuvassa 31.

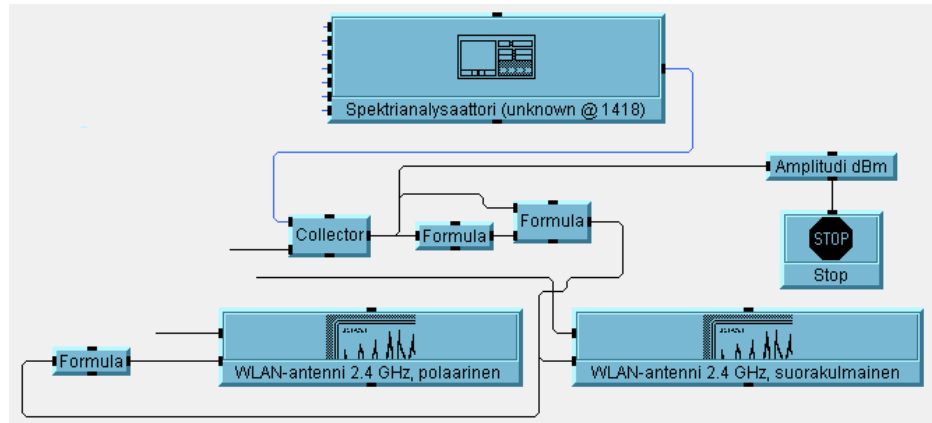


Kuva 31. X vs Y Properties Scales -ikkunan tiedot

Lopuksi ohjelmoidaan laitteet toimimaan oikeassa järjestyksessä ja tulostamaan mittaustulokset (kuva 32) taulukkoina ja kuvina. Spektrianalysaattorin ulostulosta ohjataan mitatut amplitudit Collector-objektille, jonne myös tulee kulmatiedot pyörityskoneelta. Collector-objektissa tiedot muutetaan taulukkomuotoon, jolloin ne voidaan esittää piirtureissa. Collector-objektilta liitetään yhteys AlphaNumeric-objektiin, johon tulostuu taulukko antennin tehosäteilyarvoista. AlphaNumeric-objektiin liitetään Flow-valikosta Stop-objekti, joka pysäyttää mittaustulosten kirjoittamisen Collector-objektin ohjeiden mukaan. Collector-objektin ja piirtureiden väliin liitetään vielä Formula-objektit, joissa suoritetaan X vs Y Plot -koordinaatistopiirturiin menevien tulosten amplitudien normalisoiminen eli suurimman desibeliarvon muuntaminen nolaksi ja muiden desibeliarvojen suhteuttaminen uuteen suurimpaan arvoon. Samat desibelimuunnosarvot ohjataan myös Polar Plot -piirturille toisen Formula-objektin kautta, jossa desibeliarvot muutetaan kentänvoimakkuusarvoiksi.

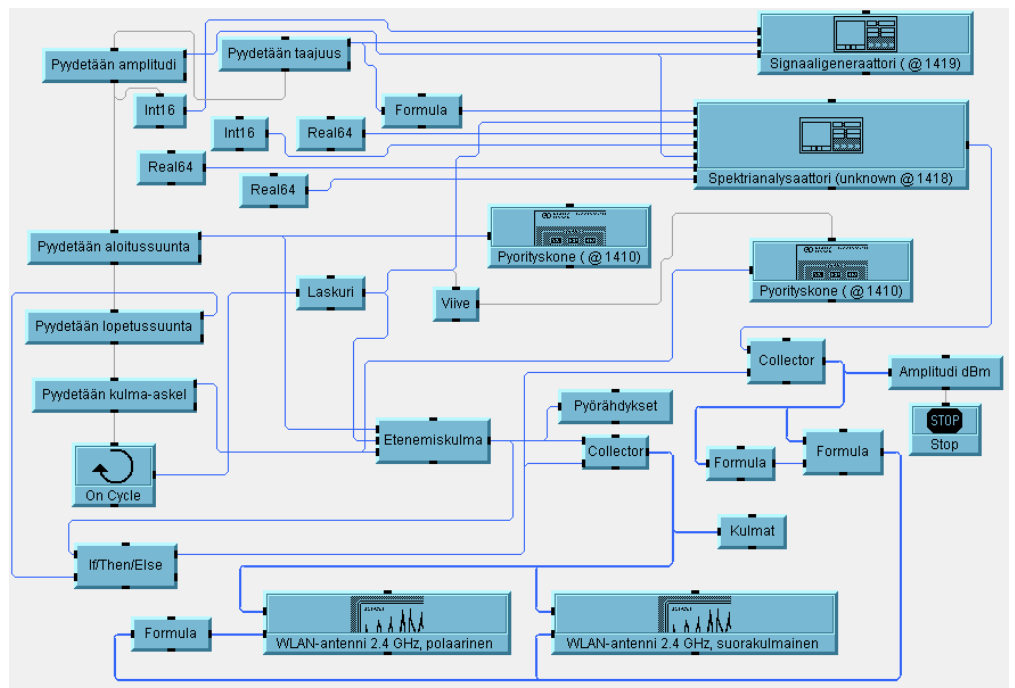


Kuvassa 32 spektrianalysaattorilta tulevat mittaustulokset muunnetaan Formula-objekteissa lopulliseen muotoon ennen piirtureille menoa.



Kuva 32. Mittaustulosten muuttaminen lopulliseen muotoon

Piirroskuvat mittaustuloksista tallennetaan pdf-muodossa, jolloin ne saadaan Adobe Acrobat-ohjelmalla tulostettua paperitulosteena tai voidaan tarvittaessa siirtää sähköisesti eteenpäin. Kuvassa 33 näkyy ohjelmoitu mittaussysteemi kokonaisuudessaan.



Kuva 33. Valmis kytkentäkaavio

## 8 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN

Laitekoonpanon toimivuus testataan ennen sen liittämistä tietokoneeseen. Signaaligeneraattorille laitetaan taajuuslukema ja spektrianalysaattori säädetään näyttämään amplitudin huippuarvoa. Antennin aloitussuunta nollataan kääntöpöydän ohjaimesta, jonka jälkeen tarkistetaan tulos spektrianalysaattorin näytöltä. Pyörityskoneen ohjaimesta käännetään antennin suuntaa ja samalla seurataan spektrianalysaattorin näytön muutoksia. Sama toimenpide toistetaan kääntämällä antennia toiseen suuntaan. Tämän jälkeen laitekoonpano liitetään tietokoneeseen GPIB-väylän kautta ja käynnistetään tietokone ja avataan Agilent VEE -ohjelma.

Kuvassa 34 antennit ja laitekoonpano on kytketty tietokoneeseen, jossa Agilent VEE -ohjelma on jo käynnistetty.



*Kuva 34. Testaustilanteen laitteistokoonpano*

Mittausjärjestelmän toimivuus testataan jokaisen ohjelma-osan liittämisen jälkeen, sillä näin toimimalla havaitaan virheet ja ongelmakohdat välittömästi, eikä virheen löytämiseksi tarvitse käydä koko ohjelmaa läpi. Vaikka tiedetäänkin, missä ohjelma-osassa virhe sijaitsee, on sen löytäminen siitä huolimatta monesti työlästä, koska virhe voi aiheutua vain yhdestä merkistä tai sen puuttumisesta. Virhe voi estää jonkin laitteen toiminnan kokonaan, tai laite voi toimia joko osittain tai täysin väärin.

Testaamisen aikana seurataan myös signaaligeneraattorin, spektrianalysaattorin ja pyörityskoneen näytöiltä saatavia tietoja ja verrataan niitä oh-

jelman antamiin tuloksiin. Tällä toimenpiteellä varmistetaan vielä ohjelman antamien mittaustulosten oikeellisuus.

Mittausjärjestelmän jatkuvalla ja säännöllisellä testaamisella ohjelmointityön edetessä varmistetaan ohjelman luotettavuus ja virheetön toiminta, mutta mittaustuloksiin vaikuttavat vielä ympäristön aiheuttamat heijastukset ja häiriöt. Niiden eliminoimiseksi laitteisto siirretään heijastuksettomaan tilaan.

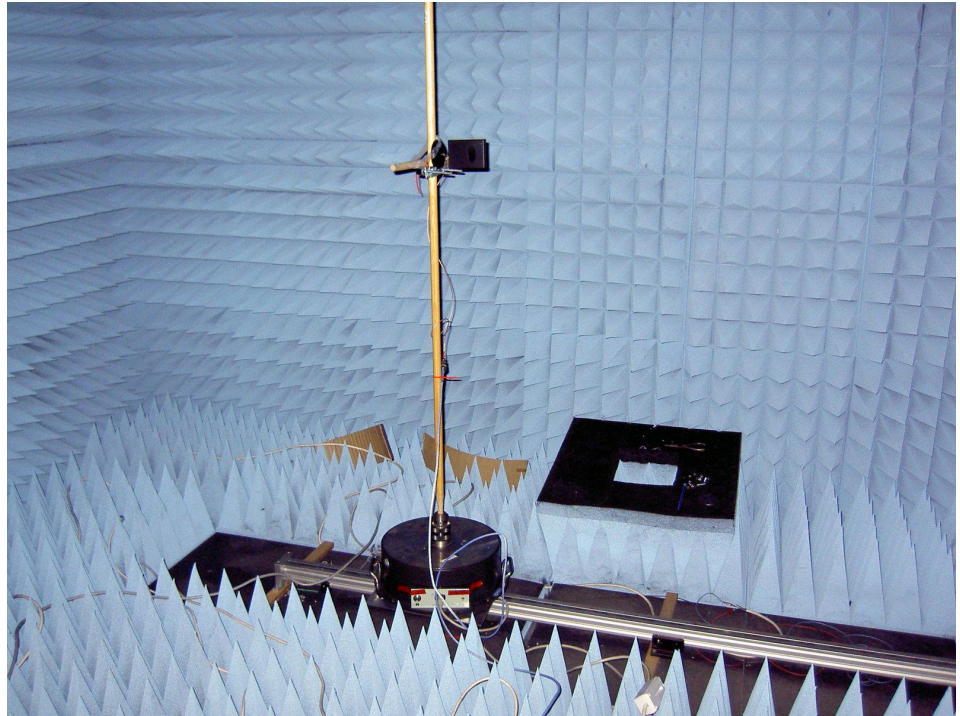
Mittausjärjestelmän toimivuuden varmistamiseksi ja luotettavien tulosten saamiseksi lopulliset testaukset tehdään heijastuksettomassa tilassa. Pyörityskone ja antennit sijoitetaan heijastuksettomaan tilaan. Signaaligeneraattori, spektrianalysointilaite ja tietokone asennetaan tilan ulkopuolelle.

Kuvassa 35 on heijastuksettomaan huoneeseen sijoitettu lähetysantenni. Siinä näkyvät myös tutkittavalle antennille, pyörityskoneelle ja tilan ulkopuolella oleviin laitteisiin menevät johdot.



*Kuva 35. Lähetysantenni heijastuksettomassa tilassa*

Kuvassa 36 on tutkittava antenni asennettuna pyörityskoneeseen heijastuksettomassa huoneessa. Pyörityskoneen takana olevat esineet eivät kuulu mittausjärjestelmään.



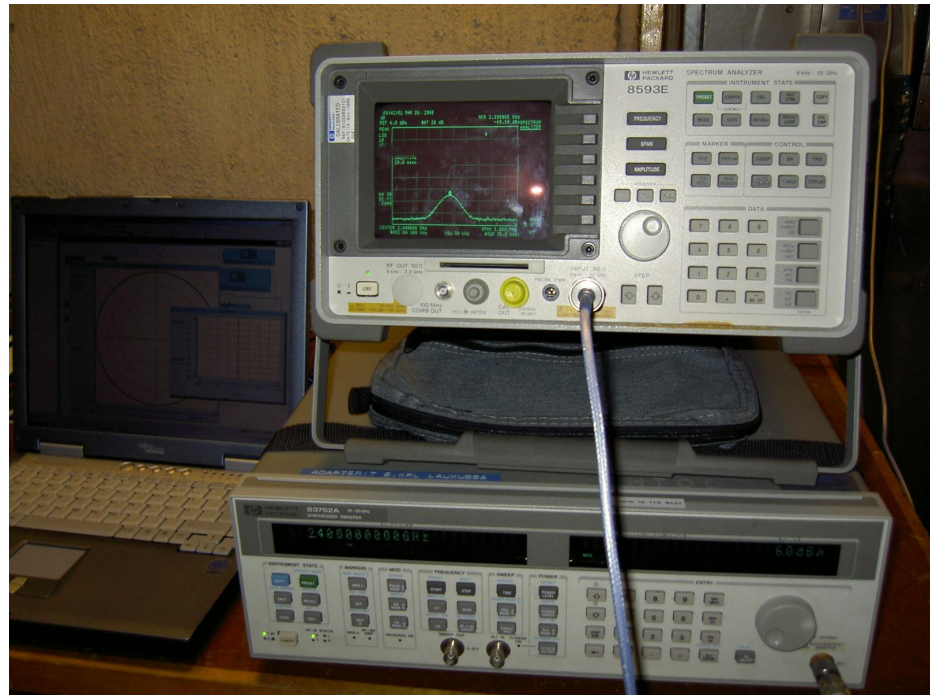
*Kuva 36. Tutkittava antenni heijastuksettomassa tilassa*

Kuvassa 37 on 2,4 GHz:n WLAN-antenni, jota käytetään heijastuksettomassa huoneessa suoritettavissa mittauksissa lähetys- ja vastaanottoantennina.



*Kuva 37. 2.4 GHz:n WLAN-antenni*

Kuvassa 38 on mittausjärjestelmän lopullisessa testauksessa käytettävä HP 83752A -signaaligeneraattori ja HP 8593E -spektrianalysaattori. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy hiukan myös kannettava Fujitsu Siemens Lifebook -tietokonetta.

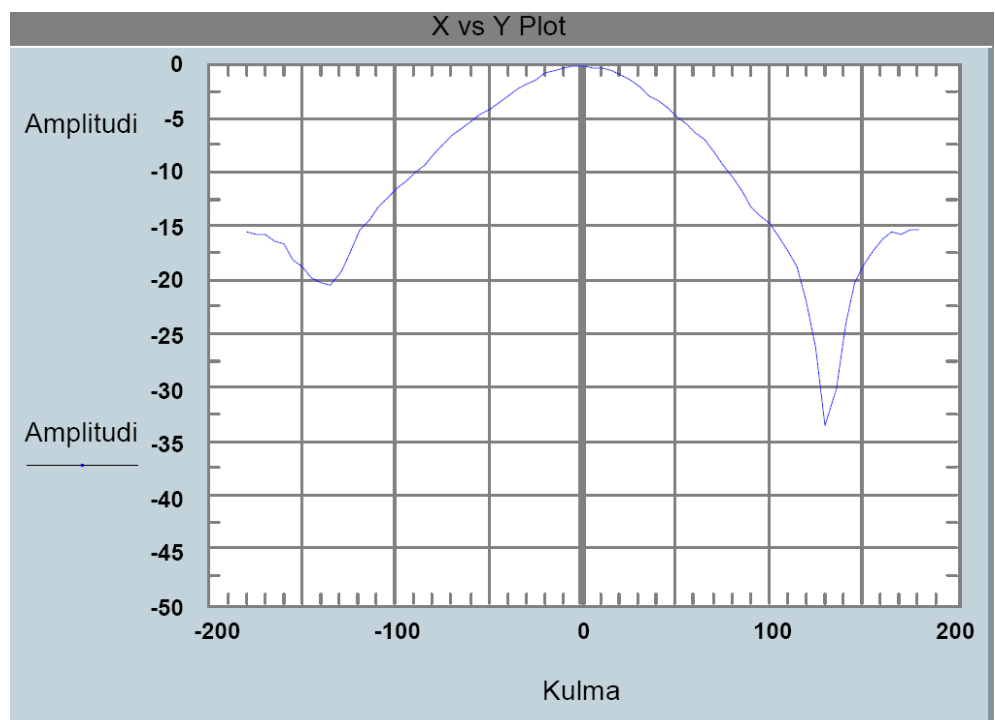


*Kuva 38. Heijastuksettoman tilan ulkopuolella olevat laitteet*

## 9 TULOKSET

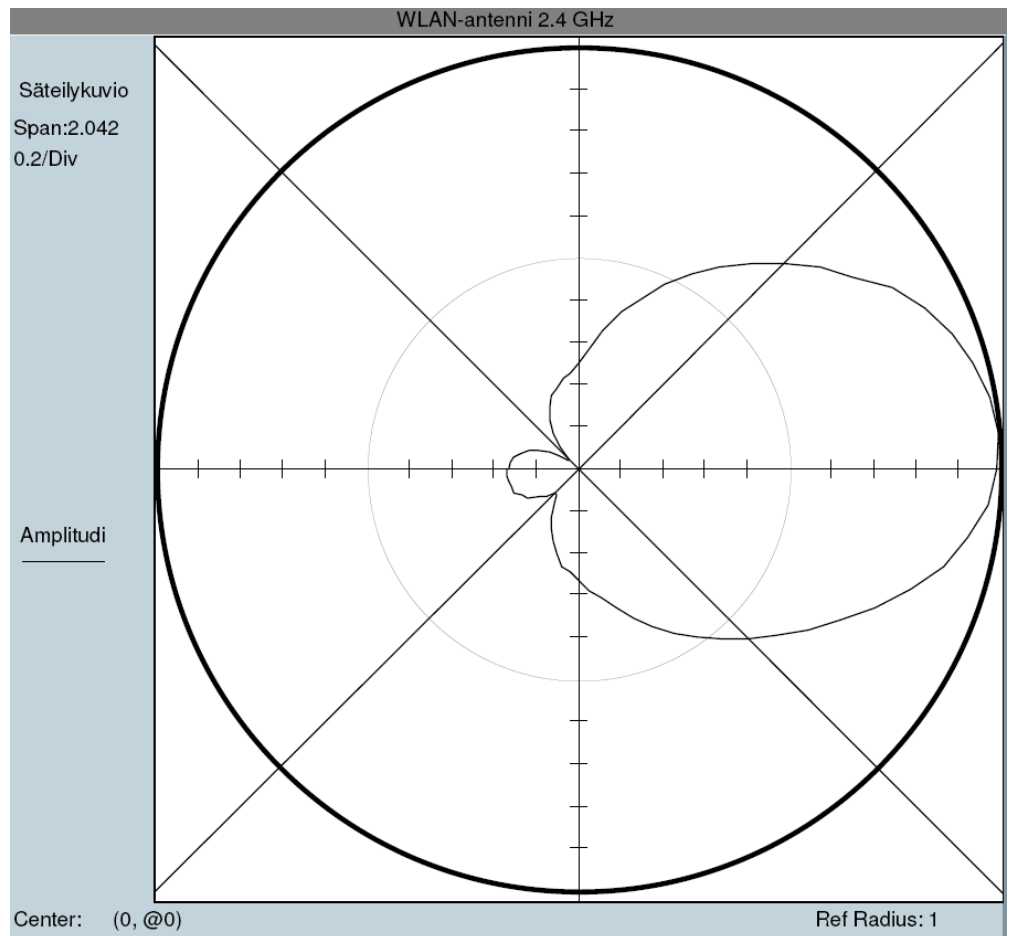
Mittausjärjestelmän avulla suoritettiin 2,4 GHz:n WLAN-antennin suunta-kuvion mittaukset. Tulokset saatiin suoraan Adobe Acrobat -ohjelman avulla pdf-muodossa. Työssä ei tutkittu antennien ominaisuuksia vaan järjestelmän mittausominaisuuksia, luotettavuutta ja tulosten esitystapaa. Testauksessa järjestelmä toimi paremmin kuin osattiin odottaa. Ennen työn aloittamista ei ollut ollenkaan varmaa, saadaanko pyörityskone toimimaan ohjelmassa, koska ohjelman ajurihakemistossa ei ollut ajureita pyörityskoneelle. Järjestelmä toimi luotettavasti, sillä siihen syötetyillä ohjauksikäskyillä saatiin tulokseksi halutut toiminnot oikeassa muodossa.

X vs Y Plot -koordinaatistopiirturille tuleva säteilykuvio on selkeä ja vastaa Polar Plot -piirturille saatua kuviota. Kuvassa 39 on mitatun WLAN-antennin säteilykuvio suorakulmaisessa koordinaatistossa.



Kuva 39. X vs Y Plot -koordinaatistopiirturin säteilykuvio

Polar Plot -piirturin säteilykuvio on myös selkeä, mutta piirroksen yksikköympyrässä pitäisi olla piirrettynä useampia ympyröitä, joiden arvot olisivat voineet myös olla merkittynä. Kuvassa 40 näkyy hyvin WLAN-antennin säteilykuvio, mutta kuvio olisi helpompilukuinen, jos kuvaan olisi saanut lisää ympyröitä ja niille lukemat. Kuvan oikeassa alakulmassa on merkitty ympyrän säteen pituudeksi 1.



Kuva 40. Polar Plot -piirturin säteilykuvio

Antenni on aikaisemmin mitattu perinteisin menetelmin ja mittaustulokset ovat osoittaneet antennilla olevan ristipolarisaatiota. Tämä tulee esille myös mittausjärjestelmällä tehdyissä mittauksissa. Kuvat ristipolarisaatiosta ovat liitteessä 4.

## 10 YHTEENVETO

Insinööriyössä kehitettiin tietokoneohjattu antennimittausjärjestelmä, jonka avulla voidaan mitata ja tulostaa antennin säteilykuviota ja joka soveltuu käytettäväksi radiotekniikan laboratoriossa suoritettaviin antennimittauksiin. Kehitetty mittausjärjestelmä nopeuttaa ja helpottaa mittaustapahtumaa ja saatujen mittaustulosten käsittelyä. Tulokset saadaan nyt valmiiksi taulukoituna ja graafisina esityksinä ja niiden tulostaminen, kopioiminen sekä lähettäminen sähköisesti tapahtuvat järjestelmään liitettyjen ohjelmien avulla helposti.

Mittaustuloksia olisi ollut mielenkiintoista verrata aikaisempiin tuloksiin ja tutkia niiden mahdollisia eroavaisuuksia ja selvittää syitä niihin. Koska vanhoja tuloksia ei ollut saatavilla, ei vertailu ollut mahdollista. Syitä mittaustulosten eroihin voisivat olla inhimillisistä tekijöistä johtuvat syyt, kuten mittaustulosten lukeminen väärin spektrianalysaattorin näytöltä, niiden kirjaaminen virheellisesti muistiinpanoihin ja virheet jatkokäsittelyssä.

Mittausjärjestelmässä käytetty Agilent VEE -ohjelmaversio on vanha, ja siinä olevat graafiset esitysmahdollisuudet ovat aika suppeat. Samoin tulosten esittämiseen käytetty Adobe Acrobat -ohjelmaversio on vanha, mutta päivittämällä molemmat ohjelmat uudemmiksi saadaan tulosteet esitetyä monipuolisempina.

Antennimittausjärjestelmä saadaan kehitettyä vielä käyttäjäystävällisemmäksi lisäämällä ohjelman alkuun pyörityskoneen käyttöön liittyviä aloitusohjeita. Ennen mittauksen aloitusta pitää pyörityskoneen kääntymiskulman arvo säätää käsin säätöyksiköstä 0-asentoon. Sen lisäksi säätöyksikön muisti pitää tyhjentää. Kun nämä ohjeet tulevat ponnahdusikkunoihin ennen varsinaista mittausta, varmistetaan se, että jokainen mittauksen suorittaja muistaa ne myös tehdä, ja välttää näin mittausrvirheet.

Mittausjärjestelmää voidaan edelleen kehittää lisäämällä siihen Microsoft Excel -ohjelma, jonne mittaustulokset saadaan taulukoituna. Siellä tuloksista on mahdollista tehdä erilaisia graafisia esityksiä. Samoin voidaan lisätä myös Microsoft Word -ohjelma, jonne voidaan kopioida valmiit kuvat ja taulukot.



Opinnäytetyötä tehtäessä on radio- ja antennitekniikan teoriaosuuden selvittämisen myötä täsmentynyt, selkeytynyt ja myös jonkin verran syventynyt kokonaiskuva antennien ominaisuuksista ja niiden vaikutuksista antennien suunnittelussa ja kehittämisessä. Saatavilla olevien antennimittausjärjestelmien tutkiminen lisäsi tietämystä mittausjärjestelmien monipuolisuudesta, siitä, miten yhdellä ohjelmalla saadaan mitattua antennin eri ominaisuuksia ja siitä, miten tuloksia pystytään esittämään monipuolisesti 3D- ja videoformaattina.

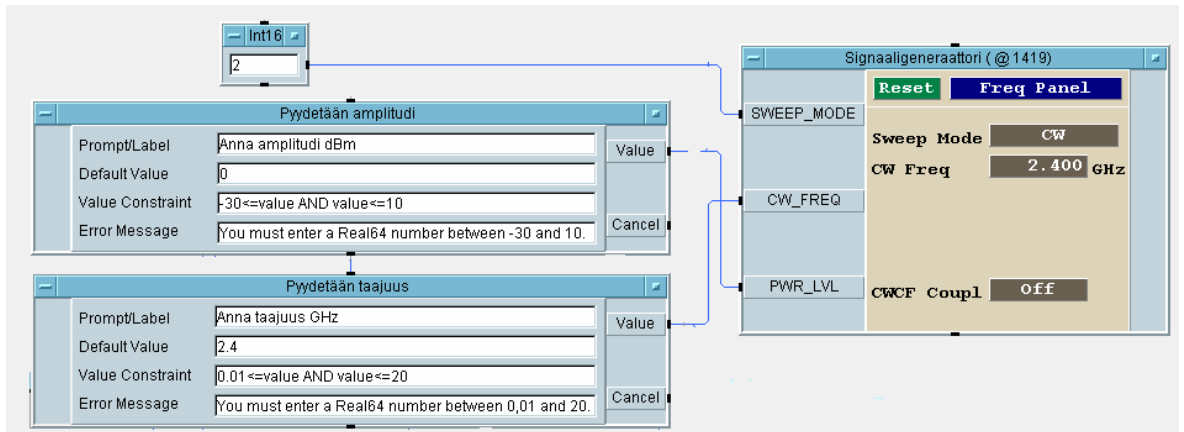
## VIITELUETTELO

- [1] Hyvä tietää säteilystä, Energiateollisuus ry. [Verkkodokumentti]. 2007 [viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/julkaisut/hyvatietaa-sarja/hyvatietaaasateilysta.pdf>
- [2] Eklöf, Kalevi - Markku, Arto - Railo, Kaarlo, I - Vehmasvuori, Jukka. *Radiotekniikan perusteet*. Vantaa: Opetushallitus. 2001.
- [3] [Jukka "Yucca" Korpelan](#) avoimeen tietosivustoon *[Datateknikka ja viestintä](#)*, Sähkömagneettinen spektri, [Verkkodokumentti]. 27.10.2006 [viitattu 19.3.2008]. Saatavissa: <http://www.cs.tut.fi/~jkorpela/smag.html>
- [4] Lehto, Arto, *Radioaaltojen maailma*. Helsinki: Otatieto. 2006.
- [5] Koivumäki, Antti, Antennien perusasioita. Opetusmoniste. Helsingin ammattikorkeakoulu. 2007.
- [6] Räsänen, Antti - Lehto, Arto, *Radiotekniikan perusteet*. 11. painos. Helsinki: Otatieto. 2003.
- [7] SMG 5450 Antennit ja ohjatut aallot, [Verkkodokumentti]. 9.2.2006 [viitattu 25.3.2008]. Saatavissa: [http://www.google.fi/search?sourceid=navclient&ie=UTF-8&rlz=1T4SUNA\\_enF1249F1250&q=SMG+5450+Antennit+ja+ohjatut+aallot](http://www.google.fi/search?sourceid=navclient&ie=UTF-8&rlz=1T4SUNA_enF1249F1250&q=SMG+5450+Antennit+ja+ohjatut+aallot)
- [8] Räsänen, Antti - Lehto, Arto, *Radiotekniikka*. 6. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 1996.
- [9] Antenniteoriaa, [Verkkodokumentti]. [viitattu 25.3.2008]. Saatavissa: <http://www.tp.spt.fi/~salabra/er/tele/antenni.doc>
- [10] Liitteet, Stuk, Sähkömagneettiset kentät, [Verkkodokumentti]. [viitattu 25.3.2008]. Saatavissa: [http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/kirjasarja/fi\\_FI/kirjasarja6/\\_print/](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja6/_print/)
- [11] Ti5312600, Siirtyvä tietoliikenne, Luento 2, Radiotekniikan perusteet: Signaalit ja antennit, [Verkkodokumentti] [viitattu 25.3.2008]. Saatavissa: <http://www.it.lut.fi/kurssit/06-07/Ti5312600/luentokalvot/luento02.pdf>
- [12] Marshall, Trevor, Antennas enhance WLA security, [Verkkodokumentti]. 1.10.2001 [viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: [http://www.trevormarshall.com/byte\\_articles/byte1.htm](http://www.trevormarshall.com/byte_articles/byte1.htm)
- [13] Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkömagneettinen säteily ja antennit, [Verkkodokumentti]. [viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: [www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2720300/5\\_sahkomagneettinen\\_sateily\\_ja\\_antennit.pdf](http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2720300/5_sahkomagneettinen_sateily_ja_antennit.pdf)
- [14] Lahti, Saku, Antennisuunnittelun perusteet, [Verkkodokumentti]. [viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: [http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-2250/luentomateriaali/luento\\_7-8\\_antennit\\_Lahti.pdf](http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-2250/luentomateriaali/luento_7-8_antennit_Lahti.pdf)

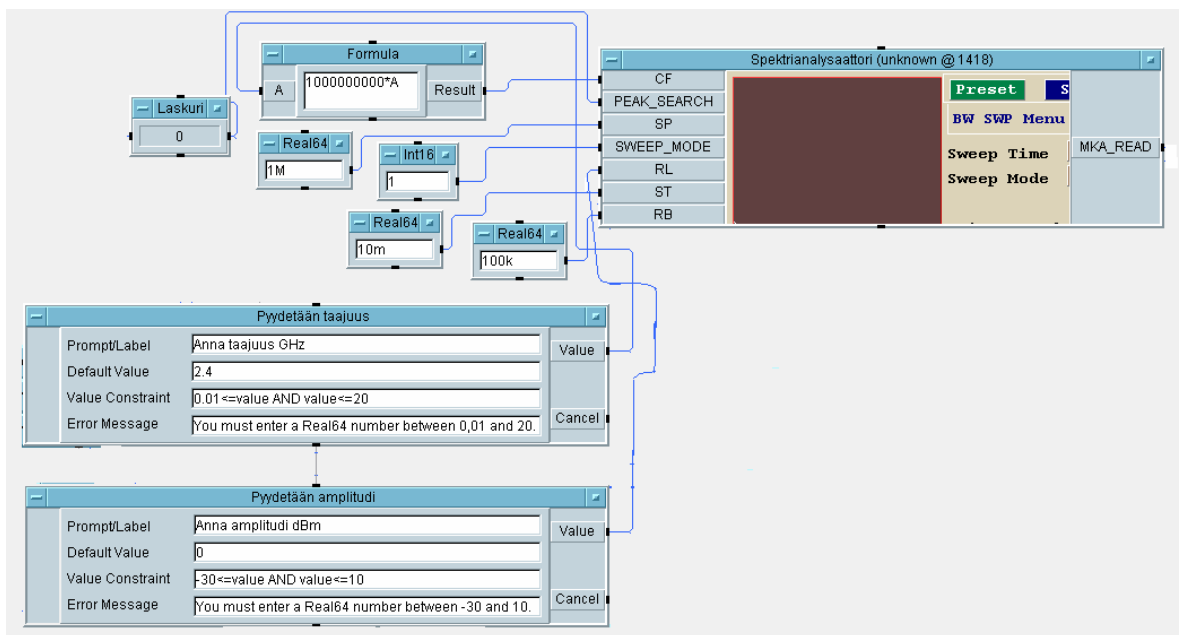
- [15] @450 Langaton laajakaista, Antenniopas, Digita Oy, [Verkkodokumentti]. [viitattu 27.3.2008]. Saatavissa: <http://www.450laajakaista.fi/9021/oppaat/9135>
- [16] Pientalon antenniopas, Digita Oy, [Verkkodokumentti]. [viitattu 27.3.2008]. Saatavissa: <http://www.digitv.fi/binary.asp?path=1;2997;8218;7637;7955>
- [17] Antennitaulukko, [Verkkodokumentti]. 10.2003 [viitattu 27.3.2008]. Saatavissa: <http://oh3tr.ele.tut.fi/suomi/kurssi/antennitaulu.html>
- [18] Radiovastaanotintekniikka, I. Yrjölä, [Verkkodokumentti]. 5.4.2006 [viitattu 27.3.2008]. Saatavissa: <http://www.ursa.fi/ursa/jaostot/radio/Radiotekniikka.html>
- [19] R. A. Mayers Company Inc. Home page, [Verkkodokumentti]. 27.3.2008 [viitattu 27.3.2008]. Saatavissa: [http://www.ramayas.com/Horn\\_Antennas.htm](http://www.ramayas.com/Horn_Antennas.htm)
- [20] Helsingin yliopisto, tähtitieteenlaitos, tähtitieteen kurssi, luentomoniste, RA\_LUENTO2, [Verkkodokumentti]. 2005 [viitattu 28.3.2008]. Saatavissa: [http://www2.astro.helsinki.fi/opetus/kurssit/httpk2/2005/RA\\_LUENTO2.pdf](http://www2.astro.helsinki.fi/opetus/kurssit/httpk2/2005/RA_LUENTO2.pdf)
- [21] Multicap. Home page, [Verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 28.3.2008]. Saatavissa: <http://www.multicap.be/antennas-accessories/special-antennas/helix-antenna>
- [22] Lindell, Ismo - Nikoskinen, Keijo, *Antenniteoria*. 4. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 1997.
- [23] Räisänen, Antti - Lehto, Arto, *Mikroaaltomittaustekniikka*. 3. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 1995.
- [24] Räisänen, Antti - Lehto, Arto, *Millimetriaaltotekniikka*. 1. painos. Helsinki: Yleisjäljennös. 1997.
- [25] Geozondas. Home page, [Verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.geozondas.com/>
- [26] Diamond Engineering. Home page, [Verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.diamondeng.net/>
- [27] ETS-Lindgren, An ESCO Technologies Company. Home page, [Verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.ets-lindgren.com/page/?i=AMS-8050>
- [28] Antcom Corporation, Home page, [Verkkodokumentti]. 30.4.2001 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.coteau-vert.co.jp/PDF/ANTCOM-NFH-panf.pdf>
- [29] MI Technologies, Home page, [Verkkodokumentti]. 2007 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.mi-technologies.com/>
- [30] Nearfield Systems Inc., Home page, [Verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.nearfield.com/>

- [31] ORBIT/FR, Home page, [Verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 1.4.2008]. Saatavissa: <http://www.orbitfr.com/index.asp?ItemID=324>
- [32] Mittalaiteväylät, [Verkkodokumentti]. [viitattu 2.4.2008]. Saatavissa: [http://opetus.stadia.fi/uusitalo/Sahkoturvallisuus\\_ ja\\_Mittaustekniikan\\_perusteet/mittalaitevaylat.pdf](http://opetus.stadia.fi/uusitalo/Sahkoturvallisuus_ ja_Mittaustekniikan_perusteet/mittalaitevaylat.pdf)

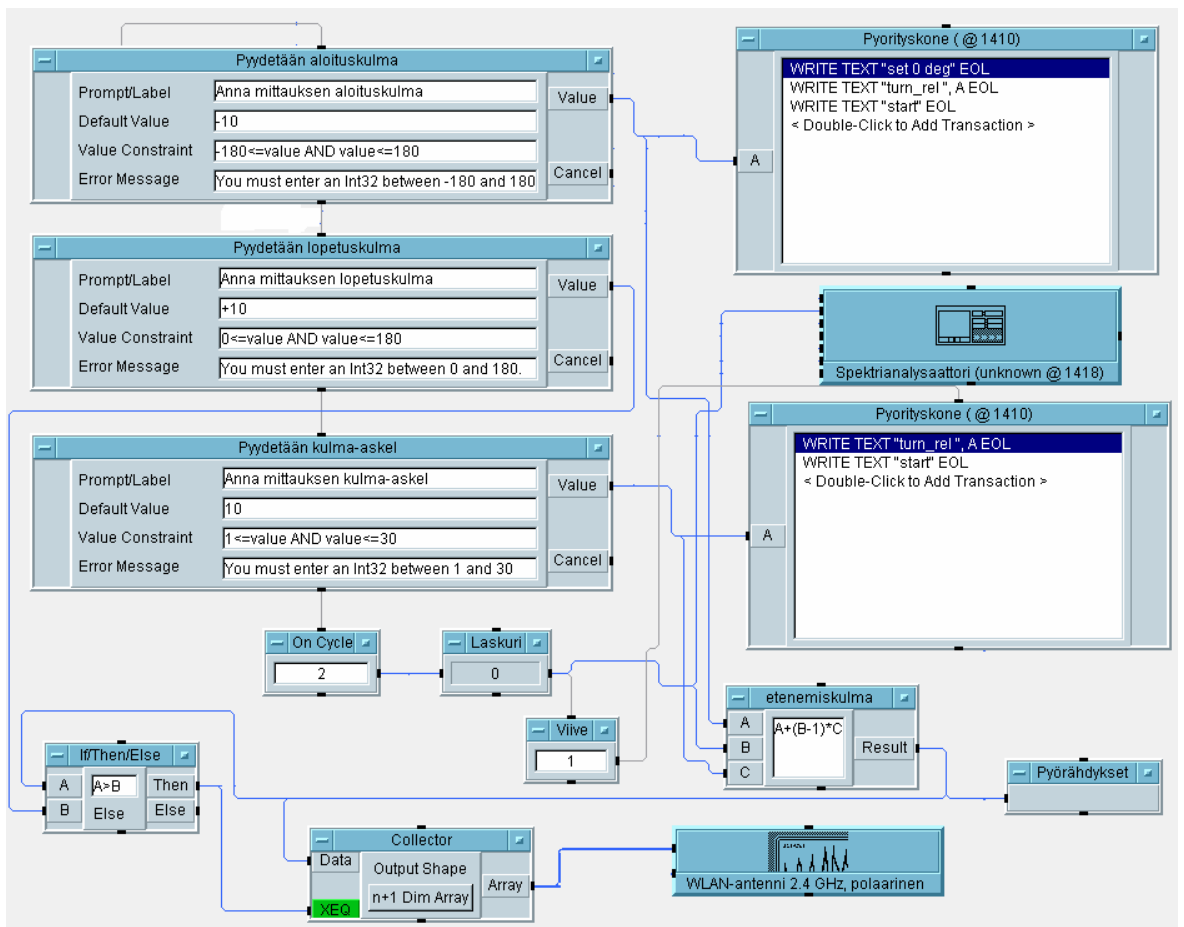
OHJAUSKÄSKYT JA KYTKENNÄT



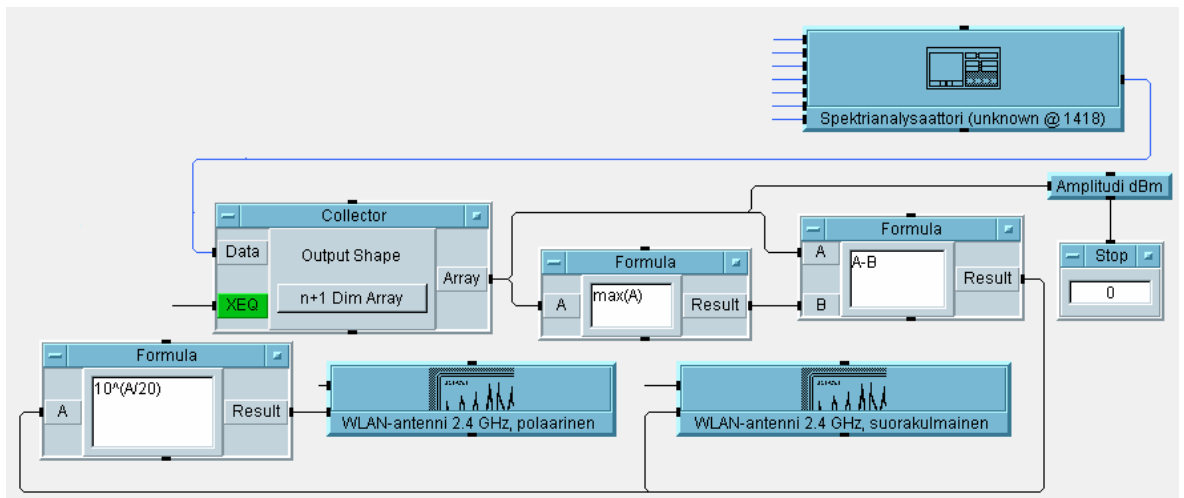
Signaaligeneraattorin ohjaukset ja kytkennät



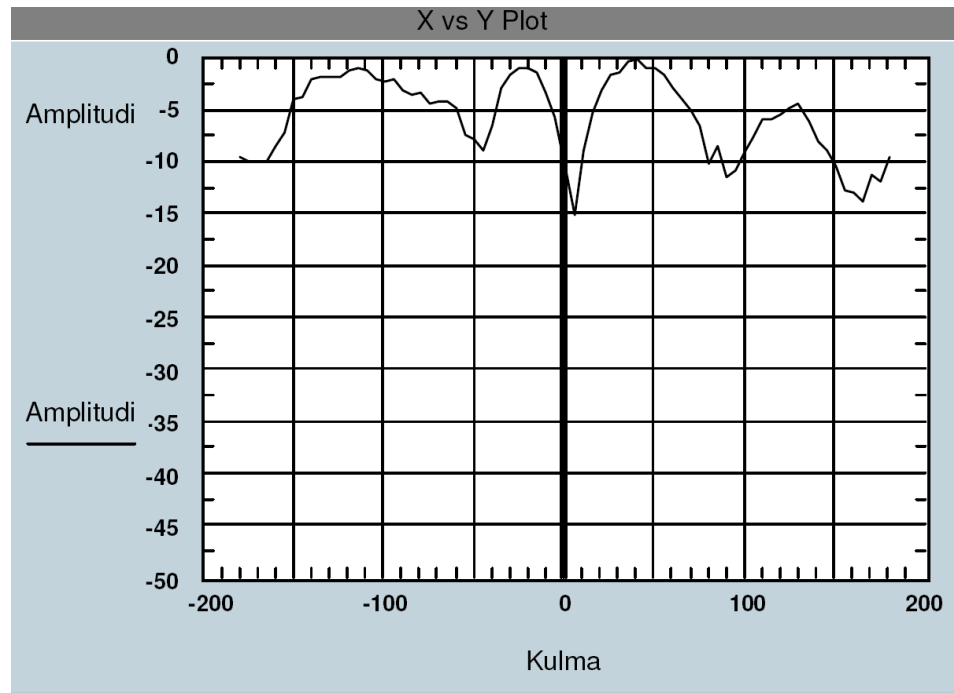
Spektrianalysointilaite ohjaukset ja kytkennät



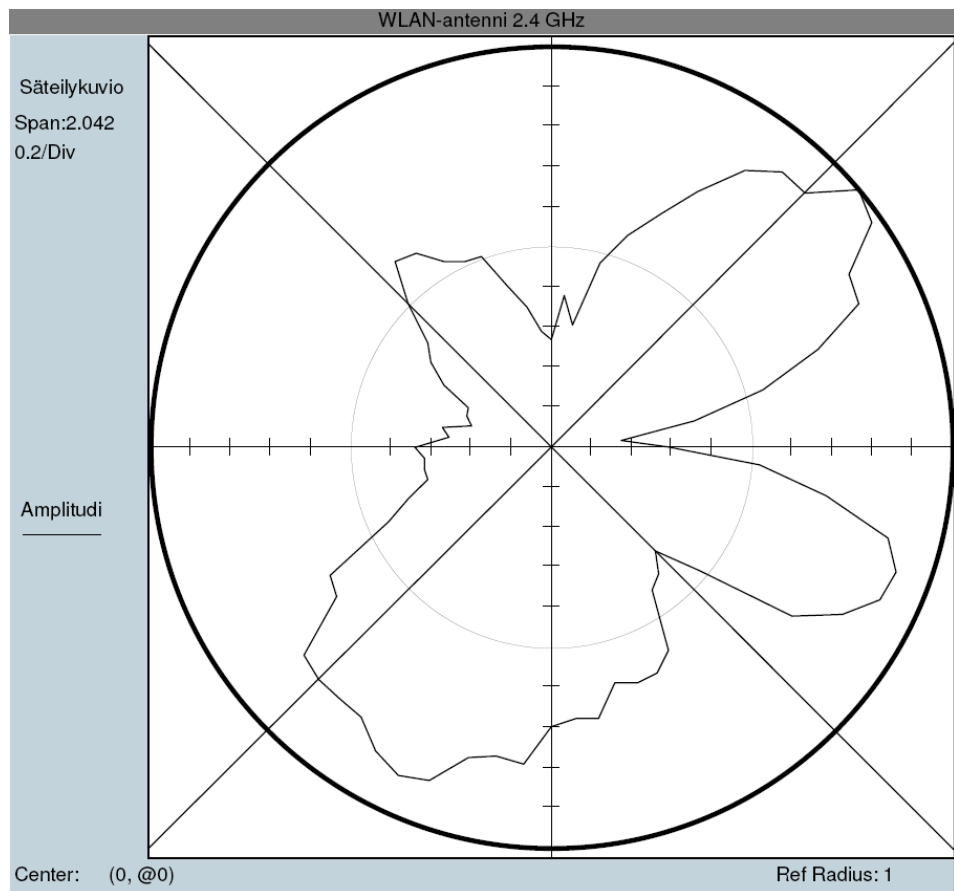
Pyörityskoneen ohjaukset ja kytkennät



*Mittaustulosten muunnoskäskyt*



*X vs Y Plot -koordinaatistopiirturin kuva antennin ristipolarisaatiosta*



*Polar Plot piirturin kuva antennin ristipolarisaatiosta*







