

Alexandr Kovrigin

VLf- ja ELF-aaltojen mittaaminen ja käyttökohteet

Tekijä(t) Otsikko	Alexandr Kovrigin VLF- ja ELF-aaltojen mittaaminen ja käyttökohteet
Sivumäärä Aika	36 sivua 2.11.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikennetekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Antti Koivumäki Lehtori Jussi Alhorinne
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Tässä insinöörityössä tutkitaan ELF- ja VLF-aaltojen ominaisuuksia ja niiden tärkeyttä tiedonsiirrossa, perehdytään myös ELF- ja VLF-aaltojen erilaisiin käyttökohteisiin. Työssä tehdään katsaus ELF- ja VLF-aaltojen mittalaitteisiin ja niiden toimintaan. Lisäksi rakennetaan oma ELF- ja VLF-mittausjärjestelmä.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä radioaaltojen ja antennien ominaisuuksiin sekä antennien ominaisuuksiin. Näiden lisäksi kartoitettiin markkinoilla olevia valmiita mittausjärjestelmiä.</p> <p>Mittauksien aikaansaamiseen tarvittavat osat olivat antenni, vahvistin ja tietokone. Ensin perehdyttiin antennin rakenteeseen ja toimintaan. Seuraavaksi luotiin katsaus vahvistimen rakenteeseen ja toimintaan. Mittaukset saadaan ulos vahvistinpiiristä tietokoneen äänikortin kautta Spectrum Laboratoryn-ohjelmistoon analysoitavaksi. Lopuksi analysoitiin ohjelmiston tulosten havaitsemisen ja tiedonkeruun monipuolisia ominaisuuksia. Vahvistinpiirin ansiosta saadaan havaittua matalia taajuuksia välillä 0,1 Hz- 500 kHz.</p> <p>Työn tuloksena syntyi tehokas ELF- ja VLF-mittaus- ja analysointijärjestelmä.</p>	
Avainsanat	ELF, VLF, magnetometri, ferriittisydän-antenni

Author(s) Title	Alexandr Kovrigin VLF- and ELF-waves measurement and implementation
Number of Pages Date	36 pages 2.11.2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Computer Science
Specialisation option	Telecommunications
Instructor(s)	Supervising instructor Antti Koivumäki Instructor Jussi Alhorinne
<p>This graduate study was done to Metropolia University of Applied Sciences. This thesis deals with ELF-wave properties and their role in information transfer, and weather predictions, also discusses possible applications of ELF-waves. This work covers several ELF wave measurement instruments and their functionality, finally building a working ELF-receiver.</p> <p>An introduction of radio wave principles and antennae design is at the beginning of this thesis. In addition a review of existing elf-measurement devices is offered for the reader.</p> <p>This followed by the principle of ELF-reception and structure of ELF-amplifier, structure and design of a specific ELF-antenna used in the experiment. Antenna with amplifier connects directly to a computer. Spectrum Laboratory software is used in the experiment and is described subsequently. Due to the powerful amplifier circuit it is possible to identify frequencies as low as 0.1 Hz-500 Khz.</p> <p>The result of this work was a powerful ELF-analyzer device, which is suitable for ELF-wave measurement analysis and logging directly on a PC.</p>	
Keywords	ELF, VLF, magnetometer, ferrite-rod antenna

Sisälllys

1	JOHDANTO	1
2	RADIOTEKNIIKAN TEORIAA	1
2.1	Radioaaltojen ominaisuuksia	2
2.2	Aallonpituus	2
2.3	Radioaaltojen taajuusalueet	3
2.3.1	RF-aallot	4
2.3.2	Mikroaallot	5
2.3.3	Millimetriaallot	6
3	ELF:N JA VLF:N KÄYTTÖKOHTEET	6
3.1	Tieteellinen tausta	6
3.2	ELF-teleyhteydet vaikeita olosuhteita varten	7
3.2.1	Sukellusveneteknologiasta	7
3.2.2	Erilaisia viestintäkeinoja	7
3.3	Radioaaltojen eteneminen	8
4	ANTENNIT	10
4.1	Antennien sähköiset ominaisuudet	10
4.1.1	Säteilykuvio eli suuntakuvio	11
4.1.2	Vahvistus	12
4.1.3	Suuntaavuus	13
4.1.4	Polarisaatio ja ristipolarisaatio	14
4.1.5	Impedanssi ja kaistanleveys	15
4.2	Antennityypit	15
4.3	ELF- ja VLF-antennit	16
4.3.1	Kehäantenni	16
4.3.2	Magnetometri-antenni	17
4.3.3	Ferriitisydän-antenni	19
5	ANTENNIEN MITTAAMINEN	20
5.1	Mittauspaikat	21
5.1.1	Vapaantilan mittauspaikka	21
5.1.2	Maaheijastusmittauspaikka	22

5.1.3	Heijastukseton huone	22
5.1.4	Kompakti mittauspaikka	23
5.1.5	Lähikenttämittauspaikka	23
5.2	Säteilykuvion mittaus	23
5.3	Vahvistuksen mittaus	24
5.4	Polarisaation ja impedanssin mittaus	24
6	ELF- JA VLF-MITTAUKSET	25
6.1	Systeemin piirteet	25
6.2	Spectrum Laboratoryn-työkalu	25
6.2.1	Vahvistimen rakentaminen EagleCad-työkalulla	27
6.2.2	ELF-vastaanotin-vahvistin	29
6.2.3	Vastaanottimen ominaisuudet	32
6.2.4	Tulosten testaus	33
6.2.5	Yhteenveto tuloksista	34
	Lähteet	38

Lyhenteet

ITU (International Telecommunication Union) – insituutio joka valvoo tietoliikenne standardit.

LF (Low Frequency) – matala taajuus.

VLf (Very Low Frequency) –hyvin matala taajuus.

ELF (Extremely Low Frequency) – erittäin matala taajuus.

1 JOHDANTO

Radiotekniikan laboratoriossa suoritetaan VLF- ja ELF-taajuuksien mittaukset käyttäen erilaisia mittauslaitteita. Mittausten tavoitteena oli saada mitattua ELF- ja VLF- taajuuksia. Mittaukset tehtiin ja analysoitiin samanaikaisesti suoraan tietokoneella.

Tämän työn tavoitteena oli kehittää tarkka mittalaite ELF- ja VLF-signaalien havaitsemiseen.

Työn alussa selostetaan radioaaltojen ominaisuuksia, selvitetään niiden taajuusalueet käyttötarkoituksen mukaan ja kerrotaan antennien sähköisistä ominaisuuksista. Työssä käydään läpi yleisimmät antennityypit sekä kuvataan antennin mittaamista, jossa pitää huomioida mittauspaikat ja se, mitä ominaisuuksia halutaan mitata.

Työssä kerrotaan myös markkinoilla olemassa olevien antennimittausjärjestelmien laitekoonpanoista, ohjelmista, toiminnoista ja ominaisuuksista. Lopuksi selostetaan tarkemmin, miten mittaustyökälua tehdään, kuvataan järjestelmän testaamista sekä näytetään, missä muodossa mittaustulokset voidaan esittää ja tulostaa, esitetään järjestelmän komponentit ja niiden ominaisuudet.

2 RADIOTEKNIIKAN TEORIAA

Radiotekniikassa tieto siirtyy sähkömagneettisena aaltona, joka etenee suoraviivaisesti poikittaisena värähtelyliikkeenä vapaassa tilassa valon nopeudella. Aalto voi edetä myös vähähäviöisessä 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. [1.]

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: [1.]

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

jossa $c = 2,998 \times 10^8$ (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. [1.]

2.2 Aallonpituus

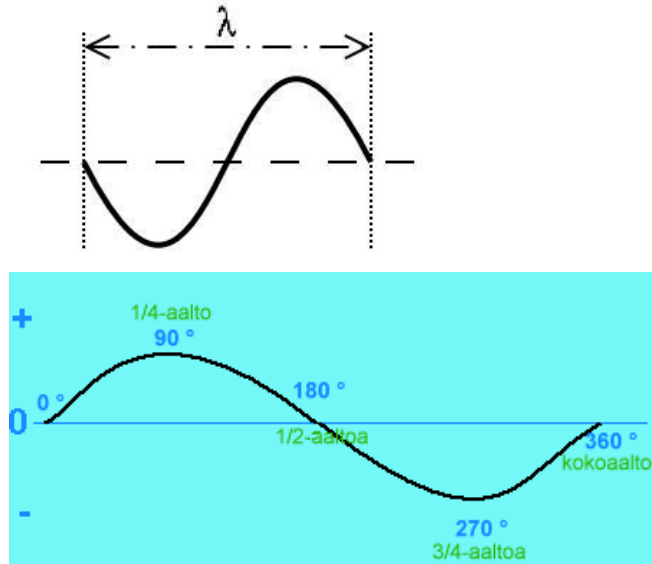
Sähkömagneettisen säteilyn spektri jaetaan osa-alueisiin aallonpituuden tai taajuuden perusteella. Sähkömagneettisella säteilyllä on myös hiukkasluonne, eli se ei ole jatkuvaa vaan kvantittunutta. Säteily koostuu energiakvanteista eli fotoneista, jotka pysähtyvät törmätessään elektroniin ja luovuttavat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

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

jossa $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ (Js) on Planckin vakio.

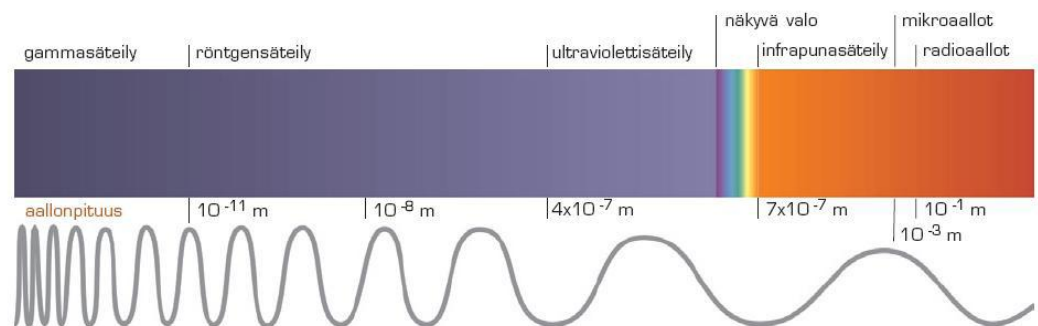
Aallonpituus on matka, jonka aalto kulkee yhden jakson aikana (kuva 1).

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 atomille tai molekyyliille 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- ja 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

ELF (extremely low frequency 3 Hz - 30 Hz) - taajuusalueen aaltojen aallonpituus on välillä 10 000 - 100 000 kilometriä.

ELF-alueella radioaallot etenevät pinta-aaltona useita tuhansia kilometrejä. Sillä on kaksi etua: radioaallot tunkeutuvat kohtuullisesti veteen ja toiseksi ydinräjähdysket ilmakehässä eivät häiritse kyseessä olevia yhteyksiä. Näistä syistä ne sopivat erittäin hyvin strategisten ydinsukellusveneiden yhteysvälineiksi. Ongelmia ovat pieni tiedonsiirtokapasiteetti ja suuret antennit (aallonpituus 100 000-10 000 km).

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 maa-asemien 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 ionosfääristä heijastuen. Eteneminen on mahdollista myös suoraan näköyhteysreitillä 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 ionosfääriete-

nemisenä. 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, 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 yleisradiolähetyksissä 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. Antenniratkaisu- ja 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 radioaallon pituus 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, radiopainuksessa, radioastronomiassa ja 60 GHz:n langattomissa lähiverkoissa. [2.]

Taajuus	Aallonpituus	Nimi	Lyhenne
3 - 30 Hz	$10^5\text{km}-10^4\text{km}$	<u>Extremely low frequency</u>	ELF
30 - 300 Hz	$10^4\text{km}-10^3\text{km}$	<u>Super low frequency</u>	SLF
300 - 3000 Hz	$10^3\text{km}-100\text{km}$	<u>Ultra low frequency</u>	ULF
3 - 30 kHz	100km-10km	<u>Very low frequency</u>	VLF
30 - 300 kHz	10km-1km	<u>Low frequency</u>	LF
300 kHz - 3 MHz	1km-100m	<u>Medium frequency</u>	MF
3 - 30 MHz	100m-10m	<u>High frequency</u>	HF
30 - 300 MHz	10m-1m	<u>Very high frequency</u>	VHF
300 MHz - 3 GHz	1m-10cm	<u>Ultra high frequency</u>	UHF
3 - 30 GHz	10cm-1cm	<u>Super high frequency</u>	SHF
30 - 300 GHz	1cm-1mm	<u>Extremely high frequency</u>	EHF

Taulukko 3. Taajuusalueen jakautumien alueisiin

3 ELF:N JA VLF:N KÄYTTÖKOHTEET

3.1 Tieteellinen tausta

ELF- ja VLF-aallot eivät ole pelkästään tärkeitä viestintävälineitä, vaan myös etädiagnostiikkajärjestelmäantureita, jotka määrittävät Maan ionosfäärin ja magnetosfäärin ominaisuudet. Koska näiden aaltojen mittaaminen maan päällä vaatii yleensä suuria, monimutkaisia ja kalliita antennejä ja niihin liittyviä järjestelmiä [CH Richard, Sub vs. Sub, Orion Books, New York, 1988] on tärkeää tutkia vaihtoehtoinen tapa mitata näitä aaltoja.

3.2 ELF-teleyhteydet vaikeita olosuhteita varten

3.2.1 Sukellusveneteknologiasta

Nykyään käytössä olevasta sotilasteknologiasta sukellusveneet ovat mitä kiinnostavin tarkastelukohde teknisestä näkökulmasta. Vesi elementtinä aiheuttaa omat rajoituksensa teleliikenteelle sekä havainnoimiselle. Vesi vaihtelee tehokkaasti radiotaajuuksia, joten viestintä täytyy toteuttaa eri lähtökohdista kuin ilmassa. Myöskään kohteiden paikantaminen merellä ei ole kovin eksaktia: usein kyetään vain hyviin arvioihin etäisyydestä ja nopeuksista. Vaikka tekniikka on ottanut valtavia edistysaskeleita, on ihminen silti vielä viime kädessä meren armoilla. [3.]

3.2.2 Erilaisia viestintäkeinoja

Johtuen juuri radioaaltojen voimakkaasta vaimennuksesta korkeimmilla taajuuksilla ovat sukellusveneet (ja niitä tukevat maa-asemat) pakotettuja käyttämään hyvin alhaisia ELF-taajuuksia (Extremely Low Frequency). Kyseinen taajuus-alue on määritelty välille 3-30 Hz. Toimittaessa näillä taajuuksilla täytyy antennien olla hyvin pitkiä, koska radioaaltojen aallonpituus kasvaa taajuuden pienentyessä. Esimerkiksi Yhdysvaltojen itärannikolla sijaitsevassa laivastotukikohdassa on tähän tarkoitukseen kaksi antennia, n. 22 km ja 44 km pituudeltaan. Vastaavasti sukellusveneet ovat pakotettuja vetämään perässään useiden satojen metrien pituisia ELF-antennia, jotta viestintä matalilla taajuuksilla olisi mahdollista. [3.]

Viestiliikenne on alhaisesta taajuudesta johtuen myös erittäin hidasta, esimerkiksi yksi merkki siirtyy 30 sekunnissa. Tämän vuoksi USA:n armeija käyttää kolme merkkiä pitkiä koodisanoja, jotka voidaan koodata luettavaan

muotoon, jossa merkkijonot tulkitaan sanoiksi sovitun koodijärjestelmän mukaisesti. Tietoturva on kriittinen asia kaikessa sukellusveneiden viestiliikenteessä, sillä lähetettävät tiedot voivat olla hyvinkin arkaluontoisia. Nimittäin nykypäivän ballistiset ydinsukellusveneet on varustettu ydinohjuksilla, joiden kunkin tuhovoima vastaa n. kahdeksaakymmentä Hiroshiman ydinpommia. Kun tähän tuhovoimaan yhdistetään sukellusveneiden kyky välttää havaituksi tulemista, viestiliikenteenkin rooli korostuu.

ELF-radioaallot eivät ole sukellusveneiden ainoa keino viestiä tukiasemien kanssa, vaan maata kiertävällä radalla on lukuisia satelliitteja, joita sukellusveneet (pääasiassa yhdysvaltalaiset) käyttävät. Näitä satelliitteja on lukuisia, jotta yhteys toimii aina riippumatta maapallon tai satelliittien kulloisestakin sijainnista. Ne ovat myös vain ja ainoastaan sukellusveneiden käytössä. [3.]

3.3 Radioaaltojen eteneminen

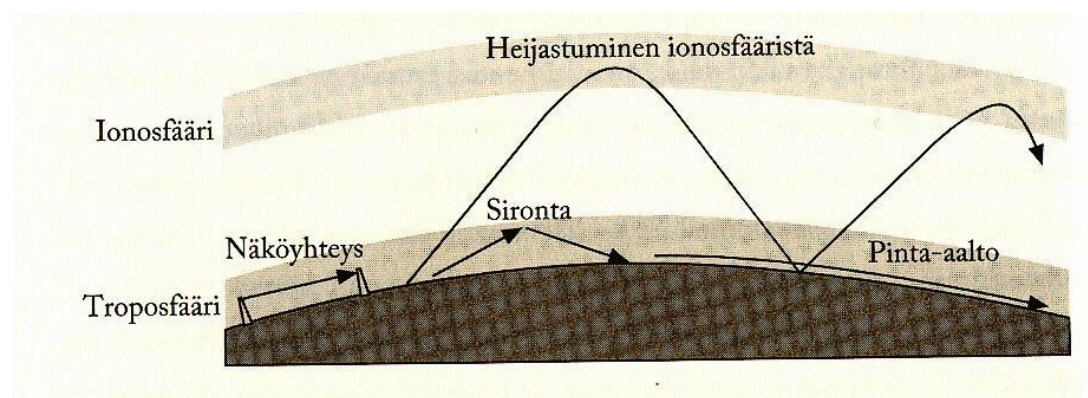
Radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat ionosfäärin, troposfäärin ja maaston ominaisuudet. Ionosfääri on 60 km:stä 1000 km:iin ulottuva ilmakehän alue, joka sisältää useita auringon ja kosmisen säteilyn aiheuttamia ionisoituneita kerroksia jossa on auringon ultraviolettij- ja hiukkassäteilyn ionisoimia 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. Säätä 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. Äkillisen 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. [4.]

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. [4.]

Kuvassa 4 nähdään radioaaltojen erilaiset etenemistavat yksinkertaisena piirroksena.



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

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

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

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

4 ANTENNIT

Lähetysantennin tehtävänä on säteillä lähettimen muodostama signaali sähkömagneettisena aaltona ulos antennilta, ja vastaanottoantennin tehtävänä on siepata mahdollisimman suuri teho vastaanotettavasta radioaallostaa. 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 siirtojohtoa kautta vastaanottimeen. [5.]

4.1 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.

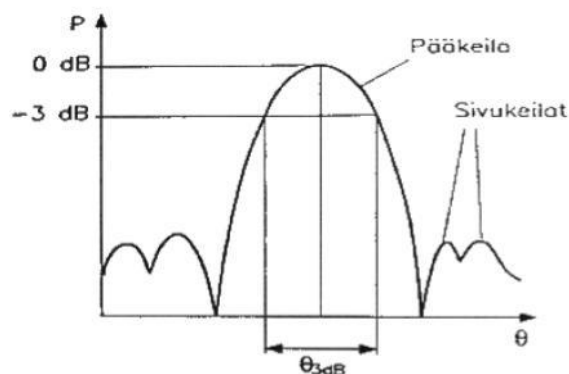
4.1.1 Säteilökuvio eli suuntakuviio

Antennin säteilökuvioita voidaan kuvata pallopinnalla, jossa kaukokenttien amplitudin suuruus vaihtelee ja amplitudin maksimiarvo on normalisoitu, pääkeilan arvoksi on muunneltu 1. Säteilökuvioilla tarkoitetaan suuntakuvioita, joka kuvaa antennin säteilemän kentän tehoitiheyden P tai kentänvoimakkuuden E kulmariippuvuutta. Elevaatio ja atsimuutti on saatu pallokoordinaatiosta. Lähettävän antennin säteilökuvioista nähdään, miten antennin lähettämä signaaliteho jakautuu avaruuteen. Vastaanottoantennin säteilökuvio kertoo puolestaan sen, miten hyvin antenni vastaanottaa eri suunnista tulevaa sähkömagneettista säteilyä. Säteilökuviossa on yleensä erotettavissa selkeä pääkeila sekä useita pienempiä sivukeiloja. Pääkeilaa vastapäätä on usein takakeila. Säteilökuviossa 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. Vastaavasti jos antenni on kooltaan aallonpituutta suurempi, on pääkeila kapea. [5.]

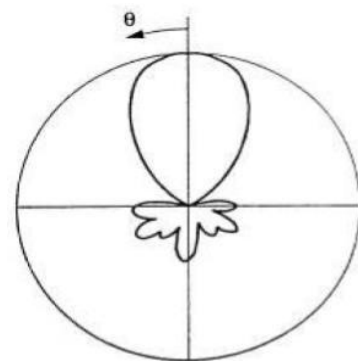
Antennin säteilökuvio ilmoittaa suhteellisen kentänvoimakkuuden suunnan funktiona, ja yleensä ne normalisoidaan siten, että maksimiarvoksi laitetaan 1, eli 0 dB.

Säteilökuvion esitystapoja on monenlaisia. Katso kuva 5.

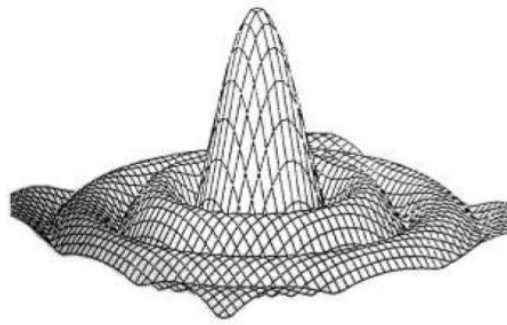
Suorakulmainen



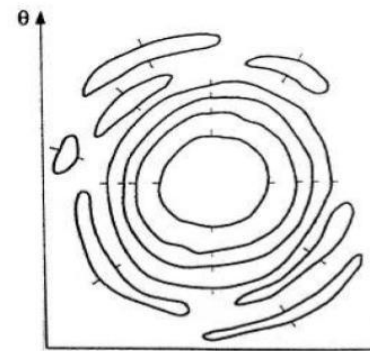
Polaarinen



Kolmiulotteinen



Vakioarvokäyrästä



Kuva 5. Suuntakuvion esitysmuotoja [6, s. 162]

Säteilykuvioista saadaan selville siis polarisaatio, tehotiheys, kentänvoimakkuus tai vaihe. [5.]

Keilanleveys on säteilykuvion nollakohtien kulma tai 3 dB:n pisteiden väli (näky kuvan 5 suorakulmaisessa esitysmuodossa). Sivukeilatase on sivukeilojen maksimin arvo verrattuna pääkeilaan. Suuntaavassa antennissa pitää yleensä olla pienet sivukeilat.

4.1.2 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:

$$G_{dB} = 20 \log G \quad (4)$$

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

$$G = \eta \frac{S}{S_0} \quad (5)$$

Referenssiantennin ollessa isotrooppinen käytetään desibeliyksikkönä dBi.

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

4.1.3 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 .

$$\frac{4\pi}{\iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (6)$$

jossa $d\Omega$ on keilan avaruuskulman alkio ja 4π on täysi avaruuskulma.

[5.] Keilan avaruuskulma Ω_A saadaan lasketuksi kaavalla 7:

$$\Omega_A = \int |P(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \quad (7)$$

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

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (8)$$

Suuntaavuus voidaan laskea myös etäisyyden suhteen, jolloin käytetään kaavaa 9:

$$D = 4\pi r^2 \frac{S}{S_0} \quad (9)$$

Kentän voimakkuus määräytyllä etäisyydellä eli lähetyssantennin aiheuttama tehotiheys saadaan lasketuksi kaavalla 10:

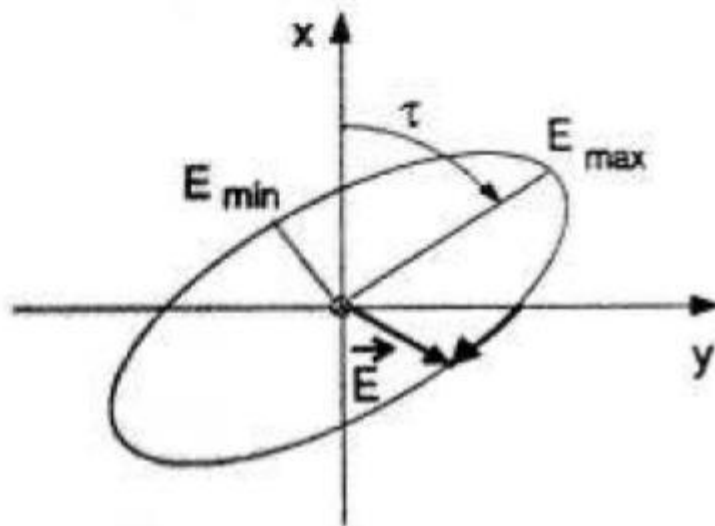
$$S = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (10)$$

jossa G_T = lähetyssantennin vahvistus ja P_T = lähetysteho.

4.1.4 Polarisaatio ja ristipolarisaatio

Polarisaatio on suuntakulman 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. [5.]

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



Kuva 6. 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 sovitautuu antenniin. Muussa tapauksessa syntyy epäsovitusta, jota kuvataan polarisaatiohyötysuhteella η_p . Epäsovitus laskee antennin polarisaatiohyötysuhdetta. Ristipolarisaatio on tärkeä esimerkiksi tilanteissa, joissa samalla taajuudella siirretään kahta kanavaa ortogonaalisilla polarisaatioilla. [5.]

4.1.5 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.

4.2 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 kulkualtoantenneihin. 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 kohdalainen vahvistus. Antenni on myös edullinen.
- Laajakaista-antenneissa säteilyn tuottaa aktiivinen alue, joka on pieni osa koko antennista. Kooltaan se on aallonpituuden tai puolikaan kokoa. Aktiivinen alue vaihtaa paikkaa antennissa taajuuden muuttuessa.
- Aukkoantenneissa on aukko, jonka läpi aalto kulkee. Tällaisella antennilla on suuri vahvistus.

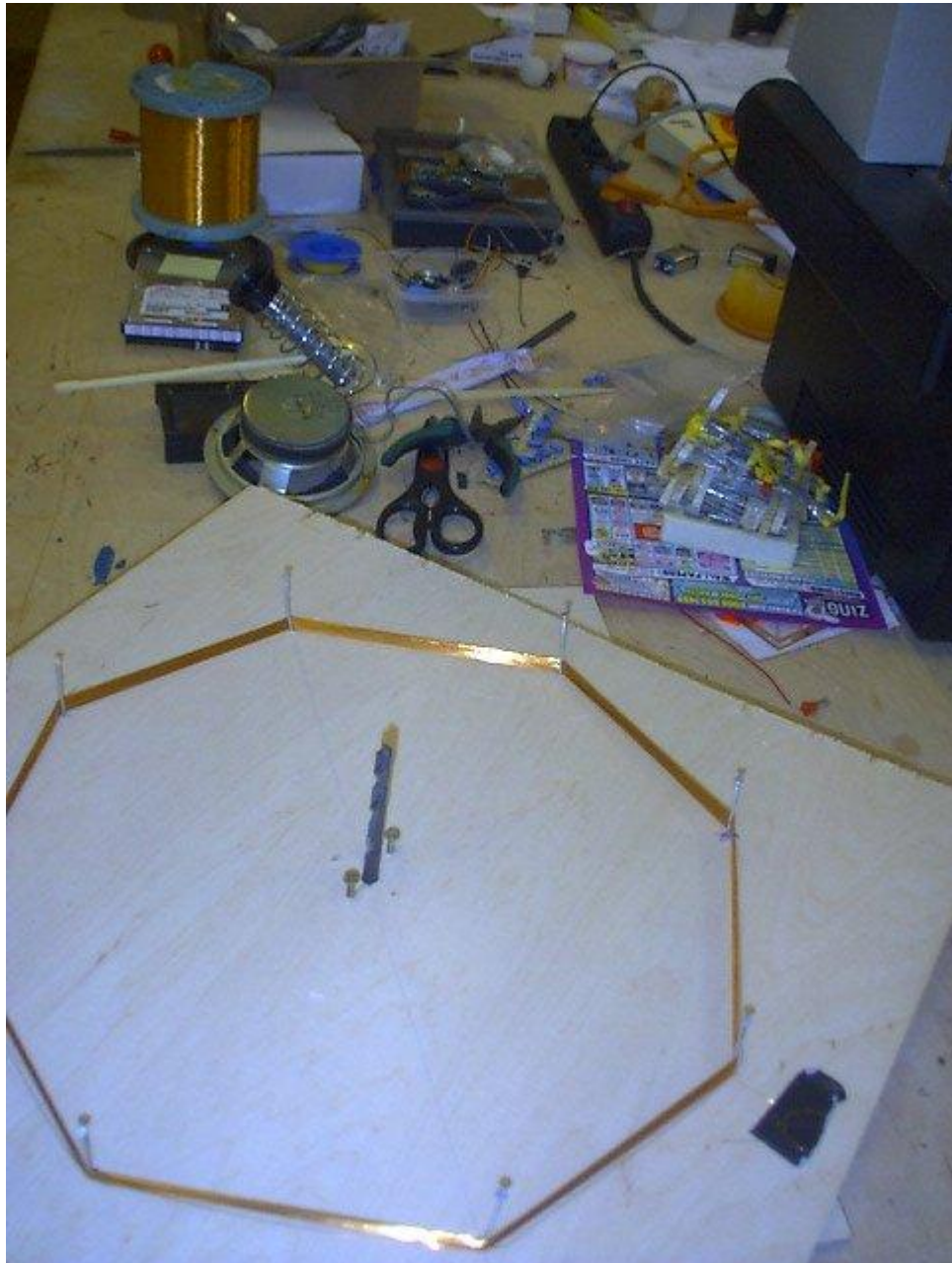
Yhteen anteeniin ei saada kaikkia hyviä ominaisuuksia, joten antennin käyttötarkoitus ratkaisee antennin valinnan. Antennin suunnittelussa joudutaan tekemään kompromisseja eri ominaisuuksien välillä.

4.3 ELF- ja VLF-antennit

4.3.1 Kehäantenni

Kehäantenni on radio-antenni, muodostuu langan, putken tai jonkun muun johtavan välineen silmukasta (tai silmukoista). Silmukka-antenneja on kahta tyyppiä: pieni silmukka (tai magneettinen silmukka), jonka koko on paljon aallonpituutta pienempi, ja resonaattori-kehäantenni, jonka ympärysmitta on suunnilleen sama kuin aallonpituus.

Pienillä silmukoilla on huono hyötysuhde ja niitä käytetään pääasiassa vastaanottamaan matalilla taajuuksilla. Näitä antenneja käytetään myös radio-suunnan etsinnässä. Teknisesti pienellä silmukalla, joka tunnetaan myös magneetti-silmukkana, pitäisi olla ympärysmitta yksi kymmenesosa aallonpituutta tai vähemmän. Taajuuden tai koon kasvaessa, seisova aalto alkaa muodostua virrassa, ja antennissa alkaa olla joitakin taitetun Dipoli-antennin ominaisuuksia. [6.]



Kuva 7. VLF-kehäantennin halkaisija on 90 cm, jossa on 1000 kierrosta ja jonka johdon halkaisija on 0,6 mm. [6.]

4.3.2 Magnetometri-antenni

Magnetometri on väline, jota käytetään magneettikentän voiman ja / tai suunnan mittaamisessa välineen läheisyydessä. Maan magneettisuus vaihtelee paikasta toiseen riippuen kivien luonteesta tai varautuneiden hiukkasien auringosta ja magnetosfäärin vuorovaikutuksesta.

Magnetometrejä käytetään geofysikaalisissa tutkimuksissa ja niillä voidaan mitata kivien ja mineraaliesiintymien aiheuttamaa magneettikentän vaihtelua.

Niitä käytetään öljyn tai kaasun havaitsemiseen ja poraustyökalun asetteluun. Magnetometrejä käytetään myös arkeologisten kohteiden kartoittamisessa, haaksirikkoja ja muita haudattuja tai vedenalaisia esineitä etsittäessä. Magnetometrejä käytetään myös satelliiteissa, kuten GOES:ssa, mittaamaan maapallon magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa.

Magnetometrit ovat hyvin herkkiä, ja ne voivat antaa viitteitä mahdollisista revontulien toiminnasta ennen kuin niiden valoa pystyy näkemään. Verkko magnetometreja ympäri maailmaa jatkuvasti mittaa aurinkotuulen vaikutusta Maan magneettikenttään. [7.]

Fluxgate-magnetometrit perustuvat magneettisten materiaalien kyllästymisen periaatteeseen. Tyypillisellä sähkömagneetilla on rautaydin, jonka ympärille on kierretty kela, jossa kulkee sähkövirta. Kelan magneettikenttä vahvistuu suuresti raudalla, koska raudan atomit ovat magneettisia. Tavallisessa raudassa, sen atomien magneettiset akselit ovat satunnaisesti suunnattuja, ja niiden magneettikenttien summa on lähellä nollaa. Kun kelassa kulkee sähkövirta sen magneettikenttä on samassa linjassa atomien magneettisen akselin kanssa.

Fluxgate-magnetometri koostuu pienestä, magneettisesti alttiista, ytimestä. Ytimen ympärillä on käärittä kaksi kela. Vaihtovirta kulkee yhden kelan läpi, joka ajaa ytimen vuorottaisen magnetisoitumisen syklin läpi. Tämä jatkuvasti muuttuva kenttä indusoi sähkövirran toiseen kelaan, jonka lähtövirta mitataan ilmaisimella. Magneettisesti neutraalissa taustassa syöttö ja lähtövirrat täsmäävät. Kuitenkin, kun ydin on alttiina taustakenttään (maan magneettikenttä), se on helpommin magnetoitu linjassa siihen kenttään ja magnetoituu vaikeammin sen vastakkaiseen suuntaan. Näin vaihteleva magneettikenttä, ja indusoituva lähtövirta, tulee olemaan epätahdissa tulovirran kanssa. Missä näin on, riippuu taustamagneettikentän vahvuudesta. [7.]

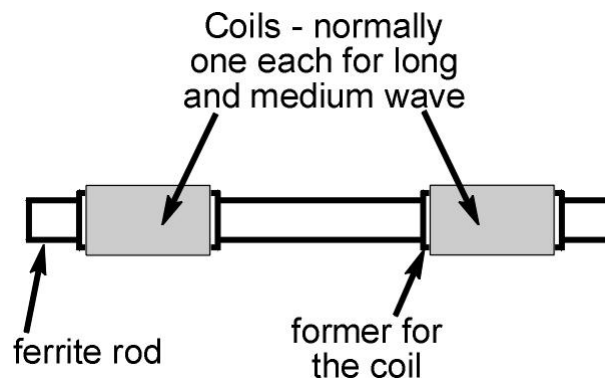


Kuva 10. Kaupallinen ELF-probe-antenni [29]

Fluxgate-magnetometrejä, paritettuna gradiometriin, käytetään yleisesti arkeologisissa tutkimuksissa. Useimmat tämän tyyppiset työkalut pystyvät havaitsemaan niin heikkoja magneettisia vaihteluja kuin 0,1 nT (joka karkeasti vastaa puolen miljoonasosan maapallon magneettikentän voimakkuutta). [7.]

4.3.3 Ferriitisydän-atenni

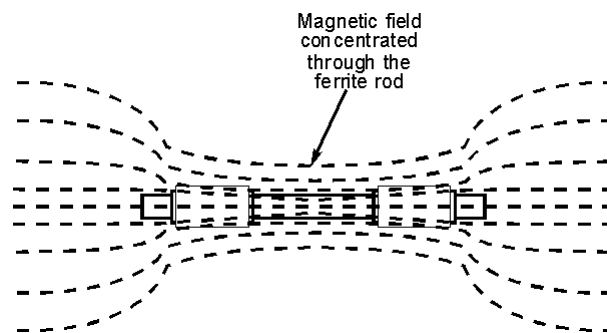
Kuten nimestä voi päätellä, antenni koostuu sauvasta, joka on tehty ferriitistä, rautapohjaisesta magneettisesta materiaalista. Kela sijoitetaan ferriittisauvan ympärille. Tämä systeemi puolestaan tuodaan resonanssiin käyttäen säätökondensaattoria, joka sisältyy itse radiopiiriin, jonka avulla antennin voi viritellä resonanssiin. Antennin virittäminen resonanssiin muodostaa yleensä vastaanottavan RF-piirin.



Kuva 11. Tyypillinen ferriittiantennin kokoonpano jota käytetään matkaradi-
oissa

Ferriittiantenni toimii perustuen korkeaan ferriitin materiaalin permeabili-
teettiin, ja sen perusmuodossa tämä voidaan ajatella radioaaltojen mag-
neettisen komponentin "keskittäjänä". Tämä on saatu aikaan ferriitin korke-
an permeabiliteetin μ avulla.

Se, että tämä antenni käyttää radiosignaalien magneettisen komponentin,
merkitsee, että antenni on suuntaava. Se toimii parhaiten silloin, kun mag-
neettikentän voimalinjat ovat samansuuntaisia antennin kanssa. Tämä ta-
pahtuu, kun se on suorassa kulmassa lähettimen suuntaan. Tämä tarkoittaa,
että antenni on nollassa-asennossa, jossa signaalin taso on minimissä ja antenni
on suorakulmassa nähden lähettimeen. [8.]



Kuva 12. Ferriitti-antennin toimintaperiaate [8.]



Kuva 13. Kaupallinen elf-ferriittiantenni [8.]

5 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.

5.1 Mittauspaikat

Antennin mittauspaikan valintaan vaikuttavat antennin sijainti, koko ja taajuus. Antennien mittauspaikkoja ovat vapaantilan ja maaheijastusmittauspaikka, heijastukseton huone sekä kompakti ja lähikenttämittauspaikka.

5.1.1 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, jolloin saadaan korjattu taajuusvaste. [9.]

5.1.2 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° vertikaalisella polarisaatiolla ja 180° horisontaalisella polarisaatiolla. [9.]

5.1.3 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 heijastuskerrointa. 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, kaukokentän vaatimus rajoittaa mitattavan antennin kokoa. Lähetysantenni suunnataan siten, ettei pääkeila valaise sivuseiniä. Mittaukset tehdään niin sanotulla hiljaisella alueella, jossa heijastukset on pyritty minimoimaan.

5.1.4 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 säteily voidaan eliminoida muotoilemalla reunat sahalaitaisiksi tai kaareviksi.

5.1.5 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 tasokoordinaattimittaus soveltuu yhteen suuntaan säteileville antenneille ja pallokoordinaattimittaus soveltuu ympärisäteileville antenneille. Lähikenttämittauksia häiritsevät antennin ja mittapään monikertaheijastukset. Mittaamalla antennin lähikenttä voidaan siitä laskea antennin kaukokentän ominaisuudet.

5.2 Säteilykuvion mittaus

Suuntakuviot mitataan usein antennin päätasossa. 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° vastaanottoantenniin nähden.

5.3 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 vastaanottotehojen avulla. Tehosuhte voidaan mitata tarkkuusvaimentimella, jolloin vastaanottimen epälineaarisuus ei vaikuta mittaukseen.

5.4 Polarisaation ja impedanssin mittaus

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

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

6 ELF- JA VLF-MITTAUKSET

6.1 Systeemin piirteet

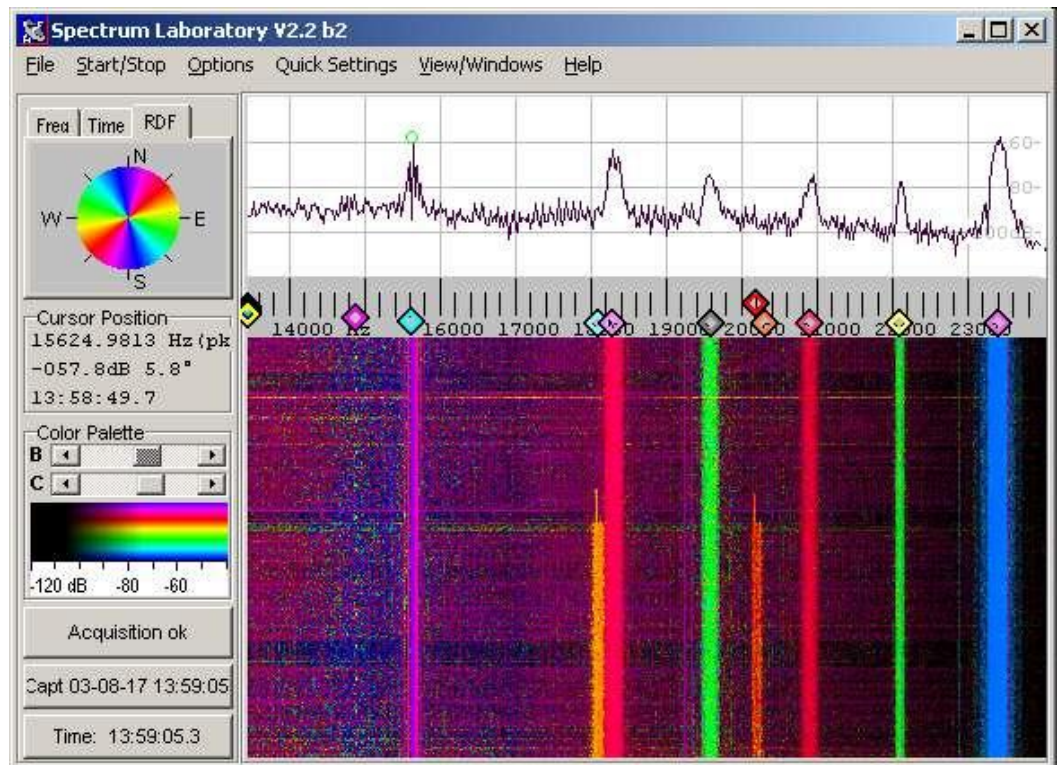
Tämän työn etuna on se, että mittauksissa ei käytetä enää yhtä antennia vaan verrataan monta erilaista antennia keskenään, kuten magnetometri-, ferriittisydän- ja silmukka-antenneja. Kokeissa päädytään siihen lopputulokseen, että yleensä silmukka-antenni on yksinkertainen, luotettava, mutta vaikeampi toteuttava ratkaisu. Silmukka-antennin mitat ja tarvittava materiaali sen rakentamiseen ovat huomattavasti suurempia kuin muissa tapauksissa.

Lisäksi vahvistinpiiriä syötetään erillisellä, erittäin stabiililla, tehonlähteellä. Koska tavalliset tehonlähteet aiheuttavat häiriöitä erittäin tarkkoihin mittauksiin, siksi niistä häiriöistä vältetään käyttämällä laadukasta tehonlähdettä.

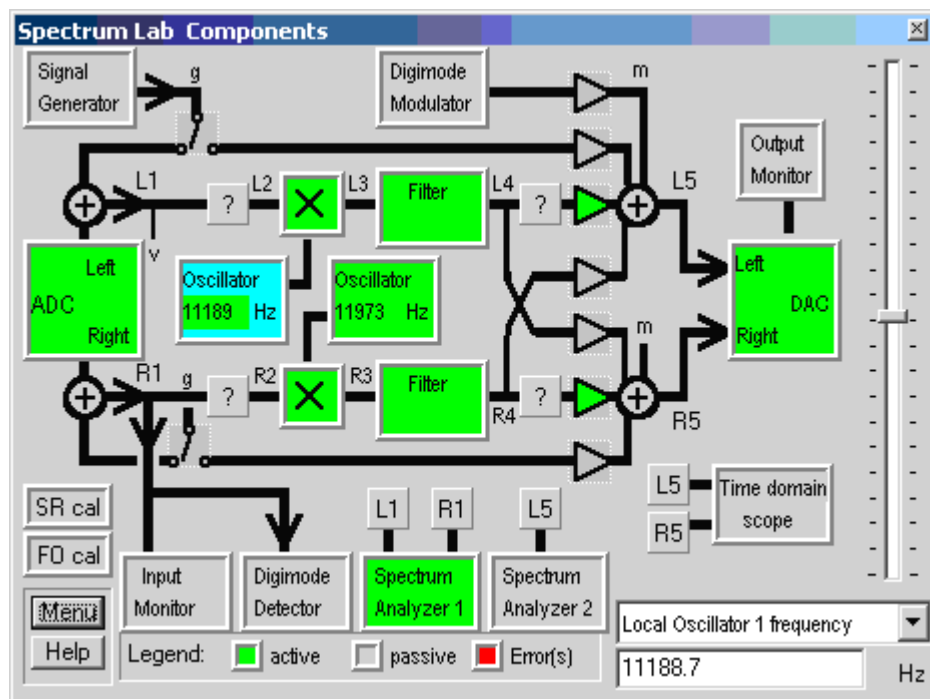
RF-vahvistin-vastaanotin piiri on ylinen vahvistinpiiri joka on saatavissa eri lähteistä. Tässä työssä kyseinen piiri ensin muokattiin vastaanottamaan ELF aaltoja ja estämään muut häiritsevät taajuudet, kuten 50Hz sähköverkon häiriösignaalin. Toiseksi tätä piiriä rakennettiin kaksipuoliselle piirilevylle joka myös estää ylimääräisiä häiriöitä.

6.2 Spectrum Laboratoryn-työkalu

Mittausten havainnoitiin käytetään Spectrum Laboratory taajuus-analysaattori ohjelma. Spectrum Laboratoryn-työkalu alkoi yksinkertaisena DOS-pohjaisena FFT-muunnosta suorittavana ohjelmana, joka on jälleen kehittynyt audio-analysaattoriksi, suodattimeksi, taajuusmuuttajaksi, kohinasuodattimeksi, tiedonkeruujärjestelmäksi jne. [10.]



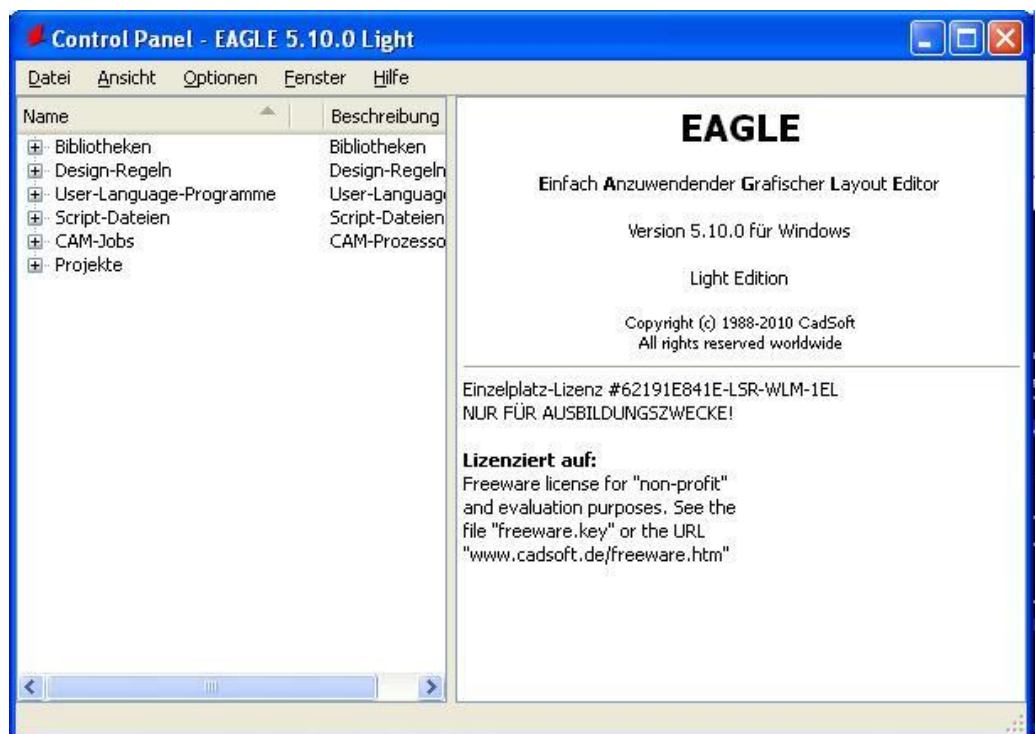
Kuva 14. Spectrum laboratoryn käyttöliittymä



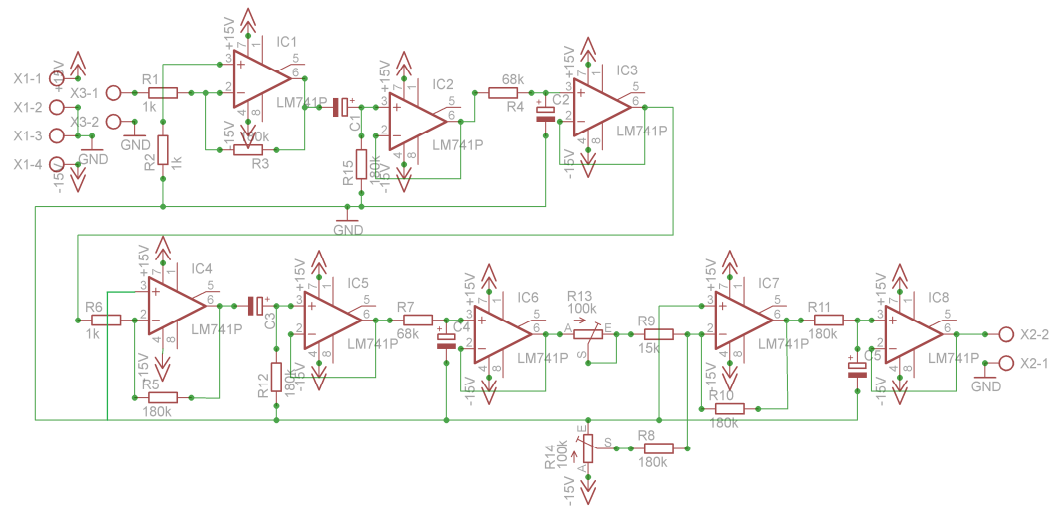
Kuva 15. Spectrum Laboratoryn periaatteellinen rakenne [10.]

6.2.1 Vahvistimen rakentaminen EagleCad-työkalulla

Vahvistimen rakentamiseen käytetään EagleCad elektroniikkapiirisuunnittelu työkalua. Eagle on monipuolinen elektroniikkapiirien talteenotto ja CAD-työkalu. Piirien talteenotto tarkoittaa, että piirejä voidaan syöttää, muokata, muuttaa ja valmistaa. Elektroniikkapiiri tiedostoja voidaan katsella millä tahansa tietokoneella, jossa on asennettu Eagle-ohjelma. CAD (tietokoneavusteinen suunnittelu) tässä yhteydessä tarkoittaa sitä, että Eagle voi tehdä elektroniikkapiiristä tarvittavat tiedostot elektroniikkapiirivalmistaja varten, jotta niiden perusteella voidaan valmistaa piirilevyjä.



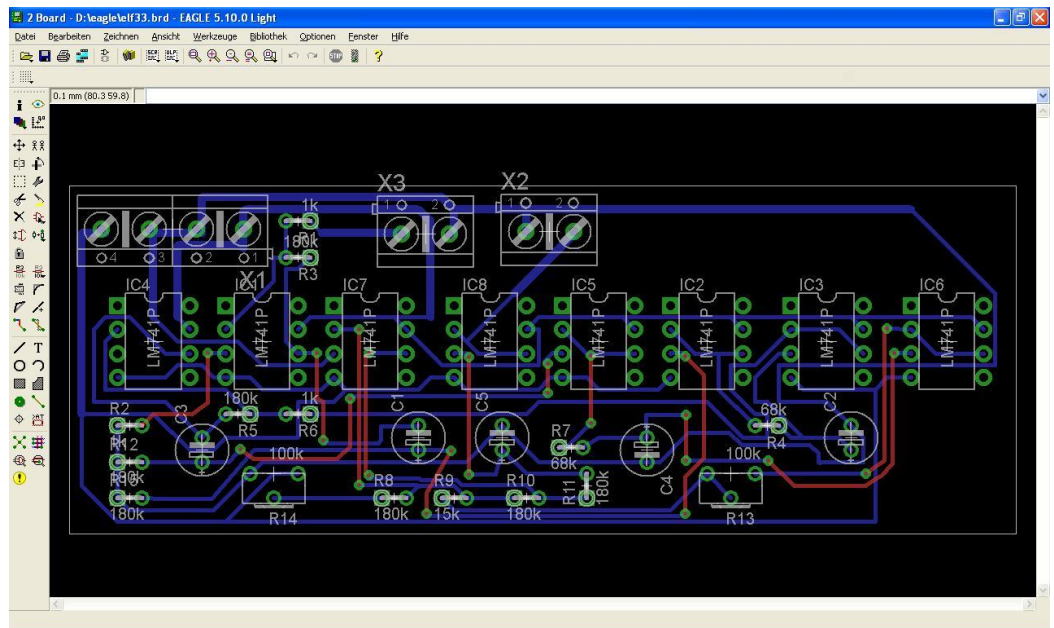
Kuva 16. EagleCAD Cadsoftin työkalu



Kuva 17. Vahvistinpiirin sähköinen piirikaavio

Ensimmäisessä vaiheessa valittiin tarvittavat elektroniikkaelementit, sekä myös piirrettiin uusia elektroniikkakomponentteja, joita tarvitaan piirisuunnittelussa. Sitten lisättiin elementit työalueeseen. Kytettiin syöttövirrat, passiivielementit ja mikropiirit. Kuvasta 19 nähdään 8 peräkkäistä operaatiovahvistinta kytkettynä sarjaan. Piirissä käytetään potentiometriä vahvistuksen säätämiseksi. Operaatiovahvistimia syötetään kahdella jännitelähteellä, jolloin saadaan -15V, 0V ja +15V-potentiaalit.

Toisessa vaiheessa sähköiset komponentit järjestetään ensin parhaalla mahdollisella tavalla, jotta piirillä tulee mahdollisimman vähän risteäviä kohtia. Suunnitteluvaiheen jälkeen siirretään automaattiseen johdotukseen, eli reititys-vaiheeseen. Tämä puolestaan tarkoittaa, että Eagle pyrkii etsiä optimaalisia reittejä elementtien johdotukselle. Piirilevyn valmistuksessa käytetään kaksipuolista levyä, eli johdotukset tehdään sekä yli- että ala-tasolle kohdissa, joissa johdot menevät ristiin. Alemman tason reitit näkyvät sinisenä ja päällimmäisen punaisena kuvassa 19.



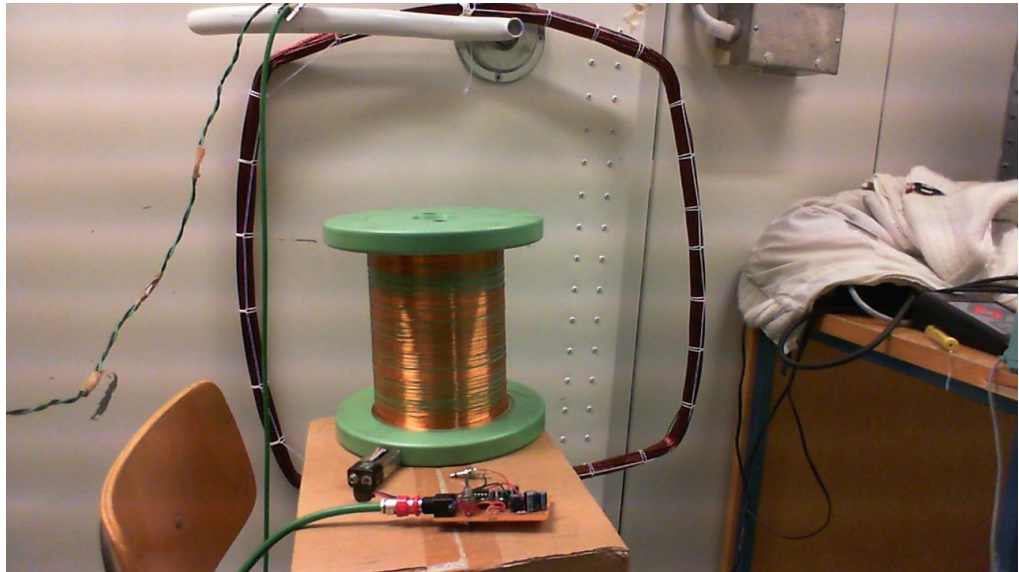
Kuva 19. Automaattinen johdotus 2-puoliselle piirilevylle

Eaglelta saadut elektroniikkapiiritiedostot siirrettiin prototyyppikoneeseen LPKF Protomat s62, jossa lopullinen piirilevy valmistettiin.



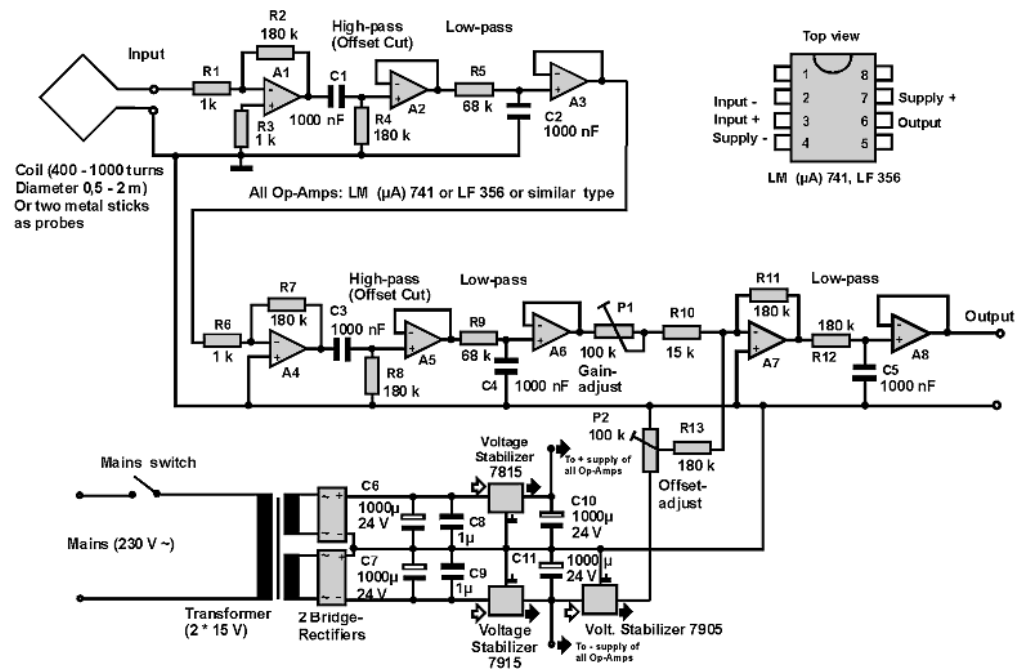
Kuva 20. Piiriprototyyppikone LPKF Protomat s62

6.2.2 ELF-vastaanotin-vahvistin



Kuva 20. Kela-antenni ja elektroniikkapiirirytkentä.

Piiri koostuu pääsääntöisesti kolmesta eri asteesta, jotka muodostavat kokonaisuuden, joka voidaan toistaa useita kertoja, kunnes haluttu vahvistustekijä on saavutettu.



Kuva 17. Vahvistinpiirin sähköinen piirikaavio

Nämä asteet ovat vahvistin, ylipäästösuodin ja alipäästösuodin, joten piirikaavio voidaan ymmärtää vain esimerkkinä, jota voidaan muuttaa käyttäjän toivomalla tavalla, erityisesti vastusten arvojen osalta.

Ensimmäinen operaatiovahvistin on kaavion vasemmassa yläkulmassa. Se toimii sisääntulovaiheessa alhaisella tuloimpedanssilla ja vahvistustekijällä 180. Tulo voidaan liittää tällöin suoraan kela-antenniin.

Vastus R2 on ei-invertoivan operaatiovahvistimen inputin ja maan välissä. Ilman sitä kytkennän toimintaa PC:n sisällä voi aiheuttaa piikkejä signaalissa.

Toisessa operaatiovahvistimessa A2 on suuri- impedanssinen puskuri CR-yksikön C1. R4 muodostaa ensimmäisen ylipäästösuodatin-vaiheen. Rajataajuus on alle 1 Hz. Ylipäästösuodattimet ovat ehdottoman välttämättömiä: koko piirin suuren vahvistuksen takia matala DC-vastike yhden vahvistimen vaiheissa olisi kertaantunut ja johtaisi koko järjestelmä sen leikkautumisen alueelle (miinus tai plus15 V).

Ensimmäisen ylipäästösuodattimen jälkeen seuraa ensimmäinen alipäästösuodatin (R5, C2). A3 toimii puskurina alipäästösuodattimelle. Alipäästösuodattimet lieventävät taajuuksia "korkeammissa" alueissa (50 Hz lähellä). Jos niitä ei olisi toteutettu, 50 Hz hurinaa olisi läsnä lähes kaikkialla, joka puolestaan johtaisi koko järjestelmän leikkautumisen alueelle.

A4:n, A5:n ja A6:n kohdalla koko "järjestelmä" toistaa itseään: toinen yksikkö, koostuu toisesta vahvistimesta, seurattuna ylipäästö- ja alipäästösuodattimilla. Kolmas vahvistin-vaihe on toteutettu A7:lla, joka on säädettävä sen P1-osassa.

Säätämällä P1 nolnaan saavutetaan vahvistusaste 12 (liittyy A7:aan). Säätämällä P1 maksimiin saadaan A7:n vahvistusaste noin 1,5. A7 toimii myös sekoittimena offset-säätöjännitteelle. Tämä jännite lisää viiveen lähtösignaaliin, joka on tarpeen, jos vahvistin on liitetty A/D-muuntimeen, joka hyväksyy vain positiivisen jännitteen.

Offset-jännitteen vahvistus ulostulossa A7 vastaa R11/R13:ta. Tämä tarkoittaa, että offset-jännite ei ole vahvistettu ($R11 / R13 = 1$) ja on helposti säädettävissä P2:lla välillä 0 ja +5 volttia. Kaikki tämän piirin vahvistimet ovat myös invertoivia. Tästä syystä jännitteen P2:ssa pitäisi olla negatiivinen saa-

uttaakseen positiivisen offset-jännitteen. Negatiivinen tasoittaja 7905 on hyvin tärkeä. Ilman sitä näkyvän signaalin nolla-linja voi siirtää, jos syöttöjännite muuttuu akun tapauksessa. Jos syötetään virtapiiriä akulla, 7815:n ja 7915:n stabilointia ei tarvita, paitsi 7905:n stabilointia.

Jos löytyy 7805:n 7905:n sijasta, on mahdollista lisätä toisen invertoivan vahvistimen A7 ja A8 välillä. Kääntääkseen negatiivisen offsetin positiiviseksi vastusten arvot tässä tapauksessa pitäisi olla samat: esimerkiksi 180 k.

R12 ja C5 muodostavat viimeisen (turvallisuus) alipäästösuotimen yhdessä A8:n kanssa ennen kuin signaali ohjataan lähtöön. [11.]

6.2.3 Vastaanottimen ominaisuudet

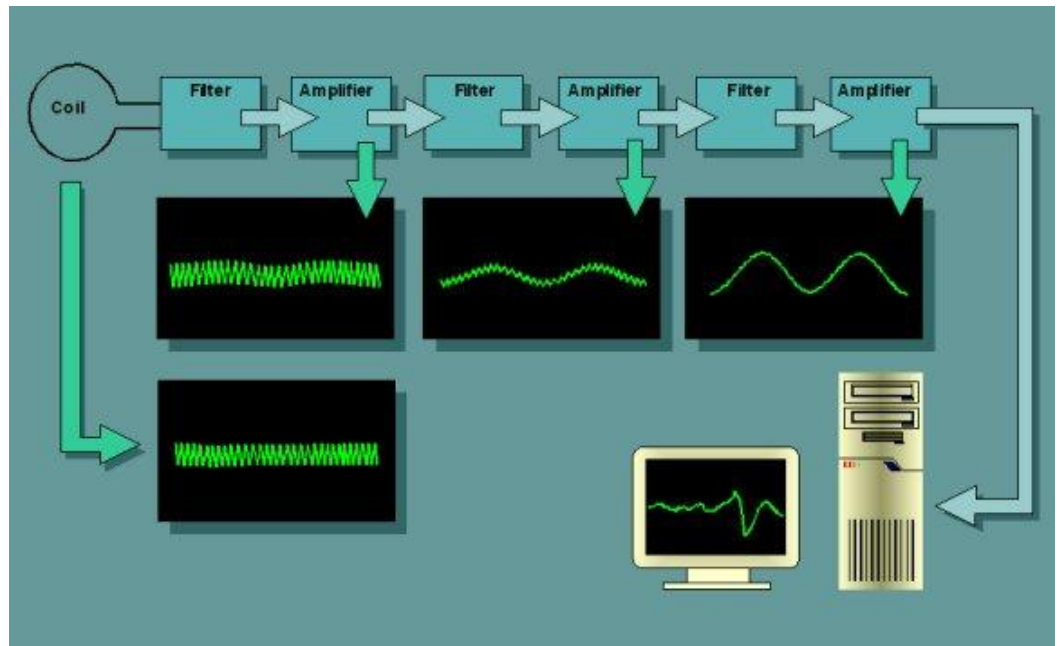
Vastaanottimessa on vältettävä 50 ja 60 Hz:n taajuusaluetta, joka aiheutuu kodin elektroniikkalaitteista. Todellisuudessa se ei ole vaan kaikilla näillä verkkovirralla toimivilla koneilla, mutta myös monimutkaisessa virtajohtojärjestelmässä. Nämä vääristymät luovat yliaaltoja, jotka ovat 50 Hz:n kerrannaisia, eli 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz jne.

Lisäksi 50 Hz:n hurinaa esiintyy lähes kaikkialla: ei vain taloissa, mutta myös luonnossa. Tämä johtuu siitä, että virrat menevät takaisin kuluttajalta voimalaitokseen osittain käyttämällä luonnollista maata johtona. Sitä paitsi kaikki sähkölinjojen pellot ja metsät säteilevät voimakkaasti 50 Hz:n signaalia.

Kaikkien näiden ongelmien takia on syytä luopua tältä taajuusalueella ja tarkastella lähemmin taajuuksilla yli ja alle 50 Hz, eli ELF- ja VLF-alueet. Koska harmoniset aallot ovat vain olemassa signaalin perustaajuuden yläpuolella eikä alapuolella, ei olisi mitään häiriöitä 50 Hz:n alapuolella. Virallisesti ei ole liiketaloudellisia tai sotilaallista viestintää alle 50 Hz:n - mutta tällä alueella, voidaan havaita sfericsin kaltaisia signaaleja jotka syntyvät luonnollisissa prosesseissa ilmakehässä - varsinkin auringon korkean aktiivisuuden ja revontulien aikoina.

Vahvistusta varten on rakennettu jännitteen vahvistin, jonka vahvistuksen kerroin on noin 240 000 ja alipäästösuodin 36 dB:n siirtofunktiolla oktaavia kohti ja rajataajuus alle 50 Hz.

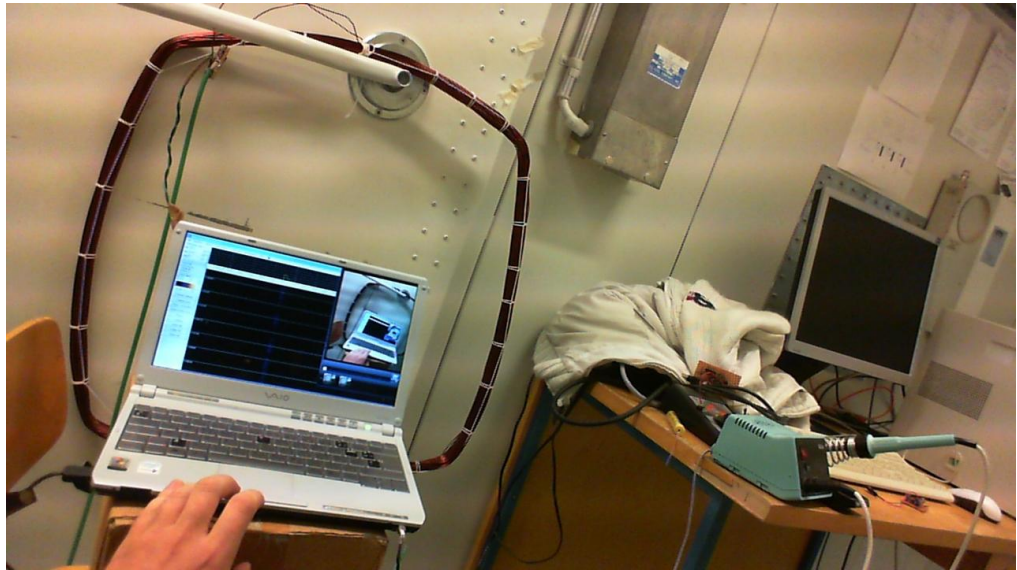
Antennia varten käytettiin omatekoista kela, jossa on 500 kierrosta ja jonka halkaisija oli 1,2 metriä. [11.]



Kuva 22. ELF-vastaanotin [24].

6.2.4 Tulosten testaus

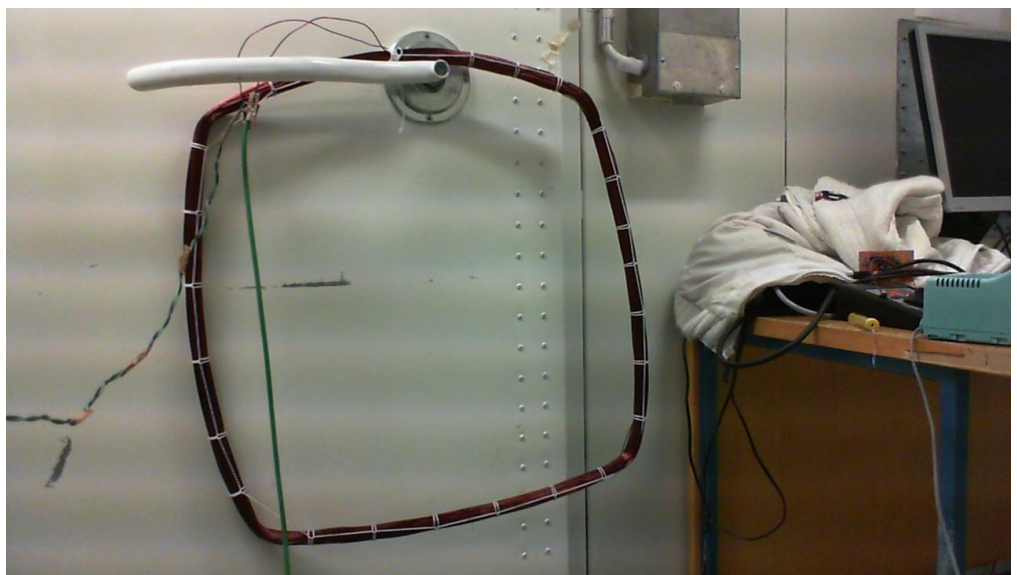
Kun piiri oli rakennettu, sitä on mahdollista testata oskilloskoopin ja magneetin avulla. Tuloksena oskilloskooppi reagoi jopa 10 metrin päässä selkeällä ja täydellisellä sini-aallolla, kun magneettia heilutettiin hitaasti. Pienten metalliesineitten kanssa, kuten avainten ja ruuvimeisselin, saadaan samoja tuloksia, kun etäisyys on laskenut enintään kahteen tai kolmeen metriin. Suurten rekka-autojen kulkeminen kadulla (etäisyys yli 20 metriä), joilla on iso metallinen lasti mukana, johti signaali leikkautumisen oskilloskoopin näytöllä.



Kuva 23. Testikokoonpano laboratoriossa

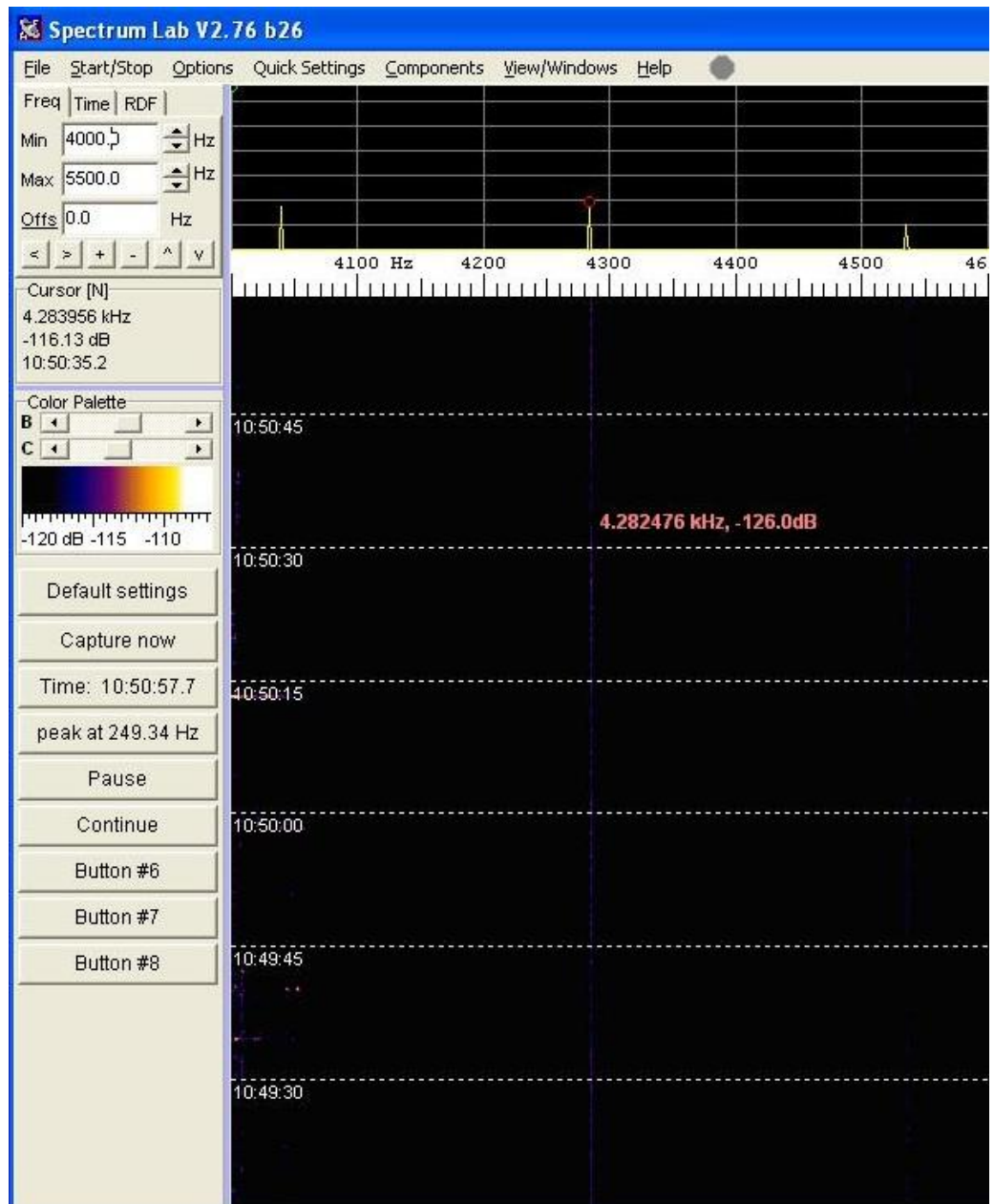
Mutta kelan sijoittaminen sähköjohtojen viereen ei johtanut havaitsemaan 50 Hz:n häiriötä. Tämä oli todiste, että suodatin toimi täydellisesti. Suuresta vahvistuksesta huolimatta signaalissa ei ollut kohinaa: jos magneettia ei ollut siirretty eikä auto mennyt ohi, oskilloskoopissa oli vain vaakasuora viiva sen näytöllä.

6.2.5 Yhteenveto tuloksista



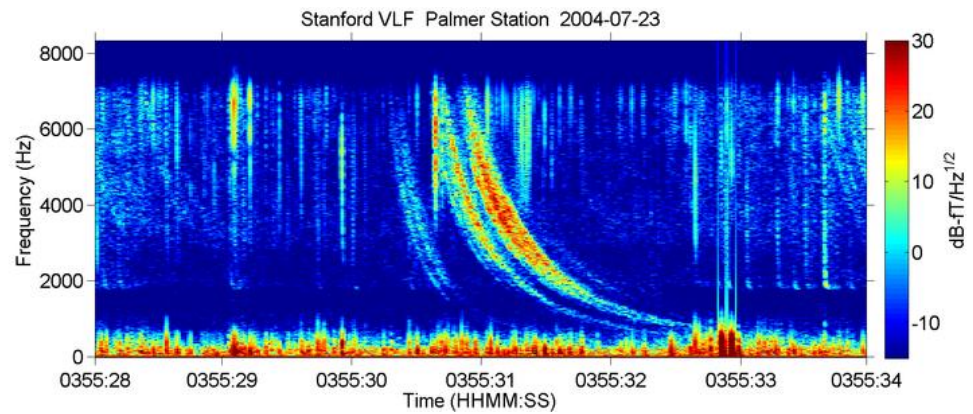
Kuva 24. Laboratoriossa valmistettu ELF- ja VLF-antenni.

Testien tuloksena saatiin havaittua voimakkaita signaaleja vlf-taajuusalueella vahvistimella ja jopa ilman vahvistinpiiriä. Havaitut taajudet osuivat 4000 Hz-4600 Hz:n haarukkaan. Signaalien lähteestä ei ole tietoa, mutta voidaan varmasti sanoa, että ne kuuluvat ei-lisensoituun alueeseen ja on ns. whistler-tyyppisiä.



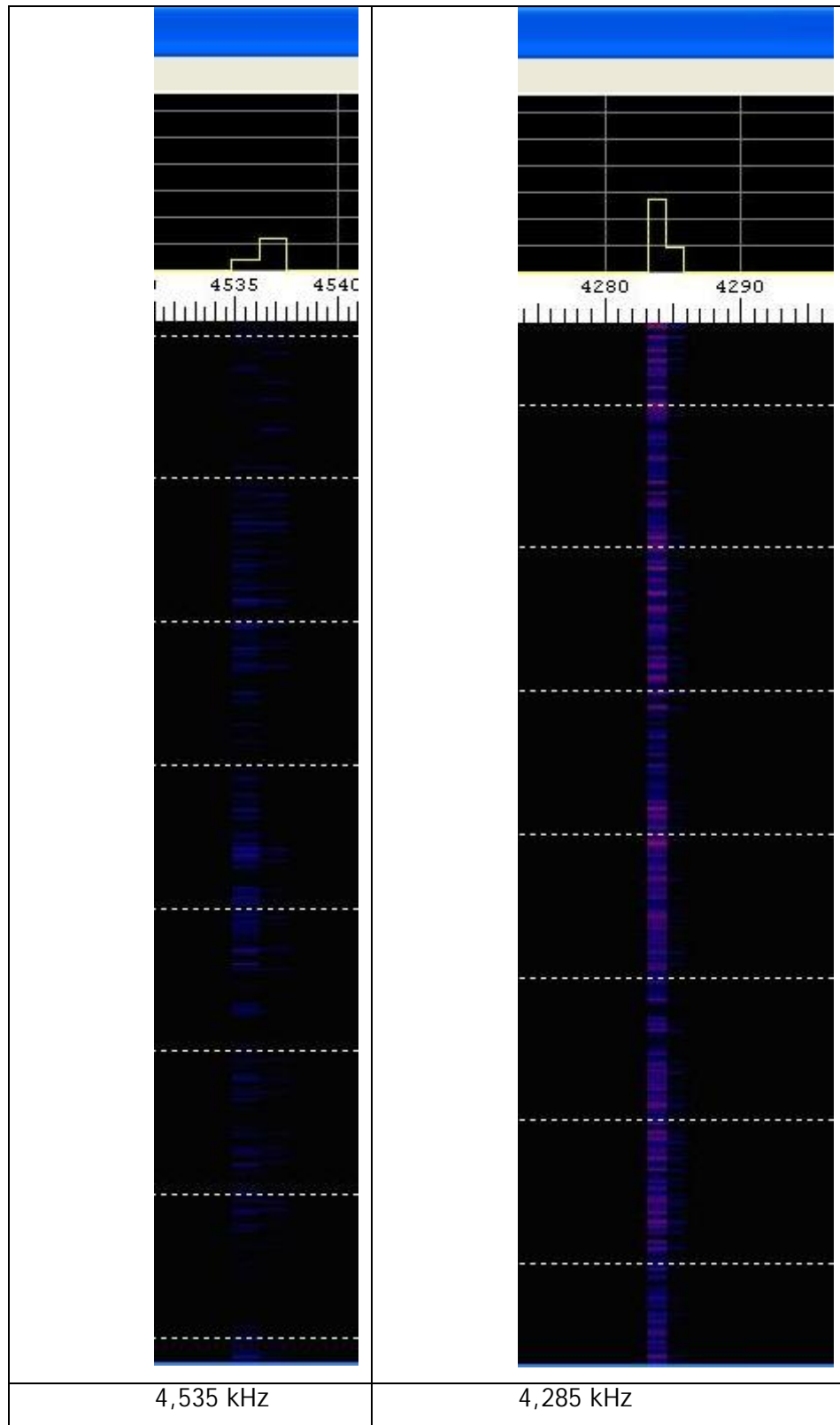
Kuva 25. Spectrum Laboratorilla saadut koetulokset

Taajuusaluetta alle 9 kHz ei ole jaettu kansainvälisen televiestintäliiton ja sitä voidaan käyttää vapaasti. Monet luonnon radiolähetykset, kuten Whistlers, voidaan kuulla tällä taajuusalueella.



Kuva 26. Spectrum Analyzerin tyypilliset Whistler-signaalit

Whistler on erittäin matalan taajuuden sähkömagneettinen (radio) aalto, joka voi syntyä esimerkiksi salaman iskusta. Whistlers-taajuudet ovat 1-30 kHz:n alueella, joiden maksimi sijoittuu yleensä 3-5 kHz taajuusalueeseen. Vaikka ne ovat sähkömagneettisia aaltoja, niitä esiintyy äänitaajuuksien, ja niiden ääntä voidaan muuntaa sopivalla vastaanottimella. Ne ovat salamaniskulla tuottamia, joissa impulssi kulkee maasta pois päin, sitten palaa maahan ja matkustaa magneettikentän linjoja pitkin.



Kuva 27. Spectrum Laboratoryn testitulokset suurennettuna.

Lähteet

- [1] Hyvä tietää säteilystä, Energiateollisuus ry. [Verkkodokumentti]. 2007 [viitattu 26.3.2008]. Saatavissa:
<http://www.energia.fi/fi/julkaisut/hyvatietaasarja/hyvatietaasateilysta.pdf>
- [2] Eklöf, Kalevi - Markku, Arto - Railo, Kaarlo, I - Vehmasvuori, Jukka. Radiotekniikan perusteet. Vantaa: Opetushallitus. 2001.
- [3] Teppo Ahonen, Markus Höijer, Tomi Luostarinen, 1998, TKK, Tietoverkkolaboratorio, Sukellusveneiden viestintä,
<http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s98/htyo/50/ELF.shtml>
- [4] Lehto, Arto, Radioaaltojen maailma. Helsinki: Otatieto. 2006.
- [5] Koivumäki, Antti, Antennien perusasioita. Opetusmoniste. Helsingin ammattikorkeakoulu. 2007.
- [6] William E. Payne, N4YWK, <http://pe2bz.philpem.me.uk/Comm/-%20ELF-VLF/-%20Info/A-103-Intro/octoloop.htm>
- [7] S. Farooq, Department of Geology, WORKING PRINCIPLES OF MAGNETOMETERS, <http://www.cps-amu.org/sf/notes/m10-1-8.htm>
- [8] Ferrite rod antenna, http://www.radio-electronics.com/info/antennas/ferrite_rod_antenna/ferrite_rod_antenna.php
- [9] Räisänen, Antti - Lehto, Arto, Mikroaaltomittaustekniikka. 3. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 1995.
- [10] DL4YHF's Amateur Radio Software: Audio Spectrum Analyzer ("Spectrum Lab"), <http://www.qsl.net/dl4yhf/spectra1.html>
- [11] Diedrich Kurt, Unknown ELF-Signals and Ground Currents:
<http://www.vlf.it/kurt/elf.html>