

Toni Vanhatalo

Vaiheistettu vertikaaliantenniryhmä

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä	Toni Vanhatalo
Työn nimi	Vaiheistettu vertikaaliantenniryhmä
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu
Vuosi	2023
Sivut	29 sivua, liitteitä 1 sivu
Työn ohjaaja(t)	Harri Kosonen

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella radioamatöörikäyttöön soveltuva vaiheistettu vertikaaliantenni (4-square), joka toimii radioamatööreille tarkoitetulla 14-megahertsin / 20 metrin taajuusalueella. Tässä opinnäytetyössä käsitellään muun muassa vaiheistetun vertikaaliantenniryhmän ohjaamista, suunnittelua, rakentamista, suuntakuvion muodostumista ja antennin toimintaa käytännössä.

Ennen työn aloittamista oli otettava selvää suuntakuvion muodostumisesta neljän vertikaaliantennin ympärille ja vaiheistuksen vaikutuksesta tähän ilmiöön. Lisäksi oli selvitettävä, miten minulle uusi antennisuunnitteluohjelma MMANA-GAL oikein toimii. Tässä työssä antennin simulointi on toteutettu tällä ohjelmalla. Suurin osa lähteistä keskittyi antennin rakentamiseen liittyviin dokumentteihin.

Työn tultua valmiiksi minulle oli tullut matkan varrella useita eri ongelmia, mutta kaikki saatiin kuitenkin lopulta ratkaistua. Fyysisen osuuden ollessa valmis vei se tilaa noin 15 m x 15 m kokoisen peltokaistaleen. Jokaisesta säteilijäelementistä tuli 5 metriä korkeita, ja niille kullekin asennettiin 16 maaradiaalilankaa. Yhteensä vertikaalielementejä oli siis neljä kappaletta ja maaradiaalilankoja 64 kappaletta. Vaiheistus toteutettiin COMTEC ACB-4 Hybrid Four-Square -ohjainlaitteella.

Opinnäytetyön tekeminen sujui hyvin. Antennista tuli toimintakykyinen, ja sen suuntaominaisuudet vaiheistuksen avulla saatiin toimimaan. Suunta vaikutukset ovat selkeästi havaittavissa, ja radioyhteyksiä sillä on pidetty jo yli tuhat kappaletta ympäri maailmaa. Antennin suuntakuviosta ei tullut aivan täydellinen johtuen lähinnä maahäviöistä. Asetetut tavoitteet saavutettiin antennin toiminnassa ja sen suunnittelussa.

Asiasanat: Antennit, harrastukset, radioamatööritoiminta, viestintäteknikka

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Toni Vanhatalo
Thesis title	Phased four-square vertical antenna
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2023
Pages	29 pages, 1 pages of appendices
Supervisor	Harri Kosonen

ABSTRACT

The subject of the thesis was to designing a 4-square vertical antenna suitable for amateur radio use, operating in the 14 megahertz / 20-metre frequency range. This thesis covers, among other things, the control, design, construction, directional patterning, and operation of a phased array vertical antenna.

Before starting the work, it was necessary to understand the directional pattern around the four vertical antennas and the effect of phasing on this pattern. In addition, I had to find out how the antenna design software MMANA-GAL, which was new to me, worked. In this work, the antenna simulation was carried out with this software. Most of the sources focused on documents related to antenna construction.

I had several problems along the way, but all of them were solved in the end. Once the physical part was complete, it took roughly 15 m x 15 m of space of the field area. Each of the radiator element were 5 m high and 16 ground wires were installed on each of them. In total, there were four elements and 64 ground radials. The phasing was implemented with a COMTEC ACB-4 Hybrid Four-Square control switch.

The research process went well. The antenna became functional, and the phasing was working. The directional effects were clearly noticeable, and it has already been used for more than a thousand radio contacts around the world. The antenna's directional pattern was not perfect, depending on ground losses. The objectives set at the beginning for the operation and design of the antenna were achieved.

Keywords: Amateur radio, Antennas, Communications technology, Hobbies

SISÄLLYS

KÄSITTEET JA LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	8
3 KAAPELOINTI	8
3.1 Heikkovirtakaapelointi kentällä olevalle antennin ohjainlaitteelle	9
3.2 RF-kaapelointi antennille ja RF-balunin merkitys.....	9
3.3 Koaksiaalikaapeleiden ominaisuudet ja impedanssit	10
4 RF-LIITTIMET	11
5 ALUMIINIMATERIAALIT ANTENNEILLE	11
6 RELEOHJAINKORTTI VAIHEISTETULLE ANTENNISIGNAALILLE.....	12
7 ANTENNISUUNNAN OHJAUSLAITE.....	13
8 RELEET.....	13
8.1 Pienjännitereleet.....	14
8.2 Tyhjiöreleet.....	14
9 ANTENNINSUUNNITTELUOHJELMA MMANA-GAL.....	14
10 RF-VAIHEISTUS	15
10.1 Koaksiaalikaapelilla toteutettuna.....	16
10.2 Toroidimuuntajilla toteutettuna.....	16
11 VAIHEISTUKSEN EDUT	17
11.1 Antennin säteilykuvio.....	18
11.2 Desibeli.....	20
12 MAAN JOHTAVUUS JA RADIAALILANKOJEN MERKITYS	20
12.1 Maahäviöt.....	22
12.2 Antenni kalliolla.....	23
12.3 Antenni savipellolla	23
12.4 Antenni meren rannalla.....	23

13	JÄNNITE- JA VIRTAKENTÄN MUODOSTUMINEN ANTENNIN YMPÄRILLE.....	24
14	SUURTAAJUUSSÄHKÖN ILMIÖT	24
15	OPEROINTI ANTENNILLA KÄYTÄNNÖSSÄ.....	25
16	YHTEENVETO	25
	LÄHTEET.....	27
	LIITTEET	

Liite 1. Kuvaluettelo

KÄSITTEET JA LYHENTEET

4-Square, 4SQ	Vaiheistettu vertikaaliantenniryhmä
ANT	Antenni
Balun	Epäsymmetrisen ja symmetrisen linjan välinen muuntaja eli siirtolinjamuuntaja
Beli	10 desibeliä = 1 Beli
Coax	Koaksiaalikaapeli
CW	Continuous Wave (Sähkötys/Morsekoodi)
dB	Desibeli
DX	Distant X (Kaukoyhteys)
Elementti	Antennin säteilevä osa
f	Taajuus
FT4	Digitaalinen lähetelaji
FT8	Digitaalinen lähetelaji
GND	Ground (maa)
Hamshack	Rakennus/huone tai muu harrastetila, jossa radioilla operointia harrastetaan
HF	High Frequency (Korkea taajuus 3–30 MHz, aallonpituus 10–100 m)
Hz	Hertz (Taajuuden yksikkö)
Lambda	Radioaallon pituusmitta
QRT	Lopetan lähettämisen
QRZ?	Kuka kutsuu minua?
QSO	Radioamatööriyhteys
QTH	Radioamatööriaseman sijaintipaikka
RF	Radio frequency (Suurtaajuus)
RFI	Suurtaajuushäiriö
RTTY	Digitaalinen lähetelaji
RX	Vastaanotin
S-yksikkö	Signaalin voimakkuus 6-desibelin portaissa
S/N	Signaali/kohinasuhde
SSB	Yleisin puheliikenteen lähetelaji
SWR	Signal Wave Ratio (Seisovan aallon suhde)
TX	Lähetin
Yagi	Suunta-antenni

1 JOHDANTO

Radioamatööriharrastus on Suomessa hyvin harvinainen harrastus ja harrastajia on vain noin kuusi tuhatta. Suurin osa suomalaisista harrastajista on 50–90-vuotiaita. Pohjois-Amerikassa ja Japanissa harrastajia on pelkästään useita miljoonia.

Radioamatööriharrastus on hyvin laaja ja harrastusmuotoja on monia erilaisia. Harrasteeseen kuuluu kilpailut, DX-yhteyksien pito, kerhoillat, tapahtumat ja leirit sekä tässä opinnäytetyössä käsiteltävä aihe eli antennien rakentaminen.

Radioamatööriharrastuksessa antennia on olemassa monia erilaisia. Yleisimpiä antennimalleja ovat yagi (tarkkaan suuntimiseen tarkoitettu antenni), dipoli (heijastaa radioaaltoja kahteen eri suuntaan, mutta ei antennin päihin) ja vertikaaliantennit (yksittäinen vertikaaliantenni säteilee ympärilleen 360 astetta). Tässä opinnäytetyössä käydään läpi vaiheistetun vertikaaliantenniryhmän (4-square) rakentamista.

Olen itse harrastanut radioamatööritoimintaa jo yli kymmenen vuotta, mutta en ole itse koskaan rakentanut minkäänlaista antennia tai suunnitellut sellaista. Kiinnostusta tähän on ollut jo jonkin aikaa, ja nyt tarjoutui oiva mahdollisuus tehdä se opinnäytetyönäni. Vaiheistettuja vertikaaliantenneja on olemassa tyyppillisesti kahta erilaista: joko sähköisesti ohjataan neljää antennia tai pelkästään kahta antennia. Kun käytössä on 4 antennia, pitää antenniryhmä olla asennettu täydelliseen neliöön, jonka sivu on $0,25 \lambda$. Antennin suuntakuvio muodostuu lävistäjien suuntaisesti. Vaiheistuksen kaapelit tulee olla 75-ohmisia ja syöttökaapeli 50-ohmista koaksiaalikaapelia. Antenni pystyy säteilemään neljään eri suuntaan, ja säteilysuunnat ovat koillinen, kaakko, lounas ja luode säteilevien elementtien ollessa pohjois-etelä suunnassa. Antenni tarvitsee lähetystä varten itselleen sähköiseksi vastapainoksi maatason. Maan pinnalle tulevien radiaalilankojen optimaalinen pituus on $\frac{1}{4}$ aallonpituudesta. Kahdenkymmenen metrin taajuusalueella maahan tulevien kuparikaapeleiden eli radiaalien yhden johtimen pituus on 5 metriä.

MMANA-GAL-antennisuunnitteluohjelmalla pystyy suunnittelemaan käytännössä millaisen antennin vain. Ohjelmaa ei ole tarkoitettu lähtökohtaisesti simuloimaan maatasoa tarvitsevaa antennia, mutta senkin ohjelmalla pystyy toteuttamaan. Tässä opinnäytetyössä kyseistä ohjelmaa on hyödynnetty vaiheistetun vertikaaliantenniryhmän suunnittelussa ja simuloinnissa.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimustyön tavoitteena oli saada aikaan selkeä ja ymmärrettävä kuvaus vaiheistetun vertikaaliantenniryhmän toteutuksesta radioamatöörikäyttöön. 4-square-antenneja on rakennettu ympäri maailmaa useille eri taajuusalueille. Tyypillisesti 4SQ-antenneja rakennetaan 14MHz – 3,5Mhz välisille taajuusalueille, koska niillä aallonpituus on 20–80 metriä pitkä, jolloin esimerkiksi yagi-antenneista tulisi suuria ja painavia, jotka olisivat vaikeasti asennettavia mastoon. Myös mastoon kohdistuva tuulikuorma lisääntyy oleellisesti suurien antennien takia, joka pitää ottaa huomioon mastorakennetta suunnitellessa. Eli matalille taajuusalueille 4SQ-antennin rakentaminen on huomattavasti helpompaa, halvempaa ja riskittömämpää.

Englanninkielistä materiaalia tästä antennityypistä löytyy hyvinkin paljon, mutta suomeksi ei juuri ollenkaan. Tavoitteena on tehdä suomeksi selkeä tutkimustyö antennin rakentamisesta ja suunnittelusta. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi säteilykuvion muodostumista antennin ympärille, vaiheistuksen vaikutusta antennin toimintaan, antennilla suuntimista, maaperän vaikutusta antennin toimintaan ja antennilla operointia sen ollessa käyttövalmiina.

Lisäksi tavoitteena oli opetella käyttämään minulle entuudestaan tuntematonta MMANA-GAL-antennimallinnusohjelmaa. Suunnitteluohjelmia on olemassa monia, mutta valitsin tämän ohjelman, koska se oli ilmainen ja sitä ovat monet radioharrastajat käyttäneet omien antennien suunnittelussa.

3 KAAPELOINTI

Kaapeloinnissa tulee käyttää ulkotiloihin tarkoitettuja kaapelivaihtoehtoja, jotka kestävät hyvin vettä ja uv-säteilyä. Kaapeleiden tulee olla myös mekaanisesti riittävän kestäviä. 4SQ-antennijärjestelmä tarvitsee samansuuruiset RF-virrat

jokaiselle antennielementille toimiakseen kunnolla. Antennielementtien impedanssit eivät ole vaiheistuksen takia aivan samat, vaan ne vaihtelevat kussakin antennissa säteilysuunnan muuttuessa. Syöttämällä antennia syöttökaapeliteiden kautta, jotka ovat $\frac{1}{4}$ aallon pituisia, antennielementeille pakotetaan samat syöttövirrat, vaikka niillä ei olisikaan samaa syöttöpisteen impedanssia. Tätä kutsutaan virran pakottamiseksi. (Egloff 2022.)

Kaapelivalmistajia on olemassa useampia, esimerkiksi Bedea, Draka NK Cables, Prysmian Group ja Televes.

3.1 Heikkovirtakaapelointi kentällä olevalle antennin ohjainlaitteelle

Heikkovirtakaapelointia tarvitaan releohjainkortin ohjauskaapelina. Kaapelointi pystyy toteuttamaan esimerkiksi säänkestävällä supercat-kaapelilla. Tämän kaapelin avulla viedään tieto antennin keskiössä olevalle ohjainlaitteelle, mitä ilmansuuntaa milloinkin halutaan käyttää. Kaapelissa käytettävät ohjausjännitteet ovat tyypillisesti 12 tai 24VDC riippuen vaiheistusreleiden käämijännitteistä. Hamshackin päässä kaapeli puolestaan kytketään kiinni antennisuunnan ohjauslaitteeseen.

3.2 RF-kaapelointi antennille ja RF-balunin merkitys

Releohjainkortilta tulevan yksittäisen vertikaaliantennin syöttökaapelin tulee olla 75 ohmin coax-kaapelia, ja sen sähköinen mitta on neljännesaallon pituinen. Kaapelin nopeuskerroin tulee olla vähintään 0,76, sillä muuten syöttölinjat ovat liian lyhyitä kuljettaakseen antennisignaalin oikeassa vaiheessa releohjainkortin ja vertikaaliantennien välillä. Jos tätä nopeuskerrointa ei pysty noudattamaan, niin kaapeloinnin tulee olla $\frac{3}{4}$ lambda pituudesta.

Hamshackilta tulevan syöttökaapelin impedanssi eli vaihtovirtavastus on 50 ohmia. Syöttökaapelin pituus ei vaikuta antennin perustoimintaan millään tavalla. Jos syöttökaapeli on todella pitkä, voi siinä itsessään muodostua tehohäviöitä. (Woods 2015.)

RF-balunien tarkoitus on estää antennien syöttökaapeleiden konsentristen johtimien eli ulkovaippojen säteily, jolloin antennikokonaisuuden säteilykuvio on optimaalinen. (Steyer 2021.)

Balun voidaan valmistaa kieputtamalla coax-kaapelia kiepille tai käyttämällä ferriittejä, jotka muodostavat induktiivisen suojan kaapelin ympärille. Induktiivinen vaihtovirtaresistanssi kuristaa virran kaapelin ulkosivuille. Virtabalun on asennettava lähelle antennin syöttöpistettä, koska induktiivisen reaktanssin ja impedanssin yhteinen suhde on silloin optimaalisin. (Kramer 2015.)

3.3 Koaksiaalikaapeleiden ominaisuudet ja impedanssit

Koaksiaalikaapeleissa on sähköjohtimiin ja eristysmateriaaleihin keskittyvät kerrokset. Tällä rakenteella pystytään varmistamaan, että suurtaajuussignaalit pysyvät kaapelin sisällä ja estävät myös ulkopuolisia häiritseviä signaaleja menemästä kaapelin sisälle. (Kellomäki 2004.)

Koaksiaalikaapelin keskimäinen johdinkerros on ohutta johtavaa johdinta, joka on joko kiinteää tai punottua kuparia. Johdinta ympäröi dielektrinen kerros, joka koostuu eristävästä materiaalista, jolla on hyvin tarkkaan määritellyt sähköiset ominaisuudet. Suojakerros ympäröi dielektrisen kerroksen metallifoliolla, punotulla kupariverkolla tai molemmilla. Nämä auttavat suojaamaan sähkömagneettiselta häiriöltä. Kokonaisuudessaan kaikki tämä on eristävän vaippakuoren sisällä. Koaksiaalikaapelin ulompi metallinen suojakerros on yleensä maadoitettu liittimissä molemmissa päissä signaalien suojaamiseksi ja häiriösignaalien estämiseksi. Koaksiaalikaapeleiden valinta tapahtuu kaapeleiden sähköisten ominaisuuksien, sekä käyttötarkoitusten mukaan, jotka ovat ratkaisevia hyvän suorituskyvyn kannalta. Syöttökaapelina on hyvä käyttää ominaisimpedanssiltaan 50-ohmista RG213-koaksiaalikaapelia tai vastaavaa sen suuren tehonsiirtokyvyn takia. Vaiheistuksen toteuttamisessa on hyvä käyttää ominaisimpedanssiltaan 75-ohmista RG11-koaksiaalikaapelia tai vastaavaa. (Kraus 1988, 24,16–20.)

4 RF-LIITTIMET

Koaksiaalinen RF-liitin (suurtaajuusliitin) on sähköinen liitin, joka on suunniteltu toimimaan radiotaajuuksilla. Yleensä RF-liitintä käytetään koaksiaalikaapeleiden kanssa, ja ne on suunniteltu säilyttämään koaksiaalikaapelin rakenteen tarjoama suojaus. RF-liittimissä on myös hyvin paljon laatueroja. Paremmat mallit myös minimoivat siirtojohtoon impedanssin muutoksen liittäessä, jotta signaalin heijastuminen ja tehohäviöt vähenevät. Taajuuden kasvaessa siirtojohtovaikutukset tulevat yhä tärkeämmiksi, ja liittimien pienet impedanssin vaihtelut aiheuttavat signaalin heijastumisen sen sijaan, että se kulkisi liittimen läpi. RF-liittimeen ei saa päästää ylimääräisiä signaaleja piirin sähkömagneettisten häiriöiden tai kapasitiivisen kuorman kautta. Mekaanisesti RF-liittimissä on yleensä kierteet kiinnitysmekanismina, joka mahdollistaa pienohmisen sähköisen kosketuksen ja säästää samalla liittimen kulutus pintaa. Yleisimpiä RF-liitintyyppäjä ovat N, UHF, BNC ja F. Näitä käytetään televisiovastaanotissa, radioissa, kamerajärjestelmissä, wifi-laitteissa, joissa on irrotettavat antennit ja mittaussaitteissa, joissa käytetään radiotaajuuksia. (Kraus 1988, 24.20–25.)

5 ALUMIINIMATERIAALIT ANTENNEILLE

Alumiini on useimmissa antenniratkaisuissa paras materiaali. Alumiinin tiheys on noin kolmasosa teräksen tai kuparin tiheydestä, joten se on kevyempää käsitellä ja helppoa työstää. Vaikka teräs on alumiinia halvempaa, painaa se paljon enemmän eikä ole järkevä käyttömateriaali tässä yhteydessä. Alumiini johtaa sähköä terästä paremmin, kestää kuparia paremmin korroosiota ja on halvempi kuin monet muut metallit. Alumiinista ei saa välttämättä johtavuudeltaan parasta antennia, mutta sen monet ominaisuudet huomioiden se on paras kompromissimateriaali.

Alumiinimateriaaleja on montaa erilaista riippuen, mistä seoksesta se on valmistettu. Puhtaalla alumiinilla ei ole suurta vetolujuutta. Seosaineiden, kuten mangaanin, piin, kuparin ja magnesiumin, lisääminen lisää ja parantaa alumiinin lujuusominaisuuksia. Alumiini soveltuu myös hyvin kylmiin olosuhteisiin, koska sen vetolujuus kasvaa lämpötilan laskiessa. Alumiini kestää korroosiota myös melko hyvin sen pinnalle muodostuvan alumiinioksidikerroksen avulla, kun alumiini on altistunut ilmalle. Alumiinin sähköjohtavuus on kuparin ohella

riittävän suuri, jotta sitä voidaan käyttää sähköjohtimena. Paras alumiinimateriaali antennin rakentamiseen on sellainen, jolla on hyvä korroosion sietokyky, korkea lujuuden kesto ja sitä on helppo hitsata. (Kraus, 1988, 21.6–10.)

6 RELEOHJAINKORTTI VAIHEISTETULLE ANTENNISIGNAALILLE

Releohjainkortti (kuva 1) on sijoitettu säänkestävään metalliseen koteloon, jossa on liitännät antennille sekä tulevalle RF-syöttöjohdolle ja ohjainkaapelille. Releohjainkortissa on kolme eri relettä, ja niiden avulla saadaan antennille valittua neljä eri säteilysuuntaa, jotka toimivat sekä lähetettäessä että vastaanottaessa. Releohjainkortin tarkoitus on vaiheistaa neljä eri vertikaali-antennia yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi. Vaiheistuksen toteuttamista varten releohjainkorttiin on kytketty kaksi toroidimuuntajaa.

Dummy load eli keinokuorma hävittää takaisin heijastuvan tehon lämmöksi, kun antenni ei ole täysin vireessä. Riippuen keinokuorman tehonkestosta, voi ulkoisesti rakennettu keinokuorma käsitellä lyhytaikaisia tehopiikkejä jopa noin 250 wattiin saakka, mutta 50–70 watin vakiokuormaa ei tulisi kuitenkaan ylittää vastuksen ylikuumentumisen takia. Keinokuorman vastuksen suuruus on 50 ohmia ja sen tehonkesto pitää mitoittaa riittäväksi. (Kramer 2015, 6.4.)



Kuva 1. Releohjainkortti ja keinokuorma

7 ANTENNISUUNNAN OHJAUSLAITE

Antennisuunnan ohjauslaite (kuva 2) sijaitsee siellä, missä antennia käyttävä radiokin tulee olemaan, eli hamshackissa. Ohjauslaitteeseen on tyypillisesti kirjattu käytettävät ilmansuunnat, eli North West (luode), North East (koillinen), South East (kaakko) ja South West (lounas). Ohjauslaitteessa tyypillisesti käytetään englanninkielisiä lyhenteitä, eli NW, NE, SE ja SW. Ohjauslaitteessa on neliasentoinen kytkin, jolla pystytään valitsemaan haluttu antennisuunta. Jokaiselle antennisuunnalle on oma led-merkkivalo, joka kertoo käytössä olevan ilmansuunnan. Antennisuunnan ohjauslaite on rakennettu siten, että kytkimen asento 2 on oletusasento. Eli kun ohjauslaite on kytketty pois päältä, antenni säteilee automaattisesti siihen suuntaan. (Comtek Systems 2016, 7.)



Kuva 2. Antennisuunnan ohjauslaite

8 RELEET

Rele on sähköisesti toimiva sähkömekaaninen kytkin. 4SQ-antennissa releillä pystytään ohjaamaan yhtä tai useampaa antennisuuntaa samanaikaisesti. Releitä käytetään, kun sähköistä virtapiiriä on ohjattava pienitehoisella jännitteellä. Perinteisesti releissä käytetään sähkömagneettia koskettimien sulkemiseen tai avaamiseen, mutta myös muita toimintaperiaatteita on olemassa, kuten puolijohdereleet ja tyhjiöreleet. Suurempiin virtapiireihin tarkoitettuja releitä kutsutaan puolestaan kontaktoreiksi, mutta tämän antennin virrat pysyvät hyvin maltillisina ja sen vuoksi kontaktoreita ei tarvitse käyttää. Releiden valmistajia on olemassa monia, esimerkiksi ABB, Bosch, Finder, Releco ja Schneider.

8.1 Pienjännitereleet

Pienjännitereleet antenniohjainkortille valitaan seuraavien kriteerien mukaan. Releen käämijännitteen tulee olla 12VDC. Lisäksi pitää ottaa huomioon releiden kosketinkärkien jännitekestoisuus, sekä läpi kulkevan virran määrä ja läpäistävän tehon suuruus.

8.2 Tyhjiöreleet

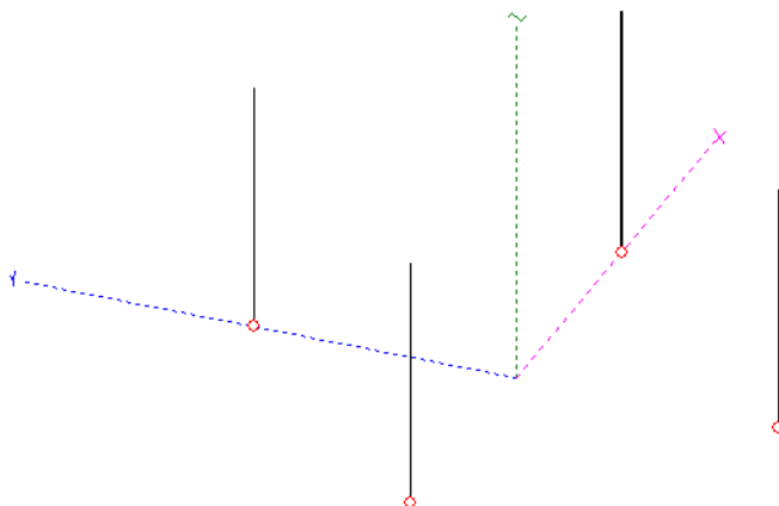
Tyhjiöreleen sisällä ei ole juurikaan ilmaa, ja täten siellä ei pääse muodostumaan niin helposti läpilyöntiä. Tyhjiöreleitä käytetään useasti antennitekniikassa niiden suuremman kytkentäjännitekestoisuuden takia. Kuitenkaan tässä antennissa ei ollut tarvetta käyttää tyhjiöreleitä tai alipainereleitä (vacuum).

9 ANTENNINSUUNNITTELUOHJELMA MMANA-GAL

MMANA:n suunnitteli alun perin japanilainen radioamatööri Makoto Mori. Ohjelman julkaisun jälkeen kaksi saksalaista radioamatööriä ottivat sen itselleen kehitettäväksi.

MMANA-GAL käyttää momenttimenetelmää, ja se soveltuu erityisesti suoravivaisista johtimista ilman maatasoa valmistetuille antenneille, kuten yagi-antenneille tai dipoleille. Ohjelmalla kuitenkin pystyy suunnittelemaan myös maataason omaavan antennin, kuten tässä työssä käsiteltävän 4-square-antennin (kuva 3). (Crowston s.a.)

Ensimmäiset antennien laskentaohjelmat kehitettiin jo 80-luvulla, mutta ne olivat hyvin alkeellisia. Sen aikaisilla ohjelmilla pystyttiin laskemaan vain tiettyjen kaavojen avulla ja vain tiettyntyyppisiä antenneja. Kun antennin suunnitteluohjelmissa ruvettiin käyttämään moniulotteisia matriisimenetelmiä, pystyttiin laskemista helpottamaan huomattavasti. Tämän avulla nykyaikaisilla antenninsuunnitteluohjelmilla jokainen antennielementti jaetaan osiin ja jokaista antennin osaa pystytään käsittelemään omana osiona. Esimerkiksi tässä kyseisessä 4-square-antennissa jokaisen antennielementin pituutta ja paksuutta pystytään muuttamaan erikseen. (Amosov 2021, 1–2.)



Kuva 3. 4-Square-antenni simuloituna MMANA-GAL-ohjelmalla

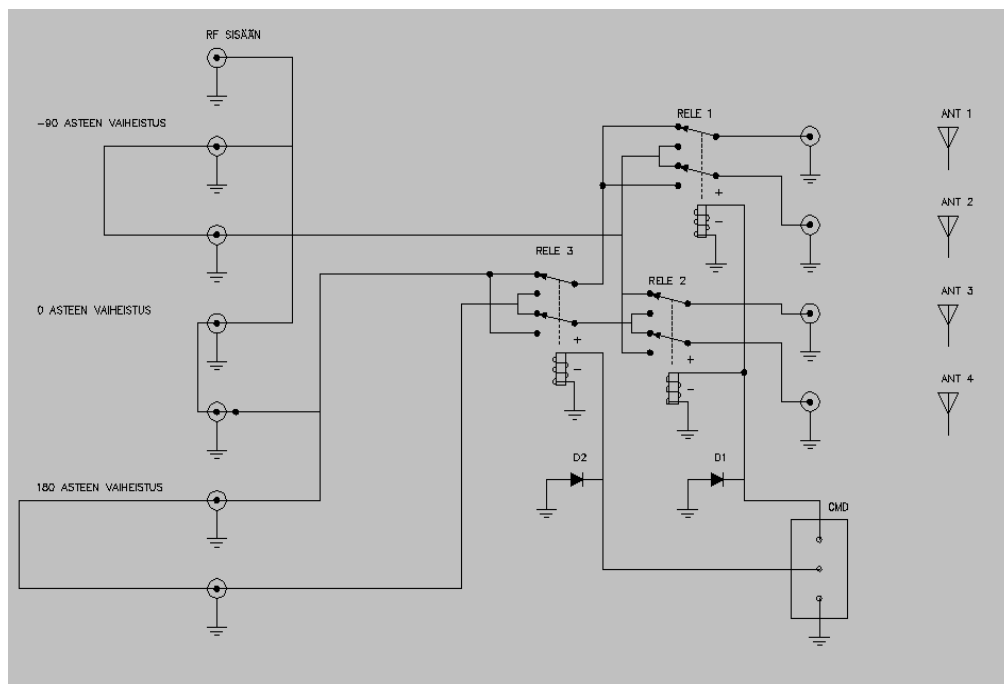
10 RF-VAIHEISTUS

RF-vaiheistus toteutetaan joko koaksiaalikaapelia tai toroidimuuntajia käyttämällä. Koaksiaalikaapelilla toteutettuna vaiheistuksen rakentaminen tulee edullisemmaksi kuin toroidimuuntajilla. Toroidimuuntajilla toteutetussa antennissa sen ulkonäkö pysyy siistimpänä, koska maahan ei tule koaksiaalikaapelilla tehtäviä signaalin viivästyslenkkejä. Vaiheistuksen toteuttamiseen tarvitaan vähintään kaksi vertikaaliantennia, jotta käyttöön muodostuu suunta-antenni. Tässä antennissa vaiheistus toteutetaan syöttämällä teho neljälle eri antennielementille samaan aikaan ja viivästämällä radiosignaalia vaiheistuslinjojen kytkentää muuttamalla. Säteilijäelementeistä lähtevät signaalit yhdistyvät ja samalla muodostuu antennin säteilykuvio sen ympärille. Säteilykuvio muodostuu elementtien etäisyyden ja signaalien vaihe-eron perusteella. (Salo 1988, 101–102.)

Elementtien optimaalinen välimatka on myös tärkeä osa antennin toimivuutta. Antennin pitää olla neliö, jotta se toimii sille tarkoitetulla tavalla. Jos antennin kokoa väärin esimerkiksi neljäkkään tai suunnikkaan muotoiseksi, ei sen toiminta ole enää läheskään yhtä tehokasta. 4-square-antennin pääsäteilysuunta on kulmasta kulmaan sen halkaisijaa pitkin, joten jos antenni on kasattu väärin, saadaan aikaan vääränlaisia suunta- ja säteilykuvioita kuhunkin suuntaan. (Rauch Jr 2008.)

10.1 Koaksiaalikaapeleilla toteutettuna

Koaksiaalikaapeleilla toteutettuna (kuva 4) tarvitaan kolme koaksiaalilenkkiä, jotka ovat kaikki eripituisia. Ensimmäisellä kaapelilla toteutetaan 0-asteen vaiheistus, ja täten se on lyhyin kaapeleista. Toisella koaksiaalilenkillä toteutetaan 90 asteen vaiheistus, jonka pituus lasketaan seuraavasti. 300 (Radioaal- lon nopeus tyhjiössä) jaettuna $14\text{MHz} = 21,43$ metriä. Tämä jaetaan neljällä, koska 90 asteen vaiheistus on neljäsosa 360 asteesta. Tulokseksi saadaan 5,36 metriä, joka kerrotaan RG213 koaksiaalikaapelin nopeuskertoimella 0,66 ja vaiheistuslinjan pituudeksi saadaan 3,54 metriä. Viimeinen kaapeleista on pisin, jolla toteutetaan 180 asteen vaiheistus. Samaa laskukaavaa noudattaen vaiheistuslinjan pituudeksi saadaan 7,07 metriä.

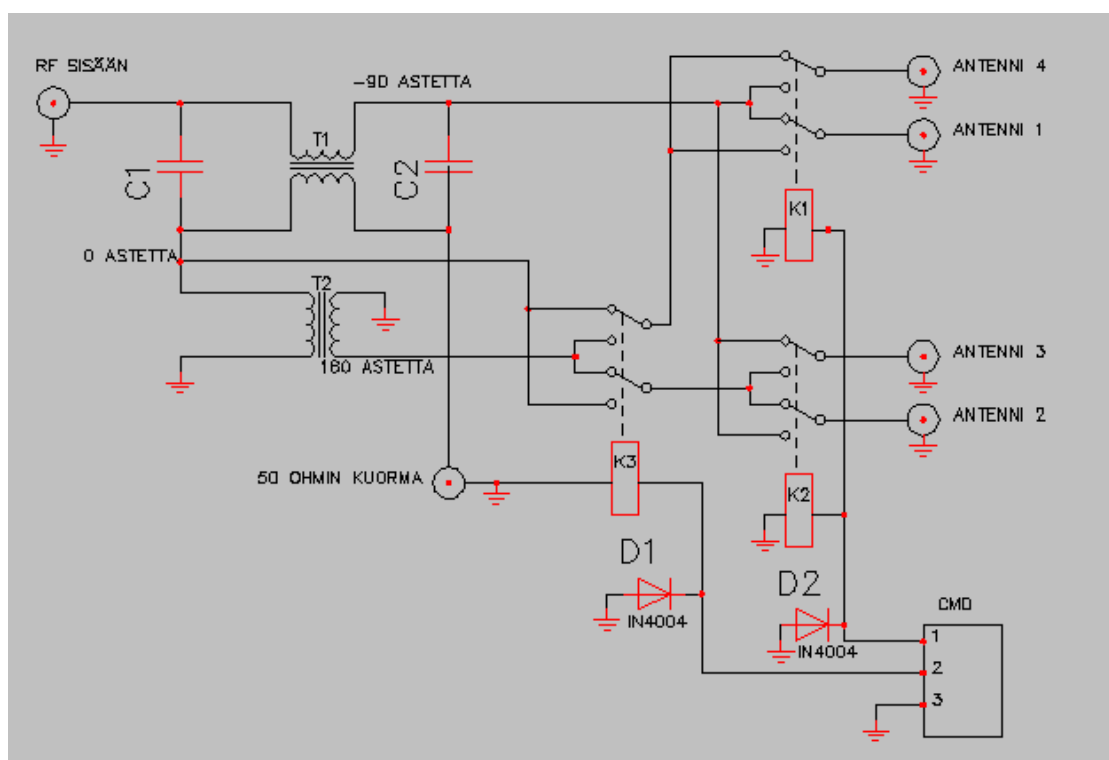


Kuva 4. Vaiheistus toteutettuna coax-kaapelilla

10.2 Toroidimuuntajilla toteutettuna

Toroidimuuntajaa koskee kaikki tyypilliset muuntajan ominaisuudet, vaikka sillä on erilaisia ominaisuuksia ja etuja. Toroidimuuntajalla on pienempi vuoto- virta kuin tavallisella muuntajalla. Toroidimuuntajalla tulee lämpöhäviöitä huo-

mattavasti vähemmän, ja se on normaalia muuntajaa tehokkaampi. Toroidimuuntajan ensiö- ja tosiokäämitykset on käämitetty koko toroidisydämen pinnalle, ja ne ovat erotettu eristysmateriaalilla. Tällä tavoin saadaan minimoitua magneettivuon vuotaminen. Magneettivuo syntyy, kun magneetikentän linjat kulkevat johtimien läpi. Näistä syistä toroidisydäntä pidetään ihanteellisena muuntajasydämen rakenteena. Kooltaan toroidimuuntaja on pienempi verrattuna tavalliseen muuntajaan. Vaiheistuksen toteuttamiseen (kuva 5) tarvitaan kaksi toroidimuuntajaa, jotka ovat -90 asteen ja 180 asteen vaiheessa toisiinsa nähden. Tämän tarkoitus ja hyöty on se, että vaiheistus toimii niin kuin se on suunniteltu ja todettu parhaiten toimivaksi. (Toroidal Transformers s.a.)



Kuva 5. Vaiheistus toteutettuna toroidimuuntajilla

11 VAIHEISTUKSEN EDUT

Vaiheistuksen etuna on suuntiminen antennilla neljään eri suuntaan, mitä ei puolestaan tavallisella yksittäisellä vertikaaliantennilla pysty tekemään. Tavallinen vertikaaliantenni säteilee ympärilleen 360 astetta samalla tehomäärällä. Vaiheistetun vertikaaliantennin muita etuja ovat sen matala lähtökulma, rakenne ja sen sijainti lähellä maanpintaa. Lisäksi yksi parhaista eduista on antennin nopea suuntiminen releiden avulla. Tavalliset radioamatöörimastot

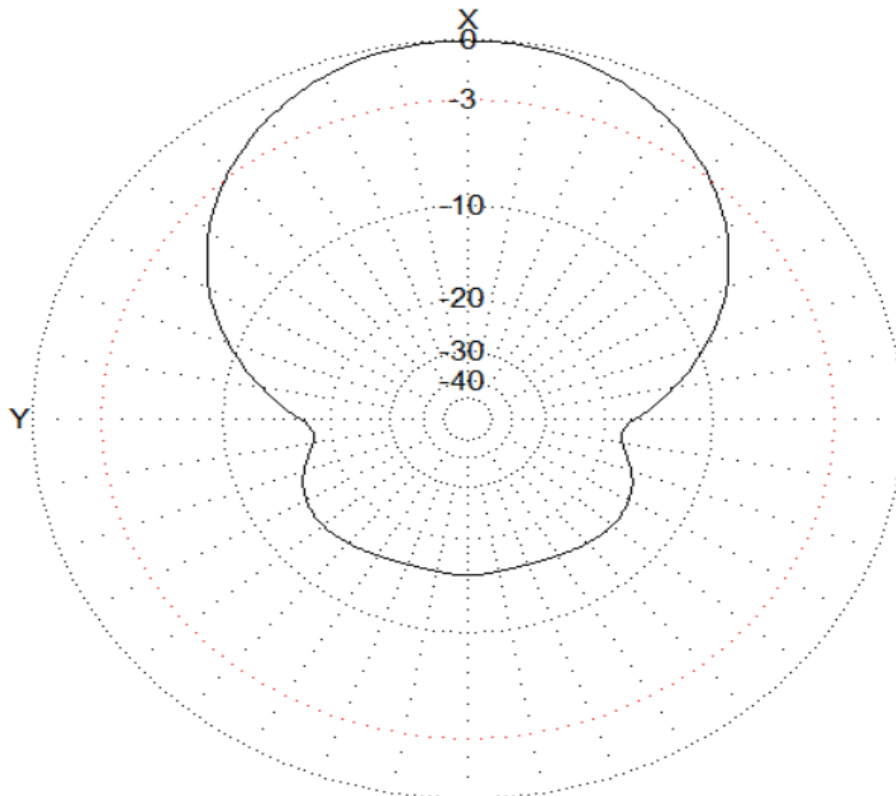
yagi-antenneineen pystytään kyllä myös kääntämään moottorin avulla, mutta se ei ole läheskään yhtä nopeaa. Kääntyvässä mastossa olevalla yagi-antennilla pystytään suuntimaan kaikkiin ilmansuuntiin, mutta vaiheistetulla vertikaaliantenniryhmällä vain neljään eri suuntaan. Radioamatööri mastot yagi-antenneineen tulevat myös huomattavasti kalliimmiksi, kun maassa oleva vaiheistettu vertikaaliantenniryhmä. Vaiheistettua vertikaaliantenniryhmää ei voi kuitenkaan rakentaa aivan mihin vain, sen suuren pinta-alan takia. (Salo 1988, 101.)

Ilmansuuntina vaiheistetussa vertikaaliantennissa käytetään yleensä koillista, kaakkoa, lounasta ja luodetta. Suomesta katsottuna koillisesta tulee vastaan muun muassa Kaukoit ja Japani, jossa radioharrastajia on miljoonia. Halutesasi pitää radioyhteyksiä esimerkiksi Japaniin on sinulla valittuna NE-suunta eli koillinen. Tällöin vastaanotat koillisesta tulevia signaaleja parhaiten, etkä esimerkiksi luoteesta tulevia pohjoisamerikkalaisten signaaleja. Kaakon suunnalta puolestaan avautuu mahdollisuus saada yhteyksiä aina Australian ja Uuteen-Seelantiin saakka. Lounaan suunnassa on puolestaan lähes koko Eurooppa ja Eteläinen osa Etelä-Amerikasta. Luoteessa vastaan tulee puolestaan Pohjois-Amerikka, missä radioharrastajia on myös satoja tuhansia. Jos suuntiminen tapahtuisi pääilmansuuntiimme, niin vasta-asemien määrä putoaisi rutkasti, koska joko niissä suunnissa ei ole tarpeeksi harrastajia tai sinne osuu paljon merialueita.

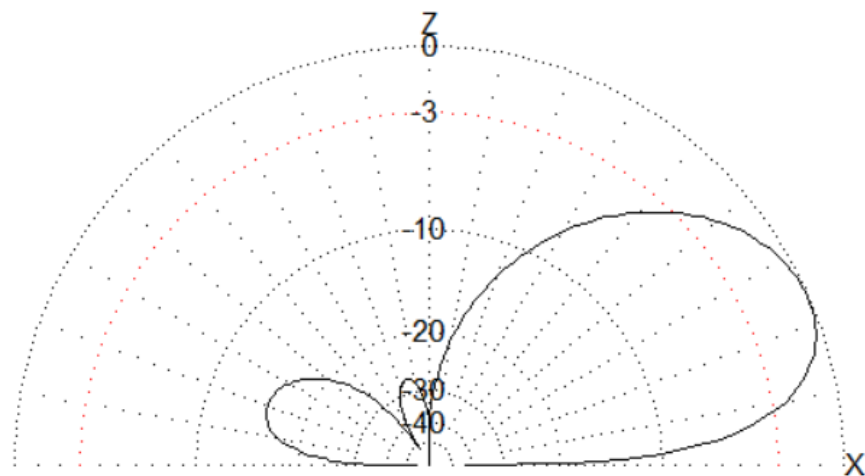
11.1 Antennin säteilykuvio

Säteilykuvio muodostuu antennin ympärille neljään eri suuntaan riippuen, mitä suuntaa milloinkin halutaan käyttää. Säteilykuvioista tulee suunta-antennilla vähän pallomainen kuvio, josta pystytään havainnollistamaan antennin toimintaa. Suunta-antennia tehdessä ja suunnitellessa on myös tärkeää pitää huolta hyvästä etu-takasuhteesta, jotta antennilla suuntiminen on ylipäätään mahdollista ja toimivaa. Jos käytössä olisi vain yksi vertikaaliantenni, sen säteilykuvio olisi täydellinen ympyrä. (Lawbuary 2011.)

Alla on näkyvissä havainnollistavia kuvia (kuva 6) (kuva 7) (kuva 8) vaiheistetun vertikaaliantenniryhmän säteily- ja suuntakuvioista, jotka on MMANA-GAL-ohjelmalla mallinnettu.

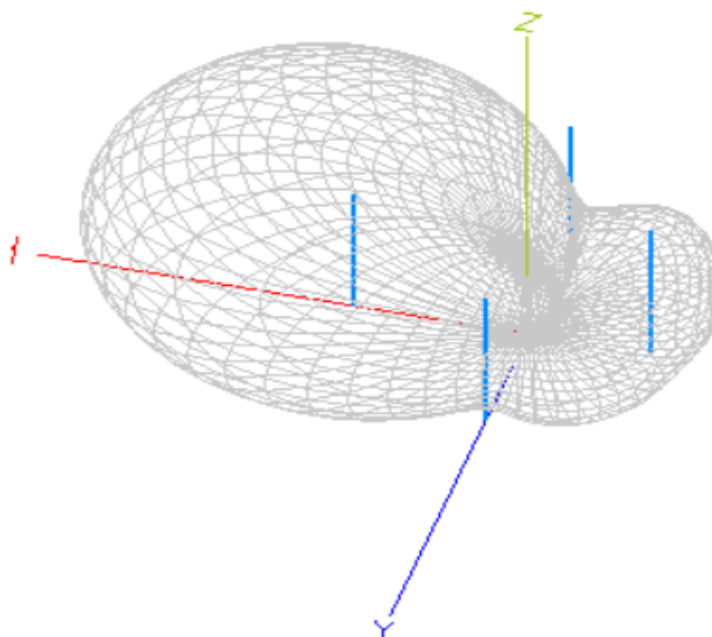


Kuva 6. Antennin säteilykuvio yläpuolelta katsottuna



G_a : 6.7 dBi = 0 dB (Vertical polarization)
 F/B: 14.34 dB; Rear: Azim. 120 deg, Elev. 60 deg
 Freq: 14.050 MHz
 Z : 38.702 - j11.372 Ohm
 SWR: 1.4 (50.0 Ohm),
 Elev: 24.1 deg (Real GND :0.00 m height)

Kuva 7. Antennin tehokkuus ja suuntakuvio sivulta katsottuna



Kuva 8. Antenninsuuntakuvio 3D-mallinnettuna

11.2 Desibeli

Desibeli on suhteellinen mittayksikkö, joka vastaa yhden belin kymmenesosaa (B). Se ilmaisee logaritmisella asteikolla kahden tehon tai kahden juuritehon arvon suhdetta. Desibeliasteikko on logaritminen, joten tehossa 10 desibeliä on 10-kertainen teho. Radioamatööriradioissa on signaalimittari, jossa on numeerinen S-yksikkönäyttö, jossa yksi S-yksikkö on 6 desibeliä.

12 MAAN JOHTAVUUS JA RADIAALILANKOJEN MERKITYS

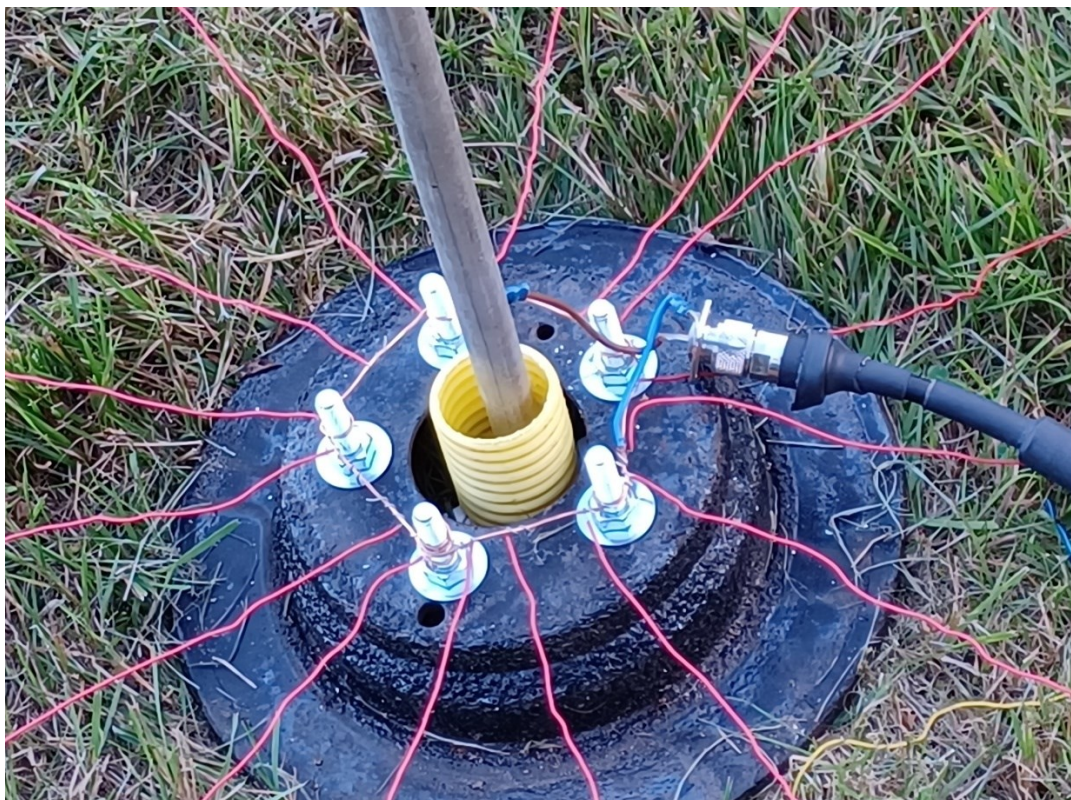
Maaperän ominaisuuksiin kuuluu sen johtokyky, jonka tässä tapauksessa muodostavat radioaallon näkökulmasta sen efektiivinen johtavuus ja suhteellinen permittiivisyys. Nämä kaksi vaikuttavat hyvin monimutkaisella tavalla sekä sähkö- ja magneettikentän kehittymiseen ja käyttäytymiseen, että siitä indikoitavaan voimakkuuteen. Sähkö- ja magneettikentän syntyyn vaikuttaa lähetettävän signaalin heijastuskertoimeen liittyvät maahäviöt ja maadoitusresistanssissa syntyvät häviöt. (Heinonen 2004, 7–12.)

Maan johtavuutta on tutkittu vuosien ajan hyvin perusteellisesti. Maan johtavuutta kutsutaan elektrolyyttiseksi ilmiöksi. Tämä tarkoittaa sitä, että se on en-

nen kaikkea riippuvainen maaperän kosteudesta. Lisäksi maaperän johtavuuteen vaikuttaa maaperän tyyppi, veden suolojen määrä ja koostumus, materiaali, lämpötila, kosteus, tiheys ja paine. (Heikkinen 1988, 20–22.)

Hyvän radiaali järjestelmän käyttö on ensiarvoisen tärkeää kaikissa suorituskykyisissä maadoitetuissa pystysuorissa antennijärjestelmissä. Radiaalit toimivat ikään kuin suojana, joka suojaa säteilyä radiaalien alapuolella olevasta häviöllisestä maasta. Radiaalit vaikuttavat suuresti maahan asennetun antenniryhmän säteilytehokkuuteen. Useimmissa tapauksissa antennin paras suorituskyky saavutetaan jo 20 tai 30 radiaalilla. Siinä vaiheessa järjestelmäkentän voimakkuus lakkaa kasvamasta nopeasti radiaaleja lisättäessä. 32 radiaalia on yleensä hyvin tavanomainen määrä yhdelle antennielementille, kun otetaan huomioon kustannusten ja tehokkuuden välinen suhde.

PVC-eristettyä kuparilankaa suositellaan maaradiaalien käyttöön parhaiden tulosten saavuttamiseksi. Radiaali johdot ovat tyypillisesti $\frac{1}{4}$ aallonpituudesta, mutta eivät kaikki. Koska neljä pystysuoraa antennia on sijoitettu $\frac{1}{4}$ aallonpituuden etäisyydellä toisistaan, säteittäiset kentät risteävät keskenään. Kohdassa, jossa säteittäiset kentät risteävät, ne voidaan leikata ja liittää yhteen vierekkäisten säteittäisten antennien risteävillä säteittäisjohtimilla. Radiaalit tulee sijoittaa mahdollisimman symmetrisesti suoraan syöttöpisteestä ja mahdollisimman tasaisilla välimatkoilla, kunkin pystyantennin ympärille. Radiaalilankojen teho heikkenee huomattavasti, jos langat ovat rinnakkain tai nipussa. (Comtek systems 2016, 4–5.)



Kuva 9. Maaradiaalit kiinnitetty toisiinsa ja maahan

Toteutin maaradiaalien rakentamisen kuvan osoittamalla tavalla (kuva 9). Käytin vanhan henkilöauton jarrulevyjä maatasen rakentamiseen ja samalla vertikaaliantennielementit tulivat juuri oikealle kohdalle keskelle radiaalijärjestelmää. Jokaiselle vertikaaliantennille asensin 16 maaradiaalia, joten yhteensä niitä tuli käyttöön 64 kappaletta. Radiaalilankojen tuplaaminen ei tuonut mielestäni enää merkittävää parannusta, joten päätin rakentaa antennin näin. Parannusta tuli noin 0,55 desibelin verran eli vain noin 0,09 S-yksikköä.

12.1 Maahäviöt

Maahäviöitä pystytään vähentämään radiaalilankoja lisäämällä sekä valmistamalla antenni mahdollisimman tehokkaaksi, jolloin SWR on lähes 1:1. Jotta maahäviöitä ei syntyisi, luodaan sille keinotekoinen maa radiaalilangoista. Antennin toimiessa varmasti oikein ja riittävän tehokkaasti pitää jokaiselle antennielementille asentaa vähintään 16 maaradiaalia (suositus 32). Jos jokaiselle vertikaaliantennielementille asennettaisiin vain neljä maaradiaalia, olisi antennin häviöt huonon maatasen takia yli 80 %. (Cederlund 1988, 94.)

12.2 Antenni kalliolla

Kallio ei ole paras alusta antennille, koska kallio ei heijasta radioaaltoja niin hyvin kuin muut materiaalit. Kalliolla on hyvä käyttää enemmän radiaalilankoja, koska antenni ei saa maasta sähköistä vastapainoa toiminnalleen yhtä hyvin. Kalliot ja kuivat soramaat ovat johtavuudeltaan heikoimpia. (Heikkinen 1988, 21.)

12.3 Antenni savipellolla

Tavallisella savipellolla (kuva 10), puutarhassa tai notkelmassa on aina vähän kosteutta maaperässä, mikä auttaa radioaaltojen heijastukseen. Näissä ympäristöissä ei ole myöskään pakko olla niin paljon radiaalilankoja käytössä, koska maan kosteus auttaa antennia sen toiminnassa. (Heikkinen 1988, 21.)



Kuva 10. Antenni käyttövalmiina savipellolla

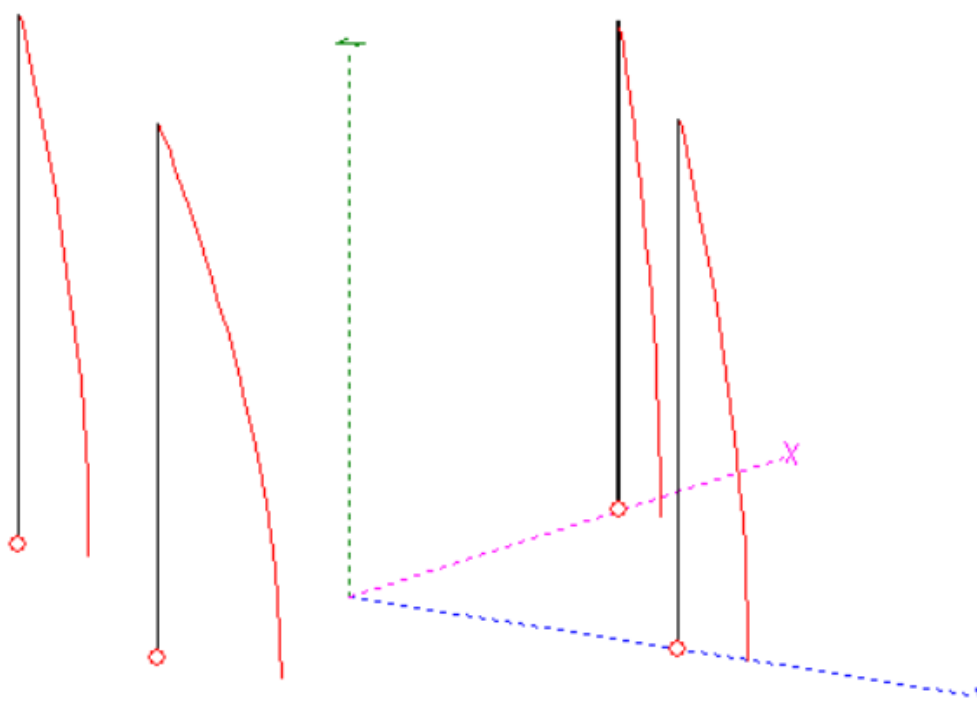
12.4 Antenni meren rannalla

Meren pinta toimii erittäin hyvänä heijastajana radioaalloille, mikä aiheuttaa sen, että radioaalto heijastuu helpommin takaisin ionosfääriin. Meren pinnalla olevista vesiaalloista radioaalto voi heijastua myös outoihin suuntiin, joka saa aikaan yhteyksiä ei valittuun antenninsuuntaan. Meren ranta on todistettavasti

paras paikka antennille, koska merenpinta sähköisenä maana on todella hyvä. Tämän ovat todistaneet useat DX-retkeilijät, jotka ovat kaukaisilta meren ympäröimillä saarilla pystyneet hyvin pienillä antennilla ja tehoilla pitämään yhteyksiä ympäri maailmaa. (Heikkinen 1988, 21.)

13 JÄNNITE- JA VIRTAKENTÄN MUODOSTUMINEN ANTENNIN YMPÄRILLE

Jännite- ja virtakenttä muodostuu vaiheistettujen vertikaaliantennien ympärille (kuva 11) siten, että suurin osa virrasta on antennielementin alapäässä ja suurin osa jännitteestä sijaitsee puolestaan antennin yläosassa. Tästä voidaan havaita ja päätellä se, että jännitteen maksimiarvo saavutetaan aivan antennielementin yläosassa. Tämä antaa antennikokonaisuudelle alhaisen syöttöimpedanssin. Tavallisesti syöttöimpedanssi asettuu noin 20 ohmiin. (Poole 2021.)



Kuva 11. Virtakentän muodostuminen vertikaaliantennien ympärille

14 SUURTAAJUSSÄHKÖN ILMIÖT

Lähetävä antenni muuntaa lähetävältä radiolta tulevan suurtaajuisen vaihtosähkön sähkömagneettiseksi säteilyksi, jolla se etenee ilmateitse vastaanotavan antennin kautta radiovastaanottimelle. Vastaanottavassa antennissa

sähkömagneettinen säteily aiheuttaa antenniin sähkömotorisen voiman. Antennin tyypillä ja mitoituksella pystytään vaikuttamaan todella paljon siihen, millä tavoin antenni toimii. Lähetyksen aikana antenniin koskeminen aiheuttaa sähköiskun. Jos lähetyksen aikana onnistuu itseensä saamaan suurtaajuussähköä, tuntuu se polttavalta ja se voi jättää kosketusalueelle palovamman. Suurtaajuussähköllä on taipumus yrittää poistua johtimesta erilaisten heijastusten avulla, jonka takia kaapeleissa on useita suojakerroksia pitämässä signaalit sen sisällä. HF-taajuusalue on 3–30 MHz ja tämä antenni on suunniteltu toimimaan 14 megahertsillä (20 metrillä).

15 OPEROINTI ANTENNILLA KÄYTÄNNÖSSÄ

Operointi tapahtuu radioamatöörikäyttöön tarkoitetulla radiolla. Tunnetuimpia radion valmistajia harrastepiireissä on Yaesu, Icom ja Kenwood. Radiosta valitaan antennille tarkoitettu 14 Mhz-taajuusalue ja sen jälkeen haluttu lähetelaji. Radio saa virtansa 12/24 voltin virtalähteestä. Radioamatööriharrastuksessa lähetelajeja on muutamia erilaisia. Tällä hetkellä yleisimmät lähetelajit ovat CW (sähkötytys), SSB (puhe) ja Digi (monia erilaisia lähetelajeja mm: FT4, FT8, RTTY jne.). Antennin suunnanvalitsimilla valitaan mihin suuntaan radioyhteyksiä halutaan pitää pääsääntöisesti. Erilaisten heijastusten ja maastoesteiden takia yhteyksiä voi tulla myös ei valitusta suunnasta. Antenni matalan lähtökulman vuoksi sillä on optimaalisinta pitää DX-, eli kaukoyhteyksiä.

16 YHTEENVETO

Opinnäytetyön teko onnistui hyvin ilman suurempia ongelmia. Viime kesänä kerkesin tehdä fyysisen osuuden työstä ja sain dokumentoitua eri työvaiheita. Antennilla suuntiminen onnistui hyvin ja suuntaa vaihtamalla pystyttiin helposti havaitsemaan eri suunnista tulevien signaalien tasoerot.

Aikaa antennin kasaamisessa alusta käyttövalmiiksi meni muutamia tunteja. Aluksi oli mitattava ja rakennettava hahmotelma täydellisestä ja oikean kokoisesta neliöstä. Rakensin naruista ja köysistä selkeän, juuri oikean kokoisena neliön, jonka avulla antennielementit saatiin tismalleen oikeille kohdille ja antenni toimi sille suunnitellulla tavalla. Antennielementtien pystytyksessä minulla oli apuna harjateräksen pätkiä, joihin sain sidottua antennielementit hetkellisesti kiinni, jotta pääsin sitomaan harusnarut niille tarkoitetuille paikoille.

Yhdelle antennielementille riittää kolme harusnarua, jotka ovat kiinnitetty 120 asteen välein toisistaan. Harusnarut ovat sidottu antennielementeissä noin 3 metrin korkeudelle ja niiden pituudet olivat noin 6 metriä. Harusnarujen toisen päään sidoin harjateräkseen, jotka olin lyönyt vasaralla valmiiksi oikeille kohdille savipeltoon. Antennielementti ei myöskään saa olla suoraan maassa kiinni, koska muuten lähetettävä teho menisi suoraan maahan. Rakensin muoviputkesta pienet eristetelineet, joihin antennielementit sai hyvin samalla pujoitettu.

Osallistuin myös elokuussa 2022 Ahvenanmaan Lemlandissa radiopeditiolle. Tuolla reissulla myös kyseinen antenni oli mukana, ja sillä pidettiin reilut 1000 radioyhteyttä ympäri maailmaa. Antenni kasattiin Ahvenanmaalla kallion päälle lähelle merenrantaa. Eli antenni oli aivan erilaisessa ympäristössä, kuin normaalisti maaseudulla savipellolla. Antennilla oli täysin vapaa ja suora näköyhteys lounaaseen päin merelle sekä Eurooppaan. Valtaosa antennilla pidetyistä radioyhteyksistä meni tuolloin juuri Eurooppaan sen sijainnin vuoksi. Toki muistakin ilmansuunnista tuli radioyhteyksiä, mutta ei niin paljoa. Kaukaisimpia valtioita, joihin antennilla on pidetty radioyhteys, ovat Australia, Uusi-Seelanti ja Chile.

LÄHTEET

Amosov, A. 2021. Special software application for antenna modelling in mechanical engineering. Journal of Physics: Conference series. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/4/042031/pdf> [viitattu 7.3.2023].

Crowston, K. s.a. MMANA-GAL. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ham-soft.ca/pages/mmana-gal.php> [viitattu 8.3.2023].

Egloff, P. 2022. 4 square vertical system. TK5EP's home. WWW-dokumentti Saatavissa: https://www.egloff.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=136&lang=en&fbclid=IwAR0YDyctQ0ziK4Yw71PV9utZjzDeQefgvYEJ8HKFC3NoWqRlqmMNFpkqEHQ [viitattu 11.1.2023].

Four-Square Arrays. s.a. COMTEK SYSTEMS. 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://static.dxengineering.com/global/images/instructions/com-acb-80-a.pdf?fbclid=IwAR0gsQodKrSKcpgp_0-649aTY3rjZzBxY-bPKNg4RbbQSH1dPHwOXAPD4NU [viitattu 5.1.2023].

Heikkinen, E. 1988. Maan vaikutuksesta antennin säteilyyn. Käytännön antenit 1. Helsinki: Ensi-offset. Ensi-offset. Helsinki.

Heinonen, H. 2004. Antennit ja syöttöjohdot (6). Tiimissä hamssiksi 2. Helsinki: Multiprint Oy. Multiprint Oy. Helsinki.

Heinonen, H. 2004. Radioaaltojen eteneminen (7). Tiimissä hamssiksi 2. Helsinki: Multiprint Oy Multiprint Oy. Helsinki.

Kellomäki, T. 2004. Antennit ja syöttöjohdot. OH3NE:n radioamatöörkurssi. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://docplayer.fi/44332442-Antennit-ja-syot-tojohdot-oh3ne-n-radioamatoorikurssi-tiiti-kellomaki-oh3hny.html?fbclid=IwAR2bk7o3w8GyG0vOJ0_78Wyzcd8--bk67MDFySH8FMZRM7S7Xi23IPAsRVs [viitattu 24.2.2023].

Kramer, F. 2014. 4-Square Antenna in theory and practice. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://tm1o.free.fr/4SQ/80m/en_ver_final4-sq_03_04_15.pdf?fbclid=IwAR33QhxO1_kNtzMAB7vu9hA30sv64jP8pAFxMk-uXreJbAG9zfff5bgwfcc [viitattu 14.2.2023].

Kraus, J. 1988. Antenna materials and accessories (21). the ARRL antenna book. The American Radio Relay League. Newington, CT USA 06111.

Lawbuary, L. 2011. 40m Compact 4-Square Antenna – EA5AVL. EA5AVL 4 SQ Antenna overview. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://rsars.fi-les.wordpress.com/2013/01/40-m-compact-4-square-antenna-ea5avl-11.pdf> [viitattu 14.3.2023].

Poole, I. 2021. Twoway radio community. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.twowayradiocommunity.com/quarter-wave-vertical-antenna/?fbclid=IwAR373fYMIwRufNh_zp7ot2-eZoHvsipvg-hrmv8XQxOKT8Nm_bX3ZQbYeA5A [viitattu 5.4.2023]

Rauch Jr., C. 2008. Four-Square. TX_four_square. WWW-dokumentti. Saatavissa:

https://www.w8ji.com/tx_four_square.htm?fbclid=IwAR05swRJAB9iT7zeOf7ZKKcaepNCQDwj6UVXQxhTREG_DU3k1HIDtAeFs2o [viitattu 13.4.2023].

Salo, T. 1988. Vaiheistetut vertikaalit. Käytännön antennit 1. Helsinki: Ensi-offset. Ensi-offset. Helsinki.

Steyer, M. 2021. Current Balun 50 Ohm 1:1. Baluns. Antenna-Home page DK7ZB. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.qsl.net/dk7zb/Baluns/current_balun.htm [viitattu 14.2.2023].

Toroidal Transformers. s.a. IQS Directory. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-transformer/toroidal-transformer.html> [viitattu 31.3.2023].

Woods, M. 2014. Fun with Four (Square)! ZL2WB – Branch 50 (Wellington) NZART – Known as the Wellington Amateur Radio Club. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://zl2wb.com/wp/?p=314> [viitattu 15.2.2023].

KUVALUETTELO

1. Releohjainkortti ja keinokuorma
2. Antennisuunnan ohjauslaite
3. 4-square antenni simuloituna MMANA-GAL-ohjelmalla
4. Vaiheistus toteutettuna coax-kaapelilla
5. Vaiheistus toteutettuna toroidimuuntajilla
6. Antennin säteilykuvio yläpuolelta katsottuna
7. Antennin tehokkuus ja suuntakuvio sivulta katsottuna
8. Antenninsuuntakuvio 3D-mallinnettuna
9. Maaradiaalit kiinnitetty toisiinsa ja maahan
10. Antenni käyttövalmiina savipellolla
11. Virtakentän muodostuminen antennikeppien ympärille