

Pasi Suhonen

Auringontutkimusvälineenä toimiva radioteleskooppijärjestelmä

Tekijä(t) Otsikko	Pasi Suhonen Auringontutkimusvälineenä toimiva radioteleskooppijärjestelmä
Sivumäärä Aika	89 sivua + 3 liitettä 24.4.2012
Tutkinto	insinööri
Koulutusohjelma	tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	tietoliikenne ja tietoverkot
Ohjaaja(t)	sovellusinsinööri Michael Fletcher yliopettaja Pertti Jäppinen
<p>Opinnäytetyön aiheena oli toteuttaa harrastajakäyttöön tarkoitettu radioteleskooppijärjestelmä, joka seuraa aurinkoa aamusta iltaan ja rekisteröi erityisesti auringonpurkauksia. Radioteleskooppijärjestelmä mittaa auringonpurkausten synnyttämän laajakaistaisen kohinavuon (engl. solar flux) voimakkuutta, esiintymisaikaa sekä kestoaikaa. Mittausdatan avulla alan harrastajilla, kuten radioamatööreillä on mahdollisuus ennustaa reaaliajassa HF (High Frequency)-alueen radiokelejä sekä revontulien esiintymistä ja tällä tavoin vaikuttaa kaukoyhteyksien onnistumiseen.</p> <p>Kehitysprojektin varsinaiset työvaiheet koostuivat radioteleskoopin antennin automaattisen ohjausjärjestelmän eri yksiköiden hankinnasta ja rakentamisesta sekä testaamisesta. Lisäksi ohjelmoitiin askelmoottorin ohjausyksikkö sekä vastaanottimen ohjausyksikkö ja mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja.</p> <p>Kehitystyön tulokseksi saatiin valmiiksi testatusti toimiva antennin automaattinen ohjausjärjestelmä, askelmoottorin ohjausyksikön ohjelma, vastaanottimeen asennettavan ohjauskortin ohjelma sekä mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja. Projektin jatkokehitysvaiheessa rakennetaan kokonaistehovastaanotin, joka asennetaan radioteleskooppijärjestelmään. Tämän lisäksi suunnitellaan ja toteutetaan mittausdatan siirto julkiselle Internet-palvelimelle, josta sitä voi kuka tahansa seurata reaaliaikaisesti.</p>	
Avainsanat	arduino, aurinko, mikrokontrolleri, radiometri, radioteleskooppi, vastaanotin

Author(s)	Pasi Suhonen
Title	Radio telescope system functioning as instrument for studying the sun
Number of Pages	89 pages + 3 appendices
Date	24 April 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Communications and data networks
Instructor(s)	Senior Application Engineer Michael Flecher Principal Lecturer Pertti Jäppinen
<p>The purpose of this bachelor's thesis was to design and implement a radio telescope system for hobbyist use that tracks the sun from the sunrise to the sunset and register solar eruptions, in particular. The radio telescope system measures the strength of the sun's broadband solar fluxes and also registers their time of occurrence and duration. Using the measurements, hobbyists, such as radio amateurs, are able to predict HF (High Frequency) band radio propagation and the appearance of aurora borealis and in this way to plan successful long distance communications to other continents.</p> <p>The main stages of the development project consisted of the acquisition of units for an automatic control system of a radio telescope antenna and also of the construction and testing of the antenna control system. In addition, a stepper motor control unit, a control unit for the receiver and a script for processing the measurement data were programmed.</p> <p>The project generated an operational and duly tested automatic control system for antennas as well as programs for the stepper motor control unit and the receiver's control unit and a script for processing the measurement data. In the next development phase of the project, a total power receiver will be constructed and integrated into the radio telescope system. In addition, a system measurement data transfer will be designed and implemented into a public Internet server, available for real time tracking for all users.</p>	
Keywords	Arduino, microcontroller, radiometer, radiotelescope, receiver, the sun

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Radioastronomian perusteita	2
2.1	Radioastronomian historiaa	2
2.2	Radioteleskooppi	4
2.3	Sähkömagneettinen säteily ja sen ominaisuuksia	5
2.3.1	Aallonpituus ja taajuus	5
2.3.2	Tehon vuontiheys	6
2.3.3	Sähkömagneettinen spektri	7
2.3.4	Polarisaatio	8
2.3.5	Sähkömagneettisen säteilyn mekanismit	10
2.4	Väliaineen vaikutus sähkömagneettiseen säteilyyn	13
2.5	Doppler-ilmiö	17
3	Aurinko	18
3.1	Auringon aktiivisuuden vaikutus radiokeleihin radioamatööritoiminnassa	18
3.2	Auringon synty ja kehitys	19
3.3	Auringon rakenne	20
3.4	Aurinkotuuli	21
3.5	Aurinkotuulen vaikutus maanpäällä ja avaruudessa	22
3.6	Auringonpurkaus	23
4	Antennin automaattisen ohjausjärjestelmän rakentaminen ja toimintaperiaate	24
4.1	Antennin historia	24
4.2	Antennin mekaaninen rakenne	26
4.3	Paraboloidipeiliantennin vahvistus	30
4.4	Puolentehon keilanleveys	33
4.5	Antennin askelmoottorien säätötarkkuuden arviointi	34
4.6	Nostokurjen rakentaminen	35
4.7	EME-systeemin rakenne ja toimintaperiaate	36
4.7.1	EHN-liityntäkortin rakenne ja toimintaperiaate	39
4.7.2	Absoluuttinen kulmatietoanturi	43

4.7.3	Kulmatietoanturien asennus antennin gyroskooppialustaan	45
4.8	Askelmoottorin toimintaperiaate	47
4.8.1	Askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikkö	49
4.8.2	Askelmoottorien johdotuskaavio ja ohjausväylän rakenne	50
4.8.3	Antennin automaattisen ohjausjärjestelmän toiminnan testaus	53
5	Vastaanottimen rakenne ja toimintaperiaate radioteleskooppijärjestelmässä	56
5.1	Vastaanottimen käyttämä taajuusalue	56
5.2	Syöttökohinalämpötilamittaus	57
5.3	Kokonaistehovastaanottimen avulla toteutettu radioteleskooppijärjestelmä	64
5.4	Dicke-vastaanottimen avulla toteutettu radioteleskooppijärjestelmä	67
5.5	Vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuus	71
6	Ohjelmistokehitys ja kehitysympäristö	72
6.1	Mikrokontrollerin kehitysympäristö	72
6.2	Askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikön ohjelman kehitys	74
6.3	Vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelman kehitys	76
6.4	Mittausdatan käsittelyyn tarkoitettun komentosarjan kehitys	80
7	Yhteenveto	83
	Lähteet	86

Liitteet

Liite 1. Askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikön ohjelmakoodi.

Liite 2. Vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelmakoodi.

Liite 3. Mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja.

Symbolit ja lyhenteet

A_{eff}	Paraboloidipeilin efektiivinen apertuuri, eli sieppauspinta-ala.
A_{phys}	Paraboloidipeilin fyysinen apertuuri, eli fyysinen pinta-ala.
k_a	Ilmakehän kaasujen aiheuttama vaimennuskerroin.
ε	Väliaineen permittiivisyys
ε_0	Tyhjiön permittiivisyys $8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m
ε_r	Suhteellinen permittiivisyys, dielektrisyysvakio.
η_{ap}	Apetuurihyötysuhde.
θ	Paraboloidipeiliantennin -3 dB:n keilanleveys.
$EIRP$	Isotrooppisen säteilylähteen teho.
F	Antennin syöttöelementin polttoväli.
G	Vahvistuskerroin.
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö.
R	Isotrooppisen säteilylähteen ja vastaanottoantennin välinen etäisyys.
S	Sähkömagneettisen aallon tehon vuontiheys.
c	Sähkömagneettisen aallon nopeus tyhjiössä, n. $2,998 \times 10^8$ m/s.
dB_d	Antennivahvistus ideaaliseen puolialtodipoliin verrattuna.
dB_i	Antennivahvistus isotrooppiseen säteilijään verrattuna.
D	Paraboloidipeilin halkaisija.
d	Paraboloidipeilin syvyys.
D	Sähkövuon tiheys väliaineessa.
E	Sähkökentän voimakkuus väliaineessa.

f	Aallon taajuus.
k	Kerroin, joka riippuu paraboloidipeilin heijastimen pinnan muodosta ja syötön valaisukuviosta. Paraboloidipeilin tapauksessa käytetään yleensä-kerrointa 70 silloin kun puolen tehon keilanleveys on ilmoitettu asteina.
n	Väliaineen taitekerroin.
v	Aallon nopeus väliaineessa.
λ	Aallonpituus.
π	Pii, matemaattinen vakio, jonka likiarvo kolmen desimaalin jälkeen on 3,141.
ΔT	Radiometrin kohinalämpötilan erottelutarkkuus.
T_A	Antennin kohinalämpötila.
T_R	Vastaanottimen kohinalämpötila.
T_L	Keinokuorman kohinalämpötila.
B	Kaistanleveys.
τ	Integrointiaika.
$\frac{\Delta G}{G_{HF}}$	Vastaanottimen vahvistinketjun epästabiiliuskerroin.
A/D	<i>Analog to Digital converter.</i> Laitte, joka muuntaa jatkuvan analogisen signaalin, esimerkiksi sinimuotoisen jännitteen diskreetiksi digitaalisessa muodossa esitettäväksi signaaliksi.
BCD	<i>Binary Coded Desimal.</i> Digitaalinen koodausmenetelmä jossa desimaaliluku ilmoitetaan binäärisessä muodossa. BCD-järjestelmä käyttää yleensä neljää bittiä desimaaliluvun esittämiseen. Neljällä bitillä on mahdollista esittää desimaaliluvut 0–9.
DC	<i>Direct Current.</i> Sähkötekniikassa käytetty lyhenne tasavirrasta.
DXCC	<i>DX Century Club.</i> Radioamatöörille tarkoitettu kerho, johon voi liittyä kun amatööri on pitänyt sata onnistunutta kaksisuuntaista kaukoyhteyttä muihin radioamatööreihin.

EHF	<i>Extremely High Frequency.</i> Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 30 GHz–300 GHz.
EME	<i>Earth-Moon-Earth.</i> Radioamatöörien käyttämä menetelmä, jonka avulla saadaan aikaiseksi kauko yhteyksiä ja tarkoittaa kuun käyttämistä passiivisenä radiosignaalin heijastimena.
F1EHN	Radioamatööriasematunnus.
FTP	<i>File Transfer Protocol.</i> Standardi tiedostojen siirtämiseen suunniteltu verkkoprotokolla, joka hyödyntää TCP-protokollan avulla toimivaa verkkoa tiedonsiirtoon kahden tietokoneen välillä.
GaAs FET	<i>Gallium Arsenide Field Effective Transistor.</i> Kanavatransistori, jossa varauksenkuljettajien liikettä ohjataan puolijohdekanavassa vaikuttavan sähkökentän avulla. Erityyppiset kanavatransistorit jakautuvat n-tyypin ja p-tyypin kanavatransistoreihin.
GPS	<i>Global Positioning System.</i> Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä ja rahoittama satelliittipaikannusjärjestelmä, viralliselta nimeltään Navstar GPS.
HF	<i>High Frequency.</i> Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 3 MHz–30 MHz.
HII-alue	Emissiosumu josta astronomit käyttävät joskus myös nimeä H2-alue. HII-alue koostuu ionisoituneesta vedystä, joka on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Emissiosumu on yleisesti käytetty nimitys tähtienväliselle kaasupilvelle, joka säteilee jollakin aallonpituudella.
I/O	<i>Input-Output.</i> Tarkoittaa tiedon siirtämistä tai signaloimista tiedonsiirtolaitteiston välillä. <i>Input</i> tarkoittaa laitteiston vastaanottamaa tietoa ja signaloimista sekä <i>Output</i> laitteiston lähettämää tietoa ja signaloimista.
Inmarsat	<i>International Maritime Satellite Organization.</i> Englantilainen satelliittitekniologiaa hyödyntävä yritys, joka tarjoaa maailmanlaajuisia palveluita kannettaville tiedonsiirtoterminaaleille. Tiedonsiirtoterminaalit hyödyntävät geostationäärirataa kiertäviä satelliitteja yhteyksien muodostamiseen eri terminaalien välillä.
LCD	<i>Liquid Crystal Display.</i> Nestekidenäyttö on kevyt ja ohut näyttölaite. Nestekidenäyttöjä käytetään paljon pienissä elektroniikkalaitteissa kuten matkapuhelimissa ja laskimissa. Nestekidenäyttötekniikka on myös korvannut kuvaputkinäyttötekniikan televisioissa ja tietokonenäytöissä.
LF	<i>Low Frequency.</i> Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 30 kHz–300 kHz.

LNB	<i>Low Noise Block Down Converter.</i> Matalan kohinaluvun omaava etuvahvistin, jonka yhteydessä on usein alas sekoittava taajuuskonvertteri.
LO	<i>Local Oscillator.</i> Paikallisoskillaattori on laite, jolla generoidaan injektiosignaali esimerkiksi vastaanottimen sekoitinasteelle.
MF	<i>Medium Frequency.</i> Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 300 kHz–3000 kHz.
PIC	<i>Peripheral Interface Controller.</i> Harvard arkkitehtuurin pohjalle rakennettu mikrokontrolleri, joka on halpa ja johon on satavilla paljon erilaisia sovelluksia ja ilmaisia kehitysympäristötyökaluja.
PIN-diodi	<i>P-type semiconductor-Intrinsic semiconductor-N-type semiconductor.</i> Kolmikerroksinen versio PN-diodista, jossa P ja N kerrosten välissä on seostamaton tai heikosti seostettu itseisjohtava kerros.
PNG	<i>Portable Network Graphics.</i> Häviötön bittikarttagrafiikan tallennusformaatti, joka kehitettiin korvaajaksi internetissä käytettävälle, ominaisuuksiltaan vanhentuneelle ja patenttien rajoittamalle GIF (Graphic Interchange Format)-formaatile.
PWM	<i>Pulse Width Modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio on modulointitapa, jossa kuormaan menevää jännitettä ja virtaa katkotaan nopeassa jaksossa päälle ja pois muuttamalla ohjaussignaalin jaksojen pulssisuhdetta. Mitä pidempään ohjaussignaali on päällä verrattuna jaksoon, jossa se on pois päältä, sitä enemmän kuormaan siirtyy tehoa.
RF	<i>Radio Frequency. Radiotaajuus,</i> joka on osa sähkömagneettista spektriä ja käsittää ITU-R:n jakamat eri taajuuskaistat VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF, EHF (3 kHz–300 GHz), sekä näiden lisäksi nimettömän taajuuskaistan (300 GHz–3000 GHz).
RIG	Radioamatöörien käyttämä yleisnimitys radioaseman lähettimestä ja vastaanottimesta.
RRD	<i>Round Robin Database.</i> Tietokantasovellus mittausdatan käsittelyyn.
RS-232	<i>Recommended Standard 232.</i> Tietoliikennestandardi, joka on tarkoitettu kahden tiedonsiirtolaitteen välillä tapahtuvan tietoliikenteen siirtämiseen. RS-232 standardin mukaisessa tietoliikenteessä data siirtyy yksi bitti kerrallaan asynkronisesti sarjamuotoisena.
RS-485	<i>Recommended Standard 485.</i> Tietoliikennestandardi, joka on tarkoitettu useamman kuin yhden tiedonsiirtolaitteen välillä tapahtuvan tietoliikenteen siirtämiseen. RS-485 standardin mukaisessa tietoliikenteessä käytetään differentiaalista osoitteellista sarjaväylää, johon voi liittyä useita lait-

teita samanaikaisesti. RS-485 väylää käytetään pääsääntöisesti tiedonsiirtoon pitkillä etäisyyksillä.

- SEI *Serial Encoder Interface*. osoitteellinen sarjamoottorin väylä, joka tukee samanaikaisesti 1–15 absoluuttista asentotieto-anturia. SEI-väylä on yhteensopiva tietokoneissa käytettyjen sarjamoottorien kanssa kuten RS-232, RS-485 ja USB-sarjamoottorit ja käyttää väyläkaapelina tavallista 6-johtimista lattaakaapelia.
- SFU *Solar Flux Unit*. Auringon laajakaistaisen kohinavuon (engl. solar flux) voimakkuuden ilmoittava luku. Mitä korkeampi luku on sitä enemmän aurinkotuulesta tai auringonpurkauksesta peräisin olevia varautuneita hiukkasia on päässyt maapallon ionosfääriin.
- SHF *Super High Frequency*. Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 3 GHz–30 GHz.
- TCP *Transmission Control Protocol*. Tietoliikenneprotokolla, jonka avulla luodaan yhteyksiä tietokoneiden välille, joilla on pääsy TCP-protokollaa käytäviin tietoliikenneverkkoihin kuten Internet.
- UHF *Ultra High Frequency*. Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 300 MHz–3000 MHz.
- USB *Universal Serial Bus*. Sarjamoottorilaajakaistatuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen. USB-standardia on kolme. USB 1.1, USB 2.0 ja USB 3.0. Teoreettinen enimmäissiirtonopeus on standardin 1.1-versiossa 12 Mbit/s, 2.0-versiossa 480 Mbit/s ja 3.0-versiossa 4,8 Gbit/s.
- VHF *Very High Frequency*. Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 30 MHz–300 MHz.
- VLF *Very Low Frequency*. Radiotaajuuden sähkömagneettisen säteilyn taajuusalue 3 kHz–30 kHz.

1 Johdanto

Tässä insinööriöraportissa kerrotaan ideasta kehittää harrastelijakäyttöön tarkoitettu radioteleskooppijärjestelmä. Kehitysprojektin lopputuloksena syntyvällä radioteleskooppijärjestelmällä seurataan aurinkoa aamusta iltaan ja sillä rekisteröidään erityisesti auringonpurkauksia. Radioteleskooppijärjestelmän mittausdataa voidaan hyödyntää esimerkiksi HF-alueen radiokelien sekä revontulien esiintymisen ennustamisessa.

Radioteleskooppijärjestelmä mittaa auringonpurkausten synnyttämän laajakaistaisen kohinavuon (engl. solar flux) voimakkuutta, esiintymisaikaa sekä kestoaikaa. Vastaanotin toimii radioastronomialle varatulla taajuuskaistalla 1660,500 MHz–1668,400 MHz, joka on vapaa muista häiriöläheteistä. Vastaanottimen keskitaajuus on 1664,440 MHz ja ilmaisukaistanleveys $\pm 2,5$ MHz. Radioteleskooppijärjestelmän avulla saatu mittausdata on tarkoitettu ilmaiseen julkiseen jakeluun ja sitä voi seurata reaaliaikaisesti Internetistä.

Aurinkoa tarkkailevia radioteleskooppeja on maailmanlaajuisesti vain kourallinen. Euroopassa ei ole saatavilla julkiseen käyttöön tarkoitettua reaaliaikaisia mittausdataa auringon aktiivisuudesta. Suomessa radioastronomisessa tutkimuskäytössä olevat radioteleskoopit sijaitsevat Tuorlan observatoriossa Piikkiössä ja Metsähovin radiotutkimusasemalla Kirkkonummella. Alan harrastajat, kuten erityisesti radioamatöörit, ovat kiinnostuneita auringon reaaliaikaisesta tilasta, kun he ennustavat radiokelejä HF-alueella sekä revontulien esiintymistä. Tällä tavoin heillä on mahdollisuus vaikuttaa kaukoyhteyksien onnistumiseen.

Koska radioteleskooppijärjestelmän avulla tutkitaan aurinkoa, raportin alussa selostetaan lyhyesti ja yksinkertaisesti radioastronomian historiaa sekä sen peruskäsitteitä. Samalla tutustutaan myös auringon rakenteeseen, aurinkotuulen ja auringonpurkauksien ominaisuuksiin sekä niiden synnyttämiin erilaisiin ilmiöihin avaruudessa ja maanpäällä. Raportissa selostetaan myös antennin automaattisen ohjaussysteemin eri yksiköiden rakenne ja toimintaperiaate sekä radioteleskooppijärjestelmään asennettavien erilaisten vastaanottimien rakenne ja toimintaperiaate.

Kehitysprojektin varsinaiset työvaiheet koostuivat radioteleskoopin antennin automaattisen ohjaussysteemin eri yksiköiden hankinnasta, rakentamisesta ja testaamisesta. Lisäksi ohjelmoitiin askelmoottorin ohjain ja ajoyksikkö sekä vastaanottimen ohjausyksikkö ja mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja (skripti).

Raportissa pyritään antamaan mahdollisimman tarkka kuvaus kehitysprojektin etenemisestä vaihe vaiheelta. Lukijalle pyritään selostamaan asiat mahdollisimman yksinkertaisesti ja ymmärrettävästi, jotta kuka tahansa tietotekniikkaan, sovelluksiin, ohjelmointiin ja yksiköihin perehtymätönkin voisi ymmärtää projektin keskeisimmät asiat. Lopuksi analysoidaan millainen lopputulos projektissa syntyi ja samalla pohditaan projektin tulevaisuuden näkymiä sekä jatkokehityshankkeita.

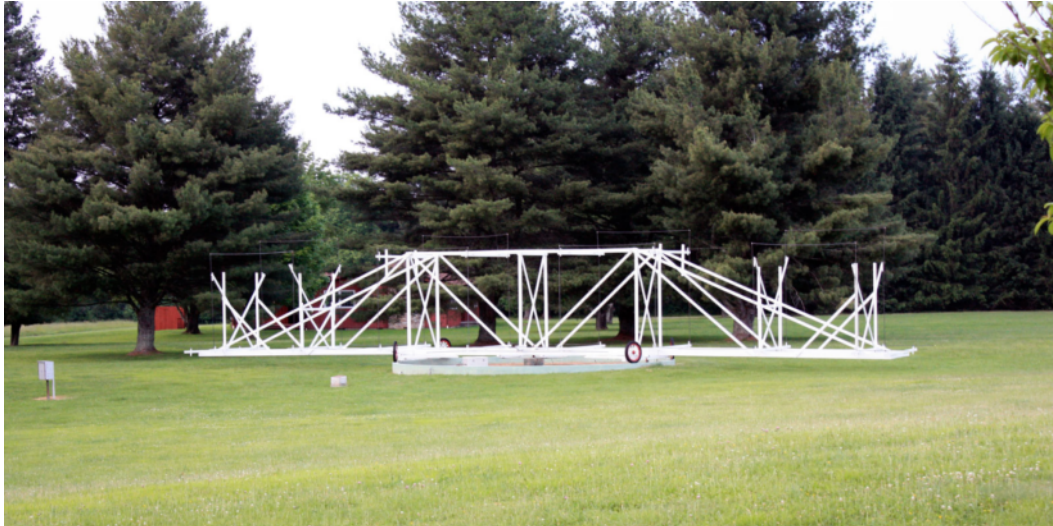
2 Radioastronomian perusteita

Aluksi selostetaan lyhyesti ja yksinkertaisesti radioastronomian historiaa ja perusteita, jotta lukijalle syntyisi mielikuva siitä, kuinka radioastronomia on saanut alkunsa. Samalla pyritään luomaan yleiskuva erilaisista maapallon ulkopuolisista radiotaajuisten sähkömagneettisen säteilyn lähteistä ja niihin liittyvistä ilmiöistä, joita radioastronomiassa tutkitaan.

2.1 Radioastronomian historiaa

Maapallon ulkopuolelta tuleva radiosäteily havaittiin ensimmäisen kerran vahingossa vuonna 1931, kun radioinsinööri Karl G. Jansky työskenteli yhdysvalloissa Bellin laboratoriossa. Hänelle annettiin tuolloin tehtäväksi tutkia ukkosmyrskyjen radioliikenteelle aiheuttamia häiriöitä taajuudella 20,5 MHz. Tutkimuksen tarkoitus oli selvittää, tulevatko häiriöt useammin jostakin tietystä suunnasta, ja jos tulevat, miten tämä voitaisiin ottaa huomioon antennien suunnittelussa ja suuntauksessa. [1, s.4.]

Jansky rakensi kummallisen näköisen antennin, joka oli viritetty aallonpituudelle 14,6 m. Antenni oli sijoitettu vanhojen Fordin renkaiden avulla jalustan päälle, jossa se pääsi vapaasti pyörimään ympäri. Antenni oli kytketty vastaanottimeen, joka tallensi mittaus tulokset paperipiirturin avulla paperille. Kuvassa 1 on esitetty Janskyyn rakentama radioteleskooppiantenni.



Kuva 1. Karl G Jansky:n rakentama radioteleskoopiantenni [2].

Jansky tallensi häiriösignaaleja joka suunnasta muutaman kuukauden ajan. Hän löysi kolme säteilyn aiheuttajaa, jotka hän lajitteli eri kategorioihin. Nämä ovat läheiset ukkosmyrskyt, kaukana olevat ukkoset ja tuntemattomasta kohteesta tuleva heikko kohina. Jansky päätti tutkia tuntemattoman kohteen kohinasignaalia tarkemmin. Pyöritellessään antennia hän havaitsi, että kohinasignaali siirtyi taivaalla liki samaa vauhtia auringon kanssa. Signaalin voimakkuuden vaihtelun jakso oli 23 h 56 min, joka on sama kuin maan pyörähdysaika tähtien suhteen. [1, s.4.]

Kohinalähteen päivittäisestä esiintymisvälistä Jansky päätteli säteilyn olevan peräisin maapallon ulkopuolelta. Lisähavaintojen perusteella hän päätteli, että säteily on peräisin Linnunradan tasosta ja se on voimakkainta Linnunradan keskustan suunnassa. Jansky julkaisi tutkimustuloksensa vuonna 1933. [1, s.4.]

Aluksi kukaan ei kiinnittänyt juurikaan huomiota Jansky:n julkaisemiin radioastronomisiin tutkimustuloksiin. Vasta vuonna 1937 radioinsinööri ja radioamatööri Grote Reber kaivoi esiin Jansky:n tutkimustulokset ja rakensi ensimmäisen prototyypin nykyaikaisesta radioteleskoopista omalle takapihalleen. Radioteleskoopissa oli paraboloidipeiliantenni, jonka halkaisija oli 9,5 m. Aluksi Reber teki tutkimuksia lyhyillä aallonpituuksilla taajuudet 3300 MHz ja 950 MHz koska ajatteli, että kyseisillä taajuuksilla säteily on voimakasta ja helppoa havaita. [1, s.5.]

Reber ei kuitenkaan onnistunut havaitsemaan säteilyä, ja hän modifioi antennia siten, että se havaitsee säteilyä aallonpituudella 1,8 m (taajuus 160 MHz). Tällä kertaa hän onnistui havaitsemaan voimakasta säteilyä Linnunradan tasosta. Kuvassa 2 on esitetty Reberin rakentama radioteleskooppiantenni. [1, s.5.]



Kuva 2. Grote Reberin rakentama radioteleskooppiantenni [3].

Reber jatkoi tutkimuksiaan 40-luvun alkupuolella, ja vuonna 1944 hän julkaisi ensimmäiset radiokartat taivaasta. Reber oli ainoa tutkijaksi tekevä radioastronomi maailmassa toisen maailmansodan loppuun saakka. Sodan aikana auringon radiotaajuista sähkömagneettista säteilyä havaittiin tutka-asemalla Englannissa. Auringossa oli tuolloin menossa aktiivinen kausi ja runsaasti purkauksia. Sodan jälkeen radioastronomia kehittyi nopeasti ja sillä on tullut elintärkeä merkitys universumin tutkimuksissa ja havainnoinnissa. [1, s.5.]

2.2 Radioteleskooppi

Radiotaajuinen sähkömagneettinen säteily (3 kHz–3000 GHz), jonka aallonpituus vaihtelee muutamasta mikrometrinä aina kymmeneen metriin saakka, läpäisee maapallon atmosfääriin. Ihmissilmä ei kykene havaitsemaan näitä aallonpituuksia, mutta ne indusoivat todella pienen sähkövirran johtimeen kuten antenniin. Radioteleskooppi on radioastronomiassa käytettävä havainnointiväline. [4.]

Se eroaa perinteisestä optisesta teleskoopista havainnoimalla kohteita sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla ja käyttää aaltojen keräämiseen tyypillisesti suurta para-

boloidipeiliantennia. Radioteleskoopin antenni vastaanottaa hyvin heikkoa radiotaajuis- ta sähkömagneettista säteilyä, joka muunnetaan sähköiseksi signaaliksi vastaanottimel- la eli radiometrillä. Signaalia vahvistetaan ja integroidaan tietyllä aikavälillä ja tallen- taan tietokoneeseen. [4.]

Koska radioastronomiassa ollaan tyypillisesti tekemisissä hyvin heikkotasosten signaa- lien kanssa, järjestelmän synnyttämä kohina on pidettävä mahdollisimman matalana. Tästä johtuen ammattikäyttöön suunnitelluissa radioteleskoopeissa etuvahvistin jäädy- tetään hyvin matalaan lämpötilaan, jotta vastaanottimen synnyttämä oma kohina saa- taisiin mahdollisimman matalaksi eikä vastaanotettu heikkotasoinen signaali huku vas- taanottimen kehittämän oman kohinan alle. [4.]

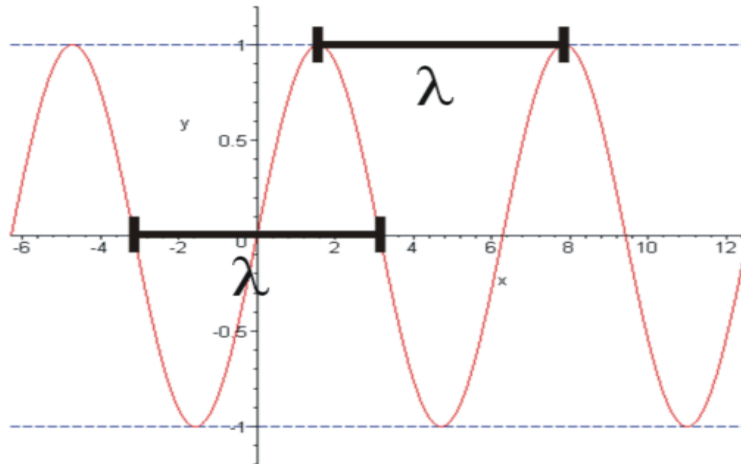
2.3 Sähkömagneettinen säteily ja sen ominaisuuksia

Sähkömagneettinen säteily eli sähkömagneettiset aallot ovat sähkömagneettisen ken- tän aaltoliikettä, jossa muuttuva sähkökenttä synnyttää magneettikentän ja muuttuva magneettikenttä synnyttää sähkökentän. Tämä tarkoittaa sitä, että muuttuva sähkö- kenttä ja muuttuva magneettikenttä indusoivat jatkuvasti toinen toisiaan. Sähkömag- neettinen säteily kuljettaa energiaa eri pisteiden välillä ja se etenee tyhjiössä taajuu- destaan riippumatta valonnopeudella $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$. [1, s.9; 5.]

2.3.1 Aallonpituus ja taajuus

Sähkömagneettisen aallon aallonpituus on paikan suhteen jaksollisen ilmiön kahden vierekkäisen samassa vaiheessa olevan pisteen välinen etäisyys. Toisin sanoen aallon- pituus on matka, jonka sähkömagneettinen aalto kulkee yhden jakson aikana. Aallonpi- tuuden yksikkö on metri tai sen johdannaisyksiköt. Taajuudella tarkoitetaan sähkö- magneettisen aallon värähtelyjen määrää aikayksikössä, ja sen yksikkö on hertsi [Hz]. [6.]

Kuvassa 3 on esitetty jaksollinen siniaalto, josta on määritetty aallonpituus kahden vie- rekkäisen samassa vaiheessa olevan pisteen avulla. Pisteiden etäisyys toisistaan kuvaa aallonpituutta. Asteikon vaaka-akseli esittää aikaa ja pystyakseli signaalin amplitudia. [6.]



Kuva 3. Aallonpituuden määrittäminen siniaallon kuvaajan avulla [6].

Aallonpituus voidaan laskea aalto-opin perusyhtälöstä 1.

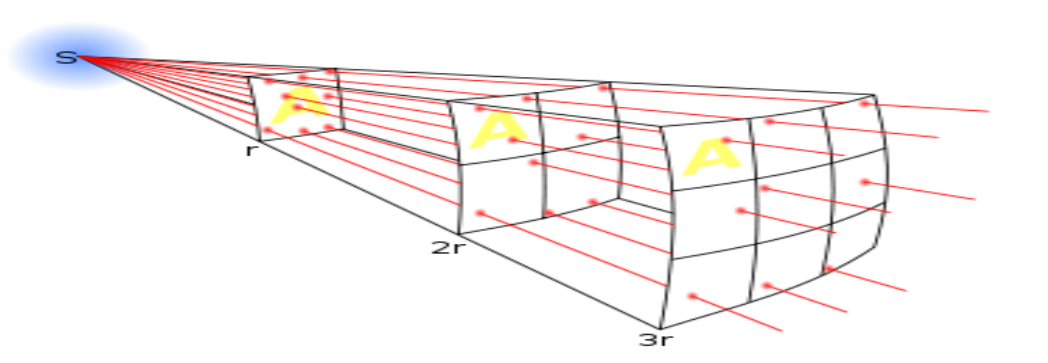
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

jossa λ on aallonpituus [m], v on aallon etenemisnopeus väliaineessa [m/s]. Tyhjiössä v on sama kuin valonnopeus c , joka on $2,998 \times 10^8$ m/s ja f on aallon taajuus [Hz]

2.3.2 Tehon vuontiheys

Vastaanottoantenniin saapuvan vastaanotetun signaalin taso mitataan saapuvan aaltorintaman tehon vuontiheydellä. Avaruudessa olevasta pistemäisestä säteilijästä peräisin oleva sähkömagneettinen säteily etenee tasaisesti kaikkiin suuntiin siten, että sen voidaan ajatella peittävän kuvitteellisen jatkuvasti laajenevan pallon pinta-alaa. [7; s.44.]

Vastaanottoantenni voidaan ajatella pallon pinnalla olevaksi pisteeksi, jolloin säteilijä on pallon keskipisteessä. Kuva 4 havainnollistaa, kuinka pistemäisestä säteilijästä peräisin olevan aaltorintaman tehon vuontiheys jakautuu kuvitteellisen alati laajenevan pallon pinnalla eri etäisyyksillä pistemäisestä säteilyn lähteestä. [7; s.44.]



Kuva 4. Havainnollistava kuva kuinka tehon vuontiheys jakautuu kuvitteellisen alati laajenevan pallon pinnalla eri etäisyyksillä pistemäisestä säteilyn lähteestä [7].

Maanpinnalla olevan vastaanottoantennin tehon vuontiheys voidaan laskea yhtälöstä 2. [7; s.44.]

$$S = \frac{(k_a)EIRP}{4\pi R^2} \quad (2)$$

jossa S on tehon vuontiheys [W/m^2], $EIRP$ on isotrooppisen säteilyn lähteen emittoima teho [W], k_a on ilmakehän kaasujen aiheuttama vaimennuskerroin ja R on isotrooppisen säteilylähteen ja vastaanottoantennin välinen etäisyys [m].

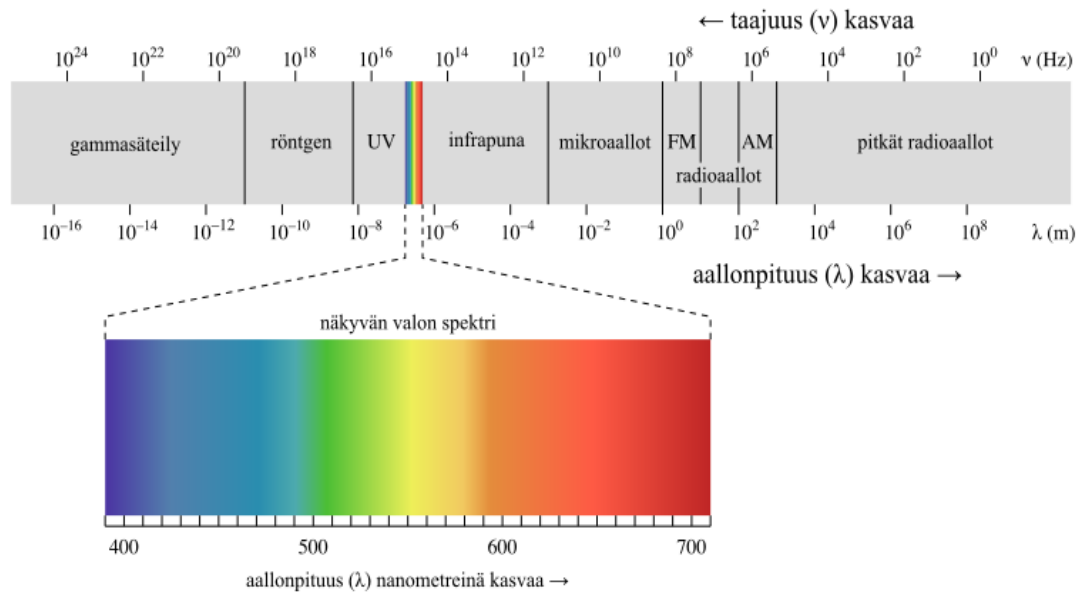
Kaukaa avaruudesta saapuvien signaalien tehojen vuontiheydet ovat maapallon pinnalla olevan vastaanottoantennin pinnalla hyvin pieniä, mistä johtuen vastaanotettujen signaalien tehotasot ovat erittäin matalia ja joudutaan käyttämään suurikokoisia antenneja korkean antennivahvistuksen aikaansaamiseksi. [1, s.11; 7.]

2.3.3 Sähkömagneettinen spektri

Sähkömagneettinen spektri kattaa kaikki sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueet. Sähkömagneettinen säteily jaotellaan aallonpituuden ja taajuuden mukaan eri osaluoksiin, jotka ovat radioaallot, mikroaallot, infrapunasäteily, valo, ultraviolettisäteily, röntgensäteily ja gammasäteily. Sähkömagneettista säteilyä, jonka taajuus on välillä 3 kHz–3000 GHz, kutsutaan RF (Radio Frequency)-säteilyksi. [1, s.12; 8.]

Näkyvä valo on myös sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus ja taajuus ovat sellaiset, että ihminen kykenee havaitsemaan sen silmällä. Kuva 5 havainnollistaa kuin-

ka sähkömagneettinen spektri on jaettu eri aallonpituuksien ja taajuuksien mukaan. [1, s.12; 8.]

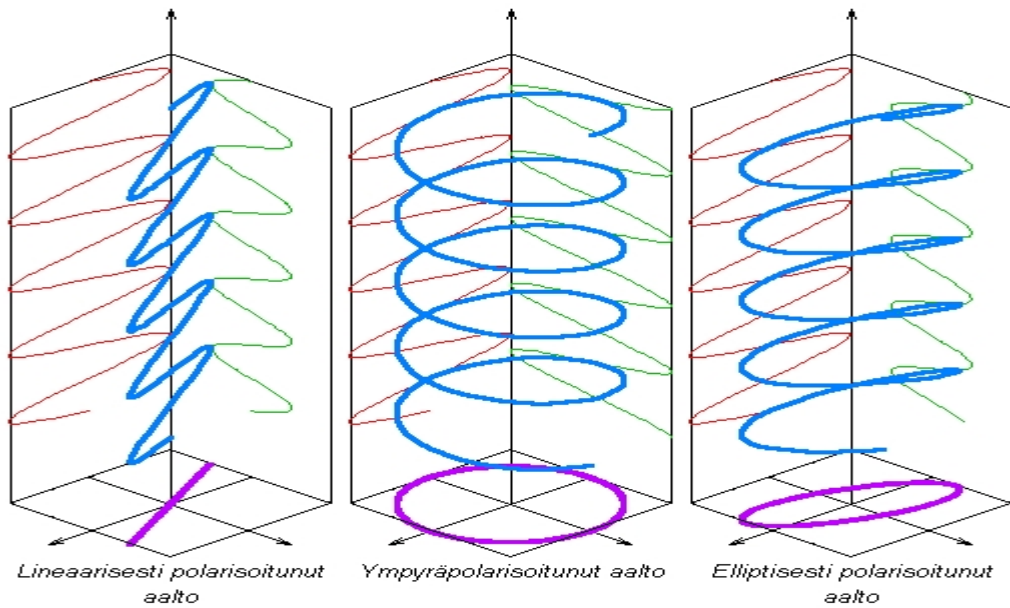


Kuva 5. Sähkömagneettinen spektri [5].

2.3.4 Polarisaatio

Polarisaatio kuvaa tasoaallossa värähtelevän sähkökentän komponenttien värähtelysuuntia. Sähkömagneettisen kentän muodostaman aallon polarisaation määrää sähkökentän kahden kompleksisen vektorikomponentin värähtelysuunta. Polarisaatio voi olla lineaarinen, ympyrä tai elliptinen. Sähkömagneettinen aalto voi olla myöskin kokonaan polarisoimatonta, kuten tavallisen lampun tai kynttilän lähettämän valon tapauksessa. [1, s.15; 10 s.19.]

Linearisella polarisaatiolla tarkoitetaan, että sähkökentällä on kaksi kompleksista vektorikomponenttia, jotka ovat samassa vaiheessa tai vastakkaisvaiheisia. Linearisessa polarisaatiossa sähkökenttä värähtelee maanpallon pintaan nähden vaaka- tai pystysuuntaisesti, jolloin kyseessä sanotaan olevan horisontaalinen tai vertikaalinen polarisaatio. Kuvassa 6 on pyritty havainnollistamaan sähkökentän kahden kompleksisen vektorikomponentin vaiheen ja amplitudin suhdetta toisiinsa nähden eri polarisaatio-tapauksissa. [1, s.17; 10 s.19.]



Kuva 6. Sähkömagneettisen aallon eri polarisaatiotapaukset [9].

Ympyräpolarisaatiossa sähkökentän kompleksisten vektorikomponenttien amplitudit ovat yhtä suuret ja niiden välinen vaihe-ero on $\pm 90^\circ$. Sähkökenttä värähtelee vaaka sekä pystysuunnassa. Lisäksi sähkökenttä pyörii etenemissuuntaansa nähden tasaisella kulmanopeudella kuvitteellisen akselin ympäri. Jos sähkökenttä pyörii myötäpäivään, kyseessä on oikeankätinen ympyräpolarisaatio. Jos sähkökenttä pyörii vastapäivään, kyseessä on vasemmankätinen ympyräpolarisaatio. [1, s.17; 10 s.20.]

Elliptisessä polarisaatiossa sähkökentän kompleksisten vektorikomponenttien amplitudit ovat erisuuret ja niiden välinen vaihe-ero on $\pm 90^\circ$. Polarisaatio on myös aina elliptinen, jos erisuurten vektorikomponenttien vaihe-ero on $\neq 90^\circ$. Elliptisessä polarisaatiossa sähkökentän pyörimissuunta noudattaa samaa sääntöä kuin ympyräpolarisaation tapauksessa. [1, s.17; 10 s.19.]

Maapallon ulkopuolelta tuleva radiotaajuinen sähkömagneettinen säteily voi olla lineaarisesti polarisoitunut, ympyräpolarisoitunut tai kokonaan polarisoimatonta. Tieto aallon polarisaatiosta antaa astronomeille arvokasta lisätietoa säteilyn lähteestä. Auringosta peräisin oleva sähkömagneettinen säteily on tyypillisesti ympyräpolarisoitunut. [1, s.15.]

2.3.5 Sähkömagneettisen säteilyn mekanismit

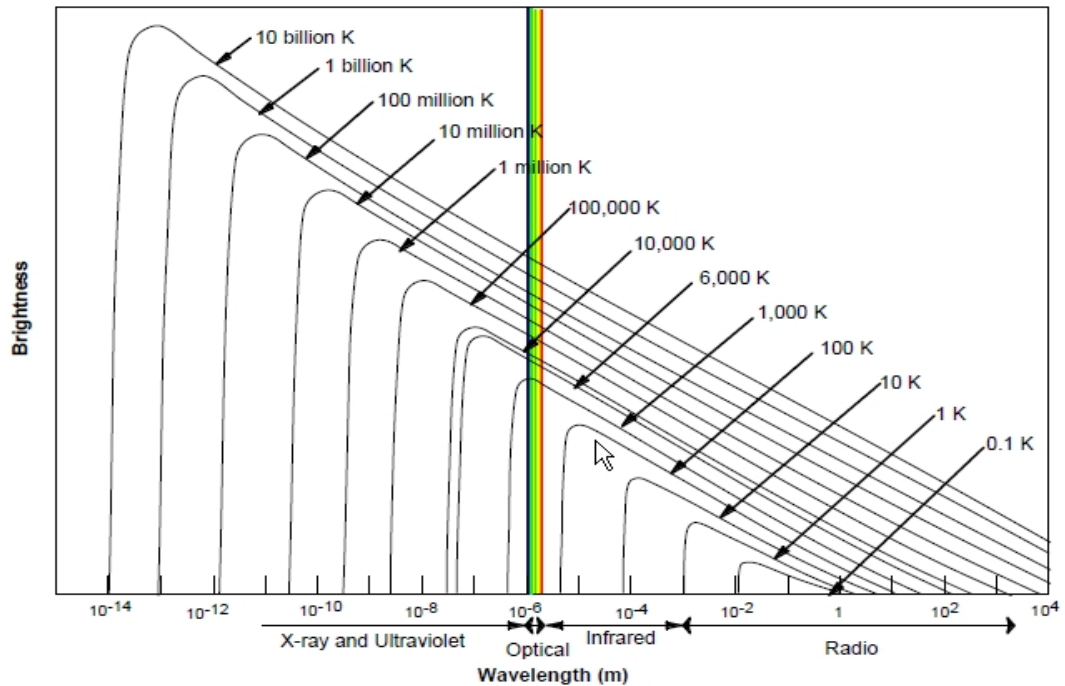
Sähkömagneettista säteilyä syntyy termisissä ja ns. ei-termisissä mekanismeissa. Termisiä mekanismeja ovat mustan kappaleen säteily, terminen jarrutussäteily ja viivasäteily. Ei-termisiä mekanismeja ovat synkrotronisäteily ja masersäteily. [1, s.19; 11.]

Mikä tahansa kappale, joka absorboi lämpöenergiaa, emittoi sähkömagneettista säteilyä. Esimerkiksi jos teräskattila lämmitetään kuumalla levyllä, kattila emittoi kaiken absorboimansa lämpöenergian pois sähkömagneettisena säteilynä. Fyysikot kutsuvat kattilaa mustaksi kappaleeksi, koska se absorboi kaiken siihen saapuvan lämpöenergian ja samanaikaisesti emittoi kaiken absorboimansa energian kaikilla aallonpituuksilla ja tietyllä energijakaumalla. [1, s.19; 11.]

Mustan kappaleen säteily on termistä, toisin sanoen jonkin kappaleen lähettämää lämpösäteilyä. Sen voidaan sanoa olevan ideaalinen absorboija ja emittoija, joka on termisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa, ja sen säteilyn voimakkuus riippuu ainoastaan ympäristön lämpötilasta. [1, s.19; 11.]

Mustan kappaleen emittoiman sähkömagneettisen säteilyn ominaisuuksiin kuuluu, että se ei heijasta eikä sirota säteilyä ja se on isotrooppista ja polarisoimatonta. Sillä on tasainen, jatkuva (kontinuumi) emissiospektri eikä se ole todellinen, vaikka jotkin tähtitieteelliset kohteet käyttäytyvät mustan kappaleen lailla. [1, s.19; 11.]

Kuvassa 7 on esitetty, kuinka mustan kappaleen emittoiman sähkömagneettisen säteilyn emissiohuiput jakautuvat eri aallonpituuksien sekä termisen lämpötilan mukaan. Asteikon vaaka-akseli esittää aallonpituutta ja pystyakseli mustan kappaleen sähkömagneettisen säteilytehon voimakkuutta (spektrin pintakirkkaus). [1, s.22; 11.]



Kuva 7. Mustan kappaleen säteilyn aallonpituusjakauma eri lämpötiloissa [1, s.22].

Kuvan 7 sähkömagneettisen säteilyn voimakkuuden huippuja tarkastelemalla voidaan havaita, että kun mustan kappaleen lämpötila laskee, sen säteilyn huiput siirtyvät kohti pidempiä aallonpituuksia. Tästä seuraa, että mustan kappaleen sähkömagneettisen säteilytehon huippua vastaava aallonpituus on kääntäen verrannollinen kappaleen lämpötilaan. [1, s.23; 11.]

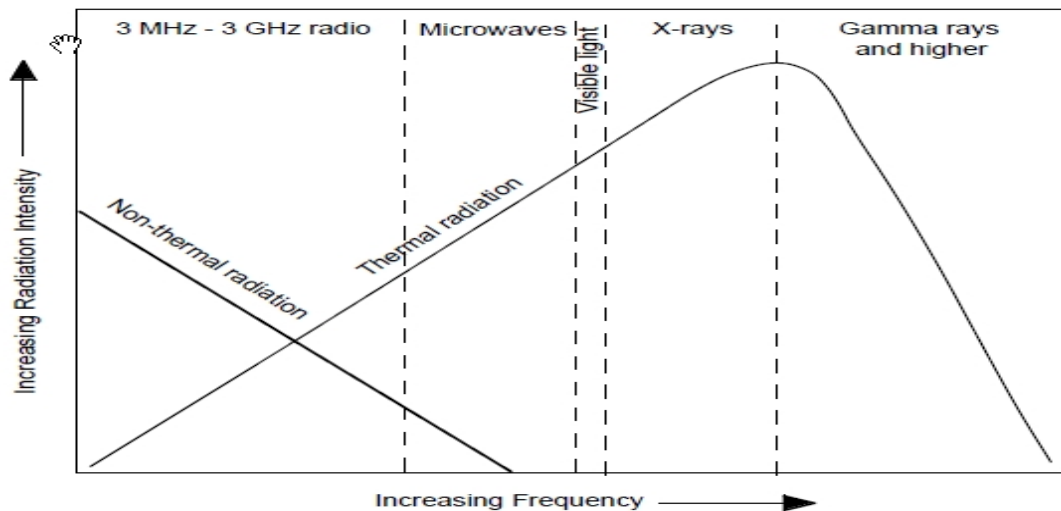
Periaatteessa mitä kuumempi musta kappale on, sitä lyhyemmällä aallonpituudella ja sitä suuremmalla säteilyteholla se lähettää sähkömagneettista säteilyä. Esimerkiksi aurion pintalämpötila on 5780 K, jolloin säteilyn voimakkuuden huippu on noin 500 nm:n kohdalla. Tämä aallonpituus on lähellä näkyvän valon spektrin keskialuetta. [1, s.23; 11.]

Termistä jarrutussäteilyä syntyy silloin, kun vapaa elektroni muuttaa nopeusvektoria siten, että se hidastuu ionin muodostamassa sähkökentässä. Tämän tyyppistä säteilyä syntyy erityisesti ionisoituneissa kaasuissa, jota ilmenee tähtien ja galaksien välisessä vedyssä. Kaasut sijaitsevat tähtien välisessä avaruudessa HII-alueella. Näiden alueiden lämpötila on tyypillisesti 10000 K–1000000 K. [1, s.23; 11.]

Atomien ja molekyylien energiatasojen muutokset saavat aikaan viivasäteilyn. Se voidaan havaita jatkuvan emissiospektrin päällä olevina viivoina. Säteilyn voidaan ajatella syntyvän esimerkiksi siten, että tähden näkyvä pinta säteilee kaikkia aallonpituuksia tasaisesti ja muodostaa jatkuvan spektrin. Tähdessä on atomeja, jotka absorboivat itseensä tiettyjä aallonpituuksia. Kullekin atomille on oma luonteenomainen aallonpituus, joten näihin kohtiin jää spektriin rako (absorptioviiva). Emissioviiva puolestaan syntyy silloin, kun kuuman kaasun atomit säteilevät omalla luonteenomaisella aallonpituudellaan. [1, s.23; 11.]

Synkrotronisäteily on ei-termisen mekanismin lähettämää sähkömagneettista säteilyä. Sitä syntyy silloin, kun kiihtyvässä liikkeessä oleva vapaa varaus, esimerkiksi elektroni, joka ei ole sidottu mihinkään atomiin, lähettää sähkömagneettista säteilyä. Magneettikentässä varatut hiukkaset liikkuvat pitkin voimaviivojen ympäri kiertäviä heliksiratoja. Magneettikentän suunnasta katsottaessa liike on ympyräliikettä ja niin ollen kiihtyvää. Tällainen varaus lähettää säteilyä, jota sanotaan synkrotronisäteilyksi. Säteily lähtee hiukkasen liikkeen suuntaan eli liikeradan tangentin suuntaan. Synkrotronisäteily on merkittävä Linnunradan radiosäteilyn lähde. Esimerkiksi aktiiviset galaksit, radiogalaksit, pulsarit sekä supernovat ovat huomattavia synkrotronisäteilyn lähteitä. [1, s.26; 11.]

Kuvassa 8 on esitetty, kuinka termisten ja ei-termisten mekanismien emittoima sähkömagneettinen säteily eroaa toisistaan. Asteikon vaaka-akseli esittää taajuutta ja pysty-akseli esittää sähkömagneettisen säteilytehon voimakkuutta. Termisten mekanismien sähkömagneettien säteily on voimakkaampaa suuremmilla taajuuksilla, kun taas ei-termisten mekanismien kohdalla tilanne on päinvastainen.



Kuva 8. Termisen ja ei-termisen säteilyn relatiivinen poikkeama toisistaan [1, s.27].

Masersäteily (micro-wave-amplified-stimulated-emission of radiation) on ei-termisen mekanismin emittoimaa sähkömagneettista säteilyä. Masersäteilijöitä löytyy tähtienvälisistä molekyylipilvistä ja pölystä. Maserit ovat molekyylipilvien sisällä olevia tiiviitä alueita, jossa tiettyjen molekyyliviivojen emissio vahvistuu. Tähtienvälinen aine sisältää vain hitusen molekyyliä kuten vetyä, vettä, piimonoksidia ja metanolia. Normaalisti nämä molekyylit ovat vaikeasti havaittavissa. Maseremission ansiosta molekyylit voidaan havaita jopa toisista galakseista saakka. Tyypillisiä maseremission taajuuksia ovat 1,65 GHz (hydroksyyli), 8 GHz (piimonoksidi), 22 GHz (vesi). [1, s.27; 11.]

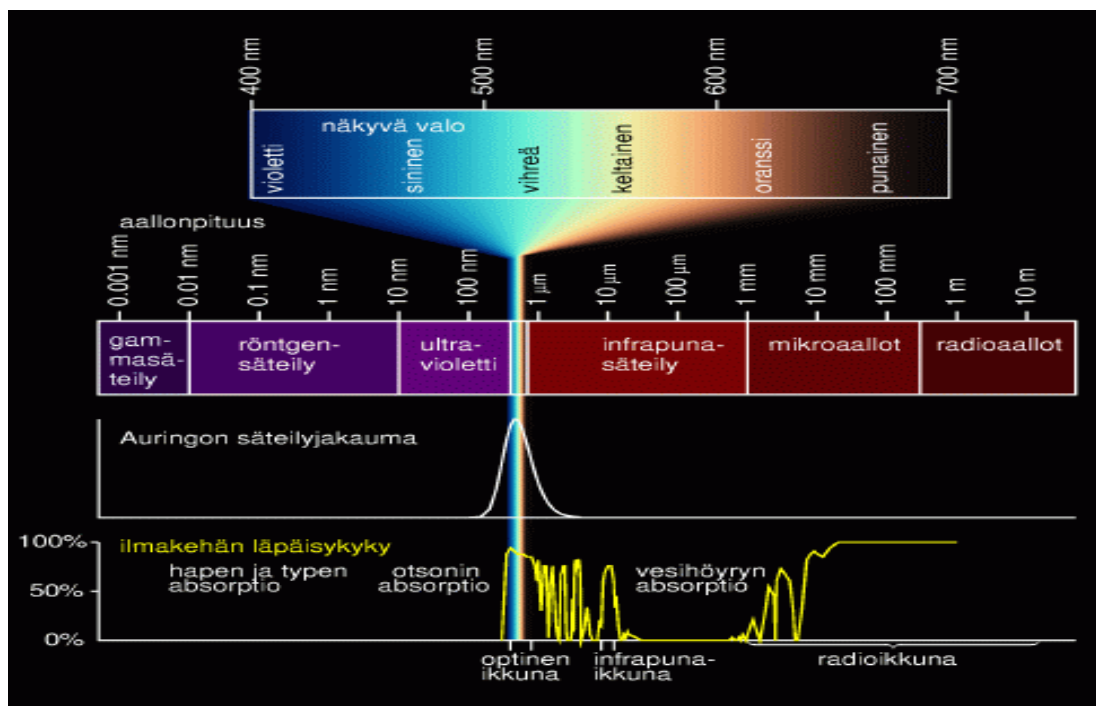
2.4 Väliaineen vaikutus sähkömagneettiseen säteilyyn

Maapallon ilmakehä muodostaa sähkömagneettiselle säteilylle rajapinnan. Ilmakehä absorboi itseensä tiettyjä aallonpituuksia. Osa sähkömagneettisesta säteilystä, kuten näkyvä valo, jotkut alueet ultravioletti ja infrapunasäteilystä sekä radiotaajuinen säteily, läpäisevät ilmakehän. Taajuusalueita, jotka läpäisevät ilmakehän kutsutaan radioikkunaksi ja optiseksi ikkunaksi. [1, s.29; 12.]

Avaruudesta saapuva sähkömagneettinen säteily sisältää kaikkia aallonpituuksia aina gammasäteistä radioaaltoihin saakka. Väliaine, jonka läpi säteily saapuu vastaanottimen antenniin, vaikuttaa siihen voimakkaasti. Väliaineen vaikutus on eri aallonpituuksilla erilainen. Väliaineen atomit ja molekyylit voivat absorboida, sirottaa tai taittaa sähkömagneettista säteilyä. [1, s.29; 12.]

Säteilyn aallonpituudesta riippuu, kuinka hyvin se pääsee ilmakehän läpi. Monilla aallonpituuksilla ilmakehä on täysin läpinäkymätön. Tärkein läpinäkyvistä alueista on niin kutsuttu optinen ikkuna, jonka aallonpituus alue ulottuu noin 300 nanometristä 800 nanometriin (375 THz–1000 THz). Yli 1 millimetrin aallonpituusalueelta alkaa niin kutsuttu radioikkuna, jonka aallonpituusalue ulottuu yhtenäisenä aina kahteenkymmeneen metriin saakka (5 MHz–300 GHz). [55.]

Tätä pidemmille aallonpituuksille ilmakehän yläosassa oleva ionosfääri on melkein läpinäkymätön. Aallonpituuden yläraja riippuu ionosfäärin voimakkuudesta, joka vaihtelee vuorokaudenajan mukaan. Kuva 9 havainnollistaa radioikkunan ja optisen ikkunan aallonpituusalueet sähkömagneettisessa spektrissä. [55.]



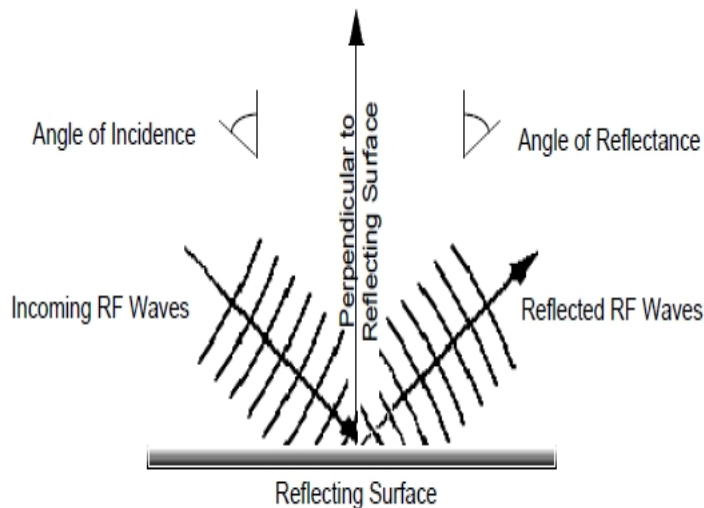
Kuva 9. Radioikkunan ja optisenikkunan aallonpituusalueet sähkömagneettisessa spektrissä [55].

Ilmakehässä olevat kaasumolekyylit, kuten happi ja vesihöyry, vaimentavat signaalia. Kaasumolekyylit absorboivat resonanssitaajuuksilla itseensä enemmän energiaa, josta osa kuluu molekyyliin lämmittämiseen ja osa säteilee pois, jolloin etenevä sähkömagneettinen aalto vaimenee. [12.]

Sade, pilvet, sumu, lumi ja jää sirottavat signaalia, jolloin radiotaajuinen sähkömagneettinen aalto aiheuttaa pisaraan polarisaatiovirtaa, pisara säteilee energiaa kaikkiin suuntiin ja toimii kuten sähködipoli. Pieni hiukkanen saa aikaan absorptiovaimennusta ja suuri hiukkanen sirontavaimennusta. [1, s.29; 12.]

Heijastuminen

Sähkömagneettinen säteily kulkee avaruudessa suoraviivaisesti. Tietyissä väliaineissa kuten metallissa säteily heijastuu. Metallin pintaan saapuvan säteilyn tulokulma ja heijastuskulma ovat yhtä suuret. Tätä periaatetta käytetään hyödyksi esimerkiksi paraboloidipeiliantennin suunnittelussa. Kuva 10 havainnollistaa tarkemmin edellä selostettua heijastusperiaatetta. [1, s.34.]



Kuva 10. Sähkömagneettisen säteilyn heijastusperiaate metallin pinnassa [1, s.34].

Refraktio

Refraktiolla tarkoitetaan sähkömagneettisen säteilyn taittumista optisesti eri tiheyttä olevien aineiden rajapinnassa tai aineen taitekertoimen muuttuessa. Sähkömagneettisen säteilyn nopeus hidastuu väliaineessa, jota kuvataan aineen taitekertoimen avulla.

Väliaineen taitekerroin voidaan laskea yhtälöstä 3. [26.]

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

jossa n on väliaineen taitekerroin, c on sähkömagneettisen aallon nopeus tyhjiössä [m/s] ja v on sähkömagneettisen aallon nopeus väliaineessa [m/s].

Mitä tiheämpää väliaine on, sitä suurempi on sen taitekerroin. Tyhjiön taitekerroin on 1, ilman taitekerroin on noin 1,00029, veden 1,33 ja timantin 2,42. Avaruudesta maahan saapuessaan sähkömagneettinen säteily kokee ilmakehässä refraktioilmion, jonka seurauksena säteily taittuu. [1, s.35.]

Ilmakehässä refraktiota aiheuttaa eri tiheyden omaavat ilmakerrokset. Ilmakerroksen tiheys puolestaan riippuu ilmanpaineesta ja lämpötilasta. Refraktioon vaikuttaa myös ilman kosteus, sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja ilmakerroksen paksuus.[13; 28.]

Refraktio on suurimmillaan horisontissa ja pienimmillään taivaan laella. Toisin sanoen mitä loivemmassa kulmassa sähkömagneettien säteily kohtaa ilmakehän, sitä enemmän se taittuu. Refraktio ilmiö saa aikaiseksi sen, että säteilylähteen paikka maasta katsottuna on korkeammalla, kuin mitä se todellisuudessa on. [1, s.35; 13.]

Skintillaatio

Ilmakehä muodostuu eri kerroksista, joiden lämpötila ja tiheys ovat erilaiset. Ilma väreilee näiden kerrosten välillä sekä niissä esiintyy virtauksia ja pyörteisyyttä, eli skintillaatiota. Sähkömagneettisen säteilyn läpäistessä väreilevän ilmakerroksen se taittuu eri suuntiin ja etenee ilmakehässä eri reittejä pitkin vastaanottimen antenniin. Skintillaatiosta (ilman väreily) johtuen vastaanottimeen antenniin saapuvat signaalit ovat eri vaiheessa keskenään. Osa radioteleskoopeista on suunniteltu siten, että ne ottavat huomioon vaihe-eron aiheuttaman särön ja poistavat sen. [1, s.37; 13.]

Faraday-kiertymä

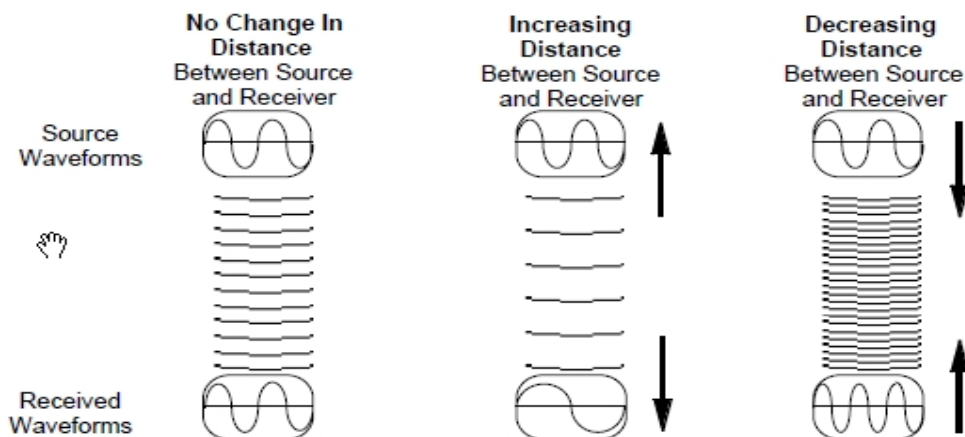
Faraday-kiertymä syntyy, kun lineaarisesti polarisoitunut sähkömagneettisen kentän muodostama aalto läpäisee plasman magneettikentän. Plasman magneettikenttä vaikuttaa aallon polarisaatioon siten, että lineaarisesti polarisoitunut aalto lähtee kiertymään. Faraday-kiertymän avulla on mahdollista määrittää esimerkiksi ionosfääriplas-

manplasman tiheys mittaamalla, kuinka paljon sähkömagneettisen aallon kiertokulma muuttuu sen kulkiessa ionosfääriplasman läpi. [1, s.37.]

2.5 Doppler-ilmiö

Doppler-ilmiöllä tarkoitetaan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuden muuttumista kun säteilyn lähde ja vastaanotin liikkuvat toisiinsa nähden. Kaikkien alkuaineiden spektriviivoilla on tietyt ja tarkoin tunnetut aallonpituudet, jolloin muutokset on helppo havaita. Doppler-ilmiöön perustuvilla mittauksilla voidaan havaita, lähestyykö kohde vastaanotinta vai etääntyykö se vastaanottimesta pois päin. [1, s.39.]

Kuva 11 havainnollistaa Doppler-ilmiön vaikutusta sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuteen kolmessa eri tapauksessa. Ensimmäisessä tapauksessa säteilyn lähde ja vastaanotin pysyvät paikoillaan toisiinsa nähden. Toisessa tapauksessa säteilyn lähde etääntyy vastaanottimesta. Kolmannessa tapauksessa säteilyn lähde liikkuu vastaanotinta kohti. [1, s.39.]



Kuva 11. Doppler-ilmiön eri tapaukset [1, s.39].

Jos säteilyn lähde pysyy paikallaan vastaanottimeen nähden sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja taajuus ovat samat sekä säteilyn lähteessä että vastaanottimen päässä. Säteilyn lähteen liikuessa vastaanottimesta pois päin siirtyy vastaanottimen päässä havaitun signaalin aallonpituus kohti spektriviivan punaista päätä (punasiirty-

mä). Tästä seuraa, että vastaanotetun signaalin aallonpituus on suurempi ja taajuus pienempi vastaanottimen päässä kuin säteilyn lähteessä. [1, s.39; 14.]

Vastaavasti säteilyn lähteen liikuessa vastaanotinta kohden siirtyy vastaanottimen päässä havaitun signaalin aallonpituus kohti spektriviivan sinistä päätä (sinisiirtymä). Tästä seuraa, että vastaanotetun signaalin aallonpituus on lyhyempi ja taajuus suurempi vastaanottimen päässä kuin säteilyn lähteessä. [1, s.39; 14.]

3 Aurinko

Tässä projektissa syntyvä radioteleskooppijärjestelmä on tarkoitettu tieteelliseksi auringontutkimusvälineeksi alan harrastajien, kuten radioamatöörien käyttöön. Aurinko on tavallinen pääsarjan tähti ja yksi voimakkaimmista maapallon ulkopuolisesta sähkömagneettisen säteilyn lähteistä, joka ilmenee taajuusalueella (3 kHz–30 EHz). Auringosta peräisin oleva sähkömagneettinen säteily on useimmiten ympyräpolarisoitunutta, sillä mahdollisesti lineaarisesti polarisoitunut sähkömagneettinen aalto muuttaa polarisaatiotaan sen kulkiessa auringon koronan läpi Faraday-kiertymän johdosta. [1, s.50; 15.]

Auringon avaruuteen säteilemän tehon määrä on noin 4×10^{23} kW ja sen pinnalle keskittyneen tehon vuontiheys on noin $60 \text{ MW}/\text{m}^2$. Se on aurinkokunnan suurin taivaankappale ja sisältää yli 99,8 % aurinkokunnan kokonaismassasta. Auringon etäisyys maapalloon nähden on $1,496 \times 10^8 \text{ km}$ ja halkaisija $1,392 \times 10^6 \text{ km}$. [1, s.50; 15.]

3.1 Auringon aktiivisuuden vaikutus radiokeluihin radioamatööritoiminnassa

Aurinko ionisoi maapallon ionosfäärin kerrokset ja määrää ionosfääriaallon etenemisen. Kaukoyhteyksien saamiseksi on tiedettävä auringon vaikutus radiosignaaleihin. Auringon aktiivisuuden tila vaikuttaa hyvin suuresti kaukoyhteyksiin, ja se vaihtelee suuresti eri vuorokauden ja vuodenaikoihin. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että aurinko tekee radiokelien ennustamisesta epäeksaktin tieteen. [62, s.165.]

Aurinko on tutkitusti aktiivisimmillaan noin 11 vuoden jaksoissa. Silloin sen pinnalla on paljon auringon pilkkuja ja maapallon ionosfäärin ionisaatio on maksimissaan. Yleisesti

ottaen suuri auringonpilkkuluku luo hyvät radiokelit HF-alueelle (3 MHz–30 MHz) maailmanlaajuisesti. [62, s.165.]

Auringon laajakaistainen kohinavuoto (engl. solar flux) eli auringosta tuleva radiotaajuinen kohinasignaali antaa tärkeää tietoa radiokelien seuraamiseen. Auringon aktiivisuuden kasvu lisää kohinavuota ja tämä puolestaan maapallon ionosfäärin ionisoitumista. [62, s.166.]

Auringon laajakaistaista kohinavuota mitataan ns. Solar Flux-(lyhenne SFU) avulla, joka on syrjäyttämässä auringonpilkkuluvun radiokelien ennustamisen välineenä. Pilkkuluvun saamiseksi on oltava näköyhteys aurinkoon, mutta kohinavuomittaus voidaan tehdä sääolosuhteista riippumatta. [62, s.166.]

Ionosfääriaalto eli hyppyeteneminen on ensisijaisesti HF-alueen etenemismuoto, mutta kun auringon kohinavuoto on hyvin korkealla, voi erinomaisia kelejä esiintyä VHF-alueella 50 MHz:n kohdalla ja ajoittain jopa 144 MHz:n kohdalla taivaalla esiintyvien revontulien ansiosta. Revontulia voidaan käyttää heijastimena pitkän matkan yhteyksillä ja niiden avulla voidaan saavuttaa jopa 2000 km:n hyppyjä. [62, s.166; 62, s.167.]

3.2 Auringon synty ja kehitys

Aurinko on syntynyt massiivisen tähden räjähtäessä supernovana noin 4,5 miljardia vuotta sitten. Räjähdyksen voimasta tähden kappaleet sinkoutuivat kaikkialle ympäröivään avaruuteen. Tähdenkappaleiden ylikuumentuneet alkuaineet törmäsivät tähtienväliseen kaasupilveen, jonka johdosta pilvi romahti kasaan. Painovoiman vaikutuksesta kaasu ja pöly kulkeutuivat pilven keskusta, joka johti lopulta ydinreaktioon, josta aurinko sai alkunsa. [15.]

On arvioitu, että aurinko loistaa yhtä vakaana vielä toiset 4,5 miljardia vuotta. Tuona aikana sen keskustassa oleva vety muuttuu heliumiksi, joka saa aikaiseksi energiasäteilyä. Lopulta vety loppuu, jolloin auringon keskusta alkaa tiivistyä ja samanaikaisesti sen ulko-osat laajenevat voimakkaasti; auringosta tulee punainen jättiläinen. Kuumen keskustan säteilypaineen vaikutuksesta laajentuneet ulko-osat kulkeutuvat ympäröivään avaruuteen, ja auringosta tulee planetaarinen sumu. Jäljelle jää kuuma keskusta, jota

nimitetään valkeaksi kääpiöksi. Lopulta Aurinko kuluttaa kaikki polttoaineensa loppuun, se jäähtyy hiljalleen mustaksi kääpiöksi, ja siitä tulee sammunut tähti. [15.]

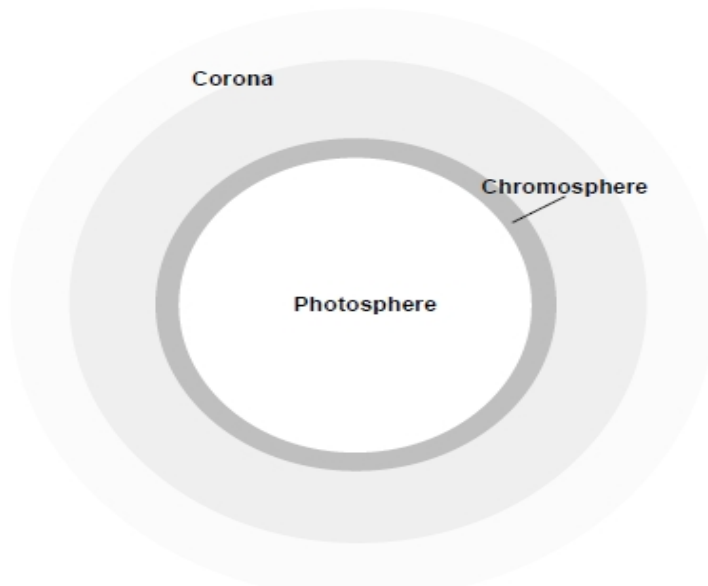
3.3 Auringon rakenne

Auringon massa koostuu 75 % vedystä, 25 % heliumista ja 0,1 % muista aineista. Auringolla ei ole kiinteää pintaa kuten esimerkiksi maapallolla. Auringon uloimmat kerrokset eli navat pyörivät eri nopeudella kuin napojen välissä olevat kerrokset. Tämä ilmiö tunnetaan nimellä differentiaalirotaatio. [15.]

Pinnan pyörähdysaika yhteen kierrokseen auringon ympäri ekvaattorilla, eli napojen välissä on 25,4 päivää ja lähellä napoja 36 päivää. Auringon ydin on suunnattoman kuuma, sen lämpötila on 15 miljoonaa Kelviniä ja paine 250 miljardia kertaa suurempi kuin maan ilmakehän paine. Paineen vaikutuksesta ytimen kaasujen tiheys on 150 kertaa suurempi kuin veden tiheys. [15.]

Auringon pintakerros eli fotosfääri (engl. photosphere) on noin 300–500 km paksu ja sen lämpötila on 5800 kelviniä. Fotosfäärin yläpuolella on kerros, jota kutsutaan kromosfääriksi (engl. chromosphere), ja sen paksuus on noin 2000 km. Kromosfäärin yläpuolella on korona (engl. corona) joka on niin laaja, että se ulottuu miljoonien kilometrien etäisyydelle avaruuteen. [15.]

Koronan lämpötila on 1000000 kelviniä. Koronan voi optisesti havaita ainoastaan auringonpimennyksen aikaan. Auringolla on myös erittäin voimakas magneettikenttä (magnetosfääri), joka ulottuu kauas Pluton taakse. Kuvassa 12 on esitetty auringon kerrosmainen rakenne. [15.]



Kuva 12. Auringon eri kerrokset [1, s.50].

Auringonpilkut ovat auringon pinnalla näkyviä tummia alueita. Ne syntyvät aineen vuorovaikutuksesta magneettikentän kanssa. Auringonpilkkujen lämpötila on 3800 kelviniä ja ne ovat huomattavasti viileämpiä kuin niitä ympäröivien alueiden lämpötila. Auringonpilkut voivat olla hyvin suurikokoisia. Niiden halkaisija voi olla jopa 50000 km, joka on noin 4–5 kertaa suurempi kuin maapallon halkaisija. Tyypillinen pilkun halkaisijan koko on noin 10000 km. Auringonpilkkujen runsaus vaihtelee lähes 11 vuoden jaksossa. [15.]

3.4 Aurinkotuuli

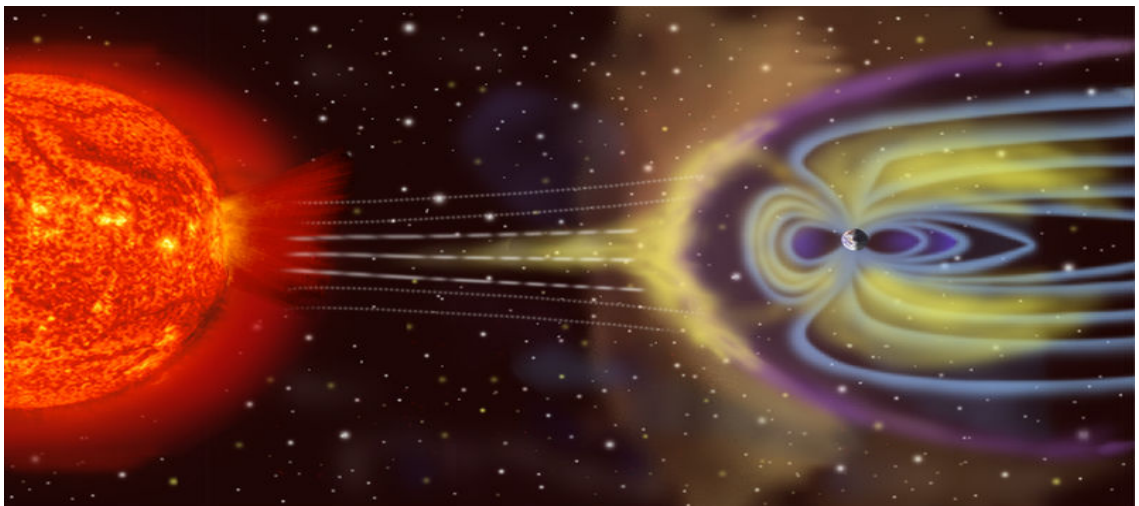
Aurinkotuuli on auringon uloimmasta kerroksesta koronasta tulevien varautuneiden hiukkasten virta. Koronan suunnaton kuumuus lisää pintakerroksessa olevien hiukkasten energiaa, lisääntynyt energia saa aikaan hiukkasten nopeuden kasvun. Lopulta hiukkasten nopeus on niin suuri, että ne karkaavat auringon pinnalta avaruuteen. Aurinkotuuli koostuu pääasiassa protoneista ja elektroneista. Koronan lämpötilan vaikutuksesta siinä olevat atomit ionisoituvat. Aurinkotuuli on lähes täysin ionisoitunutta kaasua, jota kutsutaan plasmaksi. [16; 17.]

Aurinkotuuli koostuu suurimmaksi osaksi ionisoituneen vedyn komponenteista, kuten protoneista, ja elektroneista ja sisältää näiden lisäksi pienen osan ionisoituneita he-

liumatomeja (alfa-hiukkasia). Aurinkotuulella on myös pieniä määriä raskaampia atomeja, jotka ovat ainakin osittain ionisoituneita. Aurinkotuuli on jatkuva, se ei puhalla tasaisesti vaan siinä on välillä puuskaisuutta ja myrskyjä. [16; 17.]

3.5 Aurinkotuulen vaikutus maanpäällä ja avaruudessa

Aurinkotuulen synnyttämä plasma on sähköisesti varautunutta. Maapallon magneettikenttä suojaa sen pintaa aurinkotuulelta ja ohjaa suurimman osan aurinkotuulesta maapallon ohitse. Kuvassa 13 on havainnollistettu, kuinka aurinkotuuli muoaa maapallon magneettikenttää siten, että magneettikenttä painuu kasaan päiväpuolella ja venyy yöpuolella. [15; 17.]



Kuva 13. Maapallon magneettikenttä aurinkotuulen muovaamana [18].

Aurinkotuuli etenee aurinkokunnan läpi nopeudella 450 km/s, ja sen sinkoamat korkeat energiset hiukkaset aiheuttavat maapallolla mm. revontulia, jännitteen hyppäyksiä voimalinjoissa sekä häiriöitä radioliikenteessä. Nykypäivän yhteiskunta on riippuvainen sähköstä ja erilaisista tietoliikenneverkoista sekä laitteista, joten pitkät katkokset niiden toiminnassa voivat pahimmillaan olla jopa katastrofaalisia yhteiskunnan kannalta. [15; 17.]

Voimakkaat aurinkotuulet saattavat altistaa lentomatikustajia lisääntyneelle säteilylle, jonka vuoksi lentoreittejä joudutaan usein muuttamaan. Aurinkotuulet aiheuttavat joskus myös mittavia muutoksia avaruusaluksien lentoratoihin. Aurinkotuuli aiheuttaa ava-

ruudessa mm. komeetoille hännän eli kaasupyrstön. Komeettojen häntä on ionisoituneesta kaasusta muodostuva plasmapyrstö, joka voi olla 150 miljoonaa kilometriä pitkä tai joskus jopa pidempikin. [15; 17.]

3.6 Auringonpurkaus

Auringonpurkaus sinkoaa avaruuteen sähköisesti varautuneen hiukkaspilven, jota kutsutaan plasmaksi. Purkauksen vaikutus tuntuu auringon jokaisessa kerroksessa, kun plasman lämpötila nousee kymmeniin miljooniin kelvineihin. Auringonpurkaukset syntyvät auringon koronassa alueilla, joissa on runsaasti auringonpilkkuja. [19; 59.]

Auringonpilkkualueiden magneettikenttä on erittäin kompleksinen. Purkaus saa alkunsa, kun kompleksisen magneettikentän voimaviivarakenne muuttuu yksinkertaiseksi. Tällöin osa suljetuista voimaviivarakenteista repeää auki. Pieni osa magneettikenttään sitoutuneesta energiasta vapautuu räjähdysmäisesti, jolloin sähköisesti varautunut hiukkaspilvi eli plasma sinkoutuu ympäröivään avaruuteen, joka vetää mukanaan myös magneettikenttää. [19; 59.]

Purkauksen yhteydessä plasman atomien ja hiukkasten nopeus kiihtyy aina valonnopeuteen saakka. Purkauksen aiheuttama sähkömagneettinen säteily on havaittavissa taajuusalueella, joka käsittää koko VLF (Very Low Frequency) alueen aina röntgensäteilyyn saakka (3 kHz–30 EHz). Auringon ollessa aktiivinen purkauksia ilmenee muutama päivässä ja hiljaisena aikana likimäärin yksi viikossa. [19; 59.]

Jos maapallon sijainti aurinkoon nähden on otollinen, purkauksen aiheuttama röntgensäteily saavuttaa maapallon jopa kahdeksassa minuutissa. Äkillinen röntgensäteilyn kasvu aiheuttaa maapallon ionosfäärin alemmissa kerroksissa RF-taajuuksien absorboitumista. Tämä ilmiö häiritsee kaikkea HF-alueen (3 MHz–30 MHz) liikennettä sillä maapallon puoliskolla, jossa aurinko on havaittavissa. [19; 59.]

Tyypillisesti 2–4 päivän kuluttua auringonpurkauksesta peräisin oleva plasmapilvi ja sen mukanaan vetämä magneettikenttä saavuttavat maapallon. Tämä saattaa aiheuttaa maapallon magneettikentässä muutoksia, jotka ovat havaittavissa maapallon läheisessä avaruudessa sekä maanpinnalla magneettimyrskyinä. [19; 59.]

Auringonpurkauksen vaikutukset maassa ja avaruudessa ovat hyvin samankaltaisia kuin aurinkotuulella. Todella voimakkaiden purkausten synnyttämän plasman hiukkassäteily saattaa aiheuttaa avaruudessa astronauteille vakavan säteily sairauden tai kuoleman. Pienempinä annoksina hiukkassäteily lisää syöpäriskiä. [19; 59.]

Auringonpurkausten yhteydessä syntyvät magneettimyrskyt saattavat induoida maanpinnalla sähkölinjoihin sekä avaruudessa oleviin tietoliikennelaitteisiin valtavia virtapiikkejä ja vahingoittaa niitä. Voimakkaat auringonpurkaukset saattavat aiheuttaa pitkiä katkoksia esimerkiksi GPS (Global Positioning System)-satelliittien toiminnassa. [19; 59.]

Auringonpurkauksella on sen synnyttämän laajakaistaisen kohinavuon tehon tiheyteen perustuva luokitus. Purkaukset jaetaan tehon tiheyden mukaan pääluokkiin A, B, C, M tai X. Pääluokat ovat puolestaan jaettu numeroituihin alaluokkiin, jotka kertovat kuinka moninkertainen on ilmoitettu pääluokan arvo verrattuna sen edelliseen arvoon. Heikoimmat purkaukset kuuluvat A-luokkaan esimerkiksi A1, kun puolestaan voimakkaat purkaukset kuuluvat X-luokkaan esimerkiksi X20 tai sen yli. [19; 59.]

4 Antennin automaattisen ohjausjärjestelmän rakentaminen ja toimintaperiaate

Auringontutkimusvälineenä toimivan radioteleskooppijärjestelmän rakennustyövaiheet koostuivat eri yksiköiden hankkimisesta, kokoamisesta ja testaamisesta. Samalla tutustuttiin antennin automaattisessa ohjausjärjestelmässä käytettyjen yksiköiden ja ohjelmistomodulien rakenteeseen sekä toimintaperiaatteeseen. Lopuksi suoritettiin ohjausjärjestelmän testaus radioteleskooppijärjestelmässä prototyyppi testialustan avulla.

4.1 Antennin historia

Projektissa käytetty antenni on entinen öljytankkerin Inmarsat-B (International Maritime Satellite Organization) satelliittiaseman antenni, jonka tähän projektiin on lahjoittanut Neste Oy. Antenni noudettiin Porvoon Sköldvikin öljynjalostamolta, jossa se on ollut tutkimus ja tuotekehityskäytössä.

Antenni on alkuperäisessä käytössä hoitanut satelliittiliikennettä taajuusalueella 1525,000 MHz–1545,000 MHz (vastaanotto) sekä 1626,500 MHz–1646,500 MHz (lähetys). Antennin apertuurihyötysuhteeksi arvioidaan paraboloidipeiliantennille tyypillinen arvo 0,55, jolloin sen vahvistukseksi alkuperäisellä taajuusalueella saadaan likimain 21 dB_i ja -3 dB:n keilanleveydeksi 12° .

Antennin kuljetus

Varsinainen ensimmäinen kehitysvaihe oli antennin kuljetus. Pedestaali (teräsjalusta) irrotettiin kuljetuksen ajaksi gyroskooppialustasta ja osat sidottiin kuljetushihnoilla kiinni kuvassa 14 esitettyyn autotraileriin, jonka avulla antenni kuljetettiin väliaikaiselle tuotekehitys- ja testauspaikalle.



Kuva 14. Antennin kuljetuksessa käytetty autotraileri [20].

Antennin asennus

Kuljetuksen jälkeen suoritettiin antennin asennus väliaikaiselle tuotekehitys- ja testauspaikalle. Ensimmäisenä toimenpiteenä oli pedestaalin (teräsjalustan) kiinnitys gyroskooppialustaan pulteilla, jonka jälkeen pedestaalin alle asetettiin kiviä mekaaniseksi tueksi tasapainottamaan, tukemaan ja suoristamaan sitä. Tämän jälkeen radomi (suojakupu) irrotettiin gyroskooppialustasta.

Seuraavaksi tutkittiin tarkemmin antennin mekaanista kuntoa ja samalla purettiin pois ylimääräiset sähkökaapelit, joita ei tarvita projektissa. Tutkimus osoitti, että antenni on mekaanisesti hyvässä kunnossa. Ruostetta ei havaittu juuri laisinkaan, vaikka antenni on ollut toiminnassa kosteissa olosuhteissa. Kuvassa 15 on esitetty antennin sijainti väliaikaisella tuotekehitys- ja testauspaikalla.



Kuva 15. Antennin sijainti väliaikaisella tuotekehitys- ja testauspaikalla [21].

Gyroskooppihyrrien testi

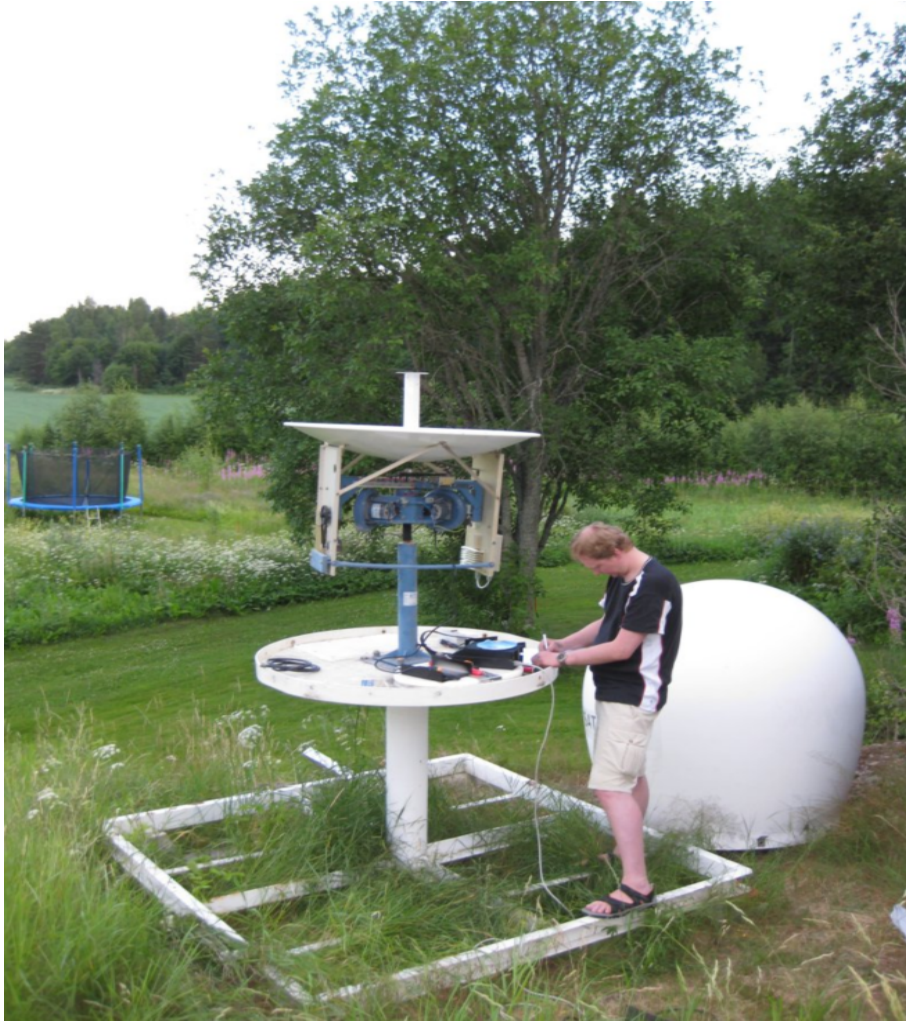
Gyroskooppialustan päällä oleva paraboloidipeiliantenni tasapainottaa itsensä automaattisesti gyroskooppihyrrien avulla, joita ohjataan kahdella 110 V:n vaihtosähkömoottorilla. Gyroskooppihyrrien tehtävänä on kompensoida gyroskooppialustan mahdollista asentovirhettä. Kytkemällä sarjaan nämä kaksi 110 V:n vaihtosähkömoottoria pystyttiin testaamaan hyrrien toiminnan 220 V:n järjestelmässä.

Sarjaan kytkennän riskinä on, että jos toinen moottoreista vioittuu menemällä esimerkiksi oikosulkuun, nousee nimellisjännite ehjän moottorin navoissa kaksinkertaiseksi. 100 %:n nousu nimellisjännitteessä aiheuttaa todennäköisesti ehjän moottorin vioittumisen. Gyroskooppihyrrien testi todisti, että hyrrät toimivat moitteettomasti 220 V:n järjestelmässä ja että ne voidaan hyödyntää projektissa.

4.2 Antennin mekaaninen rakenne

Yläosan gyroskooppialustan rakenteet ovat suojassa radomin alla. Pääheijastimena toimiva paraboloidipeili on kiinnitetty akseleiden välityksellä gyroskooppialustaan, jotka mahdollistavat peilin vapaan liikkumisen kaikkiin ilmansuuntiin. Gyroskooppialusta haakeutuu automaattisesti tasapainoon vaihtosähkömoottoreilla ohjattavien gyroskooppihyrrien avulla.

Antenniin on tehtaalla asennettu askelmoottorit, hammashihnat, hihnapyörät sekä kulmatietietoanturit, jotka liittyvät antennin atsimuutti- ja elevaatiokulman sähköiseen säätöön. Näiden lisäksi gyroskooppialustaan on kiinnitetty alkuperäisessä satelliittiliikenteessä käytetyn lähettimen ja vastaanottimen etuvahvistimet, kontrolloyksikkö sekä teräslevyjä, joiden tarkoitus on gyroskooppihyrrien lisäksi hienosäätää gyroskooppialustan tasapainoa. Kuvassa 16 on esitetty tarkemmin radomin alla olevaa antennin mekaanista rakennetta.

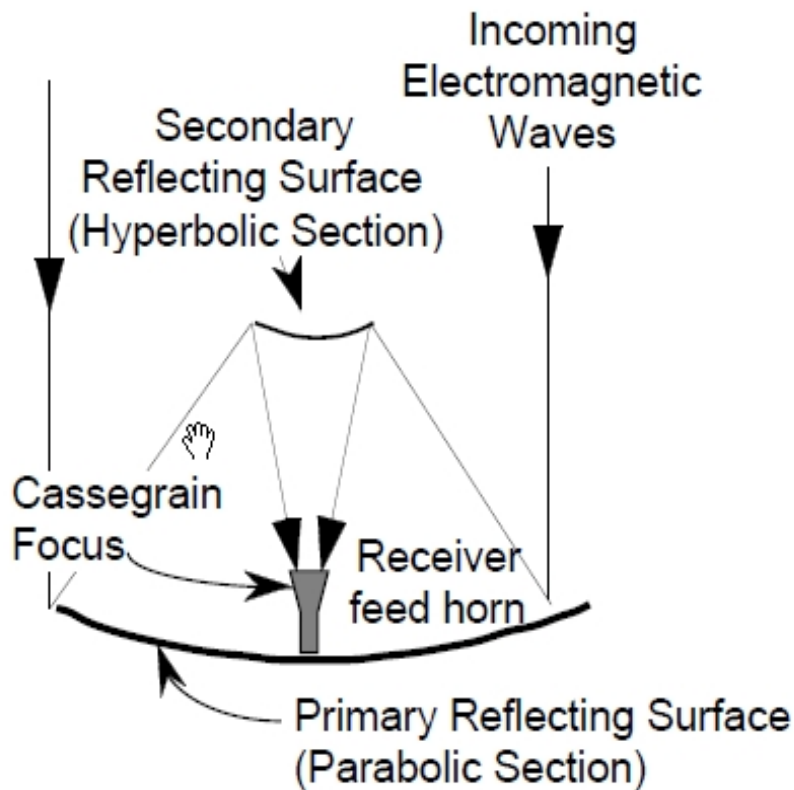


Kuva 16. Antennin mekaaninen rakenne [23].

Paraboloidipeilin syöttöelementti on rakennettu Cassegrain periaatteella. Syöttö toimii siten, että pääheijastimena toimiva paraboloidipeili kerää sähkömagneettisen säteilyn ja heijastaa sen apupeilin kautta syöttöelementtiin. Cassegrain syötön etu on, että

syöttöelementtiä ei tarvitse ripustaa peilin eteen, jolloin sille ei tarvitse rakentaa erillistä raskasta tukirakennetta.

Tämän lisäksi Cassegrain syöttöä käyttämällä antennin syöttökohinalämpötila laskee, koska syöttöelementti näkee pääsääntöisesti peilin pinnan eikä kuumaa maata peilin reunojen ohitse. Kuvassa 17 on esitetty Cassegrain syötön toimintaperiaate. [25.]



Kuva 17. Cassegrain syötön toimintaperiaate [1, s.35].

Antenni on suunniteltu mekaanisesti siten, että se kestää luonnonolosuhteita merellä öljytankkerin kannella. Se tasapainottaa itsensä automaattisesti ja pysyy suunnattuna kommunikaatiosatelliittiin, vaikka tankkeri heiluisi kovan merenkäynnin seurauksena.

Taulukossa 1 on esitetty projektin yhteydessä mitattuja antennin eri yksiköiden mekaanisia mittoja. [23.]

Taulukko 1. Antennin eri yksiköiden mekaanisia mittoja.

Mittaussuure	Mittaustulos [cm]
Radomin ympärysmitta	446,5
Radomin halkaisija	142,1
Paraboloidipeilin halkaisija	98,2
Paraboloidipeilin syvyys	15,0
Syöttöelementin pituus apupeilistä	39,8
Apuheijastimen halkaisija	12,7
Syöttöelementin polttoväli	40,2
Syöttöelementin polttovälin suhde paraboloidipeilin halkaisijaan (F/D)	0,41

Taulukossa 1 esitetyn syöttöelementin polttoväli voidaan laskea yhtälöstä 4. [22.]

$$F = \frac{D^2}{16d} \quad (4)$$

jossa F on syöttöelementin polttoväli [m], D on paraboloidipeilin halkaisija [m] ja d on paraboloidipeilin syvyys [m].

Syöttöelementin säteilykeila sovitetaan peilin polttoväli-halkaisija suhteeseen sopivaksi. Taulukossa 1 esitetty F/D-suhde on laaduton luku ja kertoo kuinka tasaisesti syöttöelementti valaisee peilin koko pinnan siten, että se ei valaise peilin reunojen ohitse. Yleisesti ottaen peilin reunaosien pinta-alaa voidaan hyödyntää siten, että syöttötorven säteilykeilan -10 dB:n pisteet osuvat peilin reunoille, jolloin saadaan hyvä antennivahvistus ja noin 50 %:n hyötysuhde. [25.]

Tämän ratkaisun huono puoli on, että antennin sivukeilojen voimakkuus ja kohinalämpötila kasvavat, koska antenni näkee mitattavan kohteen lisäksi kuumaa maata. Projektissa käytetään antenniin asennettua alkuperäistä syöttöä, joten syöttöelementin säteilykeila on optimoitu tehtaalla siten, että syöttöelementti valaisee mahdollisimman tasaisesti peilin koko pinnan. [25.]

Jos käytetään suurempia taajuuksia, kuin mille antenni on alunperin suunniteltu, syöttöelementti joudutaan vaihtamaan mistä seuraa, että uuden syöttöelementin säteilykeila täytyy sovittaa uudestaan peilin F/D-suhteeseen sopivaksi. [25.]

4.3 Paraboloidipeiliantennin vahvistus

Avaruudesta saapuvien signaalien kanssa ollaan tyypillisesti tekemisissä hyvin matalien signaalitasojen kanssa. Radioteleskooppijärjestelmän tarkoituksena on saavuttaa riittävän voimakas signaalin taso vastaanottimen ilmaisimen ulostuloon, jotta saadaan aikaiseksi luotettavia mittaustuloksia. Tämä voidaan saavuttaa kasvattamalla järjestelmän vahvistusta tai vähentämällä järjestelmässä syntyvää kohinaa.

Järjestelmän vahvistuksen kasvattaminen on yleensä helpompi vaihtoehto, joka saadaan aikaan esimerkiksi kasvattamalla antennin vahvistusta. Teoriassa, mitä suurempi antennin vahvistus on, sitä heikompia signaaleja sillä on mahdollista ottaa vastaan ilman, että vastaanotettava signaali hukkuu systeemin synnyttämän oman kohinasignaalin alle.

Yksi antennitekniikassa käytetyistä käsitteistä on efektiivinen apertuuri eli antennin sieppauspinta-ala. Efektiivisen apertuurin käsite on hyödyllinen tarkasteltaessa lähinnä vastaanotinantennia. Jos antennilla on selkeästi havaittavissa fyysinen apertuuri eli

fyysinen pinta-ala kuten paraboloidipeiliantennilla, on mielekästä puhua apertuurihyötysuhteesta.

Paraboloidipeiliantennin vahvistus voidaan laskea, kun tunnetaan antennin efektiivinen apertuuri (sieppauspinta-ala) ja fyysinen apertuuri (fyysinen pinta-ala). Yhdessä nämä muodostavat apertuurihyötysuhteen, joka paraboloidipeiliantennin tapauksessa on tyypillisesti luokkaa 50 %–80 %. [27.]

Apertuurihyötysuhde voidaan laskea yhtälöstä 5. [27.]

$$\eta_{ap} = \frac{A_{eff}}{A_{phys}} \quad (5)$$

jossa η_{ap} on apertuurihyötysuhde, A_{eff} on paraboloidipeilin efektiivinen apertuuri [m^2] ja A_{phys} on paraboloidipeilin fyysinen apertuuri [m^2].

Paraboloidipeiliantennin fyysinen apertuuri eli sen fyysinen pinta-ala voidaan laskea yhtälöstä 6. [56.]

$$A_{phys} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

jossa A_{phys} on paraboloidipeilin fyysinen apertuuri [m^2] ja D on paraboloidipeilin halkaisija [m].

Kun apertuurihyötysuhde ja fyysinen pinta-ala tunnetaan, voidaan niiden avulla laskea antennin efektiivinen apertuuri. Tällöin yhtälö 5 saa muodon. [27.]

$$A_{eff} = \eta_{ap} A_{phys} \quad (7)$$

Efektiivinen apertuuri riippuu myös antennin vahvistuksesta ja aallonpituudesta seuraavasti. [27.]

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (8)$$

jossa A_{eff} on efektiivinen apertuuri [m^2], λ on aallonpituus [m] ja G on vahvistuskerroin.

Antennivahvistus voidaan ilmoittaa joko vahvistuskertoimen avulla tai desibeleissä. Vahvistuskerroin G on laaduton luku, joka kertoo, kuinka paljon antenni vahvistaa signaalia verrattuna teoreettiseen kaikkiin suuntiin säteilevään isotrooppiseen säteilijään, jonka vahvistuskerroin on 1. [29.]

Antennin vahvistuskerroin voidaan laskea yhtälöstä 9. [29.]

$$G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 D^2 n_{ap}}{\lambda^2} \quad (9)$$

jossa G on vahvistuskerroin, A_{eff} on antennin efektiivinen apertuuri [m^2], D on paraboloidipeilin halkaisija [m], λ on aallonpituus [m] ja n_{ap} on apertuurihyötysuhde.

Radiotekniikassa antennivahvistus ilmoitetaan yleensä desibeleissä, koska niitä on yksinkertaisempaa käsitellä laskutoimituksissa kuin vahvistuskerrointa. Antennivahvistus ilmoitetaan joko usein isotrooppiseen säteilijään dB_i tai ideaaliseen puolialtodipoliin dB_d verrattuna. Isotrooppiseen säteilijään suhteutetut arvot ovat 2,15 dB suurempia kuin puolialtodipolin. [29; 30.]

Antennin vahvistuskerroin voidaan muuntaa desibeleiksi yhtälön 10 avulla. [29; 30.]

$$G_{dB_i} = 10 \log_{10}(G) \quad (10)$$

jossa G_{dB_i} on antennin vahvistus desibeleissä ideaaliseen isotrooppiseen säteilijään verrattuna ja G on vahvistuskerroin.

Yhtälön 9 perusteella havaitaan helposti, että antennin vahvistus on vahvasti riippuvainen peilin halkaisijasta, sieppauspinta-alasta sekä aallonpituudesta. Radioastronomisissa sähkömagneettinen säteily saapuu kaukaa avaruudesta maan pinnalle, jolloin antennin sieppaaman sähkömagneettisen säteilyn tehon vuontiheys on hyvin pieni.

Tämän vuoksi ammattikäyttöön tarkoitetut radioteleskoopit käyttävät erittäin suuren halkaisijan omaavia paraboloidipeiliantenneja, joilla saadaan aikaiseksi suuri vahvistus,

samalla kun peilin sieppauspinta-ala kasvaa. Projektissa käytetyn antennin vahvistus on likimain 22 dB_i systeemin vastaanottotaajuudella 1664,44 MHz sekä apertuurihyötysuhteella 0,55. Yleisesti ottaen mitä suurempi on antennivahvistus, sitä kapeampi on keilan leveys ja sitä vähemmän saadaan tehoa muista suunnista.

4.4 Puolentehon keilanleveys

Antennin keilanleveydellä tarkoitetaan yleensä puolentehon keilanleveyttä eli -3 dB :n keilanleveyttä. Se on keilan avauskulma, jossa keilan molemmilla reunoilla on 50 % keskikohdan maksimitehosta ja avauskulma voidaan ilmoittaa joko asteina tai radiaaneina. -3 dB :n keilanleveys määrittää radioteleskooppijärjestelmässä antennin suuntaustarkkuuden ja sitä kautta antennin ohjaamiseen tarkoitetun mekaniikan sekä askelmoottorien säätötarkkuuden. [25.]

Mitä kapeampi -3 dB :n keilanleveys on, sen vaativampaa on sen suuntaaminen mitattavaan kohteeseen. Jos antennin mekaniikan ja askelmoottorien säätötarkkuus on huono, -3 dB :n keilanleveys ylittyy silloin, kun askelmoottori pyörähtää yhden askeleen verran johonkin suuntaan. Tämän ilmiö on käytännössä havaittavissa mittausdatan suurina vaihteluina. [25.]

Jos mittausdata on esitetty graafisesti, mittauskäyrä on epätasainen antennin ohjauksen aikana. Varsinkin korkeilla taajuuksilla, kuten esimerkiksi 11 GHz antennin mekaniikan ja askelmoottorien säätötarkkuus ovat merkityksellisiä tekijöitä, koska silloin -3 dB :n keilanleveys on erittäin kapea. [25.]

Paraboloidipeiliantennin -3 dB :n keilanleveys voidaan laskea yhtälöstä 11. [29.]

$$\theta = \frac{k\lambda}{D} \tag{11}$$

jossa θ on paraboloidipeiliantennin -3 dB :n keilanleveys ilmoitettu asteina, k on kerroin joka on paraboloidipeilin tapauksessa 70, silloin kun puolentehon keilanleveys on ilmoitettu asteina, λ on aallonpituus [m] ja D on paraboloidipeilin halkaisija [m].

Projektissa käytetyn paraboloidipeiliantennin -3 dB:n keilanleveys järjestelmän vastaanottotaajuudella 1664,440 MHz on 13° . Koska -3 dB:n keilanleveys on paljon suurempi kuin Auringon kulmaläpimitta maasta katsottuna ($0,5^\circ$), antennin suuntaus mitattavaan kohteeseen on helppoa. [63.]

Yhtälöstä 11 voidaan havaita helposti, että mitä pienempi aallonpituus on kyseessä, sitä kapeampi on antennin -3 dB:n keilanleveys. Korkeilla taajuuksilla kuten esimerkiksi 11 GHz antennin -3 dB:n keilanleveys on likimain 2° , jolloin antennin suuntaustarkkuus, tulee haasteelliseksi. Tällöin antennin mekaniikalta ja askelmoottoreilta vaaditaan suurta säätötarkkuutta ja hyvin pieniä toleransseja.

4.5 Antennin askelmoottorien säätötarkkuuden arviointi

Antennissa on kaksi askelmoottoria ja niihin liittyvää ohjausmekaniikkaa. Antennin alkuperäisten askelmoottorien yhden askellusvälin vakioaskelkulma on moottorin valmistajan verkkosivujen mukaan $1,8^\circ$. Askelmoottorit ohjaavat vetohihnan välityksellä kahta halkaisijaltaan erikokoista hihnapyörää, jotka puolestaan pyörittävät gyroskoopialustassa olevia atsimuutti (suuntakulma) ja elevaatiokulmaa (korotuskulma) säätäviä aksleita. [37.]

Halkaisijaltaan suuremmat hihnapyörät on kiinnitetty gyroskoopialustassa oleviin atsimuutti- ja elevaatiokulmaa säätäviin aksleihin, ja pienemmät hihnapyörät on kiinni askelmoottorien aksleissa. Hihnapyöristä suuremman hampaiden lukumäärä on 54 ja pienemmän 10, josta saadaan välityssuhteeksi ($10/54 \approx 0,185$).

Askelmoottorien säätötarkkuuden arvioimiseksi laskettiin, kuinka monta astetta antennikeila siirtyy vaaka tai pystysuunnassa silloin, kun askelmoottori tekee yhden askelluksen. Asteluku saadaan selville askelmoottorin valmistajan ilmoittaman vakioastekulman sekä hihnapyörien välityssuhteen avulla, josta tässä tapauksessa seuraa ($1,8^\circ \times 0,185 \approx 0,33^\circ$).

Antennikeila siirtyy siis $0,33^\circ$ vaaka- tai pystysuunnassa yhden askelluksen aikana. Tästä voidaan päätellä, että antennin -3 dB:n keilanleveys ei ylitä askelmoottorin suorittaman yhden askelluksen aikana. Askelmoottorien säätötarkkuus on riittävä järjestelmän vas-

taanottotaajuudella 1664,440 MHz. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että antennissa olevat alkuperäiset askelmoottorit oli mahdollista hyödyntää tässä projektissa.

4.6 Nostokurjen rakentaminen

Radomin fyysinen muoto ja paino ovat sellaiset, että sen siirtäminen ilman apuvälineitä on hankalaa ja vaarallista. Esimerkiksi tuulisella säällä radomin nostaminen pois antennin pedestaalista saattaa olla mahdoton tehtävä. Joskus syntyy tilanteita, jossa yksi henkilö joutuu siirtämään radomia, jolloin työturvallisuuden vuoksi päätettiin rakentaa apuvälineeksi nostokurki.

Nostokurki on rakennettu siten, että siinä on yksi 4 x 4 tuuman pystypuu ja yksi 2 x 4 tuuman vinoside, jotka on asennettu kahdella isolla saranalla kiinni teräsjalustaan. Saranoiden avulla pystypuu voidaan kaataa maata vasten, jolloin poikittaispuomi on helppompi asettaa pystypuuhun kiinni. Poikittaispuomi on asennettu kolmella pienellä saranalla kiinni pystypuuhun, mikä mahdollistaa sen, että radomia voidaan liikutella helpommin sivusuunnassa.

Varsinainen nostotalja, jonka avulla radomi nostetaan gyroskoopialustan päältä pois, asetetaan poikittaispuomissa olevaan lenkkiruuviin. Radomiin on kiinnitetty neljä kappaletta nailonnarua, jotka on kiinnitetty nostotaljassa olevaan koukkuun. Kuvassa 18 on esitetty projektia varten rakennettu radomin nostokurki.



Kuva 18. Radomin nostokurki [34].

Pystypuun vinositeiden tarkoitus on säätää pystypuun suoruus. Vinositeisiin kohdistuu pituussuuntaista veto- tai työntövoimaa kuormasta riippuen. Poikittaispuomin pitkä vinoside on tarkoitettu puomin tukemiseksi silloin, kun siinä on kuormaa. Poikittaispuomissa olevan lyhyen vinositeen tarkoitus on pitää puomi kasassa, kun se otetaan irti pystypuusta.

4.7 EME-systeemin rakenne ja toimintaperiaate

EME (Earth Moon Earth) systeemi on tässä projektissa yksi laajempi kokonaisuus antennin automaattista ohjausjärjestelmää. EME-systeemi on suunniteltu pääasiassa radioamatöörien käyttöön, jotka pitävät kaukoyhteyksiä keskenään käyttämällä kuuta passiivisena heijastimena.

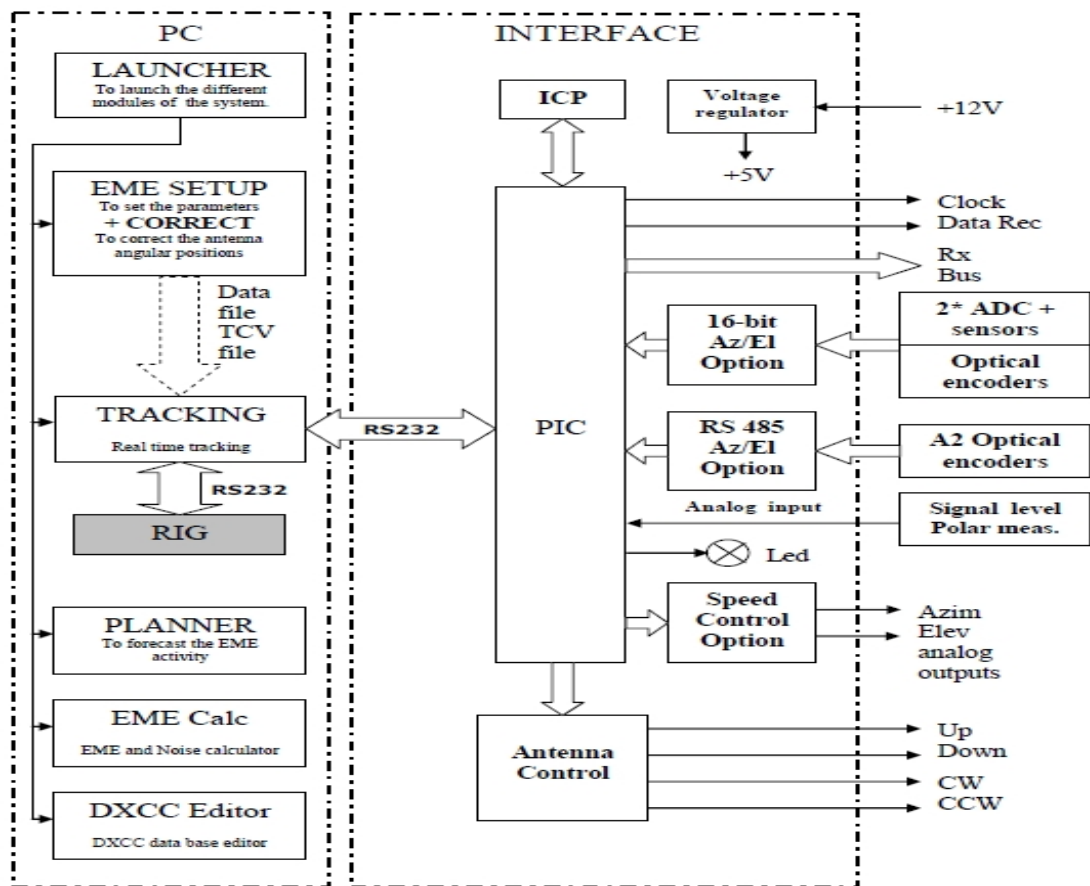
Systeemin avulla on mm. mahdollista seurata automaattisesti ja reaaliajassa eri kohteita kuten aurinkoa tai kuuta. Sen avulla voidaan hallita myös yhteydenpitoon ja liikennöintiin liittyviä menettelytapoja ja parametreja. Näiden lisäksi systeemiä voidaan käyttää myös radioaseman kaluston kauko-ohjaukseen sekä kalibrointiin. [35 s.3.]

Systeemi koostuu ilmaisista 32-bittisistä ohjelmistomoduuleista, joita on mahdollista ajaa Windows käyttöjärjestelmän avulla sekä EHN-liityntäkortista, jonka avulla on mahdollista ohjata radioaseman kalustoa. Ohjelmistomoduulit ja liityntäkortin on suunnitellut ranskalainen radioamatööri Jean-Jacques Maintoux F1EHN (Radioamatööriaseman tunnus). [35 s.3.]

EME-systeemi tarvitsee toimiakseen paikallisen tietokoneen, ilmaiset ohjelmistomoduulit ja maksullisen liityntäkortin, jonka avulla voidaan ohjata antennia, vastaanotinta sekä lähetintä. Systeemissä on kuusi erilaista ohjelmistomoduulia, jotka ovat Launcher (käynnistys), Setup (järjestelmän asetukset), Tracking (automaattinen seuranta), Planner (yhteyksien suunnittelu), Calculator (linkkibudjetin laskenta) ja DXCC (DX Century Club) editor (tietokanta editori). [35 s.3.]

Tärkeimmät ohjelmistomoduulit projektin kannalta ovat Launcher, Setup sekä Tracking. Muut ohjelmistomoduulit, kuten Planner, Calculator ja DXCC-Editor ovat käytössä silloin, kun radioamatööri suunnittelee ja hallinnoi pitkän matkan yhteyksiä käyttämällä

kuuta passiivisena heijastimena. Kuvassa 19 on esitetty EME-systeemin lohkokaavio. [35 s.3.]



Kuva 19. EME-systeemin lohkokaavio [35 s.12].

Launcher-ohjelmistomoduulin avulla voidaan hallinnoida ja käynnistää EME-systeemin muita ohjelmistomoduuleja, jolloin sen voidaan ajatella olevan käyttäjäprofiileihin. Sen avulla käyttäjä voi halutessaan luoda erilaisia käyttäjäprofiileja eri kuunteluasemien ympäristöihin. Käyttäjäprofiilit tallennetaan paikallisen tietokoneen kovalevyille. [35, s.3.]

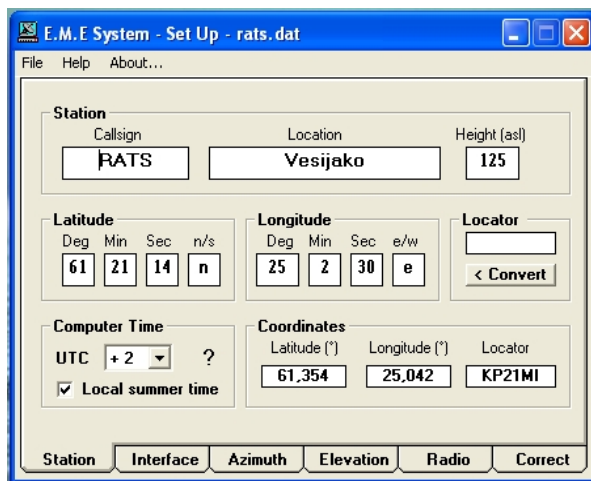
Käyttäjäprofiilit mahdollistavat sen, että EME-systeemiä voidaan helposti käyttää erilaisissa ympäristöissä ilman kaikkien parametrien uudelleen asettelua. Kuvassa 20 on esitetty Launcher-ohjelmistomoduulin päävalikko, jossa näkyy radioteleskooppijärjestelmän kolme erilaista käyttäjäprofiilia. [35, s.3.]



Kuva 20. Radioteleskooppijärjestelmän eri käyttäjäprofiilit.

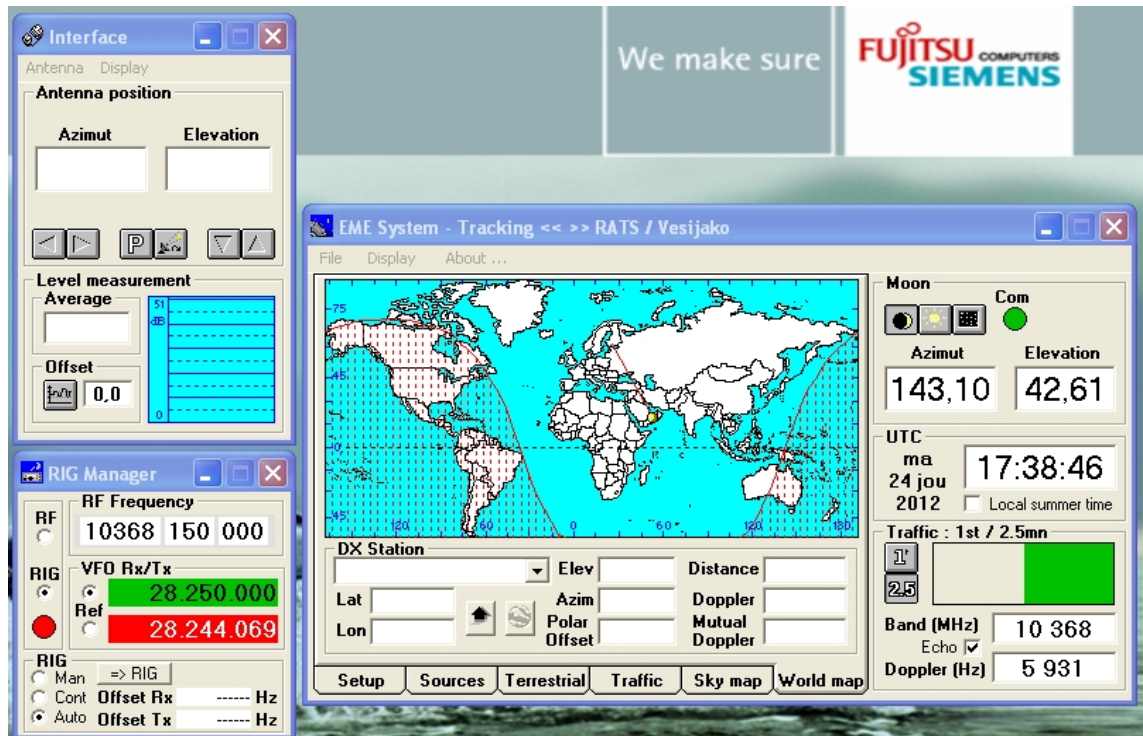
Setup-ohjelmistomoduulin avulla voidaan EME-systeemiin asettaa lähettimen ja vastaanottimen eri toimintaparametreja. Tällaisia parametreja ovat tyypillisesti aseman maantieteellinen sijainti, asematunnus, paikallisen tietokoneen sarjaportin asetukset, antennin asentotietoihin liittyvät ohjausparametrit, EHN-liityntäkortin asetukset sekä järjestelmässä käytetty lähetys- ja vastaanottotaajuus. [35, s.3.]

Kuvassa 21 on esitetty Setup-ohjelmistomoduulin asematieto välilehti, jossa näkyy radioteleskooppijärjestelmän maantieteellisen sijainnin ilmoittavat koordinaatit. [35, s.3.]



Kuva 21. Radioteleskooppijärjestelmän maantieteelliset koordinaatit.

Tracking-ohjelmistomoduulin päätehtävänä on laskea antennin asentotietoparametrit reaaliaikaisesti ja automaattisesti. Kuvassa 22 on esitetty Tracking-ohjelmistomoduulin käyttöliittymä valikot.



Kuva 22. Tracking-ohjelmistomoduulin käyttöliittymä valikot.

RIG (lähetin-vastaanotin) Manager on asemalla olevan lähettimen sekä vastaanottimen ohjaamiseen tarkoitettu käyttöliittymä. Interface on antennin manuaaliseen ja automaattiseen ohjaukseen tarkoitettu käyttöliittymä, joka näyttää samalla antennin kulmatietoantureiden välittämät atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemat sekä vastaanotetun signaalin tason. [35, s.3.]

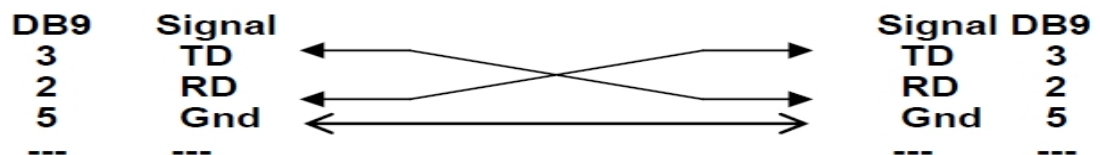
EME-System-Tracking on käyttöliittymä eri ohjausparametrien syöttämiseksi EME-systemeisiin. Se näyttää samalla mm. atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemat, jotka Tracking ohjelmistomoduuli laskee systeemiin asetetun maantieteellisen sijainnin ja paikallisen kellonajan perusteella. [35, s.3.]

4.7.1 EHN-liityntäkortin rakenne ja toimintaperiaate

EHN-liityntäkortti toimii Tracking-ohjelmistomoduulilta saamiensa ohjausparametrien perusteella. Sen päätehtävänä radioteleskooppijärjestelmässä on välittää ohjaussignaalit antennin atsimuutti- ja elevaatiokulmaa säätävälle askelmoottoriohjauskortille sekä lukea antennissa olevia kulmatietoantureita. Liityntäkorttia voidaan myös käyttää vas-

taanottimen ja lähettimen signaalintasojen ja syötön polarisaatiotiedon mittaamiseen. [35, s.31.]

Korttiin voidaan asentaa lisäoptioita, kuten analogiset ohjauslinjat antennin askelmoottorien kierrosnopeuden säätöä varten. Liityntäkortti liikennöi paikallisen tietokoneen kanssa RS-232 (Recommended Standard 232) sarjaportin välityksellä. Jotta liikennöinti onnistuisi paikallisen tietokoneen ja liityntäkortin välillä on väyläkaapeli oltava ristiin kytketty. Kuvassa 23 on esitetty RS-232-väyläkaapelin kytkentäohje. [35, s.31.]

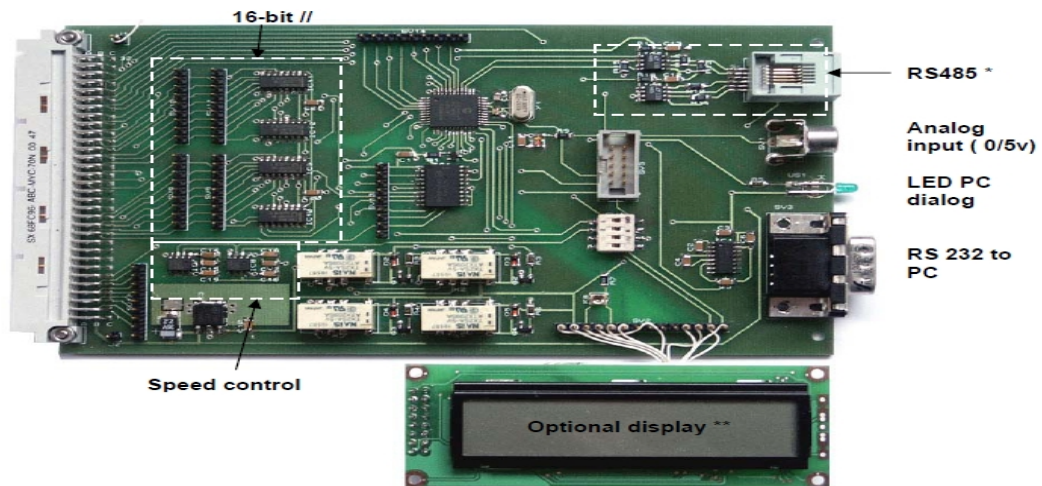


Kuva 23. RS-232-kaapelin kytkentäohjeet [35 s.60].

Liityntäkortti on suunniteltu mikrokontrollerin PIC (Peripheral Interface Controller) 16F877-4PT ympärille. Korttiin on saatavilla kytkentäkaavat ja käyttöohjeet varosaluetteloihin kortin valmistajan kotisivuilta osoitteesta http://MK-EHN.pagesperso-orange.fr/download/EME_Doc_V7.pdf. Kortin voi tarvittaessa rakentaa myös itse hankkimalla piirikytkentälevyn ja tarvittavat komponentit, tai sen voi tilata valmiiksi rakennettuna ja ohjelmoituna. [35, s.51; 35, s.58.]

Jos käyttäjä päättää kalustaa kortin itse, hänen on poltettava mikrokontrollerin ohjelma sen sisäiseen muistiin erillisellä ohjelmointilaitteella, jonka kytkentä on selitetty kortin käyttöohjeissa. Mikrokontrollerin sisäinen ohjelma on saatavana erillisenä tiedostona kortinvalmistajan tiedostopalvelimelta osoitteesta <http://MK-EHN.pagesperso-orange.fr/download/202a.zip>. Kortti tukee paikallista LCD-(Liquid Crystal Display) näyttöä, jonka avulla antennin asentotiedot saadaan näkyviin ilman paikallista tietokonetta. [35, s.57; 35, s.59.]

Projektissa käytetty liityntäkortti on tilattu valmiiksi rakennettuna, ohjelmoituna sekä testattuna. Korttiin on valmistajan toimesta asennettu lisäoptiona analogiset ohjauslinjat antennin askelmoottorien kierrosnopeuden säätöä varten. Itselle jäi tehtäväksi RS-232-kaapelin rakentaminen, sekä LCD-näytön asentaminen korttiin. Kuvassa 24 on esitetty projektissa käytetty EHN-liityntäkortin rakenne. [35 s.57.]



Kuva 24. EHN-liityntäkortti [35, s.57].

EHN-liityntäkortin RS-485 (Recommended Standard 485) portti toimii US Digitalin valmistaman absoluuttisten kulmatietoanturien SEI (Serial Encoder Interface) väylänä. Jos EME-systeemiin ei ole asennettu absoluuttisia kulmatietoantureita, RS-485-portti voidaan poistaa kokonaan käytöstä Setup-ohjelmistomoduulin asetusten avulla. [35, s.33.]

Kortissa on 16-bittinen rinnakkaisväylä, jota käytetään optisten pulseilla toimivien kulmatietoanturien lukemiseen. Tracking-ohjelmistomoduuli osaa lukea pulseilla toimivia kulmatietoantureita binäärisessä, BCD (Binary Coded Desimal), tai Grey-koodatussa muodossa. Jos EME-systeemiin ei ole asennettu pulseilla toimivia kulmatietoantureita 16-bittinen rinnakkaisväylä voidaan poistaa kokonaan käytöstä Setup-ohjelmistomoduulin asetusten avulla. [35, s.33.]

Liityntäkorttiin on asennettu lisäoptiona kaksi A/D (Analog to Digital Converter) muunninta, joiden avulla kortti muodostaa antennin askelmoottorien ohjauskortille analogisen kierrosnopeuden säätöjännitteen. Setup-ohjelmistomoduulissa asetettavan asentoero parametrin avulla käyttäjä voi määrittää kuinka askelmoottorien kierrosnopeus käyttäytyy säätöprosessin aikana. Seurattavan kohteen, kuten auringon paikka, muuttuu jatkuvasti taivaalla maapallon pyörimisliikkeen vuoksi. Antennin asentoa säädetään tarkoituksella hieman ohi seurattavasta kohteesta Setup-ohjelmistomoduulissa asetettavien hystereesi parametrien verran. Tästä seuraa, että askelmoottorit eivät pyöri jatkuvasti eikä antenni ajaudu ikuisen säätösilmukkaan. [35, s.5; 35, s.33.]

Kortissa on erillinen liityntä ulkopuolisille analogisille laitteille kuten potentiometreille, vastaanottimen ilmaisimien diodille ja antennin polarisaatiotiedon ilmoittava kytkennälle. Analoginen liityntä mahdollistaa sen, että korttia voidaan käyttää esimerkiksi vastaanotetun signaalin tasojen mittaamiseen tai antennin polarisaatiotiedon indikointiin käyttäjälle. [35, s.32.]

EHN-liityntäkortin avulla voidaan antennia ohjata kolmessa eri tilassa. Ensimmäinen ohjaustila on manuaaliohjaus, jolloin käyttäjän on ohjattava antennia itse Tracking-ohjelmistomoduulin avustuksella. Tässä tilassa liityntäkortti käyttäytyy siten, että se muodostaa antennin askelmoottorien ohjausyksikölle analogisen vakiotasoisien kierrosnopeuden säätöjännitteen, joka ei muutu säätöprosessin aikana ollenkaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että antenni liikkuu vakionopeudella säätöprosessin aikana. [35, s.33; 36, s.1.]

Toisessa ohjaustilassa on käytössä automaattiohjaus, jolloin systeemi huolehtii antennin ohjauksesta. Tässä tilassa liityntäkortti käyttäytyy siten, että se muodostaa suuntatietoreleiden kautta +5 V:n ohjaussignaali sekä analogisen kierrosnopeuden säätöjännitteen antennin askelmoottorien ohjausyksikölle. Analoginen jännite muuttuu säätöprosessin aikana välillä 0 V–4 V. Tässä tilassa antennin askelmoottorit liikkuvat analogisen kierrosnopeuden säätöjännitteen määräämällä nopeudella säätöprosessin aikana. [35, s.33; 36, s.2.]

Kolmannessa ohjaustilassa on käytössä automaattiohjaus, jolloin systeemi huolehtii antennin ohjauksesta. Tässä tilassa liityntäkortti käyttäytyy siten, että se muodostaa suuntatietoreleiden kautta +5 V:n ohjaussignaali sekä analogisen kierrosnopeuden säätöjännitteen antennin askelmoottorien ohjausyksikölle. Analoginen säätöjännite on keskitetty +2 V:n tasolle ja se vaihtelee ± 2 V keskitetyn tason ympärillä. Tässä tilassa antennin askelmoottorit liikkuvat analogisen kierrosnopeuden säätöjännitteen määräämällä nopeudella säätöprosessin aikana. [35, s.33; 36, s.3.]

Kolmas ohjaustila tarvitsee toimiakseen ulkopuolisen operaatiovahvistimen, jolla liityntäkortin muodostama +2 V:n jännite voidaan nollata antennin askelmoottorien ohjausyksikön sisään menossa vastaamaan tilaa, jossa antenni on suunnattuna tarkasti kohteeseen. [35, s.33; 36, s.3.]

Toisessa ja kolmannessa ohjaustilassa liityntäkortti muodostaa antennin askelmoottori-ohjainkortin napoihin ramppimaisen analogisen kierrosnopeuden säätöjännitteen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että säätöprosessin aikana antennin askelmoottorit lähtevät liikkeelle suurella kierrosnopeudella ja ne pudottavat kierrosnopeuttaan heti, kun antenni on suunnattu tarpeeksi lähelle lopullista asentoaan. Tämän johdosta antennin ohjaus on tasainen eikä käyttäydy töksähtelevästi säätöprosessin aikana. [35, s.33.]

EHN-liityntäkortin toimintoja testattiin kytkemällä se kiinni paikalliseen tietokoneeseen RS-232-väyläkaapelin välityksellä. Liityntäkorttia ohjattiin Tracking-ohjelmistomoduulin avustuksella manuaalisessa ja automaattisessa ohjastilassa. Testin lopputulos oli, että paikalliseen tietokoneeseen asennetut EME-systeemin ohjelmistomoduulit toimivat oikein ja liityntäkorttiin asennettu LCD-näyttö toimii oikein. Kortti reagoi ohjauskäskyihin ja eri parametrien asetteluun oikealla tavalla, josta seurasi, että se voitiin ottaa käyttöön antennin automaattisessa ohjausjärjestelmässä.

4.7.2 Absoluuttinen kulmatietoanturi

Alkuperäisessä asennuksessa antennin gyroskooppialustaan oli asennettu potentiometrit, joiden avulla antennin asentotieto ilmoitettiin askelmoottorien ohjainkortille. Nämä potentiometrit korvattiin US Digitalin valmistamilla A2-tyyppin optisilla absoluuttisen kulmatiedon antavilla antureilla. EHN-liityntäkortti tukee kyseisiä antureita suoraan ilman erillisiä ohjelmistopäivityksiä. [38.]

Tyypillinen pulsseilla toimivia kulmatietoanturi toimii siten, että se välittää tiedon anturin asennon muutoksesta vertailemalla lähettämiensä pulssien määrää kahden eri pisteen välillä. Absoluuttisen kulmatiedon antava anturi eroaa edellä mainitusta toimintaperiaatteesta siten, että se välittää tiedon anturin asennosta absoluuttisena tietona, eikä vertaile anturin uutta asentoa sen edelliseen asentoon. [38.]

Absoluuttinen kulmatietoanturi tallentaa tiedot eri asennoista sen sisäiseen muistiin anturiin asetetun resoluution ja käyttäjän suorittaman kalibroinnin perusteella. Tästä seuraa käytännössä se etu, että sähkökatkoksen yhteydessä anturi ei hukkaa asentotietoaan ja sähköjen palauduttua se osaa ilmoittaa tarkan tiedon viimeisestä asennos-

taan ilman, että anturi olisi kalibroitava uudestaan. Kuvassa 25 on esitetty projektissa käytetty A2-tyyppin absoluuttinen kulmatietoanturi. [38.]



Kuva 25. A2-tyyppin absoluuttinen kulmatietoanturi [38].

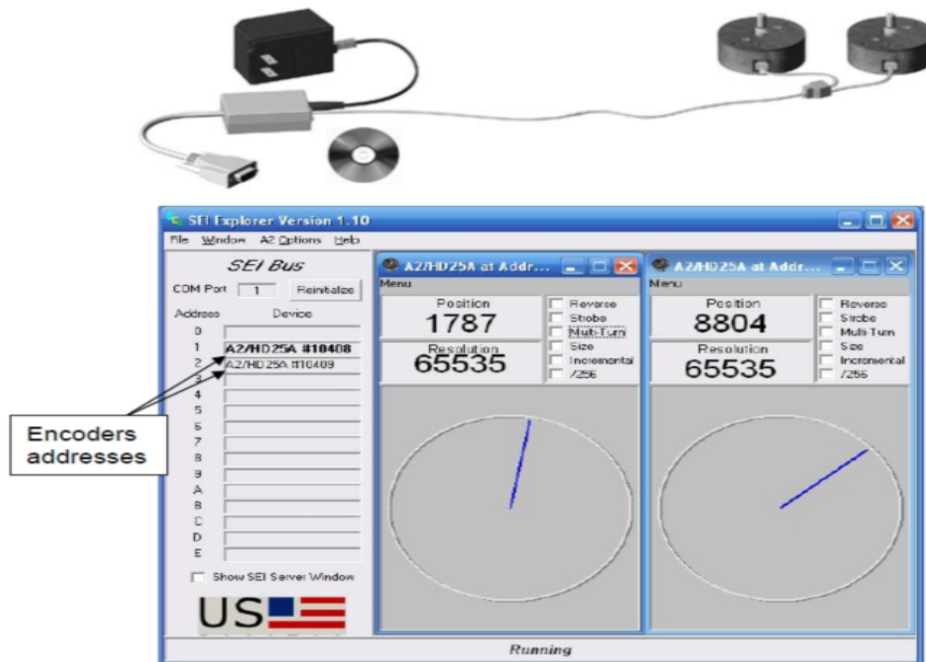
Projektissa käytetyt anturit tilattiin seuraavilla optioilla: digitaalinen SEI (Serial Encoder Interface) väylä, SEI-väyläkaapeli, väyläjakoadapteri, kosteustiivis kotelointi, kiinnityslevyt antureiden koteloon sekä kuulalaakerointi anturien akseliin. Näiden optioiden lisäksi tarvittiin RS-232/SEI-väylämuunnin, jonka avulla anturit voidaan kytkeä paikalliseen tietokoneeseen niiden asetusten muutamista varten. [38.]

SEI-väylä on osoitteellinen sarjamuotoinen väylä, joka tukee samanaikaisesti 1–15 US Digitalin valmistamaa kulmatietoanturia. Se on yhteensopiva tietokoneissa käytettyjen sarjaväylien kanssa kuten RS-232 sekä RS-485, ja USB-väylien kanssa ja käyttää väyläkaapelina tavallista 6-johtimista lattakaapelia. [38.]

Kulmatietoanturin asetuksia voidaan muokata sen mukana tulleen hallintaohjelmiston välityksellä, joka asennetaan paikalliselle tietokoneelle. Jotta EHN-liityntäkortti osaisi lukea antureita, on niille kerrottava liityntäkortin tunnistamat väyläosoitteet ja resoluutiot. [39, s.1.]

Anturi tallentaa väyläosoitteen ja resoluution omaan sisäiseen muistiinsa, josta seuraa, että asetukset eivät katoa mahdollisen sähkökatkoksen yhteydessä. EHN-liityntäkortissa on käytössä sisäinen 16-bittinen A/D-muunnin, joka käsittelee kulmatietoantureilta tulevia arvoja. Kuvassa 26 on esitetty näkymä hallintaohjelmistosta, jonka

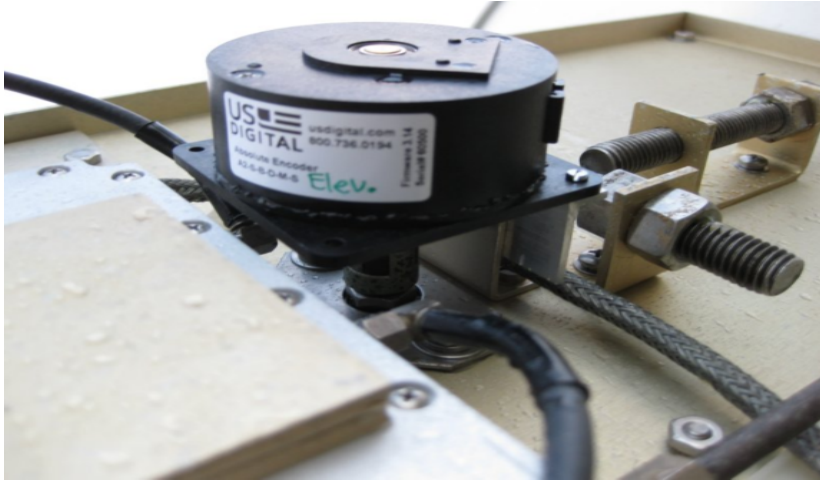
avulla määritetään kulmatietoanturien SEI-väyläosoitteet sekä niiden käyttämät resoluutiot. [39, s.1.]



Kuva 26. Kulmatietoanturien käyttämät SEI-väyläosoitteet ja resoluutiot [39, s.1].

4.7.3 Kulmatietoanturien asennus antennin gyroskooppialustaan

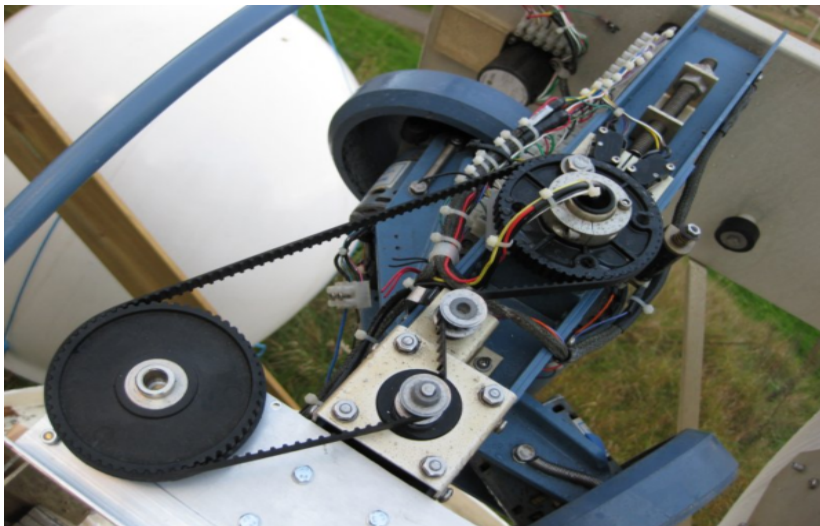
Kulmatietoantureille oli rakennettava kiinnitysadapterit, joiden avulla ne asennettiin antennin gyroskooppialustaan. Elevaatiokulmatietoanturin asennus oli hyvin suoraviivainen toimenpide. Ensin poistettiin alkuperäisasennuksena ollut potentiometri, jonka jälkeen anturi asennettiin antennin gyroskooppialustaan metallisen kiinnitysadapterin avulla. Anturin akseli on kiinnitetty gyroskooppialustassa olevaan ohjausakseliin paljeytkimen välityksellä. Kuvassa 27 on esitetty elevaatiokulmatietoanturin kiinnitysmekanismi antennin gyroskooppialustassa.



Kuva 27. Elevaatiokulmatietoanturin kiinnitysmekanismi antennin gyroskooppialustassa [40].

Atsimuuttikulmatietoanturin asennus vaati hieman enemmän työtä. Alkuperäisen askelmoottorin vetohihnan profiili oli 180XL. Tämä hihna korvattiin pidemmällä 300XL-profiilin vetohihnalla. Anturille rakennettiin metallista kiinnitysadapteri ja systeemin hankittiin uusi XL-profiilin vetohihnaratas, jossa on 55 hammasta, ja se kiinnitettiin atsimuuttikulmatietoanturin akseliin.

Alkuperäisasennuksena ollut potentiometri jätettiin paikoilleen, jolloin se toimii uuden pidemmän vetohihnan kiristäjänä. Kuvassa 28 on esitetty atsimuuttikulmatietoanturin kiinnitysmekanismi antennin gyroskooppialustassa.



Kuva 28. Atsimuuttikulmatietoanturin kiinnitysmekanismi antennin gyroskooppialustassa [41].

Gyroskoopialustan ohjausakselissa on alkuperäisenä asennuksena kiinni XL-profiilin vetohihnaratas, jossa on 54 hammasta. Uusi pidempi 300XL-profiilin vetohihna ohjaa samaan aikaan gyroskoopialustan ja atsimuuttikulmatietoanturin akseleissa olevia vetohihnarattaita. Koska rattaiden hampaiden lukumäärä eroaa toisistaan, syntyy välityssuhteeseen ongelma. Erikokoisten rattaiden välityssuhde on $(54/55 \approx 0,981)$.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun gyroskoopialustan akselissa oleva ratas on pyörähtänyt yhden täyden kierroksen, atsimuuttikulmatietoanturin akselissa oleva ratas on pyörähtänyt 0,9818 kierrosta. Välityssuhteen muuttuminen luo virheen atsimuuttikulmatietoanturin ilmoittamaan lukemaan, joka on korjattava ohjelmallisesti pois.

Virheen korjaaminen tapahtuu käytännössä muuttamalla anturin käyttämää resoluutiota kuvassa 26 esitetyn hallintaohjelmiston avulla. Anturin alkuperäiseksi resoluutioksi on asetettu 65535. Uusi resoluutio laskettiin rattaiden välityssuhteen ja atsimuuttikulmatietoanturin alkuperäisen resoluution avulla, josta tässä tapauksessa seuraa $(0,981 \times 65535 \approx 64342)$. Näin ollen atsimuuttikulmatietoanturin uudeksi resoluutioksi asetettiin hallintaohjelmiston avulla 64342, jolloin saatiin välityssuhteen synnyttämä virhe korjattua pois.

4.8 Askelmoottorin toimintaperiaate

Askelmoottorit ovat säätömoottoreita, ja ne soveltuvat tarkkaan paikoitukseen. Askelmoottorin kiertymäkulma on suoraan verrannollinen ohjauspulssien määrään. Niiden kierrosnopeus on suoraan verrannollinen ohjauspulssien taajuuteen. Moottoreilla on hyvät kiihdytysominaisuudet, jotka mahdollistavat nopeat käynnistykset ja pysäytykset, eikä niiden mahdollinen asemointivirhe kertaudu. [43.]

Askelmoottorin ohjaussysteemi on rakennettavissa helposti ja edullisesti, koska erillistä takaisinkytkentää ei tarvitse suunnitella. Lisäksi moottorit ovat helposti asennettavissa digitaaliseen systeemiin, koska niiden ohjainpiiri on yksinkertainen. Askelmoottorin ohjaus vaatii tasajännitteen, jota katkotaan jokaiselle moottorissa olevalle ohjauskäämille eli vaiheelle jaksollisesti erikseen. [43.]

Jos askelmoottoriin kytketään suoraan pelkkä vaihto-tai tasajännite, se ei saa moottoria pyörimään. Askelmoottori vaatii toimiakseen pulsseja antavan ohjausyksikön sekä

moottorin ohjaukäämejä kontrolloivan ajoyksikön. Pulseja antava ohjausyksikkö saa aikaan oikean kierrosnopeuden ja kiertymäkulman. Ajoyksikkö jakaa pulssit moottorin eri ohjaukäämeihin ja toimii virtavahvistimena. [43.]

Askelmoottorin käämejä voidaan ohjata kahdella eri ohjausperiaatteella, jotka ovat bipolaarinen ja unipolaarinen ohjaus. Bipolaarinen ohjaus mahdollistaa, että virta kulkee molempiin suuntiin moottorin ohjaukäämissä. Bipolaarisen ohjauksen etuna on hyvä hyötysuhde ja moottorista saatavat maksimaaliset ominaisuudet, jolloin se soveltuu suurta suorituskykyä vaativaan käyttöön. Bipolaarisen ohjauksen ajoyksikkö on monimutkaisempi toteuttaa kuin unipolaarisen ohjauksen. [43.]

Unipolaarisessa ohjauksessa virta kulkee yhteen suuntaan moottorin ohjaukäämissä. Tämä mahdollistaa, että ajoyksikkö on yksinkertaisempi toteuttaa ja sen kustannukset ovat vähäisemmät, mutta sen haittapuolena on, että moottorista ei saada maksimaalisia ominaisuuksia irti, jolloin sen hyötysuhde kärsii hieman. [43.]

Askelmoottoreita voidaan ajaa kolmella eri askellustavalla, jotka ovat kokoaskellus, puoliaskellus ja mikroaskellus. Kokoaskelluksessa moottorin yhden askelluksen aikana pyörähtämä askelkulma on sama kuin moottorin valmistajan ilmoittama vakioaskelkulma. Puoliaskelluksessa askelmoottorin valmistajan ilmoittama vakioaskelkulma on puolitettu, jolloin moottoria voidaan käyttää tarkempaan paikoitukseen. [43.]

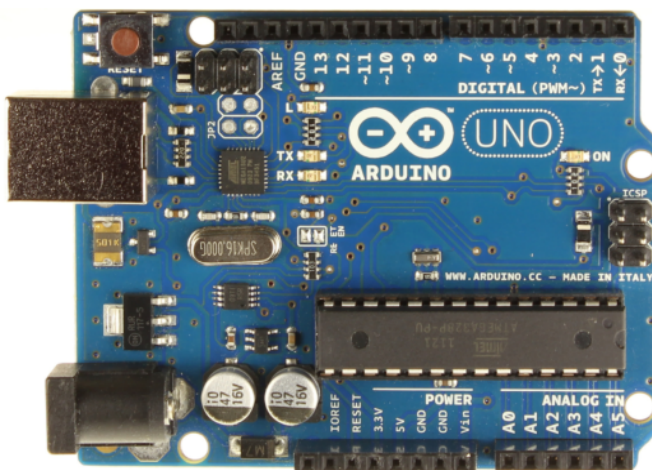
Mikroaskelluksessa askelmoottorin vakioaskelkulma jaetaan $1/N$ -osaan, jossa N tarkoittaa moottorin ohjaukäämien lukumäärää. Ohjausyksikkö tuo virran askelmoottorin jokaiseen ohjaukäämiin tietyn ennalta määritetyn sekvenssin mukaisesti ja kontrolloi tällä tavoin moottorin liikkumista. [43.]

Mikroaskellusta tukevan ohjaimen avulla moottorin yksi askel jaetaan pieniin osaaskeliin, jolla saadaan aikaiseksi tarkka ja pehmeä käynti. Mikroaskellus sopii hyvin hitaaseen ajoon ja erityisesti silloin kun askelmoottorilta halutaan suurta paikoitus tarkkuutta. [43.]

4.8.1 Askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikkö

Projektiin valittiin askelmoottorien ohjausyksiköksi avoimeen lähdekoodiin perustuva Arduino Uno-mikrokontrollerikortti, joka on rakennettu 16 MHz:n kellon avulla toimivan Atmega328-mikrokontrollerin pohjalle suunniteltuun alustaan. Arduino Uno kortissa on 32-kB:n sisäinen ohjelmamuisti sekä 14 digitaalista I/O (Input-Output) linjaa, joista kuusi voidaan asettaa toimimaan pulssinleveysmodulaattoreina eri sovelluksia varten. [44.]

Digitaalisten I/O-linjojen lisäksi kortissa on kuusi analogista sisääntulolinjaa A/D-muunnoksia varten. Kortti liitetään paikalliseen tietokoneeseen USB-sarjaväylän kautta, jonka välityksellä sitä voidaan ohjelmoida ja josta se saa myös ohjelmoinnin aikana käyttöjännitteensä. Kortin käyttöjännite voidaan syöttää tarvittaessa myös ulkoisen virtalähteen kautta. Kuvassa 29 on esitetty projektissa käytetty askelmoottorien ohjausyksikkönä toimiva Arduino Uno mikrokontrollerikortti. [44.]

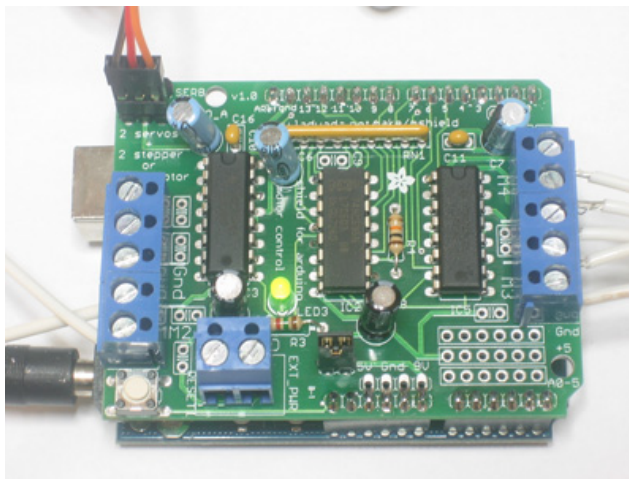


Kuva 29. Askelmoottorien ohjausyksikkö [44].

Arduino-mikrokontrollerikortteja on saatavilla useina erilaisina malleina, joille on suunniteltu erilaisia lisämoduuleja. Näiden avulla mikrokontrollerikortin toimintoja voidaan laajentaa helposti. Tyypillisiä lisämoduuleja ovat esimerkiksi paikallisverkkokortti, langaton verkkokortti sekä eri tyyppisten moottorien ajoyksiköt. Lisämoduulit on suunniteltu siten, että ne kytketään fyysisesti suoraan Arduino-mikrokontrolleri kortin ulkoisiin I/O-liittimiin, josta ne saavat ohjaussignaalin ja tarvittaessa käyttöjännitteensä.

Lisämoduulit vaativat toimiakseen moduulikohtaiset ohjelmistokirjastot, joiden avulla kehitysympäristössä jo valmiiksi olevia ohjelmistokirjastoja voidaan laajentaa helposti. Ohjelmakirjastot sisältävät valmiiksi määritellyjä moduulikohtaisia ohjelmafunktioita, jotka on suunniteltu kortin valmistajan toimesta moduulin ohjaamiseen. [45; 46.]

Askelmoottorien ajoyksiköksi valittiin tähän projektiin Adafruit Industriesin valmistama Motor Shield-lisämoduuli, joka on suoraan yhteensopiva Arduino Uno mikrokontrollerin kanssa. Lisämoduuli kytketään fyysisesti suoraan mikrokontrollerikortin päälle sen ulkoihin I/O-liittimiin, joista se saa ohjaussignaalin ja käyttöjännitteen. Kuvassa 30 on esitetty projektissa käytetty askelmoottorien ajoyksikkönä toimiva Motor Shield lisämoduuli. [45; 46.]



Kuva 30. Askelmoottorien ajoyksikkö [47].

Motor Shield-lisämoduuli soveltuu servo, askel sekä DC (Direct Current) moottorien ohjaamiseen. Lisämoduulin ohjelmakirjastot voidaan ladata moduulin valmistajan kotisivuilta osoitteesta <http://www.ladyada.net/make/mshield/download.html>. Moduulikohtaiset ohjelmakirjastot asennetaan paikalliselle tietokoneelle kortin valmistajan ohjeiden mukaisesti. [47.]

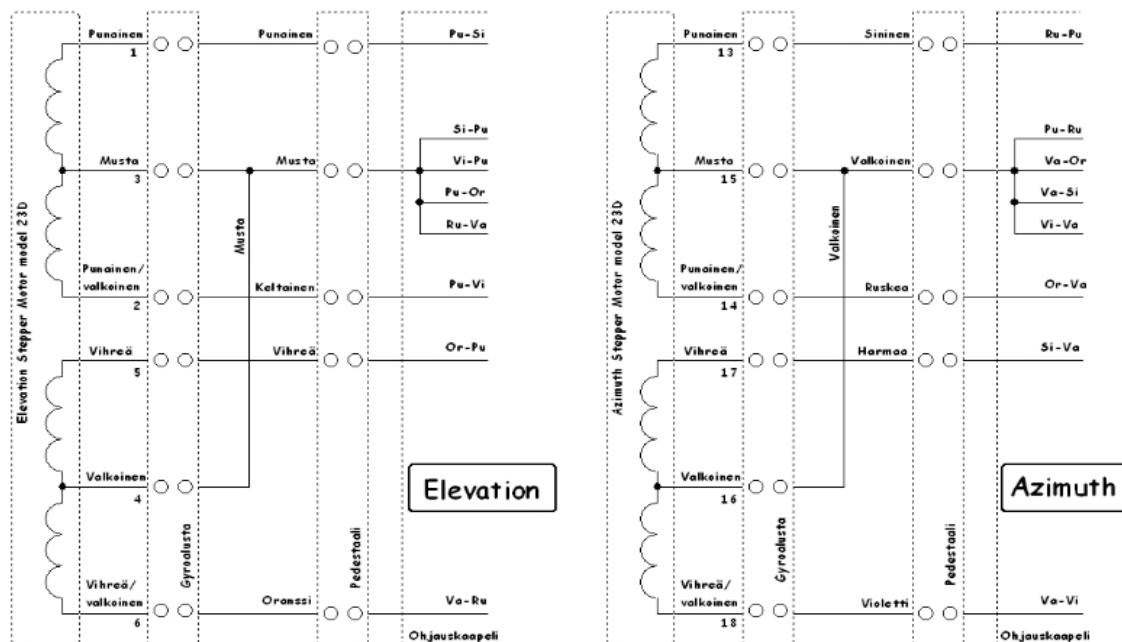
4.8.2 Askelmoottorien johdotuskaavio ja ohjausväylän rakenne

Antennissa olevien askelmoottorien ohjausta sekä testausta varten jouduttiin antennin päähän rakentamaan uusi johdotus sekä erillinen prototyyppitestialusta. Gyroskoopialustassa on kaksi unipolaarisella ohjausperiaatteella toimivaa askelmoottoria. Askel-

moottorissa on fyysisesti kuusi ohjausjohdinta ja neljä erillistä ohjauskäämiä. Moottori on rakennettu siten, että kaksi ohjauskäämiä on kytketty sarjaan ja niillä on yksi yhteinen ulosotto käämien keskellä. Askelmoottorien sisällä on kaksi tällaista sarjaan kytkettyä ohjauskäämiä.

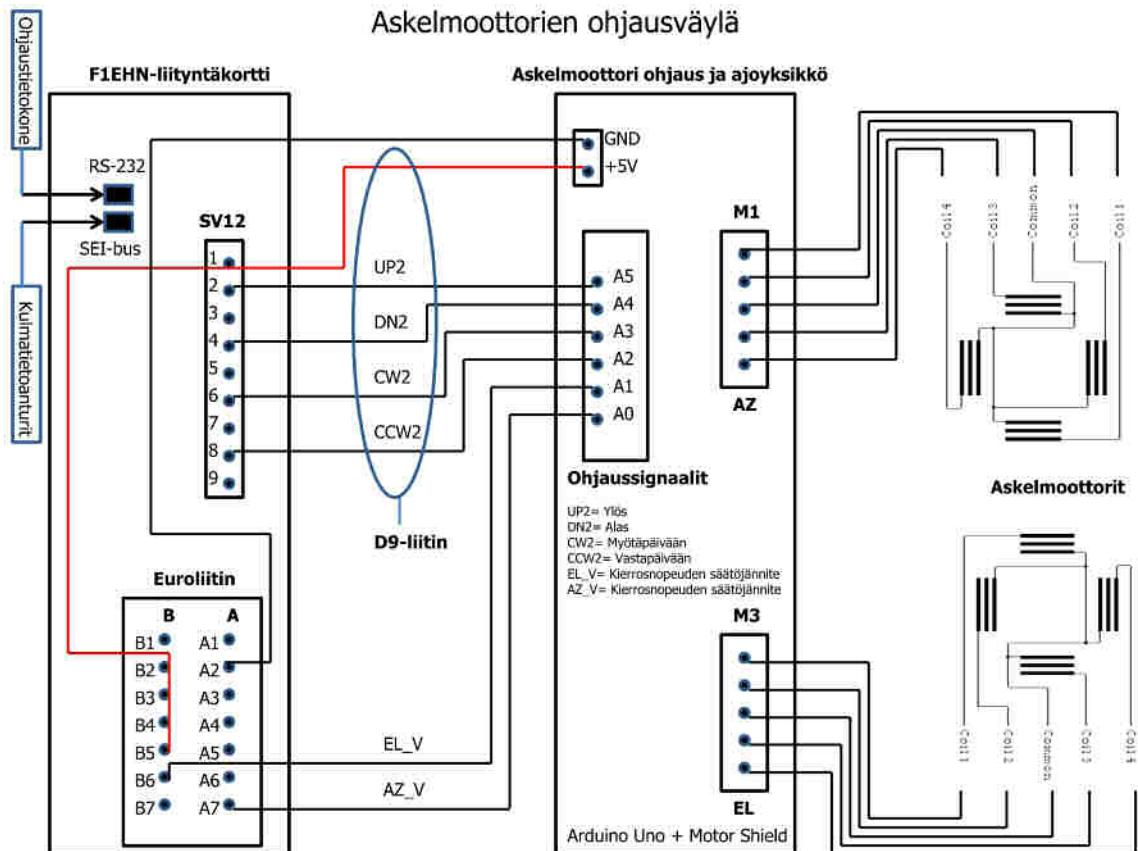
Yksi ohjauskäämpari tarvitsee toimiakseen kolme ohjausjohdinta, joista kaksi kytketään ohjauskäämien päihin ja yksi käämien keskellä olevaan ulosottoon. Askelmoottorien ajoyksikkö on kaksikanavainen, joten se kykenee ohjaamaan kahta moottoria samanaikaisesti. Ajoyksikön molemmissa ohjauskanavissa on liittimet viidelle ohjausjohtimelle. Tästä seuraa, että moottorin ohjauskäämien yhteiset keskiulosotot on kytkettävä keskenään yhteen.

Askelmoottorien fyysinen kytkentä on toteutettu siten, että niiden ohjausjohtimet on kytketty antennin gyroskoopialustassa olevalle ruuviliitinrimalle. Gyroskoopialustan ruuvirimalta ne puolestaan kytketään antennin pedestaalissa olevalle ruuviliitinrimalle. Pedestaalista eteenpäin ohjausjohtimet kytketään maakaapelin välityksellä laitekaapille, jossa sijaitsevat varsinainen askelmoottorien ohjaus- ja ajoyksikkö. Kuvassa 31 on esitetty projektissa käytetty askelmoottorien johdotuskaavio.



Kuva 31. Atsimuutti- ja elevaatiokulmaa säätevien askelmoottorien johdotuskaavio [48].

Antennin automaattinen ohjausjärjestelmä vaatii toimiakseen EHN-liityntäkortin, Tracking-ohjelmistomodulin, Arduino Uno mikrokontrollerin, Motor Shield lisämoduulin sekä absoluuttiset kulmatietoanturit. Kuvassa 32 esitettyssä kytkennässä Arduino toimii askelmoottorien ohjausyksikkönä ja se antaa ohjauspulseja askelmoottorien ajoyksikkönä toimivalle Motor Shield lisämoduulille. Lisämoduuli muodostaa askelmoottorien ohjaukskäämeille varsinaiset ohjausvirrat, joiden avulla moottoreita askelletaan.

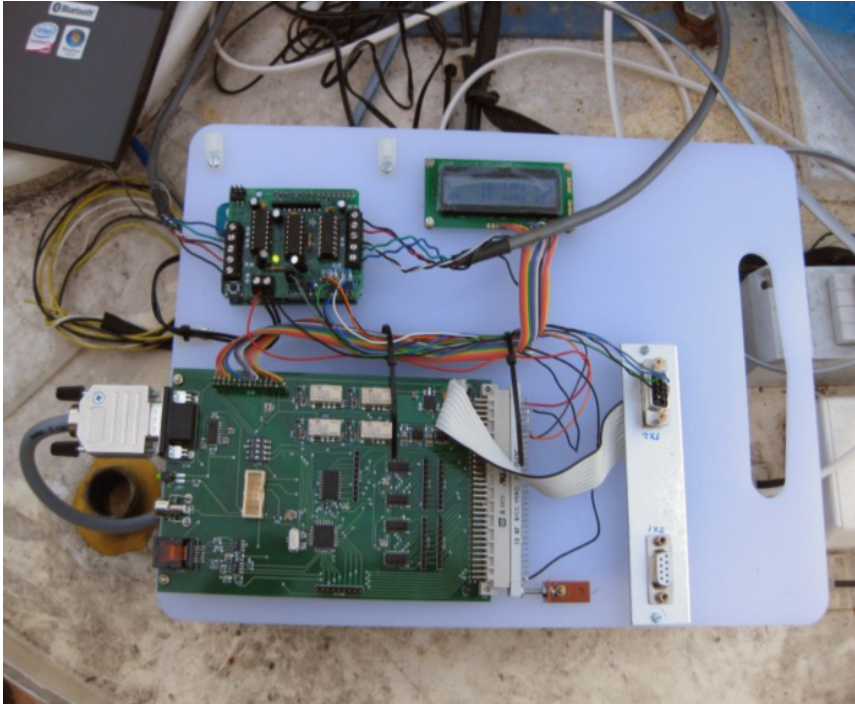


Kuva 32. Askelmoottorien ohjausväylän rakenne [49].

Tracking-ohjelmistomodulin tehtävänä on laskea uudet atsimuutti- ja elevaatiokulmat paikallisen kellonajan ja systeemin maantieteellisten koordinaattien perusteella sekä samalla välittää ohjaukskäskejä EHN-liityntäkortille RS-232-väylän kautta. Liityntäkortti muodostaa +5 V:n ohjaussignaalit askelmoottorien ohjausyksikön sisään menoon sekä muodostaa analogiset ohjausjännitteet askelmoottorien kierrosnopeuden säätöä varten. Liityntäkortti lukee myös antennissa olevia kulmatietoantureita SEI-väylän kautta ja välittää näiden antamat arvot takaisin Tracking-ohjelmistomodulille.

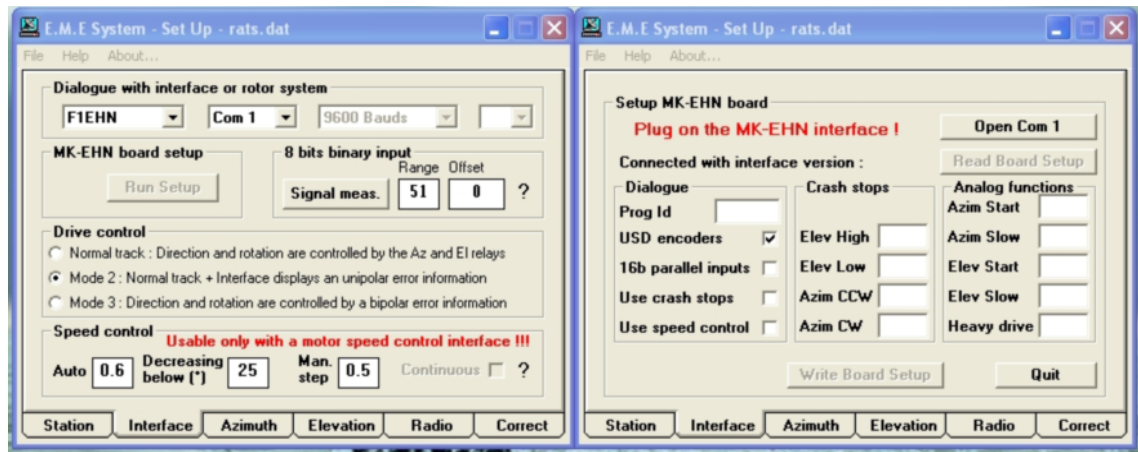
4.8.3 Antennin automaattisen ohjausjärjestelmän toiminnan testaus

Antennin automaattisen ohjausjärjestelmän toiminnan testausta varten rakennettiin kuvassa 33 esitetty prototyypitestialusta, joka koostuu edellä mainituista yksiköistä. Ennen kuin ohjausjärjestelmä saatiin toimimaan, kulmatietoanturit oli kalibroitava. Kalibrointia varten EME-systeemiin asetettiin Setup-ohjelmistomoduulin avulla kuvassa 21 esitetyt radioteleskooppijärjestelmän maantieteelliset koordinaatit.



Kuva 33. Antennin automaattisen ohjausjärjestelmän testauksessa käytetty prototyypitestialusta [50].

Maantieteellisen sijainnin lisäksi EME-systeemin asetuksiin määritettiin EHN-liityntäkortin käyttämä antennin ohjaustila sekä sen sarjaportin numero, jonka kautta liityntäkortti on kytketty paikalliseen tietokoneeseen. Liityntäkortin asetuksissa otettiin käyttöön absoluuttiset kulmatietoanturit, jolloin liityntäkortti osaa lukea antureita SEI-väylän kautta. Kuvassa 34 on esitetty Setup-ohjelmistomoduulin välilehti, jossa määritetään antennin ohjaustila, sarjaportin numero ja absoluuttisten kulmatietoanturien asetukset.



Kuva 34. Setup-ohjelmistomoduulin asetukset kulmatietoanturien kalibrointia varten.

Tracking-ohjelmistomoduuli osaa laskea seurattavan kohteen kuten kuun tai auringon atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemat aseman maantieteellisen sijainnin ja paikallisen kellonajan ja päivämäärän perusteella. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää apuna kulmatietoanturien kalibroinnissa.

Tracking-ohjelmistomoduuli ilmoittaa seurattavan kohteen atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemat asteina. Absoluuttiset kulmatietoanturit käsittelevät näitä lukuja 16-bittisinä kokonaislukuina. Kalibroinnin yhteydessä kulmatietoantureille määritetään niiden absoluuttinen asentotieto kokonaislukuina kuvassa 26 esitetyn hallintaohjelmiston avulla.

Tracking-ohjelmistomoduulin ilmoittamat atsimuutti- ja elevaatiokulmien astelukemat voidaan muuntaa kokonaisluvuksi järjestelmän kulmatietoantureille asetetun resoluution perusteella. Järjestelmän atsimuuttikulmatietoanturin resoluutioksi on asetettu 64342 ja elevaatiokulmatietoanturin resoluutioksi 65535.

Tästä seuraa, että yksi atsimuuttikulmatietoanturin täysi kierros, eli 360° on kokonaislukuna ilmaistuna 64342 ja elevaatiokulmatietoanturin 65535. Kun halutaan tietää, kuinka paljon yksi aste on kokonaislukuna, se voidaan laskea kulmatietoanturille asetetun resoluution ja yhden täyden kierroksen asteluvun avulla.

Kulmatietoanturit kalibroitiin käytännössä kuun sijainnin perusteella, koska aurinko oli ehtinyt laskeutua horisontin taakse. Tracking-ohjelmistomoduuli päivittää atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemaa asteen sadasosan verran noin joka viides sekunti. Paikallisen

tietokoneen kellonaikaa siirrettiin hieman eteenpäin, jolloin Tracking-ohjelmistomoduulin avulla saatiin selville kuun atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemat tulevaisuudessa ennalta määritettynä kellonaikana.

Tämän jälkeen paikallisen tietokoneen kello siirrettiin takaisin oikeaan aikaan, jolloin jäi runsaasti aikaa laskea ja muuntaa Tracking-ohjelmistomoduulin ennalta määritettynä kellonaikana ilmoittamat atsimuutti- ja elevaatiokulmalukemat kulmatietoantureille syötettäviksi kokonaisluvuiksi. Laskutoimitusten jälkeen antenni suunnattiin osoittamaan kohti taivaalla loistavaa kuuta siten, että kulmatietoanturien hallintaohjelmiston näytämät asentotiedot vastasivat laskettuja kokonaislukuja.

Seuraavaksi odotettiin niin pitkään, että paikallisen tietokoneen kello vastasi ennalta määritettyä kellonaikaa, jonka jälkeen atsimuutti- ja elevaatiokulmatietoantureiden absoluuttiseksi asentotiedoksi asetettiin hallintaohjelmiston avulla aikaisemmin lasketut kokonaisluvut. Kalibroinnin jälkeen kulmatietoanturit tietävät yhden asentotiedon tarkasti ja osaavat tämän perusteella laskea täyttä kierrosta vastaavat asentotiedot, jotka tallennetaan anturin sisäiseen muistiin.

Kulmatietoanturien kalibrointi voidaan suorittaa auringon avulla täsmälleen edellä mainitulla tavalla. Kalibroinnin tarkkuuden voi auringon tapauksessa tarkastaa helposti siten, että kun antenni on tarkasti suunnattuna kohti aurinkoa, sen syötössä oleva apupeili muodostaa ympyrän muotoisen varjon paraboloidipeilin keskipisteeseen.

Lopuksi esitetään esimerkki atsimuuttikulmalukeman muuntamisesta 16-bittiseksi kokonaisluvuksi. Kuvassa 22 esitetty Tracking-ohjelmistomoduuli näyttää atsimuuttikulmalukemaksi $143,10^\circ$, tämän perusteella atsimuuttikulmatietoanturin absoluuttiseksi asentotiedoksi asetettaisiin 38328 ($64342/360^\circ \times 143,10^\circ \approx 25576$) 24.12.2012 klo: 17:38:46.

Kulmatietoanturien kalibroinnin jälkeen antennin ohjausta testattiin Tracking-ohjelmistomoduulin välityksellä manuaalisessa ohjaustilassa. Manuaaliohjaus toimi moitteettomasti, jonka jälkeen EHN-liityntäkortti asetettiin automaattiseen ohjaustilaan. Antenni kykeni seuraamaan kuun asentoa taivaalla vaivattomasti sekä liikkui tarkasti ja pehmeästi, koska askelmoottorien ohjauskortissa oli käytössä mikroaskellus. Yleisesti

ottaen antennin automaattinen ohjausjärjestelmä toimii oikein ja se on valmis käytettäväksi radioteleskooppijärjestelmässä.

5 Vastaanottimen rakenne ja toimintaperiaate radioteleskooppijärjestelmässä

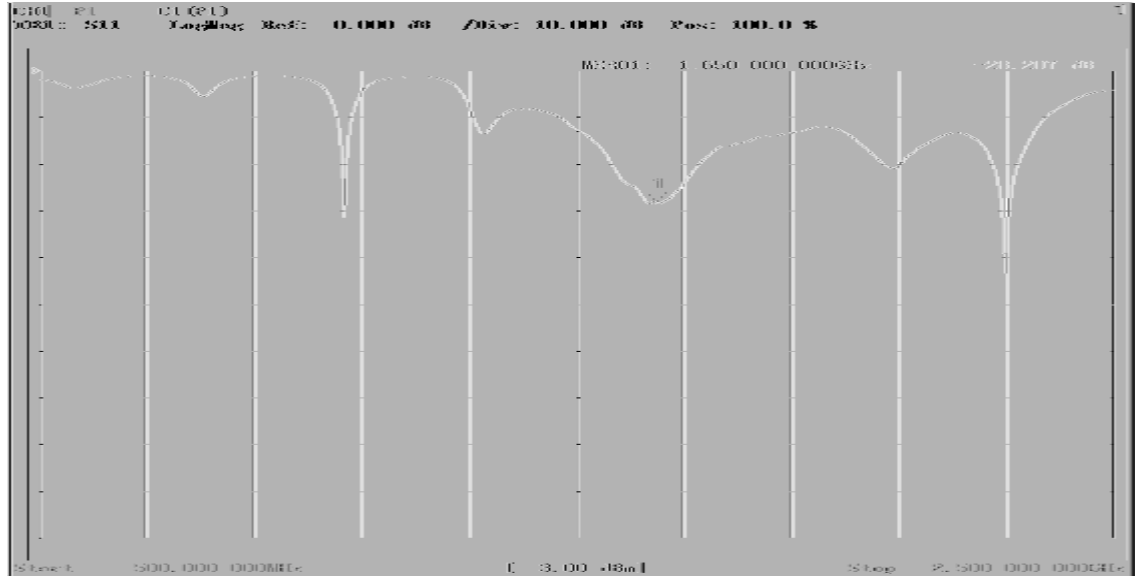
Kehitysprojektin lopputuloksena syntyy radioteleskooppijärjestelmä, jossa voidaan käyttää kahta erityyppistä vastaanotinta eli radiometriä. Vastaanottimen avulla mitataan auringonpurkausten synnyttämän laajakaistaisen kohinavuon voimakkuutta. Projektin jatkokehitysvaiheessa rakennetaan kokonaistehovastaanotin, joka asennetaan radioteleskooppijärjestelmään. Kokonaistehovastaanottimen avulla voidaan testata järjestelmän antennin sekä vastaanottimeen asennettavan ohjauskortin suoriutumista todellisessa auringon kohinasignaalin mittauksissa. Jos testit onnistuvat hyvin, seuraavaksi rakennetaan Dicke-vastaanotin, joka jätetään radioteleskooppijärjestelmään lopulliseksi vastaanottimeksi.

Ennen vastaanottimen rakentamisesta oli selvitettävä, millä taajuusalueella se tulee toimimaan. Tämän yhteydessä tutkittiin radomin vaikutusta antennin näkemään syöttökohinalämpötilaan taajuuksilla 11 GHz ja 4 GHz. Syöttökohinalämpötilan mittauksia varten rakennettiin oma erillinen testivastaanotin. Lisäksi tutustuttiin testivastaanottimen, kokonaistehovastaanottimen sekä Dicke-vastaanottimen rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen.

5.1 Vastaanottimen käyttämä taajuusalue

Ensimmäinen kriteeri vastaanottimen taajuusalueen valinnassa oli, että tarvitaan mahdollisimman paljon puhdasta vapaata kaistaa, jossa on mahdollista suorittaa auringon laajakaistaisen kohinavuon mittauksia ilman ulkopuolisia häiriönlähteitä. Kansallisessa taajuusjakotaulukossa on varattu taajuuskaista 1660,500 MHz–1668,400 MHz pelkästään radioastronomian käyttöön. Kansainvälisesti on sovittu, että tämä kaista pidetään vapaana muista lähteistä.

Taajuusalueen valintaan vaikutti myös antennin syöttöelementin sovitus. Kuvassa 35 on esitetty vektoripiirianalysaattorilla suoritetun antennin syöttöelementin heijastusvaimennuksen mittaustulos taajuudella 1,650 GHz. [31.]



Kuva 35. Syöttöelementin heijastusvaimennus taajuudella 1,650 GHz [33].

Mitta-asteikon vaaka-akseli esittää taajuutta ja pystyakseli signaalin tasoa desibeleissä. Syöttöelementin heijastusvaimennus taajuudella 1,650 GHz on -28,207 dB, joka on varsin hyvä tulos. Edellä mainittujen kriteerien perusteella vastaanotin rakennetaan toimimaan radioastronomialle varatulla taajuuskaistalla 1660,500 MHz–1668,400 MHz, joka on varattu galaktisen hydroksyyli-emissioviivan tutkimiseen. Vastaanottimen keski-taajuudeksi valittiin 1664,440 MHz ja kaistanleveydellä $\pm 2,5$ MHz. [31, s.88; 32.]

5.2 Syöttökohinalämpötilamittaus

Projektissa käytetty antenni on alkuperäisessä käytössään hoitanut satelliittiliikennettä taajuusalueilla 1525,000 MHz–1545,000 MHz (vastaanotto) sekä 1626,500 MHz–1646,500 MHz (lähetys). Syöttökohinalämpötilamittauksen tarkoituksena oli tehdä selvitystyötä mahdollista jatkokehityshanketta varten, jossa vastaanotinta tulisi käyttää taajuuksilla 11 GHz tai 4 GHz, koska kyseisille taajuuksille on valmis radiokalusto jo olemassa.

Mittausten avulla tutkittiin, kuinka paljon radomin rakennusmateriaalina käytetty lasikuitu nostaa antennin näkemää syöttökohinalämpötilaa taajuuksilla 11 GHz ja 4 GHz, kun mitataan kylmää taivasta radomin läpi. Mittausten avulla pyrittiin selvittämään, onko radomi käyttökelpoinen auringon kohinavuon mittauksiin taajuuksilla 11 GHz ja 4 GHz.

Radomin rakennusmateriaalin lisäksi sen pinnassa oleva kosteus, joka voi muodostua esimerkiksi vesisateesta tai sulaneesta lumesta, nostavat antennin näkemää syöttökohinalämpötilaa. Tämä johtuu siitä, että nestemäisessä muodossa olevan veden lämpötila on paljon korkeampi verrattuna alkuräjähdyksen jälkeisen kylmän taivaan lämpötilaan.

Avaruudesta eli tyhjiöstä saapuva heikkotasoinen sähkömagneettinen säteily joutuu kulkemaan eri väliaineiden kuten ilman ja lasikuidun läpi, ennen kuin se on vastaanottoantennin navoissa. Eri väliaineiden sähköiset ominaisuudet muuttuvat taajuuden funktiona. Väliaineen vaikutusta siihen kohdistuvaan sähkökenttään voidaan kuvata väliaineen permittiivisyyden ε avulla. [58.]

Permittiivisyys on fysikaalinen suure, joka kertoo miten sähkökenttä vaikuttaa ja vaikuttaa dielektrisessä (sähköeriste) väliaineessa. Se määrittää materiaalin kykyä polarisoida sähkökentässä, joka puolestaan vähentää materiaalin sisäistä sähköistä kenttää. Näin ollen permittiivisyys kertoo miten materiaali sallii (engl. permit) sähköisen kentän läpäistä itsensä. Sähkövuon tiheyttä ja sähkökentän voimakkuutta dielektrisessä väliaineessa yhdistää yhtälö 11. [58.]

$$\mathcal{D} = \varepsilon E \tag{11}$$

jossa \mathcal{D} on sähkövuon tiheys [C/m^2], ε on väliaineen permittiivisyys [F/m] ja E on sähkökentän voimakkuus [V/m].

Dielektrinen väliaine on sähköeriste, jonka sisällä sähkökenttä on heikompi kuin se olisi tyhjiössä. Suhteellinen permittiivisyys ε_r , jota toisinaan nimitetään myös dielektriseksi vakioksi, kertoo väliaineen permittiivisyyden ε suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen ε_0 . Suhteellinen permittiivisyys ε_r on laaduton suhdeluku, joka on aineen rakenteesta riip-

puva vakio ja aina suurempi tai yhtä suuri kuin 1. Suhteellinen permittiivisyys voidaan esittää yhtälöstä 12. [58.]

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (12)$$

jossa ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys, ϵ on väliaineen permittivisyys [F/m] ja ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys $8,854187817 \times 10^{-12}$ [F/m]

Radomin rakennusmateriaalina käytetty lasikuitu toimii signaalireitillä dielektrisen väliaineen tavoin, jolla on tietty suhteellisen permittiivisyyden arvo ϵ_r , joka aiheuttaa laajakaistaiseen kohinasignaaliin vaimennusta ja vaihesiirtoa. Käytännössä tämä ilmenee siten, että antennin näkemä syöttökohinalämpötila kasvaa taajuuden funktiona. Esimerkkinä mainittakoon, että elektroniikkateollisuudessa piirilevyjen rakennusmateriaalina käytetyn lasikuidun suhteellinen permittivisyys on tyypillisesti luokkaa 4,7 ja kuivan ilman 1,0006 sekä tyhjiön 1. [58.]

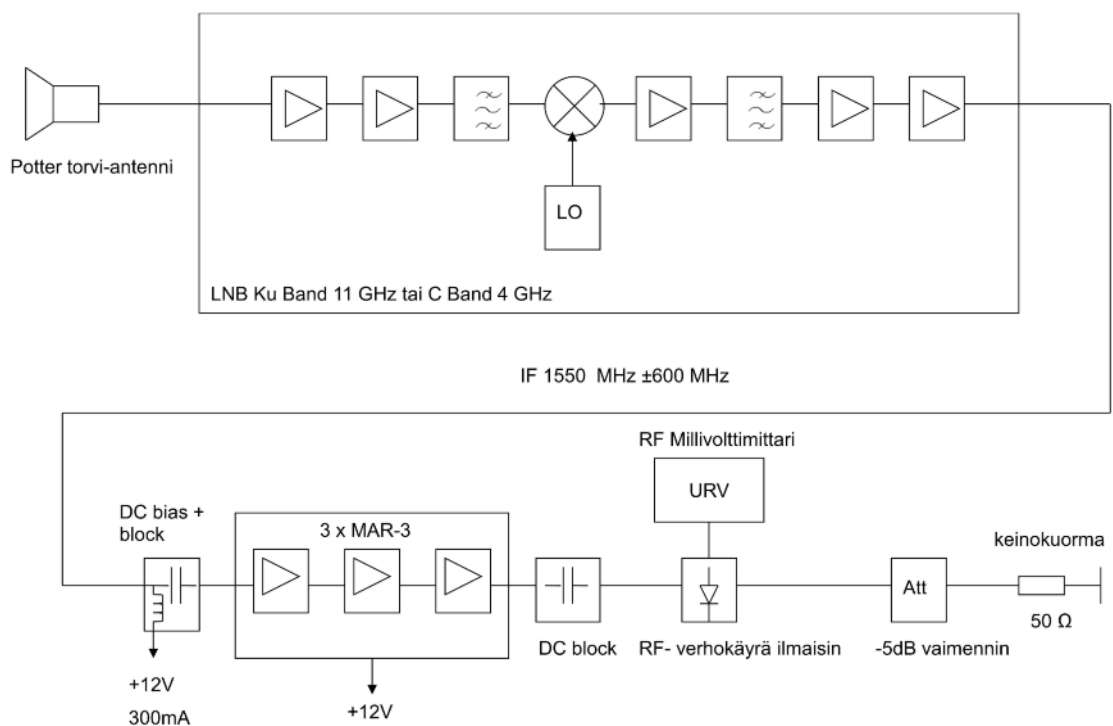
Syöttökohinalämpötilamittauksen tarkoituksena ei ollut selvittää lasikuidun suhteellisen permittiivisyyden arvoa. Sen avulla pystyttiin saamaan karkea arvio antennin näkemästä syöttökohinalämpötilasta taajuuksilla 11 GHz ja 4 GHz, kun mitataan kylmää taivasta radomin läpi. Mittauksissa käytettiin hyödyksi kuuman maan ja kylmän taivaan kohinalämpötiloja. Kuuman maan kohinalämpötila oli mittausten kannalta sama asia kuin ilman lämpötila, joka oli mittaushetkellä 303 kelviniä (+29,7 °C). Kylmän taivaan kohinalämpötila on taajuuksilla 11 GHz ja 4 GHz tyypillisesti 4 kelviniä (−269 °C).

Mittauksia varten rakennetun testivastanottimen fyysiseen lämpötilariippuvuuteen tutustuttiin suorittamalla kylmä-kuumavertailumittauksia jäähdyttäen kylmäspraylla vuoronperään vastaanottimen eri asteita. Vastaanottimessa on useita lämpötilariippuvaisia asteita, jotka nostavat sen itsensä kehittämää kohinasignaalin tasoa ympäristön lämpötilan muuttuessa. Tällaisia asteita ovat tyypillisesti etuvahvistin, välitaajuusvahvistin, diodi-ilmaisin, sekä etuvahvistimen sisään menoon kytketty aaltoputkikeinokuorma. [25.]

Testivastaanotin vastaanottaa kylmän taivaan laajakaistaista kohinasignaalia ja muodostaa signaalista sen verhoikäyräilmaisimen ulostuloon signaalin voimakkuutta vastaavan jännitteen. Vastaanottimen avulla ei tutkittu kohinasignaalin tarkkoja absoluuttisia tasoja. Sen tarkoitus oli indikoida vastaanotetun kohinasignaalin tason suhteellista muutosta, kun mittausantenni suunnattiin eri kohteisiin, kuten kuumaan maahan ja kylmään taivaaseen. Tämän vuoksi testivastaanotinta ei kalibroitu ennen mittausten suorittamista.

Mittauksia varten rakennettu testivastaanotin oli lineaarinen ja herkkä sekä siinä käytettiin matalan kohinaluvun omaavia etuvahvistinasteita. Mittaustuloksia oli mahdollista analysoida lineaarisen suoran avulla erillisessä laskentaohjelmassa. Vastaanottimen rakenne oli yleisesti ottaen melko yksinkertainen.

Mittausantenniksi valittiin torviantenni, johon päädyttiin sen vuoksi, että torviantennilla on erittäin hyvä etu-takasuhde. Yksi torviantennin eduista on, että se mittaa koko aperatuurilla varsinaista kohdetta, eikä se näe sitä ympäröivää kuumaa maata, joka nostaisi antennin näkemää syöttökohinalämpötilaa. Kuvassa 36 on esitetty syöttökohinalämpötilamittauksissa käytetyn testivastaanottimen lohkokaavio.



Kuva 36. Syöttökohinalämpötilamittauksissa käytetyn testivastaanottimen lohkokaavio.

Testivastaanottimessa oli mittausten aikana käytössä kaksi matalan kohinaluvun omaavaa etuvahvistinta, joiden vahvistus ja kohinaluku olivat likimain samat, kohinaluku luokkaa 0,6 dB ja vahvistus 50 dB–55 dB. Testivastaanotin toimii siten, että antennista tulevaa 11 GHz tai 4 GHz RF (Radio Frequency) signaalia vahvistetaan etuvahvistimen avulla, jonka jälkeen sen kaistaa rajoitetaan hieman kaistanpäästösuotimen avulla. [25.]

Sekoitinasteessa suoritetaan taajuuskonversio välitaajuudelle 1550 MHz paikallisoskillaattorista saatavan injektiosignaalin avulla. Koska sekoittimessa syntyy jonkin verran vaimennusta, välitaajuista signaalia vahvistetaan, jotta toiselle kaistanpäästösuotimelle saadaan riittävän voimakas signaalin taso. Vahvistimen jälkeen olevalla kaistanpäästösuotimella suodatetaan ylimääräiset sekoitustulokset pois ja lisäksi sen avulla rajataan lopullinen ilmaistava kaistanleveys ± 600 MHz. Tämän jälkeen välitaajuista signaalia vahvistetaan edelleen. [25.]

Etuvahvistimen ulostulosta saatava välitaajuinen 1550 MHz:n signaali on nyt kaistanleveydeltään sopiva ja riittävän matalataajuinen sekä tarpeeksi voimakas siirrettäväksi koaksiaalikaapelia pitkin vastaanottimen seuraavaan vahvistinasteeseen. Etuvahvistin saa käyttösähkensä koaksiaalikaapelia pitkin. Välitaajuinen 1550 MHz:n signaali etenee koaksiaalikaapelia pitkin tasavirran katkaisevan kondensaattorin kautta seuraavaan vahvistinketjuun, jonka vahvistus on noin 25 dB ja jonka avulla saadaan riittävä voimakas signaalin taso verhoikäyräilmaisimelle. [25.]

Vahvistinasteen jälkeen signaali etenee tasavirran katkaisevan kondensaattorin kautta verhoikäyräilmaisimelle, joka ilmaisee signaalin kaistanleveydellä 1200 MHz. Ilmaisimen ulostulosta saatavaa signaalin tasoa mitataan herkällä millivolttimittarilla. Mittauskytkentä on päätetty -5 dB:n vaimentimen kautta 50 Ω :n keinokuorman. Vaimentimen tarkoitus on parantaa keinokuorman sovitusta kytkennässä. [25.]

Käytännön mittaukset suoritettiin käyttämällä samaa mittaustekniikkaa molemmilla taajuuksilla 11 GHz ja 4 GHz. Aluksi radomi irrotettiin gyroskoopialustasta, jonka jälkeen varsinaiset mittaukset päästiin aloittamaan. Mittausantenni suunnattiin radomin ulkopuolella kohti kylmää taivasta ja sen jälkeen kohti kuumaa maata, tällä tavalla saatiin selville kylmän taivaan ja kuuman maan kohinalämpötiloja vastaavat jännitteiden tasot.

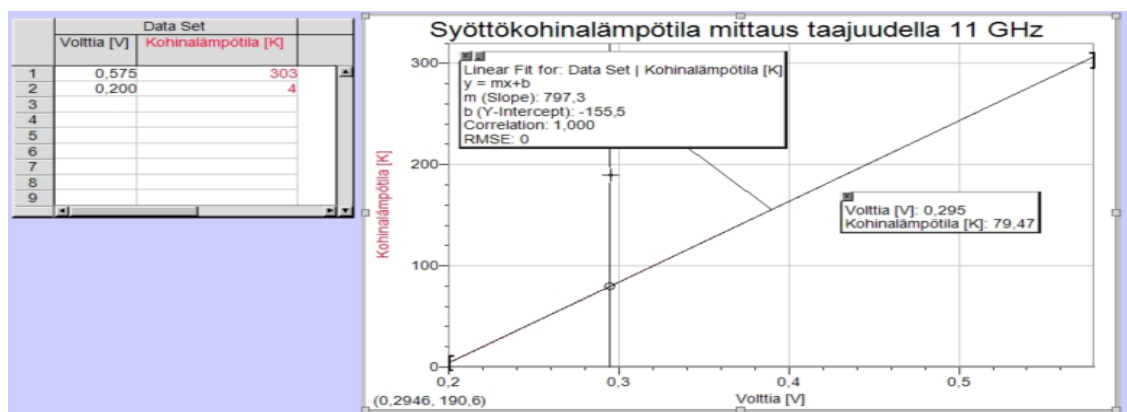
Tämän jälkeen siirryttiin radomin sisälle ja mittaussantenni suunnattiin kohti kylmää taivasta, jolla saatiin selville kylmän taivaan kohinalämpötilaa vastaava jännitteen taso radomin läpi mitattuna. Lopuksi mittaustulokset kirjattiin ylös. Taulukossa 2 on esitetty mittaustulokset taajuudella 11 GHz.

Taulukko 2. Mittaukset taajuudella 11 GHz

Mittauskohde	Mittaustulos [V]
Kuuma maa radomin ulkopuolella	0,575
Kylmä taivas radomin ulkopuolella	0,200
Kylmä taivas radomin sisällä	0,295

Seuraavaksi laskentaohjelmaan syötettiin kuuman maan ja kylmän taivaan kohinalämpötilat kelvineinä ja näitä vastaavat radomin ulkopuolella mitatut tulokset voltteina. Näiden tietojen perusteella laskentaohjelma osaa tulostaa lineaarisen suoran. Radomin vaikutus syöttökohinalämpötilaan saadaan selville etsimällä lineaariselta suoralta radomin sisällä mitatun kylmän taivaan mittaustulosta vastaava jännitearvo.

Kuvassa 37 on esitetty laskentaohjelman avulla saatu syöttökohinalämpötila taajuudella 11 GHz.



Kuva 37. Syöttökohinalämpötila taajuudella 11 GHz.

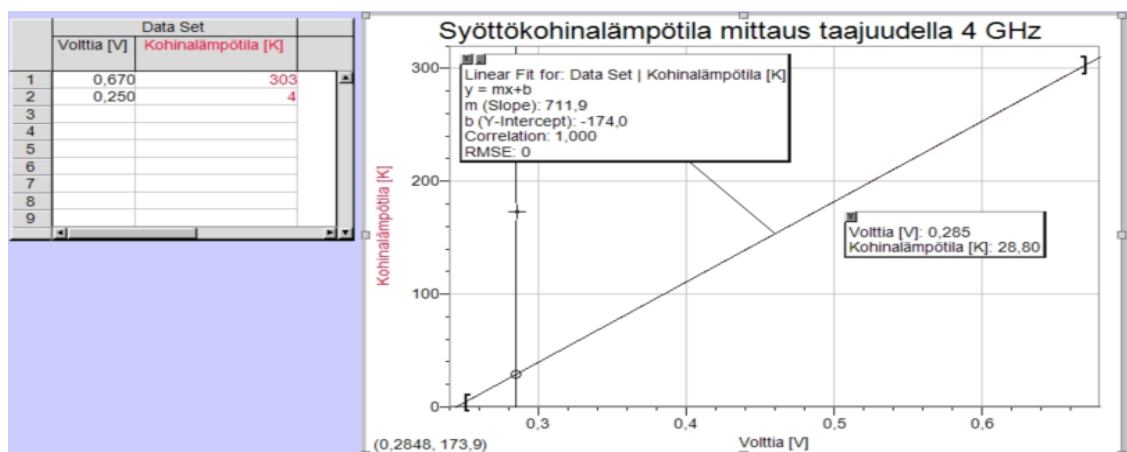
Asteikon vaaka-akseli esittää jännitettä ja pystyakseli kohinalämpötilaa kelvineissä. Kuvassa 37 esitetyn lineaarisen suoran avulla saatu syöttökohinalämpötila on taajuudella 11 GHz likimain 80 kelviniä.

4 GHz:n mittauksia varten vastaanottimeen vaihdettiin torviantenni ja etuvahvistin, jonka jälkeen suoritettiin vastaavat mittausrutiinit kuin 11 GHz:n taajuudella. Taulukossa 3 on esitetty mittaustulokset taajuudella 4 GHz.

Taulukko 3. Mittaukset taajuudella 4 GHz

Mittauskohde	Mittaustulos [V]
Kuuma maa radomin ulkopuolella	0,670
Kylmä taivas radomin ulkopuolella	0,250
Kylmä taivas radomin sisällä	0,285

Kuvassa 38 on esitetty laskentaohjelman avulla saatu syöttökohinalämpötila taajuudella 4 GHz.



Kuva 38. Syöttökohinalämpötila taajuudella 4 GHz.

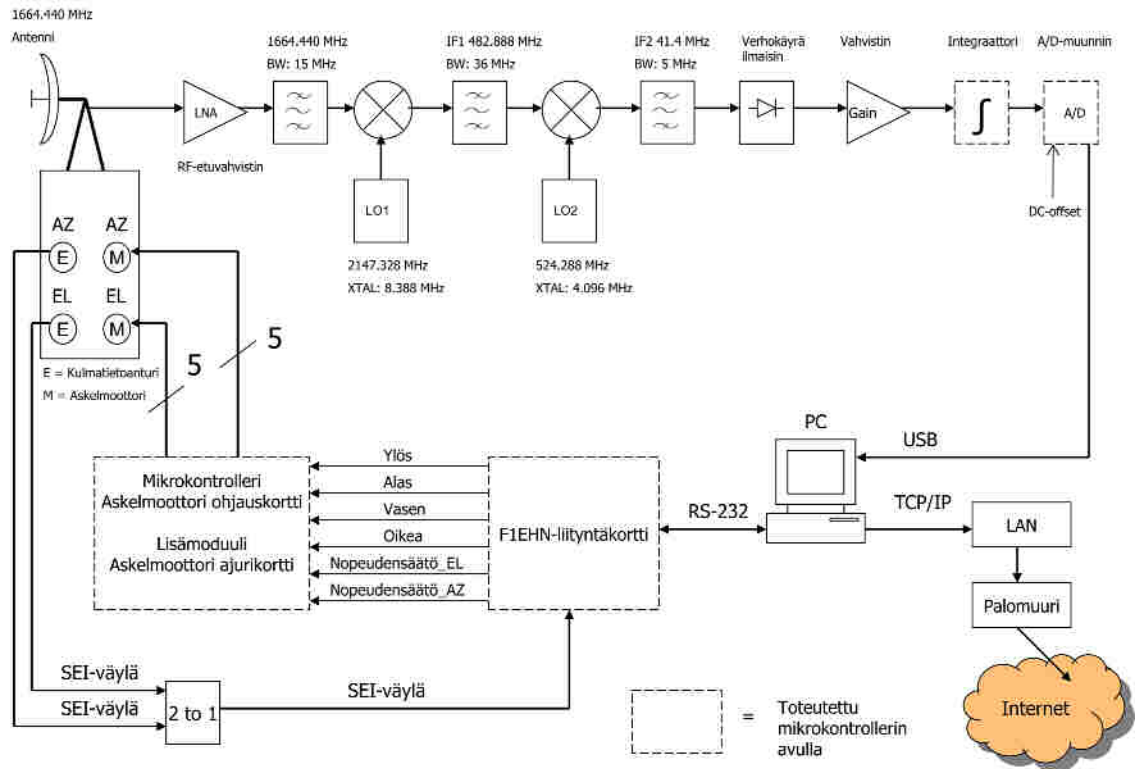
Asteikon vaaka-akseli esittää jännitetä ja pystyakseli kohinalämpötilaa kelvineissä. Kuvassa 38 esitetyn lineaarisen suoran avulla saatu syöttökohinalämpötila on taajuudella 4 GHz likimain 29 kelviniä.

Radomi nostaa antennin näkemää syöttökohinalämpötilaa taajuudella 11 GHz noin 76 kelviniä (80 K–4 K) ja taajuudella 4 GHz noin 25 kelviniä (29 K–4 K). Tulosten perusteella voidaan havaita, että mitä alemmas taajuudessa mennään, sitä vähemmän radomi vaimentaa signaalia. Tästä seuraa, että radomin vaikutus antennin näkemään syöttökohinalämpötilaan alhaisilla taajuuksilla on vähäinen. Mittaustuloksia tukee myös tieto antennin alkuperäisestä taajuusalueesta 1525,000 MHz–1545,000 MHz (vastaanotto) sekä 1626,500 MHz–1646,500 MHz (lähetys), joilla radomi on oletettavasti käytökelpoinen. Saatujen tulosten perusteella radomi on todettu riittävän hyväksi auringon kohinavuon mittauksiin vastaanottimeen valitulla taajuuskaistalla 1660,500 MHz–1668,400 MHz.

Jos vastaanotin päivitetään projektin jatkokehitysvaiheessa toimimaan taajuuksilla 11 GHz tai 4 GHz, radomia on syytä tutkia vielä tarkemmin erillisen materiaalimittauksen avulla. Käytännön materiaalimittaus voidaan suorittaa vektoripiirianalysointia avulla, jolla on mahdollista analysoida radomin rakennusmateriaalina käytetyn lasikuidun aiheuttaman vaimennuksen sekä signaalin vaiheen siirtymän tarkat arvot.

5.3 Kokonaistehovastaanottimen avulla toteutettu radioteleskooppijärjestelmä

Radioteleskooppijärjestelmässä käytetty vastaanotin eli radiometri mittaa auringon kohinavuon kohinalämpötilaeroja ja on käytännössä herkkä vastaanotin. Radiometri on kehitetty alun perin radioastronomiakäyttöön, mutta se on saavuttanut myös laajaa käyttöä lääketieteessä ja ilmakuvakartoituksessa. Kuvassa 39 on esitetty radioteleskooppijärjestelmän lohkokaavio, jossa vastaanottimena on käytetty kokonaistehovastaanotinta. [51.]



Kuva 39. Kokonaistehovastaanottimen avulla toteutettu radioteleskooppijärjestelmä.

Radioteleskooppijärjestelmään rakennettavassa kaksoissupervastaanottimessa on kaksi välitaajuusastetta, joiden avulla saadaan aikaiseksi hyvä peilitaajuusvaimennus. Antennista tulevaa 1664,440 MHz:n kohinasignaalia vahvistetaan ensin laajakaistaisen matalan kohinaluvun omaavan etuvahvistimen avulla. Tämän jälkeen taajuuskaistaa rajataan hiukan etuvahvistimen jälkeen tulevalla kaistanpäästösuotimella, jonka keskitaajuus on 1664,440 MHz ja -3 dB:n kaistanleveys 15 MHz. Kaistanpäästösuotimen tarkoitus on suodattaa mahdolliset häiriösignaalit pois, jotka saattavat tulla järjestelmän lähistöllä olevasta matkapuhelintukiasemasta. [25; 51.]

Suotimen lähdöstä saatu signaali sekoitetaan ensimmäisessä sekoitinasteessa ensimmäisen paikallisoskillaattorin (LO1) injektiotaajuuden (2147,328 MHz) kanssa. Sekoituksen lopputuloksena saadaan aikaiseksi vastaanottimen 1. välitaajuus 482,888 MHz. Sekoitinasteen jälkeen tulee kaistanpäästösuodin, jonka avulla suodatetaan ylimääräiset sekoitustulokset pois. Kaistanpäästösuotimen keskitaajuus on 482,888 MHz ja -3 dB:n kaistanleveys 36 MHz. [25; 51.]

1. välitaajuus 482,888 MHz sekoitetaan toisessa sekoitinasteessa toisen paikallisoskillaattorin (LO2) injektotaajuuden kanssa. Sekoituksen lopputuloksena saadaan aikaiseksi vastaanottimen 2. välitaajuus 41,4 MHz. Sekoitinasteen jälkeen tulee kaistanpäästösuodin, jonka avulla suodatetaan ylimääräiset sekoitustulokset pois. Kaistanpäästösuotimen keskitaajuus on 41,4 MHz ja sen -3 dB:n kaistanleveys 5 MHz. [25; 51.]

Toisen välitaajuusasteen kaistanleveys 5 MHz rajaa vastaanottimen ilmaisukaistanleveyden ja vaikuttaa siten suoraan vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuuteen. Vastaanottimessa on verhokäyräilmaisimien, joka voi yksinkertaisesti koostua diodista, vastuksesta ja kondensaattorista. Ilmaisimien toimii siten, että positiivisen jakson aikana virta kulkee diodin läpi, jolloin kondensaattori varautuu tulosignaalin hetkelliseen huippuarvoon. Kun huippuarvo on ohitettu diodi on estosuunnassa ja kondensaattorin varaus purkautuu hitaasti vastuksen kautta. Tulosignaalin seuraavien jaksojen aikana tilanne toistuu ja lähtösignaali approksimoi tulosignaalin verhokäyrää. [25.]

Verhokäyräilmaisimelta saatu signaali etenee viimeiseen vahvistinasteeseen, joka vahvistaa signaalia A/D-muuntimen sisäänmenoon sopivaksi tasoksi. Vahvistimen avulla on mahdollista hyödyntää A/D-muuntimen koko dynamiikka-alue väliltä 0 V–5 V. Viimeinen vahvistinaste määrää käytännössä mitta-asteikon skaalauksen. [25; 51.]

Vastaanottimessa oleva integraattori on käytännössä alipäästösuodin, jonka tehtävänä on poistaa verhokäyräilmaisimien lähdöstä saatavan signaalin suurtaajuiset komponentit pois. Signaalin integrointiin käytetty aika vaikuttaa myös suoraan vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuuteen. A/D-muuntimeen syötettävän DC (Direct Current) jännitteen avulla mittaustulokset keskitetään mitta-asteikon nollatason yläpuolelle, koska A/D-muuntimen sisään menossa ei saa esiintyä negatiivista jännitettä, joka voisi tuhota sen. [25; 51.]

Radioteleskooppijärjestelmään rakennettavan kokonaistehovastaanottimen integraattori ja A/D-muunnin on toteutettu mikrokontrollerinkortin avulla ohjelmallisesti. Mikrokontrolleri suorittaa A/D-muunnoksen verhokäyräilmaisimien lähdöstä saatavalle signaalille sekä emuloi ohjelmallisesti integraattorin toimintaa laskemalla juoksevaa keskiarvoa A/D-muunnetuista lukuarvoista. [60.]

Kokonaistehovastaanottimen huono puoli on, että se on herkkä ympäristön lämpötilan muutoksille. Vahvistinketjun sekä verhokäyräilmaisimen lähdöstä saatavan signaalin taso muuttuu ympäristön lämpötilan funktiona, joka aiheuttaa käytännössä mittausvirhettä. Mittausvirhe ilmenee siten, että jos mittausdatasta muodostetaan graafinen käyrä, sen paikka siirtyy mitta-asteikolla ylös tai alas ympäristön lämpötila muutoksen tahdissa. Tällöin on vaikeaa tulkita, johtuvatko mittaustulosten muutokset auringon kohinalämpötilan muutoksesta vai vastaanottimen oman vahvistinketjun ja verhokäyräilmaisimen parametrivaihtelujen vuoksi. [53.]

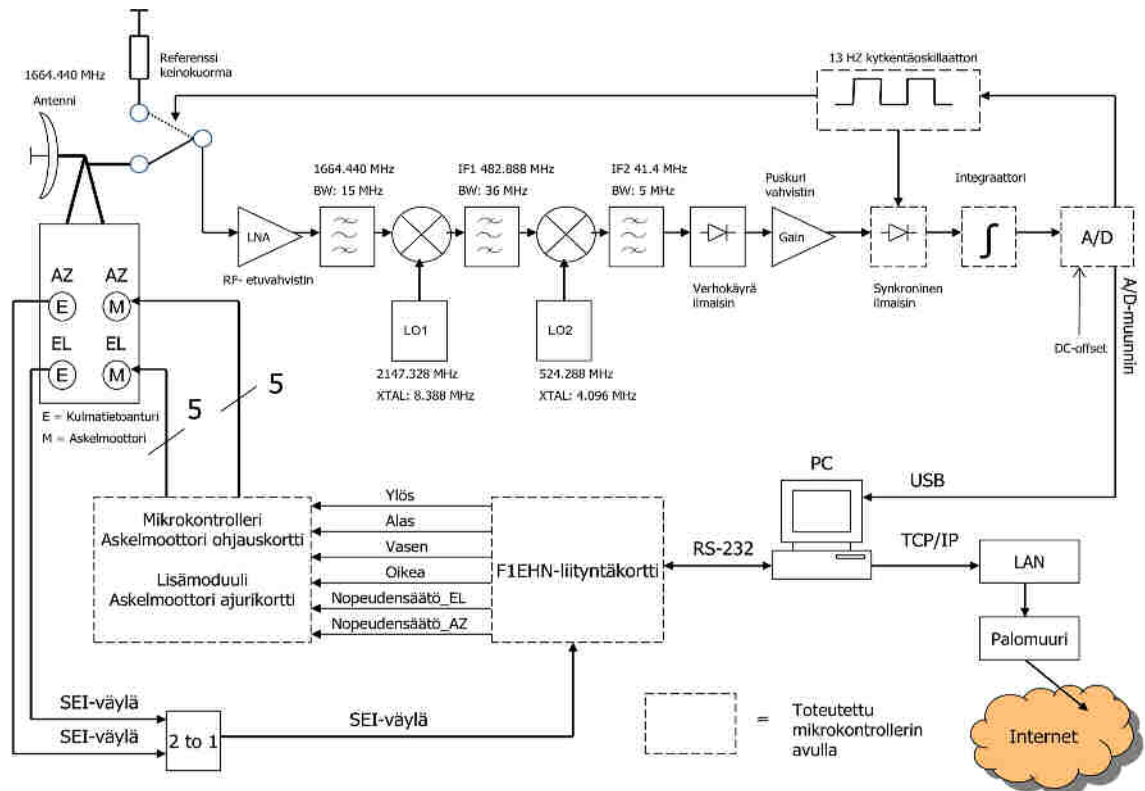
Vahvistinketjun parametrivaihtelua voidaan kompensoida pitämällä vastaanottimen ympäristön lämpötila vakaalla tasolla. Verhokäyräilmaisimen toimintaa voidaan parantaa lämpötilakompensoidun verhokäyräilmaisimen avulla. Kokonaistehovastaanotin on soveltuva aurinkomittauksiin, koska auringon emittoima laajakaistainen kohinavuo on suhteellisen voimakas systeemin vahvistinketjun ja verhokäyräilmaisimen parametrivaihteluihin verrattuna. [53.]

5.4 Dicke-vastaanottimen avulla toteutettu radioteleskooppijärjestelmä

Kehittyneempi vastaanotin on ns. Dicke-vastaanotin, jossa vastaanottimen vahvistinketjun parametrivaihtelut voidaan eliminoida vertaamalla jatkuvasti antennin kohinalämpötilaa referenssinä toimivan keinokuorman kohinalämpötilaan. [52; 53.]

Aurinkomittauksissa vastaanottimen vahvistinketjun parametrivaihtelun täydellinen kumoaminen on haastavaa, koska antennin ja referenssinä toimivan keinokuorman kohinalämpötilojen on vastattava toisiaan. [52; 53.]

Dicke-vastaanottimesta on olemassa versioita, joissa keinokuorman lämpötila säädetään automaattisesti vastaamaan antennin kohinalämpötilaa, jolloin vahvistinketjun parametrivaihtelut on pystytty kumoamaan täydellisesti pois. Kuvassa 40 on esitetty radioteleskooppijärjestelmän lohkokaavio, jossa vastaanottimena on käytetty Dicke-vastaanotinta. [52; 53.]



Kuva 40. Dicke-vastaanottimen avulla toteutettu radioteleskooppijärjestelmä.

Dicke-vastaanotin on rakenteeltaan hyvin samanlainen kuin kokonaistehovastaanotin. Sen etuvahvistin, välitaajuusasteet, verhoikäyräilmaisain sekä integraattoriaste toimivat samalla periaatteella kuin kokonaistehovastaanottimessa. Dicke-vastaanottimeen on lisätty kytkentäoskillaattori, referenssinä toimiva keinokuorma, vastaanottimen etupäässä oleva vertailukytkin sekä synkroninen ilmaisain. [52; 53.]

Dicke-vastaanottimen vahvistinketjun parametrivaihteluihin ja sitä kautta myös vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuuteen voidaan vaikuttaa pitämällä referenssinä toimivan keinokuorman lämpötila mahdollisimman stabiilina ja tunnetussa lämpötilassa. Referenssikeinokuormaksi sopii esimerkiksi hyvälaatuinen sovitettu vastus. Jos mitataan kylmiä kohteita, kuten tähtiä tai kylmää taivasta, keinokuorma voidaan jäädyttää vastaamaan mahdollisimman tarkasti kylmän kohteen kohinalämpötilaa. [52; 53.]

Vastaavasti jos Dicke-vastaanottimella mitataan kuumia maanpäälisiä kohteita, referenssinä voidaan käyttää esimerkiksi kohinageneraattoria, jonka kohinasignaalin teho-taso säädetään vastaamaan kuumen kohteen kohinalämpötilaa. Radioteleskooppijärjes-

telmään konstruoitava Dicke-vastaanotin käyttää referenssikeinokuormana aluksi hyvälaatuista sovitettua vastusta. [52; 53.]

Referenssikeinokuorma sijoitetaan antennin päässä olevan vertailukytkimen kanssa saman tilaan. Tämän ratkaisun huono puoli on, että ympäristön lämpötila vaikuttaa suoraan referenssinä toimivan keinokuorman kohinalämpötilaan, koska lämpötilaa ei ole kompensoitu millään tavalla. [52; 53.]

Vastaanottimen etupäässä oleva vertailukytkin voidaan toteuttaa monella eri tekniikalla. Se voi olla esimerkiksi elektroninen PIN-diodeilla toteutettu kytkin, sähkö- ja magneettikentän avulla toimiva polarisaattori, tai vaikka tavallinen RF-rele. Eri tekniikoilla toteutettujen vertailukytkimien vaimennukset ja kytkentätaajuudet poikkeavat hieman toisistaan. [52; 53.]

PIN-diodeilla toteutettuna vertailukytkimen vaimennus on suurempi kuin RF-releen tai polarisaattorin. PIN-diodi kytkintä voi tarvittaessa ohjata korkeammalla kytkentätaajuudella kuin polarisaattoria tai RF-relettä ja se toimii pitkällä aikavälillä luotettavammin kuin polarisaattori tai rele. Polarisaattorin vaimennus on matalampi kuin PIN-diodi kytkimen. Sen haittapuolena on sisäisestä toimintaperiaatteesta johtuva kytkentäviive, joka kasvaa taajuuden funktiona. [52; 53.]

Polarisaattorin kytkentäviiveen kasvaessa tarpeeksi suureksi vastaanottimen synkronisen ilmaisimen toiminta saattaa häiriintyä. Tämän vuoksi polarisaattoria ohjataan tyypillisesti matalalla kytkentätaajuudella. RF-rele vaimentaa signaalia aluksi hyvin vähän, mutta sen vaimennus kasvaa releen kärkien ikääntyessä. Relettä on ohjattava matalalla kytkentätaajuudella, jotta se toimisi luotettavasti. [52; 53.]

Vahvistinketjun parametrivaihtelut tapahtuvat tyypillisesti yhden hertsin tai sitä pienemmillä taajuuksilla. Tämän vuoksi vertailukytkimen kytkentätaajuus valitaan yleensä niin suureksi, että parametrit eivät ehdi yhden kytkentäjakson aikana muuttua ollenkaan, jolloin mittauksiin saadaan lisää stabiiliutta. Tyypillinen Dicke-vastaanottimen kytkentätaajuus on kymmenestä hertsistä aina muutamiin kymmeneen hertseihin saakka. [52; 53.]

Radioteleskooppijärjestelmään rakennettava Dicke-vastaanotin käyttää 13 Hz:n kytkentätaajuutta vertailukytkimen ohjaukseen. Kyseiseen kytkentätaajuuteen päädyttiin sen vuoksi, koska antennin gyroskooppihyrriä ohjataan 220 V:n ja 50 Hz:n verkkojännitteellä. Jos systeemin maadoituksessa on ongelmia, siinä saattaa esiintyä kelluvia vaihtojännitteitä, joiden taajuus on 50 Hz. Nämä kelluvat jännitteet ovat usein niin suuria, että ne ohjaavat systeemissä käytetyt operaatiovahvistimet kompressioon. Ylioijatut operaatiovahvistimet luovat 50 Hz:n harmonisia häiriösignaaleja, jotka saattavat häiritä yli 50 Hz:n kytkentätaajuudella toimivan kytkentäoskillaattorin ja synkronisen ilmaisimen toimintaa.

Dicke-vastaanottimen etupäässä oleva vertailukytkin amplitudimoduloi laajakaistaista kohinasignaalia omalla kytkentätaajuudellaan. Verhokäyräilmaisimen ulostulossa esiintyy tästä johtuen kanttiaallon muotoista kohinasignaalia. Vastaanottimessa on oltava tämän vuoksi varsinaisen verhokäyräilmaisimen jälkeen myös synkroninen ilmaisim, joka suorittaa antennista tulevan kohinasignaalin ja keinokuormasta tulevan kohinasignaalin vertailun. [52; 53.]

Jos keinokuorman kohinalämpötila on aseteltu esimerkiksi ympäristön lämpötilaa muuttamalla samaksi kuin antennin kohinalämpötila, synkronisen ilmaisimen ulostulo asetuu nolatasolle ja muuttuu vain silloin, kun antennin kohinalämpötilassa tapahtuu muutoksia. Kytkennässä oleva puskurivahvistin vahvistaa verhokäyräilmaisimen lähdestä saatavaa kanttiaallon muotoista kohinasignaalia A/D-muuntimen sisäänmenoon sopivaksi tasoksi. Vahvistimen avulla on mahdollista hyödyntää A/D-muuntimen koko dynamiikka-alue väliltä 0 V–5 V. Viimeinen vahvistinaste määrää käytännössä mitta-asteikon skaalauksen. [52; 53.]

Radioteleskooppijärjestelmään konstruoitavan Dicke-vastaanottimen kytkentäoskillaattori, synkroninen ilmaisim, integraattori sekä A/D-muunnin on toteutettu mikrokontrollien avulla ohjelmallisesti. Integraattori sekä A/D muunnin toimivat samalla periaatteella kuin kokonaistehovastaanottimen tapauksessa.

Tämän lisäksi ohjelma emuloi synkronisen ilmaisimen sekä kytkentäoskillaattorin toimintaa, jolloin ulkoisesti tarkasteltuna ne toimivat tahdistetusti keskenään yhdessä. Kytkentäoskillaattori ohjaa ulkoisesti vastaanottimen etupäässä olevaa vertailukytkintä 13 Hz:n kanttiaaltosignaalilla. Synkroninen ilmaisim suorittaa 13 Hz:n taajuuden tahdis-

sa vuoroin keinokuormasta ja vuoroin antennista tulevan kohinasignaalin A/D-muunnoksen.

5.5 Vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuus

Yksi vastaanottimen suorituskyvyn parametreista on sen kohinalämpötilan erottelutarkkuus, jolla tarkoitetaan sitä, miten pieniä kohinalämpötilan muutoksia vastaanotin kykenee kohteesta havaitsemaan. Kokonaistehovastaanottimen tapauksessa sen kohinalämpötilan erottelutarkkuus voidaan laskea yhtälöstä 13. [25; 51.]

$$\Delta T = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B\tau}} \quad (13)$$

jossa ΔT on vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuus [K], T_A on antennin kohinalämpötila [K], T_R on vastaanottimen kohinalämpötila [K], B on kaistanleveys [Hz] ja τ on integrointiaika [s].

Vastaavasti Dicke-vastaanottimen tapauksessa sen kohinalämpötilan erottelutarkkuus voidaan laskea yhtälöstä 14. [53.]

$$\Delta T = \sqrt{\frac{2(T_A + T_R)^2 + 2(T_L + T_R)^2}{B\tau} + \left(\frac{\Delta G}{G_{HF}}\right)(T_A - T_L)^2} \quad (14)$$

jossa ΔT on vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuus [K], T_A on antennin kohinalämpötila [K], T_R on vastaanottimen kohinalämpötila [K], T_L on keinokuorman kohinalämpötila [K], B on kaistanleveys [Hz], τ on integrointiaika [s] ja $(\Delta G/G_{HF})$ on vastaanottimen vahvistinketjun epästabiiliuskerroin.

Yhtälöiden 13 ja 14 avulla voidaan havaita, että kokonaisteho sekä Dicke-vastaanottimen kohinalämpötilan erottelutarkkuutta voidaan parantaa kasvattamalla ilmaisukaistanleveyttä sekä integrointiaikaa.

Yhtälöstä 14 voidaan havaita, että kun neliöjuuren alla oleva viimeinen termi $(T_A - T_L)^2$ asettuu nolla arvoon, referenssinä toimivan keinokuorman kohinalämpötila vastaa antennin kohinalämpötilaa. Tämä vastaa tilannetta, jossa Dicke-vastaanottimen vahvistin-

ketjun parametrivaihtelut kumoutuvat täydellisesti pois. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mittauksiin saadaan lisää stabiiliutta ja mittausherkkyyttä. [53.]

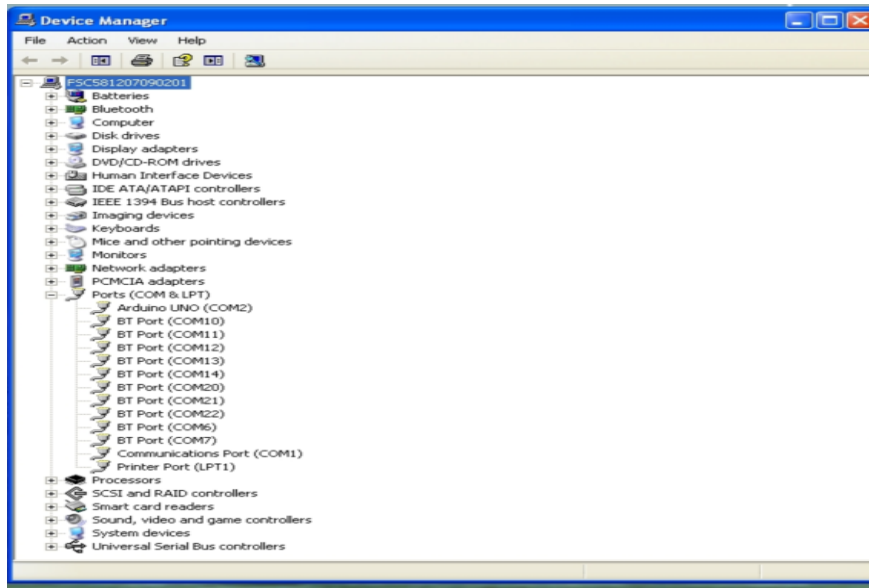
6 Ohjelmistokehitys ja kehitysympäristö

Askelmoottoriohjain ja ajoyksikkö sekä vastaanottimeen asennettava ohjauskortti ja mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja vaativat toimiakseen ohjelmallista kehitystyötä. Mikrokontrollerikorttien ohjelmointi toteutettiin C-kielen avulla Arduino-mikrokontrollerikortin omassa helppokäyttöisessä kehitysympäristössä. Komentosarja ohjelmoitiin Visual Basic komentosarjakielen avulla.

6.1 Mikrokontrollerin kehitysympäristö

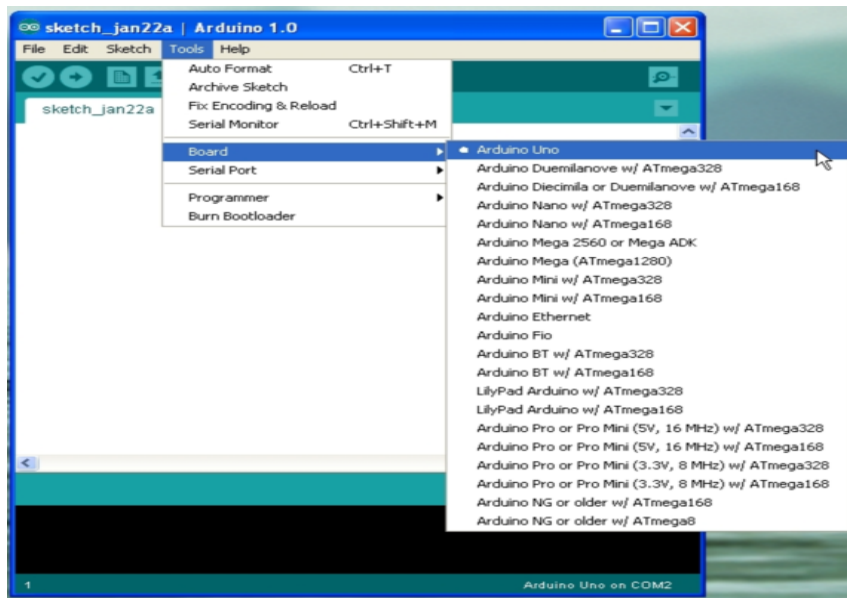
Ennen kuin mikrokontrollerien ohjelmoinnissa pääsee alkuun, tietokoneelle on asennettava kehitysympäristö. Kehitysympäristön asennusohjeet löytyvät kortinvalmistajan kotisivuilta osoitteesta <http://arduino.cc/en/Guide/Windows>. Asennuksen jälkeen tietokoneeseen on asennettava Arduino Uno kortin USB-laiteajurit. Ajurit löytyvät kehitysympäristössä Drivers (ajurit) kansioista.

USB-laiteajurin toimivuuden voi tarkastaa käyttöjärjestelmän laitehallintarekisteristä. Ajurit on asennettu oikein, jos käyttöjärjestelmä on määrännyt Arduino Uno kortille oman sarjaporttiosoitteen laitehallintarekisteriin. Kuvassa 41 on esitetty tietokoneen laitehallintarekisteri, jossa käyttöjärjestelmä on määrännyt Arduino Uno kortille sarjaporttiosoitteen *COM2*. [54; 57.]



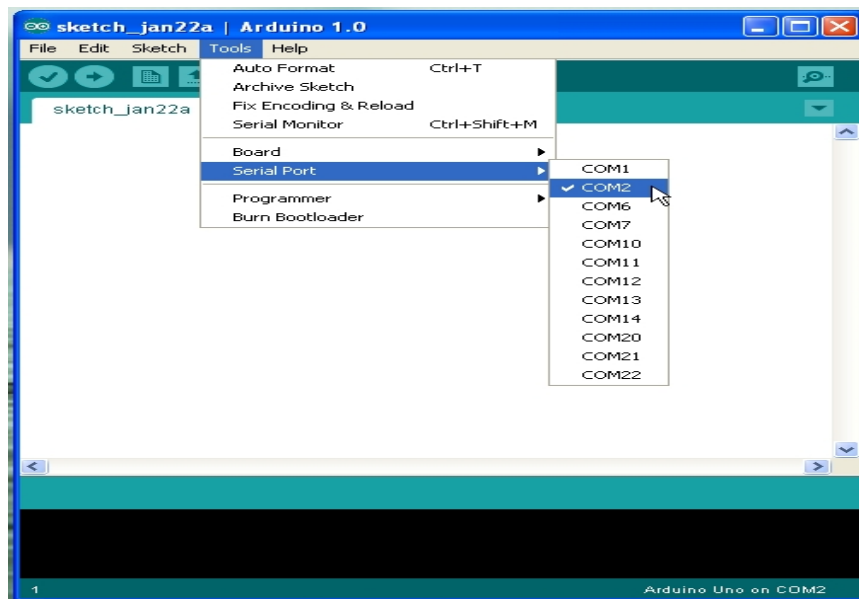
Kuva 41. Arduino Uno kortin sarjaporttiosoite laitehallintarekisterissä.

Kun USB-ajurit on asennettu, voidaan käynnistää itse kehitysympäristö ensimmäistä kertaa. Ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä kehitysympäristössä on määriteltävä kaksi tärkeää asetusta. Ensin kehitysympäristölle on kerrottava Arduino kortin malli, jota käytetään ohjelmistokehityksen aikana. Kuvassa 42 on esitetty, kuinka Arduino Uno kortti valitaan kehitysympäristössä käytettäväksi korttimalliksi. [54; 57.]



Kuva 42. Korttimallin valinta kehitysympäristössä.

Toiseksi kehitysympäristölle on kerrottava USB-sarjaportin numero, johon Arduino-kortti on kytketty paikalliseen tietokoneeseen. Kortti käyttää USB-sarjaporttia kommunikointiin muiden laitteiden kanssa ja valmiiden ohjelmien lataamiseen mikrokontrollerin sisäiseen ohjelmamuistiin sekä se saa käyttösähkensä USB-sarjaportin kautta. Kuvassa 43 on esitetty, kuinka kehitysympäristössä määritetään Arduinon käyttämä USB-sarjaportin numero. [54.]



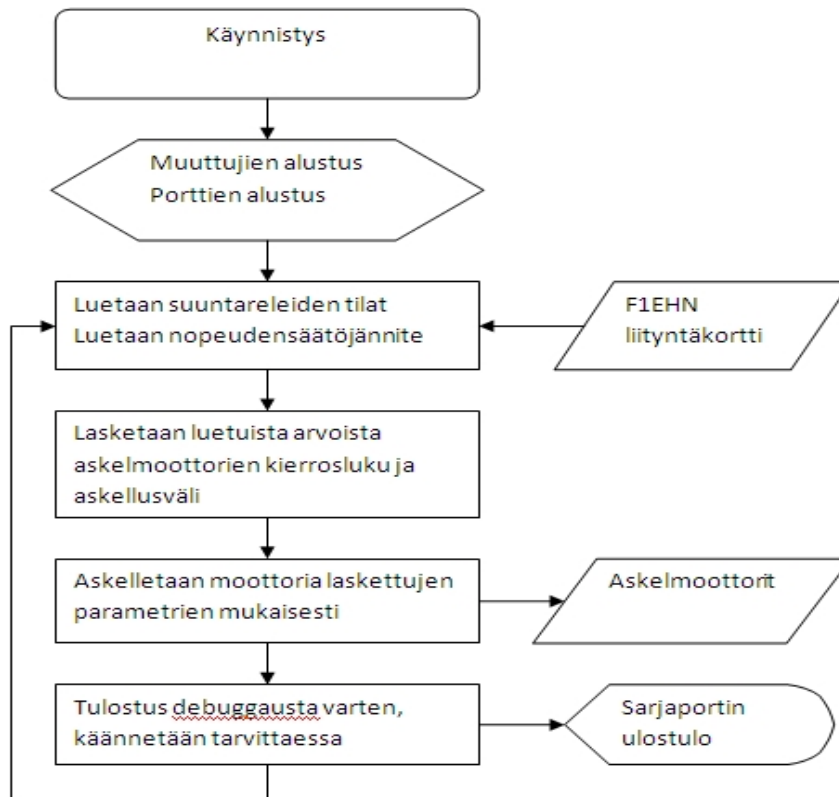
Kuva 43. Sarjaportin valinta kehitysympäristössä.

Kun edellä mainitut asetukset on määriteltty oikein, kehitysympäristö on täysin toimintavalmis ohjelmointia varten. Kehitysympäristön asennuksen ja Arduino Uno kortin toiminnan voi tarkastaa kääntämällä ja lataamalla kehitysympäristön mukana tulleita valmiita yksikertaisia esimerkkiohjelmiä mikrokontrollerin sisäiseen ohjelmamuistiin. [54; 57.]

6.2 Askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikön ohjelman kehitys

Jokainen Arduinolle suunniteltu ohjelma noudattaa samanlaista ohjelmarakennetta. Ohjelman alussa alustetaan muuttujat sekä ulkoiset portit, jonka jälkeen siirrytään ikuiseseen silmukkarakenteeseen, jossa itse pääohjelmaa suoritetaan niin pitkään, kuin mikrokontrollerissa on käyttöjännite päällä. Askelmoottorien ohjaus- ja ajoyksikön ohjel-

maa lähdettiin kehittämään kuvassa 44 esitetyn vuokaavion perusteella, jossa on esitetty ohjelman eri toimintavaiheet. [54.]



Kuva 44. Askelmoottorien ohjaus- ja ajoyksikön ohjelman vuokaavio.

Ohjelman rakenne on suunniteltu mahdollisimman yksinkertaiseksi. Ohjelman alkuun lisätään askelmoottorien ajurikortin ohjelmistokirjasto, jonka avulla ohjelmoinnissa voidaan käyttää hyödyksi valmiiksi luotuja moottorinohjausfunktioita. Tämän jälkeen alustetaan tarvittavat muuttujat ja portit.

Muuttujien ja porttien alustuksessa on käytetty "#define"-komentoa, jolla voidaan määritellä, että jokin teksti tarkoittaa jotain muuta. Näin voidaan määritellä esimerkiksi vakioita, jottei tarvitse muistaa lukuja ulkoa ja jotta niiden muuttaminen käy tarvittaessa myöhemmässä vaiheessa helpommin.

Muuttujien ja porttien alustuksen jälkeen siirrytään suorittamaan itse pääohjelmaa silmukkarakenteen alla. Ensimmäisenä ohjelma lukee EHN-liityntäkortin suuntareiden tilat ja askelmoottorien kierrosnopeuden säätöön tarkoitetut analogiset säätöjännitteet.

Suuntareiden tilojen lukemiseen suunniteltu funktio toimii siten, että se palauttaa arvot välillä -1, 0, 1. Tällä tavoin on saatu aikaiseksi yksinkertainen toimintamalli askelmoottorien pyörimissuunnan asettamiseksi. Askelmoottorien kierrosnopeuden säätöön suunniteltu funktio toimii siten, että se palauttaa arvon välillä 0 V–5 V.

Seuraavaksi luetuista arvoista lasketaan askelmoottorien kierrosluku sekä askellusväli. Laskennassa otetaan huomioon ohjelman alussa alustettujen muuttujien arvot, askelmoottorin suuntareiden tilat sekä kierrosnopeuden säätöfunktion palauttamien arvot. Tämän jälkeen askelletaan moottoreita laskettujen parametrien mukaisesti.

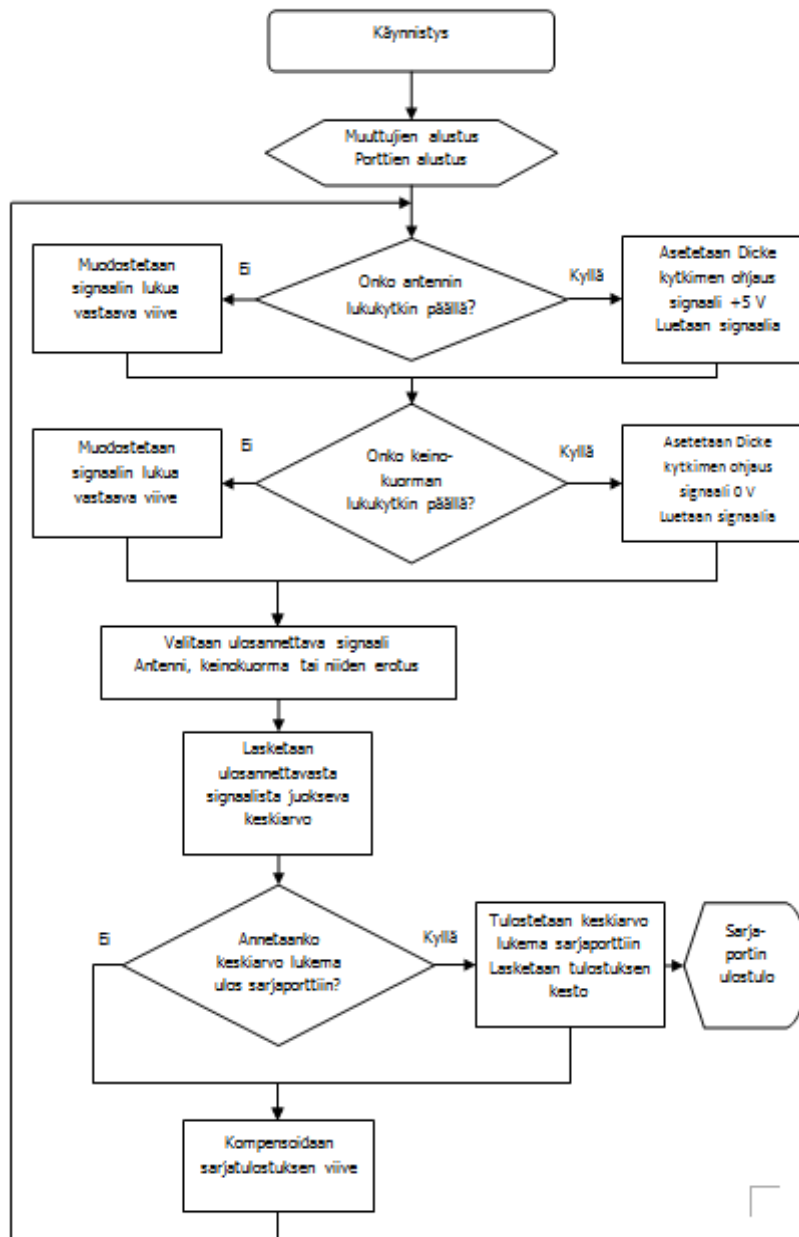
Moottorien askellukseen käytetään ohjelmistokirjaston mukana tulleita valmiita funktioita, jotka mahdollistavat mm. eri askellustapojen valinnan: kokoaskellus, puoliaskellus, mikroaskellus. Ohjelma on suunniteltu siten, että sen toimintaa voidaan tarvittaessa monitoroida Arduinon sarjaportin kautta. Ohjelmaa käännettäessä sarjaporttifunktio voidaan kytkeä tarvittaessa pois päältä. Lopuksi ohjelma siirtyy takaisin silmukkarakenteen alkuun.

Ohjelman toiminta testattiin käytännössä antennin automaattisen ohjausjärjestelmän testin yhteydessä. Testin jälkeen todettiin, että ohjelma toimii oikein ja se voidaan ottaa käyttöön radioteleskooppijärjestelmässä. Kokonainen ohjelma on luettavissa, vapaasti kopioitavissa sekä hyödynnettävissä englanniksi kommentoituna liitteessä 1.

6.3 Vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelman kehitys

Vastaanottimeen asennettava ohjausyksikkö emuloi synkronisen ilmaisimen, kytkentäoskillaattorin ja integraattorin toimintaa sekä suorittaa A/D-muunnoksen vastaanottimen verhoikäyräilmaisimelta tulevalle analogiselle kohinasignaalille. Ohjausyksikkö toteuttaa ulkoisesti neljän eri asteen toiminnan, mistä seuraa se etu, että vastaanottimen rakennusvaiheessa näitä asteita ei tarvitse rakentaa erikseen irtokomponenteista.

Ohjelma on suunniteltu siten, että samaa ohjausyksikköä voidaan käyttää sekä kokonaisteho, että Dicke-vastaanottimessa. Tämän vuoksi ohjelmallisesti emuloidun kytkentäoskillaattorin käyttäytymistä voidaan ohjata kahden eri valintakytkimen avulla. Ensimmäisen kytkimen avulla ohjausyksikkö asetetaan lukemaan antennista tulevaa kohinasignaalia. Toisen valintakytkimen avulla ohjausyksikkö asetetaan lukemaan keino-kuormasta tulevaa kohinasignaalia. Vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelmaa lähdettiin kehittämään kuvassa 45 esitetyn vuokaavion perusteella, jossa on esitetty ohjelman eri toimintavaiheet.



Kuva 45. Vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelman vuokaavio.

Ohjelman alussa alustetaan tarvittavat muuttujat ja portit. Muuttujien alustuksessa on käytetty samoja "#define"-komentoja kuin askelmoottorien ohjainkortin tapauksessa. Muuttujien alustuksen jälkeen siirrytään varsinaiseen pääohjelmaan, jota suoritetaan silmukkarakenteen alla. Pääohjelman alussa ohjelma suorittaa ensimmäisen vertailulauseen, jonka avulla tutkitaan ensimmäisen valintakytkimen tila.

Jos kytkin on asetettu aktiiviseksi, kytkentäoskillaattorin lähtö asetetaan +5 V:n tilaan sekä samanaikaisesti ohjelma suorittaa antennista tulevalle kohinasignaalille A/D-muunnoksen. Muussa tapauksessa lasketaan A/D-muunnokseen kuluva aika vastaava viive sen vuoksi, että ohjelman avulla emuloitu synkroninen ilmaisimien sekä kytkentäoskillaattori pysyvät tahdissa keskenään.

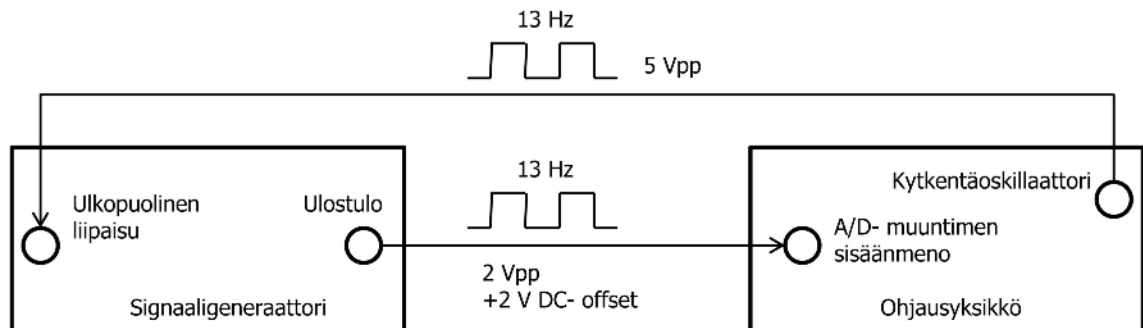
Seuraavaksi ohjelma suorittaa toisen vertailulauseen, jonka toimintaperiaate on samanlainen kuin ensimmäisen vertailulauseen tapauksessa. Ainoana erona on, että kytkentäoskillaattorin lähtö asettuu 0 V:n tilaan ja ohjelma suorittaa keinokuormasta tulevalle kohinasignaalille A/D-muunnoksen.

Tämän jälkeen ohjelma siirtyy kohtaan, jossa valintakytkimien tilan perusteella valitaan mistä lähteestä kohinasignaalin A/D-muunnoksessa syntyviä lukuarvoja luetaan. Lähde voi olla antenni, keinokuorma tai näiden erotus. Ohjelma laskee lukuarvoista juoksevaa keskiarvoa, josta seuraa, että sarjaporttiin tulostettavat lukuarvot tasoittuvat ja näin ollen ohjausyksikön toiminta muistuttaa ulkoisesti integraattorin toimintaa. Juoksevan keskiarvon avulla ohjausyksikkö emuloi ohjelmallisesti integraattorin toimintaa. Seuraavaksi ohjelma suorittaa viimeiseen vertailulauseeseen, jossa tutkitaan, annetaanko keskiarvolukema ulos sarjaportista vai ei.

Ohjelman siirtyessä varsinaiseen sarjaportti tulostusfunktioon, lasketaan samalla tulostukseen menevä aika, jonka perusteella ohjelma osaa kompensoida tulostuksessa syntyvän viiveen. Kompensointi on suoritettava sen vuoksi, että ohjelman avulla emuloitu synkroninen ilmaisimien sekä kytkentäoskillaattori pysyvät tahdissa keskenään. Lopuksi kompensoidaan tulostuksessa syntyvä viive, jonka jälkeen ohjelma siirtyy takaisin silmukkarakenteen alkuun.

Ohjausyksikön ohjelman toiminnan testausta suoritettiin kahden erillisen testikytkennän avulla. Ensimmäisessä testissä ohjausyksikön valintakytkimet asetettiin siten, että oh-

ohjelma emuloi Dicke-vastaanottimen kytkentäoskillaattorin ja integraattorin sekä synkronisen ilmaisimen toimintaa. Dicke-vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelman testaus suoritettiin kuvassa 46 esitetyn testikytkennän avulla.



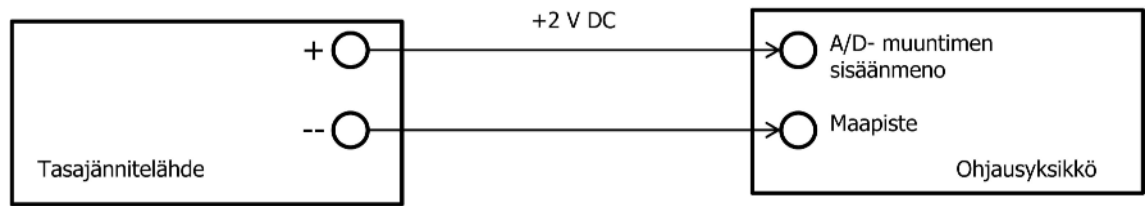
Kuva 46. Dicke-vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelman testikytkentä.

Signaaligeneraattorista syötettiin kanttiaalto signaalia, jonka taajuus oli 13 Hz ja amplitudi 2 Vpp ohjausyksikön A/D-muuntimen sisäänmenoon. Tämä lisäksi signaaligeneraattorin ulostuloon lisättiin +2 V:n DC-jännite, joka avulla kanttiaalto keskitettiin nollatason yläpuolelle. +2 V:n DC-jännite tarvitaan kytkennässä sen vuoksi, että ohjausyksikön A/D-muuntimen sisäänmenossa ei saa esiintyä negatiivista jännitetasoa, joka voisi tuhota A/D-muuntimen.

Signaaligeneraattorin ulostulo liipaistiin aktiiviseksi ohjelmallisesti emuloidun 13 Hz:n kytkentäoskillaattorin tahdissa. Ohjausyksikkö suoritti synkronisesti A/D-muunnoksen signaaligeneraattorista tulevalle 13 Hz:n kanttiaalto signaalille kytkentäoskillaattorin tahdissa. Testin lopputulos oli, että ohjausyksikkö tulosti sarjaporttiin 13 Hz:n kanttiaalto signaalin huippuarvojen erotusta vastaava lukuarvon.

Tämän perusteella todettiin, että ohjelmallisesti emuloitu integraattori ja synkroninen ilmaisim sekä kytkentäoskillaattori toimivat oikein. Ohjelma osaa suorittaa kohinasignaalista A/D-muunnoksen ja tulostaa järkeviä lukuarvoja sarjaporttiin. Näin ollen ohjausyksikkö on valmis testattavaksi todellisessa Dicke-vastaanottimessa.

Toisessa testissä ohjausyksikön valintakytkimet asetettiin siten, että ohjelma emuloi kokonaistehovastaanottimen integraattorin toimintaa sekä suorittaa A/D-muunnoksen sisään tulevalle signaalille. Ohjausyksikön ohjelman testaus suoritettiin kuvassa 47 esitetyn testikytkennän avulla.



Kuva 47. Kokonaistehovastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelman testikytkentä.

Virtalähteestä syötettiin +2 V:n tasajännite ohjausyksikön A/D-muuntimen sisäänmenoon. Testin lopputulos oli, että ohjausyksikkö tulosti sarjaporttiin +2 voltin vastavaan A/D-muunnetun lukuarvon. Tämän perusteella todettiin, että ohjelmallisesti emuloitu integraattori ja A/D-muunnin toimivat oikein sekä, että ohjelma osaa tulostaa järjestyksellisiä lukuarvoja sarjaporttiin. Ohjausyksikkö on näin ollen valmis testattavaksi todellisessa kokonaistehovastaanottimessa. Ohjausyksikön ohjelma on luettavissa, vapaasti kopioitavissa sekä hyödynnettävissä englanniksi kommentoituna liitteessä 2.

6.4 Mittausdatan käsittelyyn tarkoitetun komentosarjan kehitys

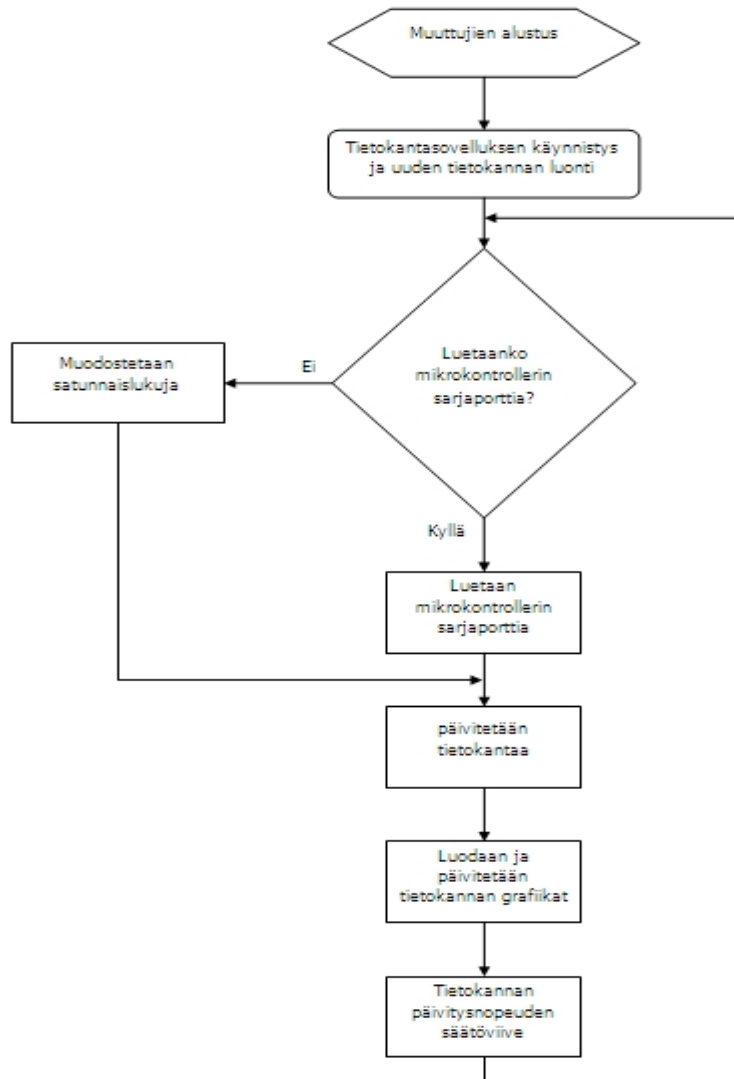
Radioteleskooppijärjestelmän tuottama mittausdata tallennetaan paikalliselle tietokoneelle RRD (Round Robin Database) tietokantaan, jonka toimintaa ohjataan Visual Basic komentosarjakielen avulla. RRD-tietokantasovellus on teollisuudessa laajalti käytössä oleva avoimeen lähdekoodiin perustava sovellus, jonka avulla on mahdollista käsitellä esimerkiksi jonkin laitteen tuottamaa mittausdataa ja tulostaa siitä erilaisia mittauskäyriä. [61.]

RRD-tietokantasovellus on kehitetty toimimaan ensisijaisesti Linux käyttöjärjestelmän alla, mutta siitä on saatavilla myös Windows käyttöjärjestelmässä toimiva versio, jota käytettiin tässä projektissa. Yksi syy RRD-tietokantasovelluksen laajaan suosioon on sen sisäinen toimintaperiaate. RRD-tietokannan koko on täysin vapaasti muokattavissa. Käyttäjä määrittelee tietokannan luonnin yhteydessä sen maksimikoon, jota ei tulla missään vaiheessa ylittämään. [61.]

Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kun tietokannan maksimikoko on tullut täyteen, sovellus tallentaa tietokantaan tulevaa uutta dataa vanhan datan päälle. Tästä seuraa käytännössä sellainen etu, että tietokannalle määritelty kovalevytila pysyy käyttäjän kannalta hallittavissa rajoissa ja näin ollen välttyään mahdolliselta kovalevytilan laajen-

nukselta tulevaisuudessa. RRD-tietokantasovellus asennusohjeineen on ladattavissa ohjelman tekijän kotisivuilta osoitteessa <http://oss.oetiker.ch/rrdtool/pub/contrib>, josta se ladattiin ja asennettiin tietokoneelle. [61.]

RRD-tietokantasovellusta ohjaavaa komentosarjaa lähdettiin kehittämään kuvassa 48 esitetyn vuokaavion perusteella, jossa on esitetty sen eri toimintavaiheet.



Kuva 48. RRD-tietokantasovellusta ohjaavan komentosarjan vuokaavio.

Komentosarja on kehitetty siten, että normaalitilassa se lukee vastaanottimeen asennettun ohjaukskortin sarjaportista tulevaa dataa ja tallentaa sen RRD-tietokantaan. Komentosarjan avulla on myös mahdollista testata RRD-tietokannan toimintaa ilman mikro-

kontrolleria siten, että komentosarja muodostaa satunnaislukugeneraattorin avulla testidataa, joka tallennetaan tietokantaan.

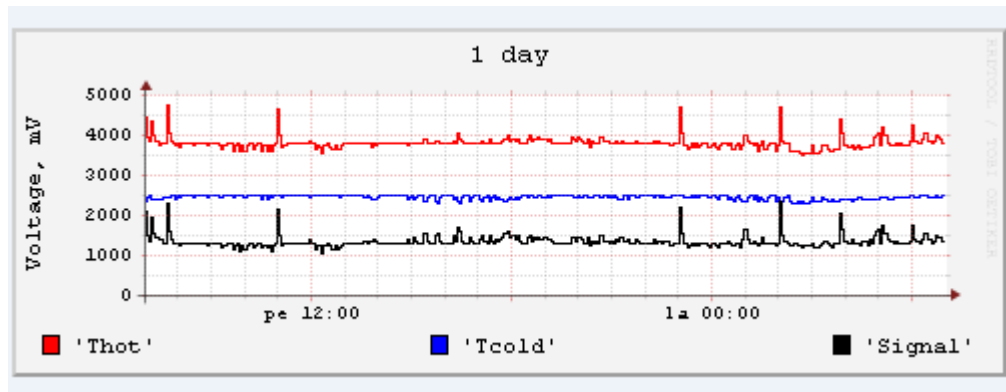
Komentosarjan aluksi alustetaan muuttujat, joita tarvitaan sen sisäisessä toiminnassa. Tämän jälkeen komentosarja käynnistää RRD-tietokantasovelluksen kansiota, johon sen ajettava tiedosto (rrdtool.exe) on asennuksen yhteydessä laitettu. Samalla luodaan uusi puhdas tietokanta, johon radioteleskooppijärjestelmän tuottamaa mittausdataa tullaan tallentamaan.

Tämän jälkeen komentosarja siirtyy varsinaiseen pääohjelmaan, jota suoritetaan silmukkarakenteen alla. Silmukkarakenteen alussa se suorittaa vertailulauseen, jonka avulla tutkitaan, luetaanko mikrokontrollerin sarjaportista tulevaa dataa vai muodostetaanko testikäyttöön tarkoitettua satunnaisdataa.

Jos käyttäjä on asettanut komentosarjan lukemaan sarjaporttia, seuraavaksi ajetaan funktio, jonka avulla käydään tarkastelemassa tietyin väliajoin sarjaporttia ja tutkitaan onko mikrokontrolleri tulostanut sinne uusia lukuarvoja. Muussa tapauksessa ajetaan funktio, jonka avulla käynnistetään satunnaislukugeneraattori tietokannan testaamista varten.

Suuraavaksi komentosarja siirtyy aliohjelmaan, jonka avulla päivitetään aiemmin luotua tietokantaa mikrokontrollerin sarjaportista tai satunnaislukugeneraattorista tulevalla datalla. Tietokannan päivityksen jälkeen siirrytään aliohjelmaan, jonka avulla muodostetaan tietokannassa olevasta datasta varsinainen mittauskäyrä, joka tallennetaan kuvatiedostona tietokoneen kovalevyille. Tämän jälkeen komentosarja ajaa funktion, joka määrittää, kuinka usein tietokantaa päivitetään uusilla lukuarvoilla. Lopuksi siirrytään takaisin silmukkarakenteen alkuun.

RRD-tietokantasovellusta sekä sitä ohjaavan komentosarjan toimintaa testattiin muodostamalla satunnaislukuarvoja väliltä 0–5000. Testin tarkoitus oli simuloida Dicke-vastaanottimeen asennettavan ohjauskortin tuottamaa dataa. Kuvassa 49 on esitetty testin yhteydessä saatu mittauskäyrästä.



Kuva 49. Kommentosarjan ja RRD-tietokannan testauksessa saatu mittauskäyrästä.

Mitta-asteikon vaaka-akseli esittää aikaa ja pystyakseli jännitettä. Testauksessa saatiin aikaiseksi kolme erillistä mittauskäyrää. Dicke-vastaanottimeen asennettava ohjauskortti tulostaa sarjaporttiin kolme eri lukuarvoa, joista RRD-tietokannan avulla tulostetaan kolme erillistä mittauskäyrää ajan funktiona.

Ylimmäinen mittauskäyrä (engl. Thot) vastaa antennista tulevan kohinasignaalin tasoa. Keskimmäinen mittauskäyrä (engl. Tcold) vastaa referenssinä toimivasta keinokuormasta tulevaa kohinasignaalin tasoa. Alimmainen mittauskäyrä (engl. Signal) vastaa antennin ja keinokuorman signaalien erotusta. Testin lopputuloksena todettiin, että RRD-tietokantasovellus ja sitä ohjaava komentosarja toimii oikein ja ne voidaan ottaa käyttöön radioteleskooppijärjestelmässä.

7 Yhteenveto

Kehitysprojekti sai alkunsa tarpeesta toteuttaa harrastajakäyttöön tarkoitettu oma auringontutkimusväline, jonka avulla voidaan seurata auringon aktiivisuutta. Euroopassa ei ole olemassa sellaista julkista tietolähdettä, jonka avulla alan harrastajat, kuten radioamatöörit, voisivat reaaliajassa ennustaa radiokelejä sekä revontulien esiintymistä ja sitä kautta vaikuttaa kaukoyhteyksien onnistumiseen.

Reaaliaikaista dataa auringon aktiivisuudesta on yleensä vaikea saada, sillä esimerkiksi Suomessa on vain kaksi julkista tutkimusasemaa ja paikkaa, jossa auringontutkimusta

tehdään eikä esimerkiksi radioamatöörillä ole mahdollisuutta päästä tätä kautta hake-
maan ongelmiinsa apua.

Koska radioteleskooppijärjestelmän avulla tutkitaan aurinkoa, katsoin tässä opinnäyte-
työssäni tarpeelliseksi, että raportin alussa selostetaan lyhyesti ja yksinkertaisesti ra-
dioastronomian historiaa sekä sen peruskäsitteitä. Samalla tutustutaan myös auringon
rakenteeseen, aurinkotuulen ja auringonpurkauksien ominaisuuksiin sekä niiden syn-
nyttämiin erilaisiin ilmiöihin avaruudessa ja maanpäällä.

Varsinaisen kehitystyön ensimmäisessä vaiheessa hankittiin radioteleskoopin antennin
automaattisen ohjaussysteemin tarvitsemat yksiköt, tutustuttiin automaattisen ohjaus-
systeemin yksiköiden rakenteeseen ja toimintaan, testattiin ohjaussysteemin yksiköiden
toimintaa sekä lopuksi eri yksiköt konstruointiin kokonaisuudeksi, jonka toiminta testat-
tiin radioteleskooppijärjestelmässä. Edellä mainittujen asioiden lisäksi tutustuttiin radio-
teleskooppijärjestelmässä käytetyn vastaanottimen rakenteeseen sekä toimintaperiaat-
teeseen.

Tämä vaihe eteni varsin hitaasti johtuen rakennettavan laitteiston etäisestä fyysisestä
sijainnista ja siitä tosiasista, että varsinaiset rakennustyöt toteutettiin työajan ulko-
puolella vapaa-aikana. Tämän lisäksi radioteleskooppijärjestelmän toimintaperiaate oli
minulle entuudestaan varsin tuntematon asia. Olen kuitenkin työn valvojan Michael
Fletcherin antamien vihjeiden avulla onnistunut oppimaan paljon uusia asioita järjes-
telmän toiminnasta ja sen rakentamiseen liittyvistä asioista.

Yksi projektin ensimmäisen vaiheen keskeisimmistä asioista oli antennin automaattises-
sa ohjaussysteemissä käytetyn askelmoottorin ohjain- ja ajoyksikön sekä vastaanotti-
meen asennettavan ohjausyksikön ja mittaustulosten käsittelyyn tarkoitettun tietokan-
nan toimintaa ohjaavan komentosarjan ohjelmointi.

Ohjelmointityö osoittautui haasteelliseksi, se eteni hitaasti, mutta siinä onnistuttiin var-
sin hyvin, kun etsittiin tietoa erilaisista lähteistä sekä noudattaen ystävältäni radioama-
tööri Pasi Kristotalta saatuja ohjelmointivihjeitä.

Kehitystyön lopuksi saatiin aikaan testatusti toimiva antennin automaattinen ohjausjärjestelmä, askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikön ohjelma, vastaanottimeen asennettavan ohjauskortin ohjelma sekä mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja.

Radioteleskooppijärjestelmää tullaan kehittämään jatkossa siten, että seuraavaksi rakennetaan kokonaistehovastaanotin, joka asennetaan osaksi järjestelmää. Tämän lisäksi suunnitellaan ja toteutetaan mittausdatan siirto julkiselle Internet-palvelimelle, josta niitä voi kuka tahansa seurata reaaliaikaisesti. Systeemin toimintaa parannetaan jatkossa asentamalla siihen Dicke-vastaanotin.

Edellä mainittujen asioiden lisäksi radioteleskooppijärjestelmään asennetaan eri puolille lämpötila-antureita, joiden avulla voidaan tarkkailla systeemin käyttäytymistä ympäristön lämpötilan muuttuessa. Antennissa olevilla gyroskooppihyrrille suunnitellaan ja toteutetaan oma 110 V:n syöttö erillisten muuntajien avulla.

Kehitysprojektin lopputuloksena voidaan päätellä, että jatkokehitystyönä on hyvinkin mahdollista saada kohtuullisin kustannuksin aikaan auringontutkimusvälineenä toimiva radioteleskooppijärjestelmä, joka soveltuu esimerkiksi radioamatööriharrastajien ja muiden alan harrastajien tarpeisiin ja avuksi käytännön työhön.

Lähteet

- 1 Basics of Radio Astronomy for the Gold –Stone Apple Valley Radio Telescope. 1998. Verkkodokumentti. <<http://www2.jpl.nasa.gov/radioastronomy>>. Luettu 24.4.2012
- 2 Kuvalähde: <<http://www.astronomynotes.com/telescop/greenbanktour/gb2.jpg>>. Kuva Karl G Jansky radioteleskoopista. Lainattu 24.4.2012
- 3 Kuvalähde: <<http://www.obsessedeas.org/gbrebertelescopet.jpg>>. Kuva Grote Reberin radioteleskoopista. Lainattu 24.4.2012
- 4 Radioteleskoopit. 2011. Verkkodokumentti. <<http://www.astro.utu.fi/zubi/obs/radio.htm>>. Luettu 24.4.2012
- 5 Sähkömagneettinen säteily. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Sähkömagneettinen_säteily>. Luettu 24.4.2012
- 6 Aallonpituus.2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Aallonpituus>>. Luettu 24.4.2012
- 7 Radiojärjestelmät. 2003. Verkkodokumentti <users.jyu.fi/~arjuvi/opetus/tli347/tli245_materiaali.pdf >. Luettu 24.4.2012
- 8 Sähkömagneettinen spektri. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6magneettinen_spektri>. Luettu 24.4.2012
- 9 Kuvalähde: <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Polarisaatio>>. Kuva Sähkömagneettisen aallon eri polarisaatioista. Lainattu 24.4.2012
- 10 UHF-alueen RFID-tunnisteen prototyypin antennin suunnittelu, simulointi ja mittaaminen .2010. Verkkodokumentti. <<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/17367/UHF%20alueen%20RFID%20tunnisteen%20prototyypin%20antennin%20suunnittelu%20simulointi%20ja%20mittaaminen.pdf?sequence=1>>. Luettu 24.4.2012
- 11 Säteilymekanismit. 2006. Verkkodokumentti. <<http://www.metsahovi.fi/edu/radast2006/sateily.html> >. Luettu 24.4.2012
- 12 Radioastronomia kurssimateriaali. 2006. Verkkodokumentti <<http://www.metsahovi.fi/edu/radast2006/ilmakeha.html>>. Luettu 24.4.2012
- 13 Valonsäteiden kohtaamat ilmiöt. 2003. Verkkodokumentti. <<http://www.ava.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/ilmiot.html>>. Luettu 24.4.2012
- 14 Doppler ilmiö. 2011. Verkkodokumentti. <<http://www.astro.utu.fi/zubi/spectra/doppler.htm>>. Luettu 24.4.2012
- 15 Aurinko. 2010. Verkkodokumentti. <<http://www.astronetti.com/tahtitieto/aurinko.htm>>. Luettu 1.1.2012

- 16 Aurinkotuuli. 2001. Verkkodokumentti.
<<http://www.oulu.fi/astronomy/planetology/PlanetologiaII/Aurinkotuuli/Aurinkotuuli.htm>>. Luettu 24.4.2012
- 17 Aurinkotuuli. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Aurinkotuuli>>. Luettu 24.4.2012
- 18 Kuvalähde: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:Magnetosphere_rendition.jpg>. Kuva Magnetosphere rendition. Lainattu 24.4.2012
- 19 Solar Flare. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_flare>. Luettu 24.4.2012
- 20 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/saturn_b_transport_5.jpg>. Kuva saturn_b_transport_5. Lainattu 24.4.2012
- 21 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/saturn_b_transport_4.jpg>. Kuva saturn_b_transport_4. Lainattu 24.4.2012
- 22 Parabolic focal point. 2011. Verkkodokumentti. <<http://www.radio-astronomy.org/library/Parabolic%20Focal%20Point.pdf>>. Luettu 24.4.2012
- 23 Kuvalähde: <http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/obelix_uncovered_3.jpg>. Kuva obelix_uncovered_3. Lainattu 24.4.2012
- 24 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/obelix_coarse_layout_1.gif>. Kuva obelix coarse layout. Lainattu 24.4.2012
- 25 Ursan Wikit Radiotekniikka. 2010. Verkkodokumentti.
<<http://www.ursa.fi/wiki/Radioastronomia/Radiotekniikka>>. Luettu 24.4.2012
- 26 Aalto(Fysiikka). 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Aalto_%28fysiikka%29>. Luettu 24.4.2012
- 27 Antennit_Ennakkopalaute_Luento_2.3. 2011.
<http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=ele%20tut%20antennit%20ennakko%20palaute&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ele.tut.fi%2Fteaching%2Fele-2250%2Fennakkoasiat%2FEnnakkopalaute%2520luento%25202.3.pdf&ei=BuZLT563M4bi4QSfpajqAw&usq=AFQjCNH8kaB9qRlfWhVwYrX0n_H8onhAcg&sig2=r0X_xmUXo049Obb70L-zzg&cad=rja>. Luettu 24.4.2012
- 28 Taitekerroin. 2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.astro.utu.fi/zubi/optics/n.htm>>. Luettu 24.4.2012
- 29 Parabolic antenna. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna>. Luettu 24.4.2012
- 30 Antenna Gain. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_gain>. Luettu 24.4.2012

- 31 Taajuustaulukko. 2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.ficora.fi/attachments/suomiry/607CUMR17/Taajuusjakotaulukko.pdf>>. Luettu. 24.4.2012
- 32 Project Obelix. 2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/obelix.htm>>. Luettu 24.4.2012
- 33 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/seavey_feed_matching.gif> Kuva sea-veey feed mathing. Lainattu 24.4.2012
- 34 Kuvalähde: <http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/obelix_gallows_2.jpg>. Kuva obelix_gallows.Lainattu 24.4.2012
- 35 EME_Doc_V7. 2011. Verkkodokumentti. <http://MK-EHN.pagesperso-orange.fr/download/EME_Doc_V7.pdf>. Luettu 1.1.2012
- 36 Rotation_modes.2011. Verkkodokumentti. <http://MK-EHN.pagesperso-orange.fr/download/Rotation_modes.pdf>. Luettu 1.1.2012
- 37 Standard Stepper. 2011. Verkkodokumentti.
<http://www.elwood.com/rs_series_23.shtml>. Luettu 24.4.2012
- 38 A2 Absolut Optical Encoder. 2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.usdigital.com/products/a2>>. Luettu 24.4.2012
- 39 USD-Encoders.Verkkodokumentti.<http://f1ehn.pagesperso-orange.fr/download/USD_Encoders.pdf>. Luettu 24.4.2012
- 40 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/elevaatioananturin_jatkos_2a.jpg>. Kuva elevaatioanturin_jatkos_2a. Lainattu 24.4.2012
- 41 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/uusi_atsimuuttiajo_3a.jpg>. Kuva uusi_atsimuuttiajo_3a. Lainattu 24.4.2012
- 42 Kuvalähde: <http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg>. Kuva ArduinoUno_R3_Front. Lainattu 24.4.2012
- 43 Stepper motor. 2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor> Luettu 24.4.2012
- 44 ArduinoBoardUno. 2011 Verkkodokumentti.
<<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>> . Luettu 24.4.2012
- 45 Arduino. 2011. Verkkodokumentti. <<http://www.arduino.cc>>. Luettu 24.4.2012
- 46 Arduino Hardware. 2011. Verkkodokumentti.
<<http://arduino.cc/en/Main/Hardware>> . Luettu 24.4.2012

- 47 Motor Shiled. 2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.ladyada.net/make/mshield/>>. Luettu 24.4.2012
- 48 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/obelix_23d_steppers_pedestal_cabling.gif>. Kuva obelix_23d_steppers_pedestal_cabling. Lainattu 24.4.2012
- 49 Kuvalähde:
<http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/obelix_23d_steppers_controller_cabling.gif>. Kuva obelix_23d_steppers_controller_cabling. Lainattu 24.4.2012
- 50 Kuvalähde: <http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/breadboard_3a.jpg>. Kuva breadboard:3a>. Lainattu 24.4.2012
- 51 Radiometers.2011. Verkkodokumentti
<<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Radiometers.html>>. Luettu 24.4.2012
- 52 Dickepaper. Verkkodokumentti.
<<http://www.eng.yale.edu/rslab/internal/Papers/dickepaper.pdf>>. Luettu 24.4.2012
- 53 Article on homebrew Dicke Radiometers for Amateur Radio Astronomy. Verkkodokumentti. 2011. <http://www.kolumbus.fi/michael.fletcher/dicke_uk.htm>. Luettu 24.4.2012
- 54 Karvinen Tero & Karvinen Kimmo. 2010. Sulautetut. Porvoo: WS Bookwell Oy. Luettu 24.4.2012
- 55 Ilmakehän läpinäkyvyys.2011. Verkkodokumentti.
<<http://www.astro.utu.fi/zubi/obs/trans.htm>>. Luettu 24.4.2012
- 56 Ympyrä. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Ympyr%C3%A4>>. Luettu 24.4.2012
- 57 Arduino. 2011. Verkkodokumentti.<<http://arduino.cc/en/Guide/Windows>>. Luettu 24.4.2012
- 58 Permittiivisyys.2011. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Permittiivisyys>>. Luettu 24.4.2012
- 59 Coronal Mass Ejection. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Coronal_mass_ejection>. Luettu 24.4.2012
- 60 Moving average. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average>. Luettu 24.4.2012
- 61 RRDtool. Verkkodokumentti. <<http://oss.oetiker.ch/rrdtool/index.en.html>>. Luettu 24.4.2012
- 62 Heinonen Heikki E OH3RU. 1997. Tiimissä hamssiksi. Helsinki: Ensi-Offset Ky
- 63 Angular diameter. Verkkodokumentti. Wikipedia tietosanakirja.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Angular_diameter>. Luettu 24.4.2012

Askelmoottorin ohjaus- ja ajoyksikön ohjelmakoodi

```
// Obelix_Stepper.pde
#include <AccelStepper.h>
#include <AFMotor.h>
#include <stdarg.h>

// switch for serialdebugger 0=off, 1=on
#define SERIALDEBUG 1

// HARDWARE ANALOG PIN DEFINITIONS
#define PORT_AZ_SPEED A0
#define PORT_EL_SPEED A1
#define PORT_AZ_CCW_RELAY A2
#define PORT_AZ_CW_RELAY A3
#define PORT_EL_DN_RELAY A4
#define PORT_EL_UP_RELAY A5

// ANTENNA HARDWARE PARAMETERS
#define MOTOR_STEPS_PER_REV      24.0
// F1EHN INTERFACE MAX SPEED CONTROL OUTPUT (MODE2)
#define MAX_SPEED_CONTROL_VALUE  800.0
// SECONDS TO ROTATE AXLE 90°
#define QUARTER_ANTENNA_ROTATION_TIME  2.0
// ANTENNA GEAR / MOTOR GEAR = 5.4
#define GEAR_RATIO                (54.0/10.0)

// CALCULATE MORE ANTENNA PARAMETERS
// = 20 SECS
#define FULL_ANTENNA_ROTATION_TIME  (4.0 * QUARTER_ANTENNA_ROTATION_TIME)
// SECS = 3 RPM
#define MAX_ANTENNA_SPEED_RPM      (60.0 / FULL_ANTENNA_ROTATION_TIME)
// = 16.2 RPM = MAX SPEED
#define MAX_MOTOR_SPEED_RPM        (MAX_ANTENNA_SPEED_RPM * GEAR_RATIO)
// = 0.02025
#define MAX_MOTOR_SPEED_FACTOR     (MAX_MOTOR_SPEED_RPM / MAX_SPEED_CONTROL_VALUE)

// INTERNAL LABELS FOR AXLE PORTS
#define AXLE_AZ 1
#define AXLE_EL 2

// DEFINE STEPPER MOTOR FOR AZIMUTH
AF_Stepper motorAz(MOTOR_STEPS_PER_REV, 1); // CREATE NEW OBJECT motorAz
```



```
void forwardstepAz()
{
// function for moving azimuth step motor forward SINGLE, DOUBLE or INTERLEAVE or MICROSTEP
  motorAz.onestep(FORWARD, MICROSTEP);
}

void backwardstepAz()
{
// function for moving azimuth step motor backward SINGLE, DOUBLE or INTERLEAVE or MICROSTEP
  motorAz.onestep(BACKWARD, MICROSTEP);
}

// use functions to step azimuth motor
AccelStepper stepperAz(forwardstepAz, backwardstepAz);

// DEFINE STEPPER MOTOR FOR ELEVATION
// CREATE NEW OBJECT motorEl
AF_Stepper motorEl(MOTOR_STEPS_PER_REV, 2);

void forwardstepEl()
{
// function for moving elevation step motor forward SINGLE, DOUBLE or INTERLEAVE or MICROSTEP
  motorEl.onestep(FORWARD, MICROSTEP);
}

void backwardstepEl()
{
// function for elevation azimuth step motor backward SINGLE, DOUBLE or INTERLEAVE or MICROSTEP
  motorEl.onestep(BACKWARD, MICROSTEP);
}

// use functions to step elevation motor
AccelStepper stepperEl(forwardstepEl, backwardstepEl);

// READS DIRECTION RELAYS, RETURNS -1, 0, 1
int ReadDirectionRelays(int axle)
{
  if(axle == AXLE_AZ)
  {
    return (digitalRead(PORT_AZ_CCW_RELAY) * -1) + (digitalRead(PORT_AZ_CW_RELAY) * 1);
  }
  if(axle == AXLE_EL)
  {
    return (digitalRead(PORT_EL_DN_RELAY) * -1) + (digitalRead(PORT_EL_UP_RELAY) * 1);
  }
}
```

```
// READS SPEED VOLTAGE, MAY RETURN 0...1023
// ACTUAL VALUES SHOULD BE ABT. 100...800
int ReadSpeedVoltage(int axle)
{
  if(axle == AXLE_AZ)
  {
    // returns azimuth analog speed control voltage
    return analogRead(PORT_AZ_SPEED);
  }
  if(axle == AXLE_EL)
  {
    // returns elevation speed control voltage
    return analogRead(PORT_EL_SPEED);
  }
}

int i;

// INITIALIZE HARDWARE WHEN ARDUINO BOOTS RUNS ONLY ONCE
void setup()
{

  // SET ANALOG A0-A5 PORTS AS INPUT PORTS
  pinMode(PORT_AZ_SPEED, INPUT);
  pinMode(PORT_EL_SPEED, INPUT);
  pinMode(PORT_AZ_CCW_RELAY, INPUT);
  pinMode(PORT_AZ_CW_RELAY, INPUT);
  pinMode(PORT_EL_DN_RELAY, INPUT);
  pinMode(PORT_EL_UP_RELAY, INPUT);

  //Configures the reference voltage used for analog input (i.e. the value used as the top of the input range).
  //DEFAULT: the default analog reference of 5 volts
  analogReference(DEFAULT);

  #if SERIALDEBUG > 0
  // set up Serial library at 9600 bps
  Serial.begin(9600);
  serialDebugDefines();
  #endif
}

// MAIN LOOP
void loop()
{
  float valAzSpeed = 0;
  float valElSpeed = 0;
```

```

float valAzDirection = 0;
float valElDirection = 0;
float rpmAz=0.0;
float rpmEl=0.0;
float stepTimeAz=0.0;
float stepTimeEl=0.0;

// returns -1, 0, 1
valAzDirection = (float)ReadDirectionRelays(AXLE_AZ);
// returns -1, 0, 1
valElDirection = (float)ReadDirectionRelays(AXLE_EL);
// returns azimuth analog speed control voltage
valAzSpeed = ReadSpeedVoltage(AXLE_AZ);
// returns elevation analog speed control voltage
valElSpeed = ReadSpeedVoltage(AXLE_EL);
// OUT = 0...16.2
rpmAz = valAzDirection * valAzSpeed * MAX_MOTOR_SPEED_FACTOR;
rpmEl = valElDirection * valElSpeed * MAX_MOTOR_SPEED_FACTOR;
// = steps / s
stepTimeAz = (MOTOR_STEPS_PER_REV * rpmAz) / 60;
// = steps / s
stepTimeEl = (MOTOR_STEPS_PER_REV * rpmEl) / 60;

#if SERIALDEBUG > 0
  if(i>5000)
  {
    serialDebug(valAzDirection,valAzSpeed,valElDirection,valElSpeed,rpmAz,rpmEl,stepTimeAz,stepTimeEl);
    i=0;
  }
  i++;
#endif

// stepperAz.setSpeed and stepperEl.setSpeed functions requires modification for AccelStepper.cpp library line 220
// input parameters in time unit ie steps / s
stepperAz.setSpeed(stepTimeAz);
stepperAz.runSpeed();
// input parameters in time unit ie steps / s
stepperEl.setSpeed(stepTimeEl);
stepperEl.runSpeed();

}

// PRINT DEBUG INTO SERIAL PORT
// print debug into serial port if serialdebug is switched on ie 1
#if SERIALDEBUG > 0
void serialDebugDefines()

```

```

{
Serial.print("Fixed parameters (#defines):");
Serial.println();
Serial.print("MOTOR_STEPS_PER_REV = ");
serialPrintFloat(MOTOR_STEPS_PER_REV);
Serial.println();
Serial.print("MAX_SPEED_CONTROL_VALUE = ");
serialPrintFloat(MAX_SPEED_CONTROL_VALUE);
Serial.println();
Serial.print("QUARTER_ANTENNA_ROTATION_TIME = ");
serialPrintFloat(QUARTER_ANTENNA_ROTATION_TIME);
Serial.println();
Serial.print("GEAR_RATIO = ");
serialPrintFloat(GEAR_RATIO);
Serial.println();
Serial.print("Calculated parameters (#defines):"); Serial.println();
Serial.print("FULL_ANTENNA_ROTATION_TIME = ");
serialPrintFloat(FULL_ANTENNA_ROTATION_TIME);
Serial.println();
Serial.print("MAX_ANTENNA_SPEED_RPM = ");
serialPrintFloat(MAX_ANTENNA_SPEED_RPM);
Serial.println();
Serial.print("MAX_MOTOR_SPEED_RPM = ");
serialPrintFloat(MAX_MOTOR_SPEED_RPM);
Serial.println();
Serial.print("MAX_MOTOR_SPEED_FACTOR = ");
serialPrintFloat(MAX_MOTOR_SPEED_FACTOR);
Serial.println();
}

```

// PRINT DEBUG INTO SERIAL PORT

```

void serialDebug(int valAzDirection,int valAzSpeed,int valEIDirection,int valEISpeed,float rpmAz,float rpmEl,float stepTimeAz,float stepTimeEl)
{
Serial.print("AzDir=\t");
Serial.print(valAzDirection);
Serial.print("\tAzSpd=\t");
Serial.print(valAzSpeed);
Serial.print("\tEIDir=\t");
Serial.print(valEIDirection);
Serial.print("\tEISpd=\t");
Serial.print(valEISpeed);
Serial.print("\trpmAz=\t");
serialPrintFloat(rpmAz);
Serial.print("\trpmEl=\t");
serialPrintFloat(rpmEl);
}

```

```
Serial.print("\tstepTimeAz=\t");  
serialPrintFloat(stepTimeAz);  
Serial.print("\tstepTimeEI=\t");  
serialPrintFloat(stepTimeEI);  
Serial.println();  
}
```

```
// PRINT FLOAT INTO SERIAL PORT
```

```
void serialPrintFloat(float f)  
{  
  if(f<0 && f>=-1)  
  {  
    Serial.print("-");  
  }  
  Serial.print((int)f);  
  Serial.print(".");  
  int tmp=(f-(int)f)*100;  
  Serial.print(abs(tmp));  
}  
#endif
```

Vastaanottimeen asennettavan ohjausyksikön ohjelmakoodi

```
// Obelix_Dicke_Switch.pde
// for serial debug function
#include <stdarg.h>
// HARDWARE ANALOG/DIGITAL PIN DEFINITIONS
// input signal for arduino analog pin A0 from diode detector
#define DIODE_DETECTOR_INPUT A0
// output signal from arduino digital pin 4 for dicke switch
#define DICKE_SWITCH_OUTPUT 4
// input signal for arduino digital pin 5 for square wave button
#define DICKE_MODE_BUTTON 5
// input signal for arduino digital pin 6 for antenna noise button
#define ANTENNA_NOISE_BUTTON 6
// input signal for arduino digital pin 7 for reference noise button
#define REFERENCE_NOISE_BUTTON 7
// default led port
#define LED 13

// HARDWARE DEFINITION FOR THOT AND TCOLD SIGNALS (THOT=LOGICAL HIGH) (TCOLD=LOGICAL LOW)
#define INPUT_SELECT_BIT_THOT 1
#define INPUT_SELECT_BIT_TCOLD 0

// 13 PERIODS = 1 SECOND
#define PERIODS_PER_OUTPUT 13*2
// Subset size for running average
#define AVG_READINGS 195
// Frequency compensation delay µs
#define FREQCOMP 29
// 64 = 13.0Hz with 30ms FREQCOMP
#define SAMPLES_PER_13HZ 72

// global variables
int ThotAvg=0;
int ThotValue=0;
int TcoldAvg=0;
int TcoldValue=0;
int Avg=0,

// Final signal average value
AvgA=0;
// Signal period (for calculating 1/13 secs = 13 Hz)
int Period=0;
unsigned long time;
// the running average readings from the analog input
```

```

int avg_values[AVG_READINGS.];
// the index of the current reading
int avg_index = 0;
// the running total
long avg_total = 0;

// INITIALIZE HARDWARE WHEN ARDUINO BOOTS, RUNS ONLY ONCE
void setup()
{
// LED port as output
pinMode(LED, OUTPUT);
// SET ANALOG A0 PORT AS INPUT PORT
pinMode(DIODE_DETECTOR_INPUT, INPUT);
// SET DIGITAL PORT 5 AS OUTPUT PORT
pinMode(DICKE_SWITCH_OUTPUT, OUTPUT);
// SET DIGITAL PORT 6 AS INPUT PORT
pinMode(DICKE_MODE_BUTTON,INPUT);
// SET DIGITAL PORT 7 AS INPUT PORT
pinMode(ANTENNA_NOISE_BUTTON,INPUT);
// SET DIGITAL PORT 8 AS INPUT PORT
pinMode(REFERENCE_NOISE_BUTTON,INPUT);

//Configures the reference voltage used for analog input (i.e. the value used as the top of the input range).
//DEFAULT: the default analog reference of 5 volts
analogReference(DEFAULT);

// for initializing running average subset array with zeros
for (int thisReading = 0; thisReading < AVG_READINGS; thisReading++)
{
    avg_values[thisReading.] = 0;
}
// set up Serial library at 9600 bps
Serial.begin(9600);
}

// ONE LOOP IS 77ms
// ONE HALF OF ONE PERIOD IS 38ms
// MAIN LOOP

void loop()
{
//digitalWrite(LED, HIGH);           // set the LED on so we can see it's working
//digitalWrite(LED, LOW);           // set the default led off
// HOT
if (digitalRead(ANTENNA_NOISE_BUTTON) == HIGH)
{
// select input That

```

```

SelectInput(INPUT_SELECT_BIT_THOT);
// read Thot signal
ThotValue=ReadSignal();
// calculate average value of Thot signal
ThotAvg=(ThotValue+ThotAvg)/2;
}
else
{
// default value if no signal
ThotAvg=0;
// 77ms delay for compensating missing ReadSignal()
delay(38);
}

// 1ms delay for compensating serial output delay, makes SelectInput square wave 50%/50%
delay(FREQCOMP);

// COLD
if (digitalRead(REFERENCE_NOISE_BUTTON) ==HIGH)
{
// select input Tcold
SelectInput(INPUT_SELECT_BIT_TCOLD);
// read Tcold signal
TcoldValue=ReadSignal();
// calculate average value of Tcold signal
TcoldAvg=(TcoldValue+TcoldAvg)/2;
}
else
{
// default value if no signal
TcoldAvg=0;
// 77ms delay for compensating missing ReadSignal()
delay(38);
}

// SELECT AVERAGE SOURCE
if (digitalRead(ANTENNA_NOISE_BUTTON) == HIGH && digitalRead(REFERENCE_NOISE_BUTTON) == HIGH)
{
// calculate final signal Thot-Tcold
Avg=ThotAvg-TcoldAvg;
}
else if (digitalRead(ANTENNA_NOISE_BUTTON) == HIGH)
{
// only Thot
Avg=ThotAvg;
}
else if (digitalRead(REFERENCE_NOISE_BUTTON) == HIGH)

```



```

{
  // only Tcold
  Avg=TcoldAvg;
}
// Neither is selected
else
{
  // default value if no signal
  Avg=0;
}

// CALCULATE MOVING AVERAGE
avg_total = avg_total -avg_values[avg_index.];
avg_values[avg_index.] = Avg;
avg_total = avg_total + Avg;
avg_index++;
if (avg_index >= AVG_READINGS)
  avg_index = 0;
AvgA = avg_total / AVG_READINGS;

// output final signal for serial port every now and then
// if time to output
if (Period==PERIODS_PER_OUTPUT)
{
  // calculate time which we spend sending serial output
  time = millis();
  // output data (once/second)
  serialOutput();
  time = millis()-time;
  // start period counting over
  Period=0;
}
// if not time to output
else
{
  time=0;
}

// 1ms delay for compensating serial output delay, makes SelectInput square wave 50%/50%
delay(FREQCOMP-time);
Period++;
}
// Outputs antenna select signal for digital pin 5
void SelectInput(int inputSelectBit)
{
  digitalWrite(DICKE_SWITCH_OUTPUT,inputSelectBit);
}

```

```
// Reads input signal 38,5ms half of 13Hz period time
int ReadSignal()
{
// internal variables for ReadSignal function
int avg;
int value;
// a/d conversion in port A0 (initialize avg value)
avg=analogRead(DIODE_DETECTOR_INPUT);

// loop for adjusting output frequency in digital pin 5
// 75 = 12.5Hz with 30ms FREQCOMP
// 64 = 13.0Hz with 30ms FREQCOMP
for(int i=0;i<SAMPLES_PER_13HZ;i++)
{
// a/d conversion in port A0
value=analogRead(DIODE_DETECTOR_INPUT);
// calculate average value for final signal
avg=(value+avg)/2;
}
return avg;
}

// PRINT OUTPUT INTO SERIAL PORT
void serialOutput()
{
//Serial.print(ThotValue);
//Serial.print("\t");
//Serial.print(TcoldValue);
//Serial.print("\t");
Serial.print(ThotAvg*5); //
Serial.print("\t");
Serial.print(TcoldAvg*5); // *5
Serial.print("\t");
Serial.print(Avg*5);
Serial.print("\t");
Serial.print(AvgA*5);
Serial.println();
}
```

Mittausdatan käsittelyyn tarkoitettu komentosarja

```
'set variables
public wshShell
Dim ardVals
Dim rrdVals
Dim update
Dim fake
Dim interval
Dim rrd

'selection for output data true=test data false=arduino data
fake = true

'milliseconds between read ins
interval = 5000

'start rrdtool
rrd = "C:\Program Files\RRDtool\rrdtool.exe"

' create new WScript object
Set wshShell = WScript.CreateObject ("WScript.shell")

'if output data is from arduino set com port settings
if not fake then

'com port settings for reading data'
Set com = fso.OpenTextFile("COM2:9600,N,8,1", ForReading)

'terminate if statement
end if

'start loop fuction
Do

'if output data is is from arduino check when serial por stream
if not fake then
ends

'if serial por stream ends
if com.AtEndOfStream <> True then

'read new values from serial port
ardVals = com.ReadLine

'terminate if statement'
end if

'if staement is fake=true
else

'read values from random number generator (0-5000 mV)
ardVals = int(rnd*5000) & chr(9) & int(rnd*5000) & chr(9) & int(rnd*5000) & chr(9) & int(rnd*5000)

'terminate if statemet'
end if
```

```
'update database with new values
updateRRD(ardVals)
'go to RRD graph creating sub program
graphRRD()
'wait for 5000 ms
WScript.Sleep(interval)

'loop function
Loop
'sub program for updating database
sub updateRRD(values)
'replace arduiduino tab with colon
rrdValues = replace(values,chr(9),":")
'create RRD parameters
update = " update Obelix.rrd N:" & rrdValues
'run RRD with parameters
wshShell.run """" & rrd & """" & update ,0
'end sub program
end sub

'sub program for updating graphics from database
sub graphRRD()
graph = " graph obelix1day.png" _

'-t Title
'-v Vertical label
'-l -u Lower and upper limits on Y-axis
'-X Fixed scaling for Y-axis (exponent)
params = " graph obelix1day.png" _
        & " -t ""1 day"" _
        & " -v ""Voltage, mV"" _
        & " -l 0 -u 5000" _
        & " -X 0" _
        & " DEF:sig=Obelix.rrd:SignalAvg:AVERAGE" _
        & " DEF:hot=Obelix.rrd:ThotValue:AVERAGE" _
        & " DEF:cold=Obelix.rrd:TcoldValue:AVERAGE" _
        & " LINE2:sig#000000:'Signal'" _
        & " LINE1:hot#ff0000:'Thot'" _
'create RRD paramets for graphics'
        & " LINE1:cold#0000ff:'Tcold'"
graph = params

'run RRD with parameters
wshShell.run """" & rrd & """" & graph ,0

'end sub program
end sub
```