

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**VIRHEBUDJETIN SOVELTAMINEN OSAKSI AVOIMEN RADAN  
TUTKAHERÄTEMITTAUSJÄRJESTELMÄN  
LUOTETTAVUUSTARKASTELUA**

Pro gradu -tutkimus  
Yliluutnantti  
Mika Järä

Sotatieteiden maisterikurssi 4  
Ilmasotalinja

Huhtikuu 2015

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 4	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Mika Järä	
Tutkimuksen nimi VIRHEBUDJETIN SOVELTAMINEN OSAKSI AVOIMEN RADAN TUTKAHERÄ- TEMITTAUSJÄRJESTELMÄN LUOTETTAVUUSTARKASTELUA	
Oppiaine Sotatekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)
Aika Huhtikuu 2015	Tekstisivuja 66      Liitesivuja 0
<p><b>TIIVISTELMÄ</b></p> <p>Tutkimuksessa selvitetään virhebudjetin soveltuvuutta tutkaherätemittausjärjestelmän luotettavuustarkasteluun. Virhebudjetti on rajattu kalibroinnin osa-alueeseen. Lakialan avoimen radan tutkaherätemittausjärjestelmän epävarmuuksia ei ole aiemmin kattavasti selvitetty. Tässä tutkimuksessa on pilotoitu Lakialaan ensimmäistä kirjallista luotettavuustarkastelua, jonka tuloksena esitetään karkeimpia virheitä.</p> <p>Virhebudjetin valitseminen tehdään kirjallisuuskatsauksella, joka kohdistetaan yhdysvaltalaisien häiveyhteisöjen tietokantoihin. Sopivan virhebudjetin valinnan jälkeen se pilotoidaan tarkastelemalla jokaista testikohtetta. Tutkimusta varten suunniteltujen mittauksen perusteella testikohteille tehdään virhearviot. Mittauksilla kartoitettiin myös muita järjestelmän käyttäjän havaitsemia mahdollisia virheitä kalibroinnin kehittämiseksi.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksessa valittu Yhdysvalloissa laajalti käytetty avoimen tutkaherätemittausradan virhebudjetti on joustava ja tarvittaessa erittäin tarkka. Virhebudjetin ja mittauksien avulla voitiin järjestelmälle muodostaa perusteltu kokonaisvirhearvio. Mittauksissa todettiin, että nykyinen kalibrintiasetus aiheuttaa isoja turhia virheitä. Mittauksien tuloksena havaittiin myös antennitelineen pystytason kiinnikkeiden riittämättömän tukevuus pienelläkin tuulella.</p> <p>Tulosten perusteella voidaan todeta, että virhebudjetti soveltuu hyvin Lakialan järjestelmän luotettavuustarkasteluun. Tutkimuksen perusteella suositellaan, että kalibrointikohte siirretään mittausalueen etäisyydelle, jossa se kiinnitetään paremmilla häiveominaisuuksilla varustettuun tukeen kiinteäksi kalibrointikohteeksi. Toisena kehitysehdotuksena voidaan suositella antennitelineen vahvistamista. Jatkotutkimuskohteeksi suositellaan järjestelmän kalibrintimenetelmien kehittämistä tutkimuksen lähteistä löytyvän sylinterikalibroinnin avulla, mikä mahdollistaisi tarkemmat mittaukset häivekohteille.</p>	
<p><b>AVAINSANAT</b></p> <p>Luotettavuustarkastelu, virhebudjetti, tutkimustutka, kalibrinti, tutkakaikupinta, RCS</p>	

## Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TUTKIMUSTUTKAN JA LUOTETTAVUUSTARKASTELUN ESITTELY .....	4
2.1.	Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen tutkaherätteiden mittausjärjestelmä.....	4
2.2.	Tutkateorian epävarmuutta aiheuttavat ilmiöt.....	9
2.3.	Tutkapoikkipinta-ala .....	11
2.4.	Luotettavuustarkastelun perusteet .....	13
2.5.	Virhebudjetti menetelmänä .....	15
2.6.	Virhebudjetin soveltuvuuden arviointi .....	17
3.	LUOTETTAVUUSTARKASTELUN MITTAUKSET .....	21
3.1.	Sivuttaisvirheen aiheuttamat epävarmuudet.....	22
3.2.	Tuulen aiheuttamat epävarmuudet .....	26
3.3.	Kalibrointietäisyyden eroavaisuuden aiheuttama kohdistusvirhe .....	28
3.4.	Monitie-etenemisen aiheuttamat epävarmuudet.....	30
3.5.	Kiinnityksen aiheuttamat epävarmuudet .....	30
3.6.	Ristipolarisaation aiheuttamat epävarmuudet .....	33
3.7.	Stabiilisuustesti.....	35
3.8.	Lämpötilan muutoksen aiheuttamat epävarmuudet.....	36
3.9.	Kaukokenttäehdon täytyminen.....	39
3.10.	Kohinatasot kalibroinnissa .....	40
3.11.	Kohinatasot kääntöpöydällä .....	41
3.12.	Kaapelien liikkeen aiheuttamat epävarmuudet.....	43
3.13.	Tilastolliset epävarmuudet.....	44
4.	VIRHEBUDJETTI NISTIR 5019.....	46
4.1.	Virhebudjetin epävarmuusarvojen raportointi.....	46
4.2.	Virhebudjetin testikohteet .....	48
4.3.	Kalibroinnin kokonaisvirhearvio.....	57
5.	YHTEENVETO .....	59
5.1.	Luotettavuustarkastelun pohdintaa.....	59
5.2.	Johtopäätökset ja jatkotutkimuskohteet.....	64
6.	LÄHDELUETTELO .....	67

## KUVALUETTELO

Kuva 1 Virhebudjetin rakenne .....	3
Kuva 2 Operaattorin työpiste .....	5
Kuva 3 SPC MkV -tutkimustutkan antenniteline.....	6
Kuva 4 Näkymä kääntöpöydältä antennitornille.....	6
Kuva 5 Kalibroinnissa käytettävä tutkasoppi.....	8
Kuva 6 Kalibroitiasetelma.....	9
Kuva 7 Horisontaalinen 9 GHz:n keilan leveys .....	23
Kuva 8 Vertikaalinen 9 GHz:n keilan leveys.....	23
Kuva 9 Horisontaalinen 17.25 GHz:n keilan leveys .....	24
Kuva 10 Vertikaalinen 17.25 GHz:n keilan leveys.....	24
Kuva 11 Horisontaalisen 9 GHz:n pyyhkäisyn huipun RCS-kuvaaja .....	26
Kuva 12 Kovan tuulen mittauksen RCS-kuvaaja.....	27
Kuva 13 Havainnekuva kohdistusvirheestä .....	28
Kuva 14 Ristipolarisaatiokanavan RCS-kuvaaja .....	34
Kuva 15 Stabiilisuusmittauksen RCS-kuvaaja .....	36
Kuva 16 Lämpötilan vaikutus kalibroimattomaan 17 GHz:n mittaukseen.....	37
Kuva 17 Lämpötilan vaikutus kalibroimattomaan 9 GHz:n mittaukseen.....	38
Kuva 18 Lämpötilan vaikutus kalibroimattomaan 5 GHz:n mittaukseen.....	38
Kuva 19 Kalibroitalueen HRR-kuvakoonnos .....	41
Kuva 20 Kääntöpöydän kohinatason HRR-kuva .....	42
Kuva 21 Tyhjän kääntöpöydän RCS-kuvaaja .....	43
Kuva 22 Kaapeleiden liikkeen vaikutusten RCS-kuvaaja .....	44
Kuva 23 Tilastollisten virheiden yhdistetty RCS-kuvaaja.....	45

## TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1 Antennikeilan leveyden laskelmat moottorin kulmalukemina .....	22
Taulukko 2 Kovan tuulen mittaustulokset (dB) .....	27
Taulukko 3 Antennin ja kameran kohdistusvirhelaskemat .....	29
Taulukko 4 Stabiilisuustestin kuvaajan kulmakerroin .....	36
Taulukko 5 Lämpötilavirheet (dB).....	37
Taulukko 6 Kalibrointisopen tuen herätteet .....	40
Taulukko 7 Tilastollisten virheiden tarkastelu .....	45
Taulukko 8 NISTIR 5019 virhebudjetin testikohteet.....	48
Taulukko 9 Virhebudjetin epävarmuusarvot.....	58

## **LYHENTEET**

AFRL	Air Force Research Laboratory
AMTA	Antenna Measurement Techniques Association
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NIST	National Institute of Standards and Technology
RAM	Radar-absorbent material
RCC	Range Commanders Council
RCS	Radar Cross Section
RSS	Root Sum Square
SMSG	Signal Measuring Standards Group
SPC	System Planning Corporation

# **VIRHEBUDJETIN SOVELTAMINEN OSAKSI AVOIMEN RADAN TUTKAHERÄTEMITTAUSJÄRJESTELMÄN LUOTETTAVUUSTARKASTELUA**

## **1. JOHDANTO**

Tutkan tarkoituksena on mitata kohteiden etäisyyttä ja sijaintia ympäristössä mahdollisimman tarkasti ja kaukaa. Koska tutka tekee mittauksia vastaanottamalla kohteesta heijastuvaa lähettämäänsä korkeataajuisia säteilyä, saattaa tutkan tuottaman mittaustuloksen tarkkuus vaihdella monien syiden vuoksi. Tätä mittaustuloksen tarkkuuden määrittämistä selvitetään tarkastelemalla mittausten luotettavuutta dokumentoituna tarkasteluna rajatussa kontekstissa.

Tutkaherätemittausten tutkimus käynnistyi Yhdysvalloissa 1950-luvun lopulla sotateollisuuden ensimmäisissä suurissa häiveteknisissä vakoilukonehankkeissa, joissa tutkaherätteitä pienentävään kehitystyöhön investoitiin paljon. Yhdysvalloissa on edelleenkin huomattava määrä tutkimuskeskuksia [1], jotka tekevät yhä tarkempia tutkaherätemittauksia. Yhdysvallat on ollut kehityksen kärkimaa, mutta myös muualla maailmassa on tehty häivetutkimusta sen merkityksen kasvaessa. Mittausmenetelmien tarkkuutta on parannettu uusien häiveominaisuuksien sisältävien innovaatioiden testaamisen vuoksi. Häivetrendin jatkuessa on myös Puolustusvoimien tutkimuslaitoksella alettu tekemään häiveteknistä tutkimusta mittausten ja simulaatioiden avulla. [2, s. 2]

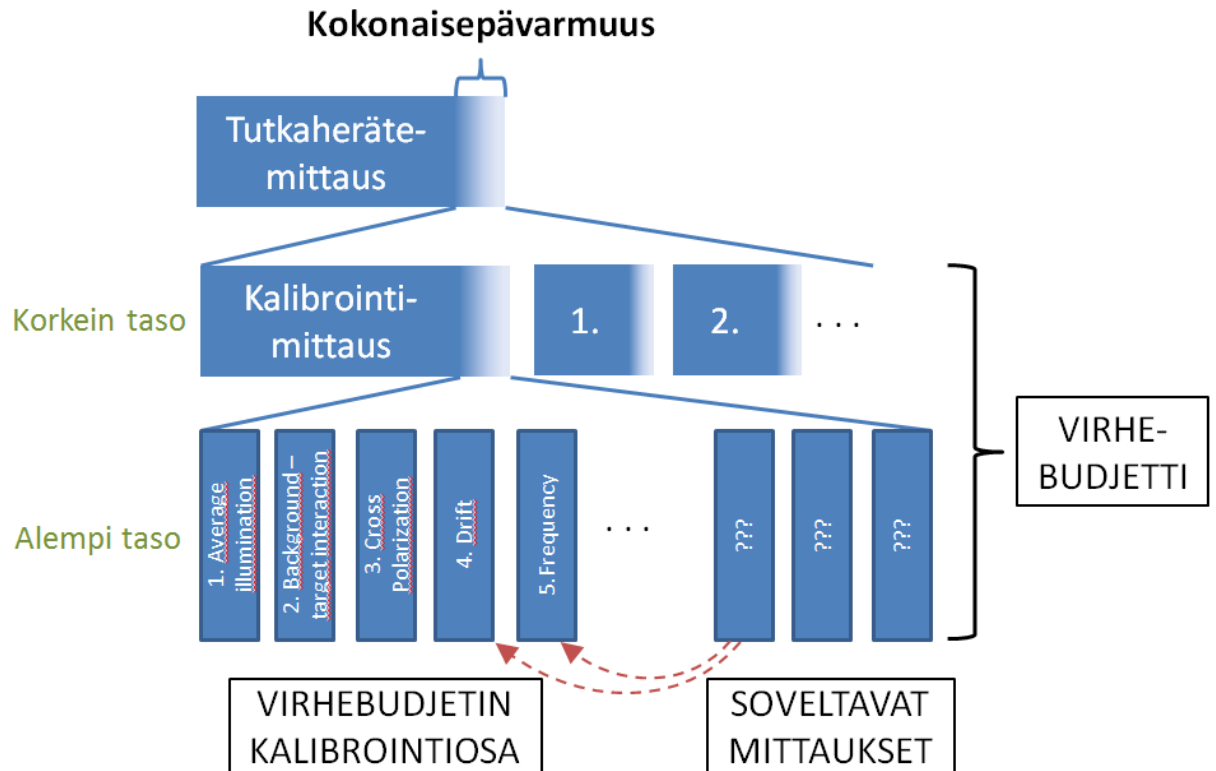
Nykypäivänä lähes kaikkiin sotateknisiin järjestelmiin kohdistuu tutkalla tehtävää tiedustelua ja maalinnusta. Häiveteknisen tutkimuksen avulla pyritään pienentämään laitteiden tutkakoikkipinta-alaa, eli kohteesta tutkalle heijastuvaa säteilyä, tiedusteltavuuden vaikeuttamiseksi. Tätä häiveteknistä kehitystyötä ja tutkimusta varten Puolustusvoimille hankittiin vuonna 2005 uusi tutkimustutka, jolla voidaan simuloida laajalla taajuusalueella erityyppisiä tutkauhkia. Tutkimustutka lähettää säteilyä erilaisilla modulaatioilla ja pulssimuodoilla, sekä mittaa tutkittavasta kohteesta heijastuneen säteilyn, eli tutkaherätteen, tallentaen sen muistiinsa.

Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen kiinteä avoin mittausrata tehtiin vedellä täyttyneen entisen avolouhoksen ympäristöön Lakialassa. Tutkaherätemittausjärjestelmä sijoitettiin vanhaan kaivostorniin ja järven toiselle puolelle rakennettiin kääntöpöytä, jolla kohteita voidaan monostaattisesti mitata kaikilta suunnilta pyörittämällä ja kallistamalla pöytää. Järjestelmän dynaamisuus mahdollistaa hyvin erikokoisten kohteiden mittaamisen ja niistä voidaan jatkoanalyysillä kerätä tärkeää tietoa erityisesti taktiikan kehittämistä varten.

Lakialan tutkimustutkalla on tehty mittauksia jo vuosien ajan arvioimalla suurpiirteisesti mitaustulosten tarkkuutta ilman kattavaa luotettavuustarkastelua. Jotta erilaisten kohteiden mitaustuloksia voitaisiin luotettavasti arvioida, täytyisi kaikkien mittauksiin vaikuttavien epävarmuuksien olla selvitettyinä ja dokumentoituna. Mittaustulosten luotettavuustarkastelu on olennainen osa tutkimustiedon oikeellisuutta, koska mitaustulosten hyödyllisyyden arviointi ilman tietoa epävarmuuksista on erittäin vaikeaa.

Tässä tutkimuksessa selvitetään virhebudjettimenetelmän soveltamista osaksi edellä mainittua luotettavuustarkastelua. Virhebudjetti on menetelmä, jolla eritellyistä epävarmuustekijöistä muodostetaan numeraalisia arvoja, jotka voidaan erilaisilla menetelmillä yhdistää perustelluksi kokonaisvirhearvioksi [3]. Koska virhebudjetin kattava suorittaminen tutkimuksen aihealueella sisältäisi valtavan työmäärän, tarkastellaan tutkimuksessa virhebudjetin alatasolla olevaa kalibroinnin testikohdetta. Siinä tarkastellaan mittaussjärjestelmän säätymistä oikeille teho-  
tasolle kalibrointimittauksella. Kuvassa 1 on kuvattu virhebudjetin kokonaisuutta tutkaherätemittausten luotettavuustarkasteluna ja tämän tutkimuksen roolia alemmalla tasolla.





Kuva 1 Virhebudjetin rakenne

Tämä opinnäytetyö on ensimmäinen tutkimustutkien virhetarkastelua koskeva tutkimus Suomessa, joten se on Lakialan avoimen radan luotettavuustarkastelun pilottitutkimus. Tutkimuksen yhteydessä tehtävien mittausten ja analyysin avulla on kerätty tietoa myös kalibrointimenetelmän kehittämistä varten. Tutkimus liittyy osittain Ilmataistelukeskuksen tutkimussarjaan. Tutkimussarja on vasta alussa, ja sen ensimmäinen osatutkimus valmistui keväällä 2014 Jyri Mattilan esiupseerikurssin opinnäytetyönä. Tätä tutkimusta voidaan pitää sarjan toisena osatutkimuksena, jossa käsitellään tutkaherätemittausjärjestelmän virheanalyysiä, jotta tutkimussarjan mittauksille voidaan tuottaa tarkempi virhearvio.

Tutkimuksen tutkimusongelma ja samalla tutkimuksen pääkysymys on:

- Miten virhebudjettimenetelmä soveltuu tutkaherätemittausjärjestelmän kalibroinnin epävarmuustekijöiden arviointiin ja tutkaherätemittausten luotettavuuden tarkasteluun?

Tutkimuksen pääkysymyksen vastataan seuraavien apukysymysten avulla:

- Mikä virhebudjetti sopisi Lakialan mittausjärjestelmän virhetarkasteluun?
- Kuinka suuria epävarmuustekijöitä on tutkaherätemittausjärjestelmän kalibroinnissa?

## 2. TUTKIMUSTUTKAN JA LUOTETTAVUUSTARKASTELUN ESITTELY

### 2.1. Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen tutkaherätteiden mittausjärjestelmä

Käsiteltävänä järjestelmänä Lakialassa on System Planning Corporationin valmistama MkV-tutkaherätemittausjärjestelmä, josta käytetään nimitystä ”Tutra”. Mittausjärjestelmästä on olemassa uudempi MkVe-versio [4], jossa lisämääre e tarkoittaa sanaa enhanced. Mittausjärjestelmä toimii neljällä antennillaan 0.1–18 GHz ja 26.5–40 GHz taajuusalueilla, joilla voidaan käyttää kaikkia tutkan tukemia pulssimuotoja. Se on tyypiltään taajuusaskeltava pulssitutka [5, s. 56], joka lähettää vaihekoodattuja pulsseja. Sen tarkoitus on muodostaa kiinteällä amplitudilla pulssisarjoja, joissa jokaisen pulssin taajuus on erikseen valittavissa koko taajuuskaistalta. Pulssin sisäinen koodaus olisi myös mahdollista toteuttaa ulkoisella generaattorilla, joka mahdollisesti hankitaan myöhemmin Lakialaan. Tutran etäisyysportti, jonka ulkopuolelta vastaanotettavat herätteet suljetaan ajallisesti pois, on hyvin tarkasti säädettävissä. Sillä voidaan vähentää ylimääräistä välkettä ja kohinaa pienentämällä tarkasteltavaa aluetta. Tarkemmat tekniset tiedot löytyvät liitteenä olevasta mittausjärjestelmän esittelysivusta.

Mittausjärjestelmällä tehdään mittauksia tarkoitusta varten tehdyllä radalla, mutta järjestelmä mahdollistaa myös siirrettävän konfiguraation tarkoitusta varten rakennettuun perävaunuun asennettuna. Siirrettävässä konfiguraatiossa antennit ja tutka kuljetetaan mittauspaikalle erikoisvalmisteisella peräkärryllä, jonka päälle järjestelmä kootaan yleensä dynaamisia mittauksia varten. Esimerkki dynaamisesta mittauksesta voisi olla laivan tutkaherätteiden mittaaminen, kun laiva liikkuu omilla moottoreillaan eri asentoihin. Järjestelmää ohjataan molemmissa tapauksissa kuvassa 2 olevasta hallintayksiköstä, joka on hallinta- ja tallennuslaitteineen rakennettu kuorma-autolla siirrettävään konttiin.



Kuva 2 Operaattorin työpiste

Lakialan avoimella mittausradalla Tutran käyttökohteina voi olla muun muassa silppujen ominaisuuksien tutkiminen, tutkauhan simulointi ja vastatoimien määrittäminen, häirinnän vaikutus erilaisiin simuloituihin tutkiin, aktiivisen ja passiivisen harhautuksen vaikutus, erilaisten signaalimuotojen testaus ja muut elektronisen sodankäynnin mittaukset. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan Tutran käyttöä erilaisten kohteiden tutkaheijastusominaisuuksien mittauksiin luotettavuuden osalta.

Kiinteä avoin mittausrata on rakennettu Lakialan vanhan kaivoksen ympäristöön, jossa sijaitsevan kaivostornin seinään on kiinnitetty kisko, jota pitkin tutkan antennitelinettä voidaan vinssillä liikuttaa eri korkeuksille. Tutkan eri taajuusalueiden antennit ovat telineessä noin kahden metrin säteellä toisistaan. Eri taajuusalueiden antennit muodostavat erilaisia tutkakeiloja, jotka saattavat muuttua hieman myös samalla antennilla eri taajuuksilla. Tämän vuoksi eri taajuusalueiden kohdistaminen mahdollisimman tarkasti on tärkeää. Antenniryhmään kiinnitetyn kameran kuva välittyy tutkan hallintayksikössä sijaitsevalle monitorille, jolla antennien kohdistaminen haluttuun paikkaan voidaan tehdä.

Mittausjärjestelmän antennit ovat asennettuna kuvassa 3 näkyvään telineeseen, jonka korkeutta voidaan säätää portaattomasti käyttämällä sähkömoottorilla toimivaa vaijerivinssiä, joka liikuttaa telinettä kaivostornin kyljessä olevaa raidetta pitkin. Vaijerivinssin käyttöpaneeli sijaitsee ulkona tornin juurella, mutta siihen on suunnitteilla etäkäyttömahdollisuus hallintayksiköstä.



Kuva 3 SPC MkV -tutkimustutkan antenniteline

Tutkimuskohteet sijoitetaan mittausta varten kuvassa 4 näkyvälle kääntöpöydälle, jonka keskipiste sijaitsee 235,6 metrin etäisyydellä antenneista. Se on Lakialan ainoa mittausta paikka. Kääntöpöytä on pyöritettävä teräslevy, joka voidaan kallistaa jopa pystysuoraan painorajoitukset huomioiden. Sitä liikutetaan voimakkailla hydraulijärjestelmillä, joita voidaan etäkäyttää hallintayksiköstä. Kääntöpöytä on tehty kestäväksi isojen ja painavien kohteiden massan ja sen päällä on mitattu jopa panssarivaunuja. Kääntöpöydän edessä olevat kulmat on peitetty RAM-levyillä (Radar-absorbent material) ja kääntöpöydän pinnassa olevat pulttien paikat metallisilla korkeilla ylimääräisten herätteiden vähentämiseksi.



Kuva 4 Näkymä kääntöpöydältä antennitornille

Mittausradan antenniryhmän ja mittauspaikan välinen alue muodostuu pääasiassa järvestä, jonka toisella puolella sijaitsevalla kääntöpöydällä mittaukset suoritetaan. Kääntöpöydän puoleinen ranta on kivituhkaa ja se on muotoiltu tasaiseksi välkkeen vähentämiseksi. Mittausradan välialueella ei ole käytössä monitie-etenemistä vähentäviä aitoja. Monitie-etenemisen aiheuttamia ongelmia on pyritty vähentämään nostamalla kääntöpöytä korkeammalle, jotta normaalissa mittauksessa antennin pääkeila ei osuisi järveen. Monitie-etenemisen pitäisi olla mahdollista ainoastaan vastamäessä olevista kivituhkan pinnoista tai pienempitehoisten sivukeilojen heijastuessa järven pinnasta, mutta asiaa ei ole tutkittu tarkemmin.

Tutran kalibrointi tehdään jokaiselle käytettävälle taajuudelle ja polarisaatiolle erikseen, jolloin tutka tallentaa kalibroinnissa havaitut parametrit ja tehoreferenssit muistiinsa. Kalibroinnin, kuten muutkin mittaukset, voi tehdä joko pistetaajuudella tai askeltavalla pyyhkäisyllä (chirp). Ensimmäisen kalibroinnin yhteydessä jokaisen antennin kohdistus etsitään mittaamalla kalibrointiesinettä sopivalla kuviolla ja etsimällä suurimman herätteen kohtaa käytettävällä antennilla. Kun suurimman herätteen kohta on löydetty, keskitetään antenni kohteeseen ja laitetaan operaattorin monitoriin kameran kuvassa näkyvän kohteen kohdalle kohdistusmerkki, jossa lukee siihen kohdistetun antennin yksilöintitieto. Näiden merkkien avulla voidaan eri taajuusalueiden antennit suunnata kohteen kohdalle nopeasti sekä kalibroinnissa että tutkittavien kohteiden mittauksissa. Kalibrointi täytyy suorittaa lämpötilan muuttuessa ja mahdollisuuksien mukaan aina ennen mittausta, jotta lämpötilan muutoksen ja muiden muuttujien aiheuttamia turhia virheitä ei tulisi mittaustuloksiin.

Mittausjärjestelmän kalibrointikohteena käytetään kaikilla taajuuksilla ja tehotasoilla kuvassa 5 näkyvää kolmesta kolmion muotoisesta alumiinilevystä tehtyä kulmaa (triheedral), eli tutkasoppea. Se heijastaa geometriansa vuoksi kaksi kolmasosaa kulman fyysiselle pinta-alalle osuneesta säteilystä takaisin. Kolmiolevyjen alasivu, eli lähinnä tutkaa oleva sivu, on 42.5 cm pitkä ja tutkasopen sisäkulmien sivunpituus on 30.2 cm. Näillä mitoilla voidaan kohteelle laskea teoreettinen tutkapaikkipinta-ala, jota käytetään kalibroinnin referenssinä. Tämän muotoisen esineen tutkaheräte vaimenee kohdistusvirheen kasvaessa hitaammin, kun sitä vertaa esimerkiksi sylinterin muotoisiin alumiinikappaleisiin, joiden pystysuoran kaarevan sivun tulee olla hyvin tarkasti tutkaa kohden [6, s. 74-77].



Kuva 5 Kalibroinnissa käytettävä tutkasoppi

Kalibroinnin tarkoituksena on tuottaa tutkalle referenssiarvo teoreettisesti laskettavasta kalibrointikohteesta, jolloin tutka säätää parametreja yhdistääksensä kohteesta tulevan tutkaherätteen vastaamaan teoreettisesti laskettua arvoa. Sen tutkapoikkipinta-alan tulisi olla laskettavissa mahdollisimman tarkasti. Tämän vuoksi kalibrointikohteen tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen objekti, joka voidaan valmistaa suurella tarkkuudella. Koska tutka säätää parametrisia ja tehonsa kalibrointikohteen mittausten perusteella, tuottavat tässä vaiheessa muodostuvat virheet systemaattisia virheitä, jotka vaikuttavat kaikissa kalibroinnin jälkeisiin mittauksiin. Tutkimuksen yhteydessä kalibrointikohtetta mitattiin myös kääntöpöydällä eri korkeuksilla, jotta vaihtoehtoista kalibrointiasetelmaa voitaisiin verrata tutkimuksessa käsiteltävään kalibrointiasetelmaan. Tämä mittausaineisto jouduttiin tosin jättämään pois tutkimuksen laajuuden ja liian moniselitteisen aineiston vuoksi.

Tutkimuksessa tarkasteltava kalibrointikohte on kiinnitetty noin kolmen metrin korkeudelle kuvassa 6 näkyvään vanhaan puunrunkoon, joka on 45,6 metrin päässä antenneista. Tutkan edestä kulkee tie, jota pitkin kulkee välillä autoja aiheuttaen ylimääräisen huomioitavan asian. Vaikka kalibrointikohte on 3 metrin ja tutka kalibroinnissa 5,6 metrin korkeudella, muodostavat ohiajavat autot välillä havaittavia häiriötä mittausdataan.



Kuva 6 Kalibrointiasetus

## 2.2. Tutkateorian epävarmuutta aiheuttavat ilmiöt

Mittauksia tehtäessä saattaa erilaisista olosuhteiden aiheuttamista ilmiöistä muodostua lopulliseen mittaustulokseen erisuuruisia virheitä, joita voi huomioida mittausajankohtaa ja menetelmiä hallitsemalla. Tässä alaluvussa tarkastellaan myös mittajaan toiminnasta aiheutuvia virheitä.

Lämpö aiheuttaa kohinaa, joka vaikuttaa tutkien toimintaan. Kohinaa muodostuu, kun materiaali ympärillämme säteilee sähkömagneettista säteilyä eri taajuuksilla. Eli mitä johtavampi ja lämpimämpi kohde on, sitä enemmän se säteilee. Tutkaan vaikuttaa sekä ulkoisia, että sisäisiä kohinalähteitä. Tutkalle vastaan tulevia ulkoisia kohinalähteitä ovat muun muassa maanpinta, vedenpinta ja aurinko. Lämmenneen ympäristön lisäämä taustakohina vaikeuttaa tutkan lähettämän pulssin havaitsemista kasvaneen kohinatason seasta. Aurinko saattaisi myös suoraan vaikuttaa sen ollessa esimerkiksi talvella matalalla lähellä mitattavaa kohdetta, joten auringon sijainti tulee ottaa huomioon mittausjärjestelyjä suunniteltaessa. Ympäristön muuttuva lämpötila muuttaa myös tutkan sisäisten laitteiden lämpötilaa ja samalla kaikkien sähkölaitteiden ominaista kohinatasoa. Tämä vaikuttaa osaltaan erityisesti vastaanottimen vertailulämpötilan muuttumiseen. Se taas aiheuttaa ylimääräistä kohinaa vastaanotettavaan signaaliin, joka on huomattavasti pienempi kuin lähtevä signaali.

Tutkan vastaanottaessa signaalia, se vahvistetaan helpommin tulkittavaksi. Samalla myös vahvistetaan jo vastaanotettua ulkoista kohinaa sekä vastaanottimen omaa sisäistä kohinaa. Tämän vuoksi vastaanottimessa lisääntyvä kohina kertautuu suuremmaksi epävarmuustekijäksi. Tutka säätää kalibroinnin yhteydessä arvonsa kohdalleen vallitsevaan lämpötilaan nähden. Tämä lämpötilan muutos siis onkin kriittisin kohinan epävarmuutta aiheuttava tekijä, jota voi vähentää välttämällä kohdealueen ja itse järjestelmän lämpenemistä. Tämän mittaaja voi huomioida kalibroimalla tutkan riittävän usein ulkoisen lämpötilan muuttuessa ja välttämällä erityistä tarkkuutta vaativia mittauksia ajankohtina, jolloin ulkoinen lämpötila muuttuu paljon. Tätä lämpötilan muutoksen aiheuttamaa virhettä kalibroimattomaan tutkaan testataan alaluvussa 3.8. [7, s. 116-121]

Kohinan ohessa tarkastellaan usein myös mittauksiin vaikuttavaa välkettä. Taustavälke määritellään IEEE:n standardissa seuraavasti: ”Ei haluttuja kaikuja, tyypillisesti maasta, merestä, vesi- tai muusta sateesta, silpusta, linnuista, hyönteisistä ja taustasäteilystä” [8]. Välkettä on tutkittu erittäin kattavasti ja siitä on julkaistu paljon tutkimustietoa. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan taustakohinan ja välkkeen yhdistelmää kokonaisuutena.

Tutkayhtälössä huomioidaan väliaineen, eli ilman, vaikutusta monella tavalla. Ilman aiheuttama vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa voimakkaasti aiheuttaen maksimihavaintoetäisyyden pienenemistä. Ilmakehän vaimennus ei muutu kuitenkaan lineaarisesti, vaan ilmakehän eri kaasut vaimentavat voimakkaammin joitain taajuusalueita, joista esimerkkinä  $O_2$  vaimentaa säteilyä voimakkaasti  $K_a$ -taajuusalueen yläpuolella. Näiden vaimennuspiikkien välistä löytyy yleisesti käytössä olevien tutkien taajuusalueet. [9, s. 268] Tämä ei Lakialassa kuitenkaan vaikuta merkittävästi, kun verrataan sen mittausetäisyyttä 235.6 m valvontatutkien useisiin satoihin kilometreihin. Mittausrata on kuitenkin täysin altis myös muille ulkoilman olosuhteille. Esimerkkinä sateen aiheuttama vaimennus kasvaa taajuuden ja vesipisaroiden koon kasvaessa huomattavasti enemmän kuin ilman. Tämäkään ei käytännössä vaikuta Lakialan lyhyellä etäisyydellä, mutta korkeimmilla taajuuksilla mittaamista kannattaa silti välttää kovi-en rankkasateiden aikana, koska tutka ei huomioi sateen aiheuttamia muutoksia väliaineen vaimennuksessa sen olettaessa ilmakehän olevan standardiolosuhteiden mukainen.



Sateen suurin vaikutus signaaliin muodostuu mittaavan antennin tai sitä suojaavan radomin pinnalle muodostuvasta vesikalvosta. Kuten väliaineenkin kohdalla, niin tässäkin tapauksessa vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa. 0.05 mm vesikalvo radomin pinnalla aiheuttaa 16 GHz:n taajuudella 3.2 dB vaimennuksen edestakaisin kulkevaan signaaliin [9, s. 275], mikä tekee siitä Lakialan avoimeen rataan vaikuttavan asian. Jo pienillä kalvonpaksuuksilla muodostuu valtavia epävarmuuksia mittaustuloksiin, mutta lähteessä ei ole tarkasteltu antennia, jonka päällä ei ole radomia. Tästä huolimatta voidaan olettaa, että antennien tasainen kulumisen muodostaa suurimman epävarmuustekijän mittauksia ajatellen. Radomit ja antennit valmistetaan yleensä vettä hylkivillä pinnoitteilla, jolloin uutena vesi ei muodosta kalvoa niiden pinnalle, mutta ikääntymisen ja kulumisen myötä nämä ongelmat saattavat tulla vastaan. Vaimennusta muodostuu myös kohteen pinnalle muodostuneesta vesikalvosta, mutta se ei ole merkittävä, ellei vesikalvon paksuus muodostu yli 0.2 mm paksuiseksi. [9, s. 275] Nämä epävarmuudet voi välttää tekemällä mittauksia ainoastaan poutaisessa säässä.

### 2.3. Tutkapoikkipinta-ala

Yksinkertaisilla monostaattisilla tutkaherätämittauksilla pyritään pääasiassa selvittämään mitattavan kohteen takaisin säteilemän energian määrää eri kulmilla. Tällä tavalla voidaan simuloida kohteen havaittavuutta suuremmalta etäisyydeltä erityyppisillä tutkilla. Tutkimustutkalla tehdään yleensä hyvin kattava taajuuspyyhkäisy kohteen kaikille kulmille, jotta aineistosta voidaan myöhemmin laskea, kuinka kohde näkyisi jollakin valitulla taajuudella standardi-ilmakehän olosuhteissa. Tällä tavalla voidaan jo kehitysvaiheessa tarkastella täyttääkö suunniteltu malli haluttuja ominaisuuksia ilman ympäristön vaikutusta. Suure, jota tutkaherätämittausjärjestelmillä mitataan, on tutkapoikkipinta-ala. Tässä alaluvussa esitellään yksinkertaisettuja RCS:n kaavoja ja lopulta tutkimuksessa tarkasteltavan tutkan käyttämä kaava.

Tutkapoikkipinta-ala on englanniksi Radar Cross Section, joka lyhennetään yleensä tekstissä RCS. Sen yksikkö on pinta-alaa fyysisesti kuvaava  $m^2$  ja sen arvot vaihtelevat hyönteisen  $10^{-5} m^2$ :stä ison laivan  $10^{+6} m^2$ :iin. Näin ollen tutkapoikkipinta-alan arvot vaihtelevat hyvin dynaamisella asteikolla. Jotta lukuarvot olisivat helpommin vertailtavissa, käytetään tutkapinta-alan kuvaamiseen desibeliasteikkoa, jonka referenssiarvo on  $1 m^2$ . Täten ison laivan desibeliarvoksi tulisi  $60 dBm^2$ . Yleisemmin teollisuudessa ja akateemisessa yhteisössä tästä kuitenkin käytetään yksikkömuotoa  $60 dBsm$ . [10, s. 68]

John F. Shaffer kuvaa tutkapoikkipinta-alaa Knott:n kirjassa seuraavalla tavalla. Tutkapoikkipinta-ala on mitta, joka kuvaa tiettyyn suuntaan heijastuneen tehon määrää kohteeseen osuneesta säteilyaallost. Tutkapoikkipinta-alan kaava sulkee säteilyaallon lähettimen ja vastaanottimen etäisyydet sekä kohteen sijainnin pois lopputuloksesta, jotta saadaan mahdollisimman yleistettävä kaava, joka kuvaa kohteen sähkömagneettisia heijastusominaisuuksia tiettyyn suuntaan. Näin ollen kohteen tutkapoikkipinta-alaa ei voi kasvattaa nostamalla lähetystehoja tai tuomalla lähetintä lähemmäs kohdetta. Toinen kuvaava termi tutkapoikkipinta-alalle voisi olla ”kaikupinta”. [10, s. 64]

IEEE määrittelee tutkapoikkipinta-alan seuraavalla tavalla:

”...RCS as a measure of reflective strength of a target defined as  $4\pi$  times the ration of the power per unit solid angle scattered in a specified direction to the power per unit area in a plane wave incident on the scatterer from a specified direction. More precisely, it is the limit of that ratio as the distance from the scatterer to the point where the scattered power is measured approaches infinity:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E^{scat}|^2}{|E^{inc}|^2}, \quad (1)$$

where  $E^{scat}$  is the scattered electric field and  $E^{inc}$  is the field incident at the target. Three cases are distinguished: monostatic or backscatter, forward scattering, and bistatic scattering.” [10, s. 64]

Stimsonin kirjassa määritellään tutkapoikkipinta-ala hyvin yksinkertaistetulla tavalla. Tutkapoikkipinta-ala koostuu kolmesta vaikuttavasta tekijästä: geometrinen pinta-ala, heijastavuus ja suuntaavuus. Geometrinen pinta-ala on se fyysinen poikkipinta-ala, joka kohteesta näkyy mittaavalle tutkalle. Siitä voi laskea, kuinka suuri määrä säteilyenergiaa kohdistuu kappaleeseen. Heijastavuus määrittää, kuinka suuren osan tästä kohdistuneesta säteilyenergiasta kappale heijastaa takaisin suhteessa sen absorboimaan energiaan. Suuntaavuus määrittää kappaleesta takaisin heijastuneen säteilyenergian määrän ympärisäteilevään, eli isotrooppiseen, kappaleeseen verrattuna.

$$\sigma = A \frac{p_{scatter}}{A p_{incident}} \frac{p_{backscatter}}{\frac{1}{4\pi} p_{scatter}}. \quad [7] \quad (2)$$

Tutra käyttää RCS:n laskemiseksi monimutkaisempaa yhtälöä

$$\sigma = \frac{SNR \cdot R^4 \cdot (4\pi)^3 \cdot (k_B \cdot T \cdot B \cdot NF) \cdot L}{P \cdot G^2 \cdot (c/f)^2 \cdot N_c}. \quad (3)$$

Tutran käyttämä yhtälö on tehty huomioimaan tarkemmin erilaisia mittauksiin vaikuttavia tekijöitä. Koska tietokone tekee laskentaa sensoreiden tuottamasta datasta, ei yhtälön tarvitse olla yksinkertainen. Monimutkaisessa yhtälössä on monta epävarmuutta tuottavaa tekijää, mutta tässä tutkimuksessa luotettavuustarkastelua ei rakenneta käytetyn tutkayhtälön ympärille, koska virhebudjetin laatija on tehnyt tämän työn jo valmiiksi.

#### 2.4. Luotettavuustarkastelun perusteet

Tässä alaluvussa käsitellään mittauksiin liittyvää virheanalyysiä. Mittauksilla pyritään tutkimaan teorioiden toteutumista, mutta empiirisiin sovelluksiin siirryttäessä täytyy huomioida mittausmenetelmien tarkkuus. Mitä tarkempi mittausmenetelmä on sitä paremmin sillä voidaan todentaa teoriaa. Tutkimuksessa virheellä tarkoitetaan teoreettisen oikean tuloksen ja yksittäisen mittaustuloksen välistä eroa. Epävarmuudella taas tarkoitetaan vaihteluväliä, jolle virhe todennäköisesti osuu. Virheiden suuruuksien vaihdellessa normaalijakauman mukaisilla todennäköisyyksillä voidaan eri todennäköisyyksillä toteutuvia epävarmuuksia tarkastella eri tyyppisissä tarkasteluissa. Yleensä epävarmuuksia määritettäessä tarkastellaan vaihteluväliä, joka on kahden keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta sisältäen 95 % kaikista virheistä. Epävarmuutta voidaan käsitellä jakamalla sitä erillisiksi epävarmuustekijöiksi, joiden määrää ja suuruutta selvitetään virheanalyysillä. Virheanalyysillä mittaustulosten epävarmuustekijät tunnistetaan paremmin ja mittausmenetelmän tarkkuutta voidaan parantaa. [2, s. 44; 11, s. 3-154]

LaHaie et al. toteavat:

”While no single treatment can please everyone, most agree a measurement uncertainty program is critical to the understanding of measurement quality, the development of error reduction strategies, and to the planning of range improvement paths.” [12, s. 227]

Tällä toteamuksella tuodaan hyvin esille epävarmuustekijöiden selvittämisen tärkeys mittausmenetelmien laadun ja kehityksen kannalta. Virke kuvaa tämän tutkimuksen lähtökohtaa ja tavoitteita, sillä juuri nämä asiat ovat keskeisiä Lakialan avointa rataa kehitettäessä.

Epävarmuuden määrittäminen on pääasiassa arviointia, jonka mittaaja suorittaa virheanalyysissä. Siinä käydään läpi kaikki mittaukseen vaikuttavat tekijät, joiden perusteella mittaaja määrittää virhearvion. Myös mittaustulosten loppukäyttäjät tarvitsee virhearviota arvioidakseen tulosten luotettavuutta.

Teoriassa erilaiset epävarmuustekijät luokitellaan kahteen luokkaan, jotka ovat tutkimuksen luotettavuustarkastelun kannalta olennaisia. Ensimmäisenä tarkastellaan satunnaisia virheitä, jotka teoriassa ovat toisistaan riippumattomia ja muuttavat mittaustulosta tasaisesti suuremmaksi ja pienemmäksi normaalijakauman mukaisesti. Mikäli mittaus sisältää vain satunnaisia virheitä, voi samaa mittausta toistamalla etsiä tilastollisesti tarkasteltuna oikeaa mittaustulosta. Tässä tutkimuksessa ja virhebudjetissa tarkastellaan kuitenkin yksittäisen mittauksen epävarmuutta, jossa tilastollisella tarkastelulla ei voida aina löytää juuri oikeaa arvoa.

Toisena tarkastellaan mittaustulosten vääristymää (bias) eli systemaattista virhettä. Vääristymä kuvaa vaihteluvälin, eli epävarmuuden, keskikohdan eroavaisuutta oikeasta arvosta. Vääristymä muodostuu virheistä, jotka puoltavat mittaustulosta aina joko suuremmaksi tai pienemmäksi, joten se on vaikeampi havaita mittaustuloksista. Mittaustulokset vaikuttavat mahdollisesti loogisilta, mutta vääristymä on voinut siirtää vaihteluvälin keskikohtaa. Esimerkki vääristymästä voisi olla mikä tahansa virhe kalibroinnissa, joka muokkasi kaikkia mittauksia kalibroinnissa tulleen virheen verran toiseen suuntaan.

Tutkaherätemittauksissa näiden kahden luokan väli on joskus häilyvä, sillä olosuhteet voivat aiheuttaa tuloksiin myös pidempijaksoista huojuntaa tai kohinaa, joista saattaa lyhyessä mittauksessa muodostua systemaattisen virheen luonne. Tämän vuoksi epävarmuudet jaetaan yleensä luotettavuustarkastelussa kahteen luokkaan tarkastelujakson sisällä määritettyinä. Joissakin analyttisissä virhemallinuksissa tämä luokkajako otetaan huomioon [12, s. 228], mutta tässä tutkimuksessa ei luokittelua tehdä, vaan sitä suositellaan jatkotutkimuksen yhteydessä tehtäväksi. [9, s. 425]

Virheanalyysi kuuluu mittausprosessiin jo mittausten suunnitteluvaiheessa, jotta käytettävät mittausmenetelmät voidaan suhteuttaa tarvittavaan tulosten tarkkuuteen. Jatkuvuuden kannalta prosessin dokumentointi on myös tärkeää, jotta sen oikeellisuutta voivat muutkin arvioida jälkepäin. Virheanalyysi on aina erilainen riippuen kohteesta, parametreista ja olosuhteista. Siksi yleispätevän ja toistettavan menetelmän on oltava hyvin joustava, jotta sillä voi tarkastella mahdollisimman erilaisia mittauksia. Jokaisen mittauksen epävarmuuksien kokonaisuus joudutaan silti aina arvioimaan tapauskohtaisesti, jotta kaikki tekijät tulisi huomioitua oikeassa mittasuhteessa. Tutkakerätämittausten monimutkainen signaalikenttä ja koherentin tutkan herkkyys tuottavat tuloksiin vaikuttavia epävarmuustekijöitä monella tavalla. Tämän vuoksi luotettavan kokonaisvirhearvion muodostaminen vaatii analyysiä ja kattavasti mittauksia. Jotta tästä monivaiheisesta virheanalyysistä saadaan luotettava toistettava prosessi, on avuksi kehitetty erilaisia virhearviointimenetelmiä.

## 2.5. Virhebudjetti menetelmänä

Tässä tutkimuksessa menetelmänä käytetään virhebudjettia, jonka valmiilla listalla tarkastellaan erilaisia järjestelmään vaikuttavia itsenäisiä epävarmuustekijöitä. Virhebudjetin avulla voi toistettavalla tavalla kartoittaa epävarmuuksien suuruusluokkia ja kehittää mittausmenetelmiä tarkemmiksi. Lopuksi sen pohjalta laaditaan listan mukainen kokonaisvirhearvio. Virhebudjetti on luotettavuustarkastelua ajatellen joustava työkalu, jonka eri kohdissa muodostetaan arvioita yksittäisistä epävarmuustekijöistä. Luotettavuustarkastelun tekijä voi päättää, mihin kohtiin käytetään eniten resursseja vaativia mittauksia ja simulointeja, ja mitkä kohdat tehdään kokemuksiin ja analyysiin perustuen. Virhebudjetilla voidaan siis tarkastella mittausrataa tarvittaessa todella syvällisesti kattavilla mittauksilla tai suurpiirteisesti nopealla analyysillä. Mitä suurempaa tarkkuutta mittauksilta vaaditaan, sitä suurempia investointeja ne vaativat. Jos virhebudjettia varten on käytettävissä paljon resursseja, voidaan virhebudjetin jokaiselle kohdalle tehdä kattavat mittaukset tarkemmin valmistetuilla kohteilla. Toisaalta alkuvaiheessa virhebudjetin voi tehdä myös tässä tutkimuksessa tehdyllä kevyemmällä prosessilla, koska virheet ovat yleensä karkeampia ja helpommin löydettäviä, jolloin tarkastelun ei tarvitse olla kovin syvällistä.

Virhebudjeteissa käsitellään pääasiassa vain niitä virheitä, joita ei voida välttää huolellisuudella. Tieteellisissä virhemalleissa ei siis käsitellä erehdyksen tai huolimattomuuden aiheuttamia virheitä, vaan pyrkimyksenä on kartoittaa, kuinka tarkka mittaustulos järjestelmällä ja menetelmällä voidaan saavuttaa. [11, s. 3]

Epävarmuudet moniselitteisissä mittauksissa muodostuvat useista virhelähteistä, joiden määrittely vaatii myös alavirhelähteet huomioivaa virheanalyysiä. Näin ollen epävarmuuksien kattava tarkastelu muistuttaa puun juuristoa, joka haaroittuu sitä pienempiin osiin mitä syvällisemmin sitä tarkastellaan. Alempien tasojen tarkastelussa käytetään aina suurimpia mahdollisia epävarmuusarvioita todennäköisempien sijasta, jotta vaikutukset ylettyvät kokonaisvirhearvioon vaikuttavaksi. Ylemmän tason epävarmuusarvo lasketaan siis sen alakohtien suurimpien arvioiden koonnoksesta. Tilastollisesti normaalijakaumaa tarkastelemalla voidaan ajatella, että alatasoilla tarkastellaan vähintään kahden keskihajonnan sisään mahtuvia virheitä. Tämä tutkimus keskittyy alemman tason tarkasteluun, jossa pyritään löytämään kalibroinnin sisältämät epävarmuustekijät. [2, s. 48]

Virhebudjetilla ei voida muodostaa yleispätevää kaikille kohteille sopivaa virhemarginaalia, koska kohteen antamien tutkaherätteiden voimakkuus vaikuttaa merkittävästi virheiden merkittävyyteen ja suuruusluokkaan. Virheet samalla radalla ovat usein samoja, mutta niiden suhteellinen merkitys muuttuu verrattuna kohteesta saatavaan herätetasoon. R. B. Dybdal toteaa konferenssijulkaisussaan seuraavaa:

”The measurement accuracy of a target relative to this reference can be made; i.e., low level RCS returns are dominated by the background errors, whereas high level RCS returns are principally limited by the bias error components. Thus, the accuracy of RCS measurements varies over the dynamic range of its values.” [13]

Tämän tutkimuksen virhebudjetti tehdään kalibroinnin luotettavuustarkasteluun, jossa herätetaso on tarkasteltavan kalibrointikohteen mukainen. Tämä tulee ottaa huomioon muiden tutkimuskohteiden virheanalyysissä, jossa vastaanotettu herätetaso voi vaihdella suuresti. Näin ollen kalibroinnissa esiintyvät virheet ja niiden suuruusluokat voivat olla erilaisia verrattuna muunlaisten kohteiden mittauksiin.

Tieteellisen menetelmän yksi pääperiaatteista on toistettavuus. Tämän vaateen merkitys mittauksia suunniteltaessa on tärkeä ja sen saavuttaminen vaatii tarkkaa mittausten määrittelyä, jotta vähennettäisiin määrittelyongelmasta johtuvia epävarmuuksia. Määrittelyongelma muodostuu, kun tarkkakaan määrittely ei täysin poista epävarmuuksia, jotka näkyvät tilastollisina eroina tuloksissa eri mittaajien mitatessa samaa asiaa aavistuksen eri tavoilla. Tämä huomio kohdistuu lähinnä luotettavuustarkasteluun tässä tutkimuksessa, eikä se vaikuta tutkimuksen virhebudjettiin. [11, s. 4]

## 2.6. Virhebudjetin soveltuvuuden arviointi

Tämä alaluku tarkastelee kirjallisuuskatsauksella, miten virhetarkastelua on tehty aiemmin maissa, joilla on pitkä historia häivetutkimuksesta. Tässä alaluvussa tehtävä kirjallisuuskatsaus on kuvailevan kirjallisuuskatsauksen alalajiksi määriteltävä narratiivinen yleiskatsaus [14, s. 7]. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on muodostaa synteesi virhetarkastelussa käytetyistä menetelmistä ja niiden kehityksestä tutkaherätämittausten alalla. Synteesin avulla päätellään, onko tutkimuksen tarkoitukseen sopivaa tutkaherätämittausten virhebudjettia olemassa, vai joudutaanko virheanalyysiin soveltamaan toiseen tarkoitukseen suunniteltua virhebudjettia.

Alun perin tutkimuksessa oli tarkoitus soveltaa käytäntöön Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen esittämää NIST 18-term error budget -listaa [15, s. 756], joka on alun perin tasoantennin lähikenttämittauksiin (planar near-field measurements) kehitetty virhebudjetti. Tätä menetelmää on käytetty laajalti AMTA:n (Antenna Measurement Techniques Association) ja IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) konferenssijulkaisuissa, joten sen ajateltiin soveltuvan hyvin myös alkuperäisen tarkoituksensa ulkopuolelle. Käytännön kokemukset Lakialassa havaituista virheistä puolsivat tämän menetelmän valintaa virhebudjetiksi tutkimuksen aihetta valittaessa.

Tutkimuksen apukysymyksenä kirjallisuuskatsausta varten on: ”Mikä virhebudjetti sopisi Lakialan mittausjärjestelmän virhetarkasteluun?” Avointa julkista tutkimusta tutkaherätämittauksista löytyy pääasiassa Yhdysvalloista, joten kirjallisuuskatsaus kohdistetaan AMTA:n ja IEEE:n tietokantoihin. Julkaisuja haetaan sopivilla hakusanoilla liittyen virheanalyysiin, virhebudjetteihin ja tutkaherätämittauksiin. Tietoa tutkien ja antennien virhearvioinneista löytyy lähinnä englanninkielisistä lähteistä. Tärkeimmät alan julkaisufoorumit ovat AMTA:n ja IEEE:n antenniteknologioihin keskittyvät vuosittaiset konferenssit, joissa kansainvälinen tutkijayhteisö esittelee tekemäänsä tutkimusta liittyen antennien kehitykseen, tutkaherätämittauksiin sekä tutkapoikkipinta-alaan. IEEE on järjestänyt huomattavasti vanhempana organisaationa konferensseja jo vuodesta 1963 [16, s. 16]. AMTA:n konferensseja on pidetty vuosittain 70-luvun lopulta lähtien [17]. Molempien organisaatioiden julkaisuista löytyy paljon tietoa mittausten luotettavuuden arvioinnin kehittymisestä eri aikakausilta. Lisäksi mainittakoon, että IEEE on tutkinut ja standardisoinut virheanalyysiin liittyviä asioita [2], joihin viitataan myös tässä tutkimuksessa.

Tutkaherätemittausratoja on rakennettu ympäri maailmaa, joten erilaisia toteutuksia virhebudjeteista on olemassa lukuisia. Vaikka ensimmäiset tutkaherätemittaukset esimerkiksi Isossa-Britanniassa ovat jäljitettävissä vuoteen 1958 [18], on mittaustulosten luotettavuuteen ja eri ratojen väliseen vertailtavuuteen alettu kiinnittää enemmän huomiota Yhdysvalloissa vasta vuodesta 1965 alkaen [2, s. 2]. NIST (National Institute of Standards and Technology) ja AFRL (Air Force Research Laboratory) aloittivat Yhdysvalloissa 1990-luvulla tutkaherätemittausratojensa sertifiointi-ohjelman [19], jolla pyrittiin parantamaan dokumentointia näillä radoilla suoritettavien tutkaherätemittausten menetelmistä, laadusta ja tarkkuudesta. Tätä ennen NIST julkaisi vuonna 1994 NISTIR 5019 -raportissaan ehdotuksen yleismuotoisesta tutkaherätemittausten virhebudjetista [20], joka oli koostettu eri mittausratojen parhaista toimintatavoista mittaustarkkuuden parantamiseksi. Muuallakin maailmassa on vuosien mittaan kehitetty tutkaherätemittausratoja ja selvitetty epävarmuuksia, mutta Yhdysvalloista lähti liikkeelle vertailtavuuden parantaminen standardoimalla virhetarkastelumenetelmiä yhtenäisiksi. Tavoitteena oli antaa virhetarkastelun kokonaisuus tieteenalan yhteisön kritiikille, jotta siitä voitaisiin kehittää kaikkialla toimiva menetelmä.

Vuonna 2001 oli Yhdysvalloissa päädytty määrittelemään ANSI/NCSL (American National Standards Institute / National Calibration Standards Laboratory) Z-540-1-1994-standardin mukaisesti koostettu ratakirja, eli “the range book”, jonka tarkoituksena on järjestää, ylläpitää ja esittää tutkaherätemittausradan tarpeelliset tiedot selkeässä järjestyksessä yksissä kansissa [19]. Valmiista ratakirjasta pitäisi löytyä kirjallisessa muodossa kaikki tiedot laitteistoista, menetelmien luotettavuusarvioista, henkilöstöstä ja toimintaohjeistuksista. RCC/SMSG (Range Commanders Council / Signal Measuring Standards Group) lanseerasi 804-01-asiakirjassaan [21] yllä mainitun ratakirjan laatimisohteet, jossa virheanalyysi perustuu edellisessä kappaleessa mainittuun NIST:n virhebudjettiin. Ohjeistuksessa viitataan lukemaan ja seuraamaan virhebudjettia, jonka tulokset liitetään suoraan ratakirjan liitteeksi. 804-01 sisältää myös ohjeistuksen sertifiointiprosessista, jolla tutkaherätemittausradat voivat kolmannen osapuolen tekemänä evaluoida toimintansa kappaleen alussa mainitun standardin mukaiseksi. 804-01 määrittelee tutkaherätesertifiointin seuraavalla tavalla:

“RCS certification, as used in the DoD demonstration program, is hereby defined as having successfully completed a detailed review of an RCS Range Book by a peer review committee using published evaluation criteria.” [21]



Sertifiointiprosessilla tutkaherätemittausradat voivat myös hakea hyväksyntää standardin mukaiseksi radaksi. Rekisteröityäkseen pitää ohjeistuksen ja laaduntarkastelun olla tehtynä, valmis ratakirja tulee olla annettuna kolmen hengen arvovaltaisen arviointikomitean arvioitavaksi, ja tutkaherätemittausrata tulee olla arvioituna paikanpäällä toteutetulla evaluoinnilla saman komitean toimesta. Vuoden 2007 kesällä Z-540-1-1994-standardi korvattiin ANS/ISO/IEC 17025:2005:lla osan 1 osalta ja ANSI/NC SL Z540.3-2006:lla osan 2 osalta [22].

Vuonna 1997 samasta aiheesta oli aloitettu IEEE:n standardisointiprosessi 1502, jonka valmistelussa olivat mukana myös samoja henkilöitä kuin NISTIR 5019:ssä. Standardi saatiin julkaistua vuoden 2007 maaliskuussa ja se on viimeisin tarkoitukseen soveltuva voimassaoleva dokumentti, joka koskee tutkaherätemittausratojen standardisointia. 1502:ssa on selkeytetty aiemmin lueteltujen dokumenttien sisältöä ja kerrottu hieman kattavammin taustatietoa ja -teoriaa tutkaherätemittauksiin vaikuttavista tekijöistä. Tähän standardiin on suoraan liitetty aiemmin mainittu NISTIR 5019:n mukainen virhebudjetti, mutta joissain sen kohdissa viitataan kuitenkin edelleen alkuperäiseen teokseen. [2]

Muualta kuin Yhdysvalloista ei julkaistuja menetelmiä löytynyt. Eräässä lähteessä [18, s. 78] kalibrointi on yksi luotettavuustarkastelun neljästä osa-alueesta. Tämänkin tarkastelun virheet ovat itsenäisiä ja vaikuttavat omalla osuudellaan kokonaistuloksiin. Kalibroinnin osa-alueita tarkasteltaessa tulisi käydä läpi RCS-analyysi, kalibrointikohteen valmistustarkkuus ja johtavuus, tukirakenteen kiinnitykset ja kosketuspinta sekä käytettyjen kalibrointikohteiden lukumäärä. Tästä Isossa-Britanniassa käytössä olevasta menetelmästä ei löytynyt muuta ohjetta tai selvitystä, kuin taulukkomuotoinen lista epävarmuustekijöistä otsikkotasolla. Näihin kaikkiin kohtiin otetaan tutkimuksen kolmannen luvun mittauksissa ja analyysissä kantaa, mistä huomaa, että ympäri maailmaa käsitellään samoja asioita erilaisilla menetelmillä. Tällä perusteella voidaan todeta, että NISTIR 5019 on huomattavasti helpompi omaksua käyttöön sen laajemmalla ohjeistuksella, sillä kaikki tärkeimmät kokonaisuudet on siinä käyty läpi. Muissa maissa käytössä olevia virhebudjetteja ei tässä tutkimuksessa löydetty todennäköisesti aineiston maantieteellisen rajauksen vuoksi, mutta se voisi olla kiinnostava jatkotutkimuskohde.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella löydettiin siis NIST:n 18-kohdan virhebudjettia paremmin sopiva NISTIR 5019 -virhebudjetti [20]. Tutkimuksessa käytettäväksi virhebudjetiksi valitaan siis NISTIR 5019, jonka listaa voidaan soveltaa suoraan avoimella radalla suoritettaviin tutkaherätteiden kaukokenttämittauksiin. Joitain tietoja löytyy selkeämpänä IEEE:n 1502-standardista, johon NISTIR 5019 on lähes suoraan liitetty. NISTIR 5019 antaakin hyvän ja luotettavan ohjenuoran virheanalyysille, mutta pääasiassa siihen viitataan uudemman standardin kautta. Alkuperäistä NIST:n 18 kohdan virhebudjettia on myös käytetty apuna virheiden kartoituksessa ja soveltavien mittausten valinnassa. Virhebudjetin vaihtuminen muuttaa tutkimusta analyttisempaan suuntaan, jossa mittauksilla etsitään myös virhebudjetin ulkopuolisia virhelähteitä järjestelmän kokeneen käyttäjän asiantuntijuuden avulla. Virhebudjettia ja luotettavuustarkastelua varten suunniteltu mittausohjelma toimiikin pohjana virhebudjetin virhearvioiden määrittämiselle.

### 3. LUOTETTAVUUSTARKASTELUN MITTAUKSET

Tässä luvussa käydään läpi tutkimusta varten suunniteltujen mittauksen tulokset, joita tarkastellaan tilastollisten menetelmien avulla virhebudjetin testikohteiden arvioita varten. Osa mittauksista on suunniteltu luotettavuustarkastelua varten virhebudjetin ulkopuolisten virheiden tarkastelua tukemaan. Mittauksilla pyritään siis tuottamaan tietoa myös erilaisten huolimattomuusvirheiden suuruusluokista, koska näiden oletettujen virhelähteiden suuruusluokkia ei ole aiemmin vielä selvitetty. Lisäksi mittauksilla hankitaan tietoa kalibrointiasetelman kehittämistä varten. Mittaussuunnitelman lähtökohtana on ollut järjestelmää käyttävän asiantuntijan kokemukset ja alun perin suunniteltu 18 kohdan virhebudjetti.

Mittaustulokset on järjestelty virhebudjetin testikohtia mukaillen, jolloin niiden tuloksia voidaan hyödyntää loogisessa järjestyksessä. Tuloksissa on mukana myös pelkkää analyysiä sisältäviä kohtia, mutta ne on rakenteen selkeyttämiseksi sisällytetty mittauksen sekaan. Mittausdataa on analysoitu Matlabille tehdyllä SAR-prosessointi ver 1.5 -ohjelmalla, jolla voidaan tutkan tuottamasta I-Q-datasta muodostaa esimerkiksi RCS-kuvaajia tai HRR-kuvia. Näistä lopputuotteista voidaan ottaa Matlabilla tilastollisia arvoja, joiden laskentaa ja tilastollista analyysiä on tässä tutkimuksessa tehty Microsoft Excel -ohjelmalla.

Tutkimuksessa oli alun perin tarkoitus tehdä moottorin kulmalukemien tarkkuuden vertailumittaus, jota ei ehditty suorittamaan ennen järjestelmän huoltoa. Tämän vuoksi mittauksissa tarkoitetaan kulmalukemalla Tutran käyttöliittymälle välittyviä kulmalukemia tutkan kohdistuksesta. Tutkan kääntymistä ohjataan näitä kulmalukemia muuttamalla, jolloin moottori kääntää antennitelinettä halutun muutoksen verran. Huomioitavana asiana kulmalukemien arvot saattavat nollaantua välillä esimerkiksi tutkan uudelleen käynnistyksen yhteydessä, jolloin sama kulmalukema ei aina tarkoita täsmälleen samaa kohtaa reaali maailmassa. Kulman muutokset ovat näistä huomioista huolimatta kohtuullisen lähellä antennitelinettä oikeita kulmamuuhtoksia, joten esimerkiksi alaluvussa 3.1. käsitellään keilan leveyttä näillä kulmalukemilla.

### 3.1. Sivuttaisvirheen aiheuttamat epävarmuudet

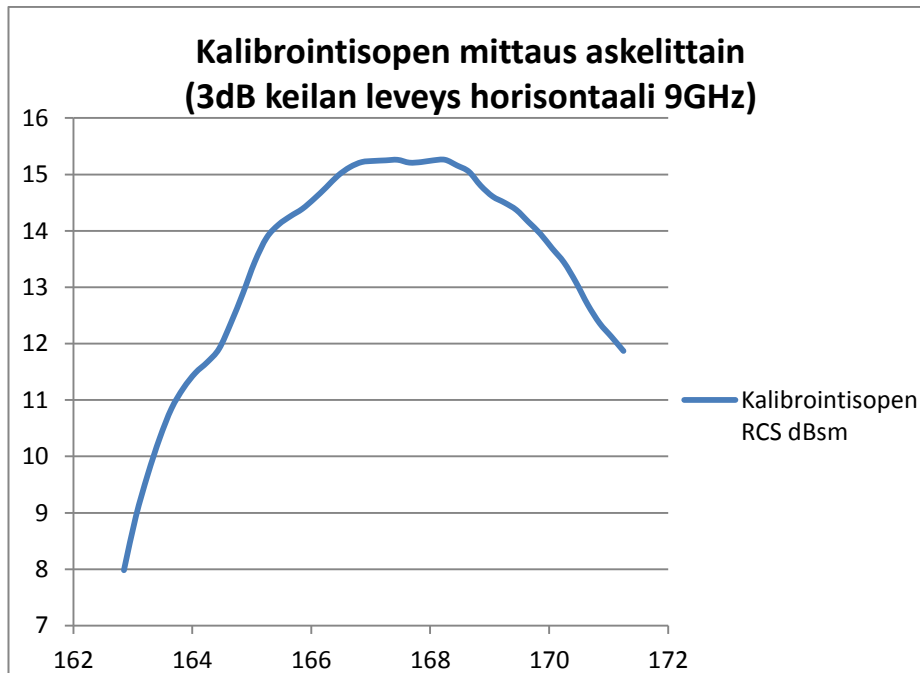
Tällä mittauksella haluttiin selvittää antennin pysty- ja sivuttaiskohdistusvirheen suuruutta sekä 3 dB keilan leveyttä eri taajuuksilla 45,6 metrin etäisyydellä. Mittauksella tarkastellaan kokeellisesti antennin muodostaman pääkeilan vahvistuksen vaimenemista, jos kohdistuksessa muodostuu virheitä horisontaalisesti ja vertikaalisesti. Samalla pyritään tuottamaan tietoa mahdollisen virheen suuruudesta, jotta vanhemmistakin kulmavirheellisistä tuloksista voitaisiin tarvittaessa kompensoida kohtuullisia mittaustuloksia. Antennin pääkeilan muoto muuttuu taajuuden muuttuessa ja muiden antennien keilat poikkeavat todennäköisesti näistä mitatuista kuvista, joten kattavan kompensointimateriaalin laatimiseksi pitäisi sama mittaus tehdä kaikille antennille vähintään ala- ja ylätaajuuksille, josta voisi arvioida virheen suuruuden lineaarisesti interpoloimalla. Tästä mittauksesta muodostettiin pääkeilan vaimenemiskuvat X- ja Ku-taajuuskaistoille, jotka ovat saman alueen antennin ylä- ja alapään taajuuksia.

Mittaus tehtiin jatkuvalla mittauksella noin 2 sekunnin askeleilla kalibrintikohteen ohi kahdella eri taajuudella: 9 GHz ja 17.25 GHz. Kaikissa mittauksissa askellus tehtiin  $0.2^\circ$  kulmalukemina. 9 GHz taajuudella antennia kuljetettiin horisontaalisesti välillä  $171.25^\circ - 162.85^\circ$  ja vertikaalisesti välillä  $10.92^\circ - 6.50^\circ$ . 17.25 GHz taajuudella antennia kuljetettiin horisontaalisesti välillä  $169.96^\circ - 163.96^\circ$  ja vertikaalisesti välillä  $11.46^\circ - 7.45^\circ$ . Mittaajan huomiona todettiin, että oikealla puolella ollut metalliaita nosti luultavasti keskiarvoherätteitä. Mittausdata esitellään taulukossa 1, jossa lasketaan kahden eri vahvistustason keilanleveydet.

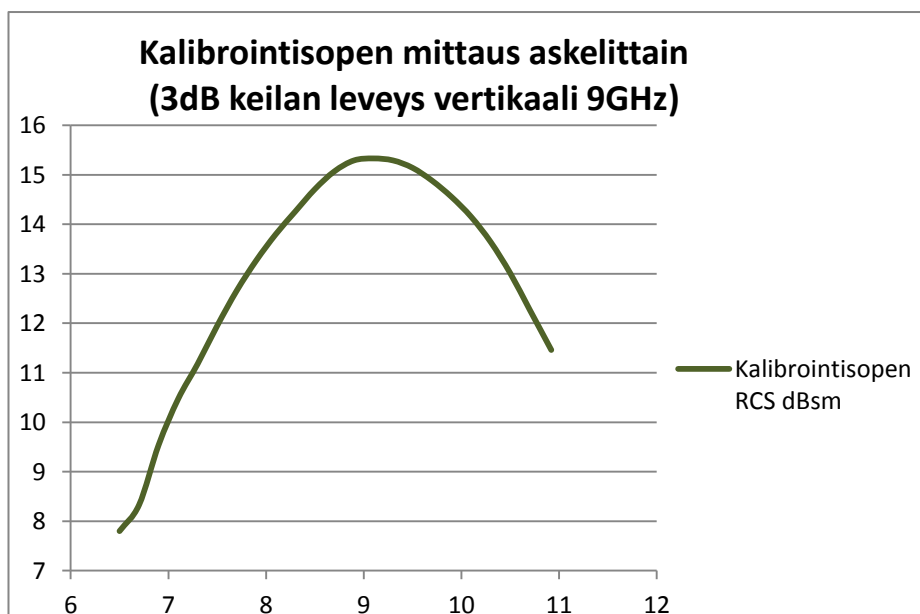
Taulukko 1 Antennikeilan leveyden laskelmat moottorin kulmalukemina

Tarkastelutaso	9 GHz		17.25 GHz	
	Horisont.	Vertik.	Horisont.	Vertik.
Huippuarvo	15,26 dB	15,33 dB	20,66 dB	20,60 dB
Huippuarvo -3dB	12,26 dB	12,33 dB	17,66 dB	17,60 dB
Vasen / yläreuna	164,60°	10,68°	168,88°	10,17°
Oikea / alareuna	170,93°	7,61°	165,07°	8,36°
Kulmalukemana -3 dB keila	6,33°	3,07°	3,81°	1,81°
Puolikas -3 dB keila	3,17°	1,54°	1,91°	0,91°
Keilan laen leveys +- 0,1 astetta	1,60°	0,40°	0,80°	0,20°
Puolikas -0,1 dB keila	0,80°	0,20°	0,40°	0,10°
Keilan laen keskikohta	167,65°	9,10°	166,96°	9,25°
3 dB:n keilan keskikohta	167,77°	9,15°	166,98°	9,26°

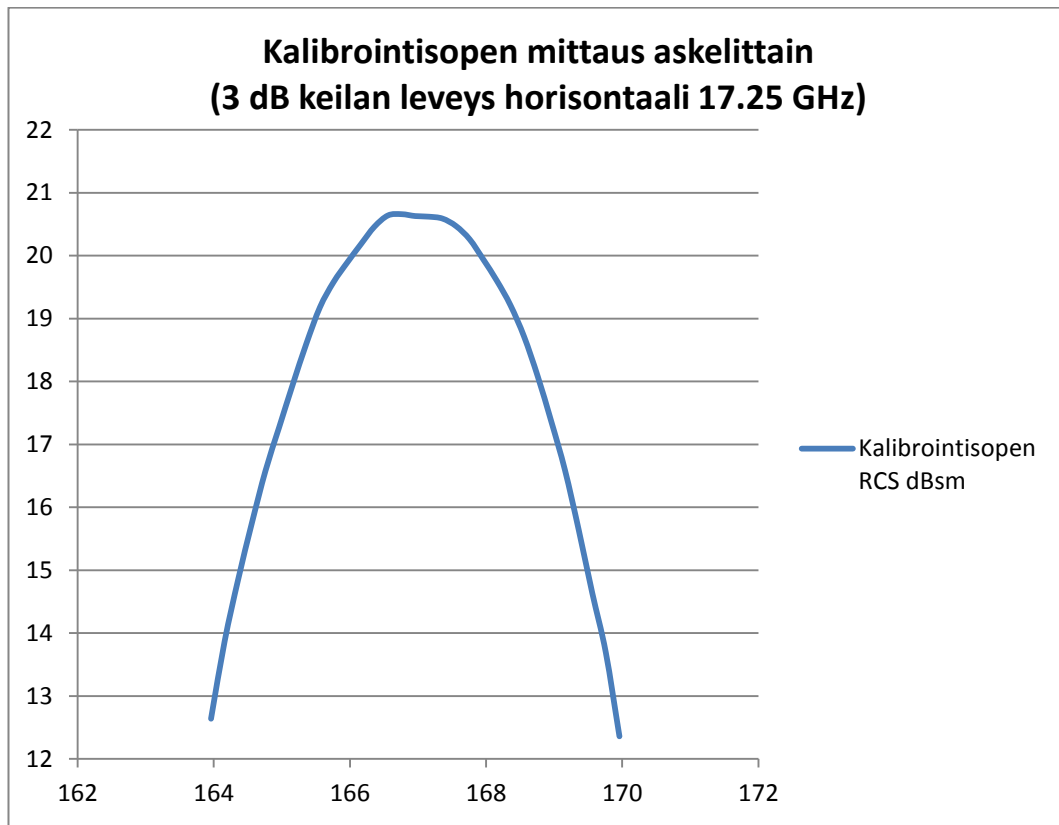
Tuloksista piirrettiin RCS-kuvaaja, josta haettiin Matlabilla 43 portaan vakiintuneiden arvojen keskiarvot. Nämä keskiarvot taulukoitiin vastaavien kameran kulmalukemien viereen ja niistä piirrettiin kuvaajat. Kuvista 7, 8, 9 ja 10 löytyy molempien taajuuksien horisontaalisten ja vertikaalisten antennikeilojen kuvaajat, joista pitäisi ilmetä antennin vahvistuksen muutos kohdistusvirheen tapauksessa. Näistä kuvaajista voi myös tarkastella eri vahvistustasojen keulanleveyksiä kameran kulmalukemina.



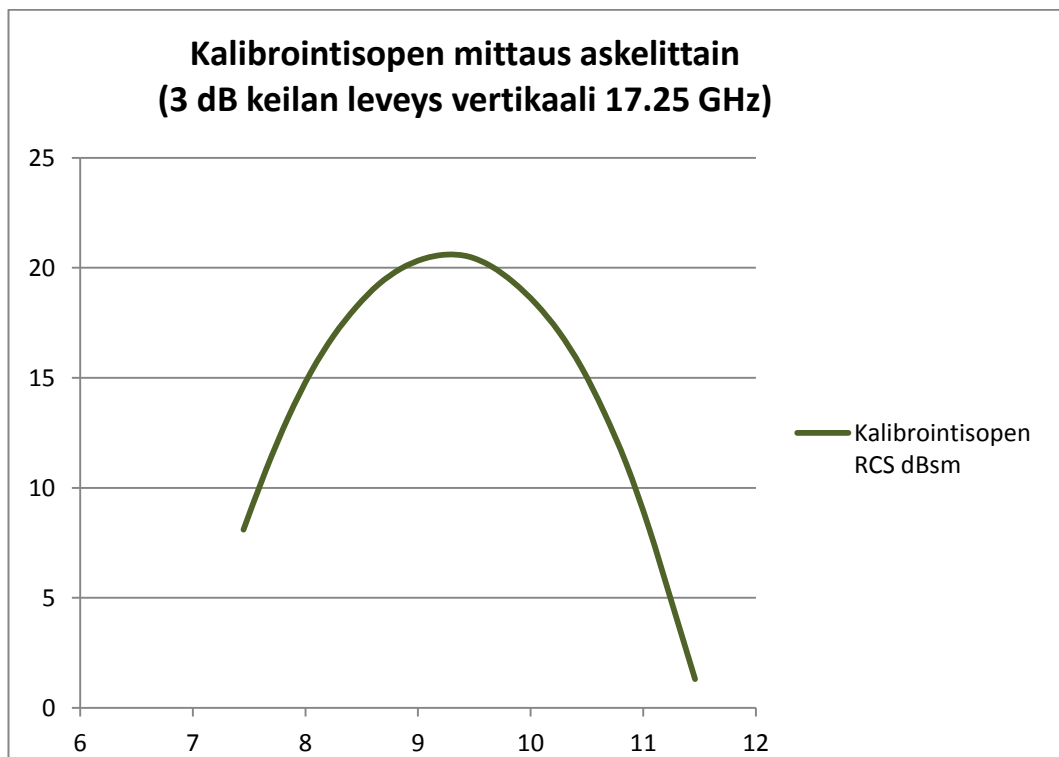
Kuva 7 Horisontaalinen 9 GHz:n keilan leveys



Kuva 8 Vertikaalinen 9 GHz:n keilan leveys



Kuva 9 Horisontaalinen 17.25 GHz:n keilan leveys

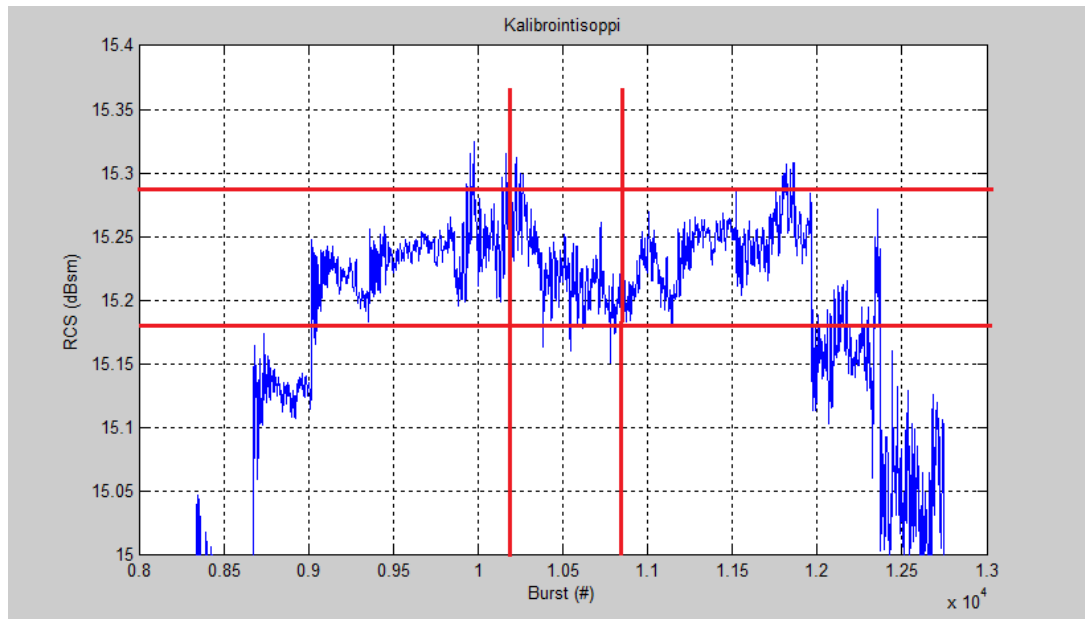


Kuva 10 Vertikaalinen 17.25 GHz:n keilan leveys

Kuvista 7, 8, 9 ja 10 voidaan huomata antennin vahvistuksen kasvu taajuuden kasvaessa. Pääkeilan muoto myös kaventuu ja jyrkkenee, jolloin 3 dB:n keilan leveys muuttuu yhä kapeammaksi. Tästä voi päätellä, että mitä suuremman taajuuden mittaukset ovat kyseessä, sitä suurempia virheitä mittaustuloksiin tulee, jos kohdistus on virheellinen. Kuvaajista voidaan myös havaita, kuinka antennin oikea kohdistus on löydettävissä molemmissa tasoissa, vaikka tässä tapauksessa ei olekaan tehty varmennukseksi vinoja pyyhkäisyjä.

Järjestelmää käyttävän tutkijan kokemuksista nousi esille mahdollinen huolimattomuusvirhe tutkan taajuuskaistaa ja antennia vaihdettaessa. Tyypillisin virhetilanne muodostuu, kun mitaaja ei muista muuttaa edellisen mittauksen kohdistusta seuraavaa mittausta varten. Tällöin virheeksi saattaa muodostua minkä tahansa kohdistusmerkkien välinen etäisyys. Käyttäjän haastattelussa ilmeni, että kohdistusmerkkien välillä saattaa olla enimmillään 133 mm, joka tarkoittaa jopa useiden metrien virhekohdistusta kalibroitikohteen etäisyydellä. Kuvista 7, 8, 9 ja 10 voidaan huomata, että mikäli kohdistus muuttuu useamman asteen, saattaa vahvistus muuttua jopa useamman desibelin verran. Saman taajuusalueen HH- ja VV-polarisaatioiden sekoittuessa aiheutuu seuraavanlaisia virheitä: S 15mm, C 70 mm, X-Ku 35 mm ja Ka 35 mm.

Tällä mittauksella voidaan tuottaa virhebudjetin average illumination -kohtaan arvio kalibroitikohteen valaisun tasaisuudesta. Kun antenni kuljetetaan kohteen ohi horisontaalisesti, voidaan huomata epätasaisuutta antennikeilan huipulla. Antennikeilan huippuarvoissa ei näyttäisi vertikaalisesti olevan havaittavia epätasaisuuksia. Kuvassa 11 esitetään Matlabilla tarkasteltu horisontaalisen pyyhkäisyn kuvaaja 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla. Kuvasta voidaan havaita, että noin 10200 ja 10850 burstin kohdalla on havaittavissa väliaikainen pudotus, joka voi johtua antennin epätasaisesta valaisusta. Valaisun huippuarvo on noin 15.29 dB ja alin arvo 15.18 dB, jolloin eroksi muodostuu 0.11 dB:n poikkeama. Tätä lukemaa voidaan käyttää virhebudjetissa epävarmuusarvona. Kuvaajassa on myös lyhyitä suurempia piikkejä, mutta ne ovat luultavasti muodostuneet antennin heilahtelusta pysäytyksen yhteydessä.

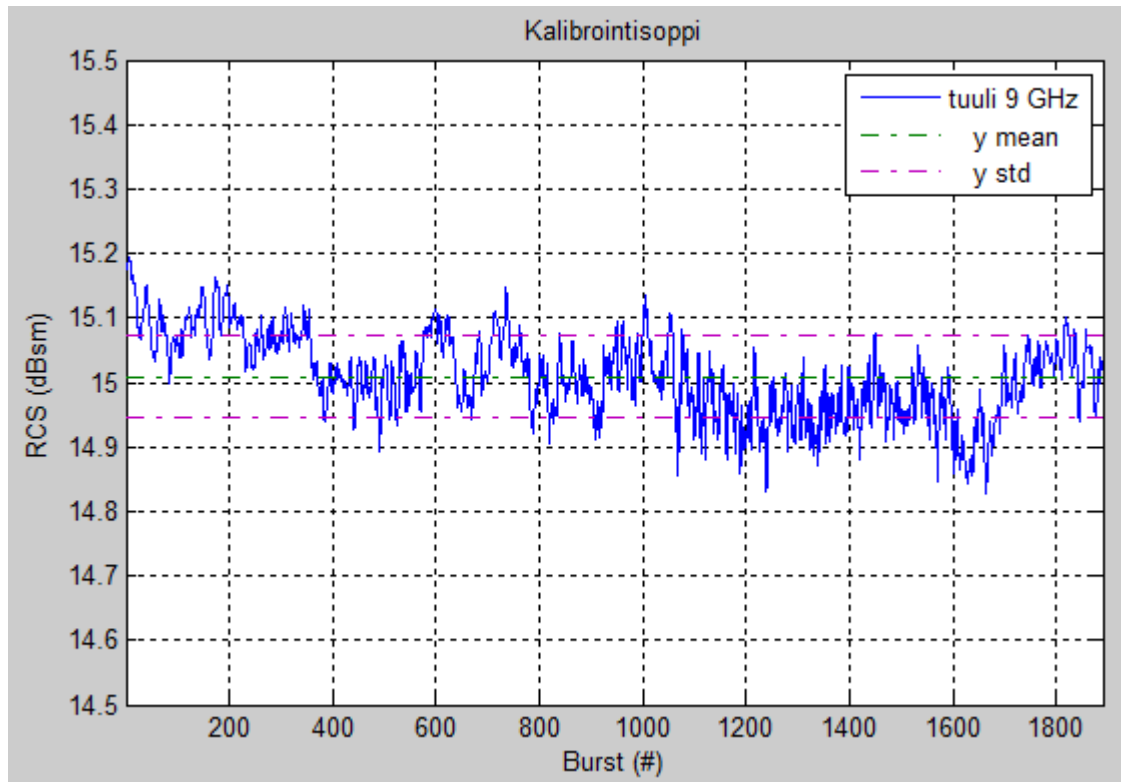


Kuva 11 Horisontaalisen 9 GHz:n pyyhkäisyn huipun RCS-kuvaaja

### 3.2. Tuulen aiheuttamat epävarmuudet

Tällä mittauksella haluttiin selvittää vaikuttaako kova tuuli kalibroinnin tarkkuuteen. Tarkkuutta tarkastellaan amplitudin lyhyt- ja pitkäjaksoista huojuntaa, jonka vaikuttavuutta tulkitaan keskihajonnan ja maksimi- ja minimiarvon erotuksen avulla. Kaksi samanlaista mittausta tehtiin kovan tuulen päivänä suhteellisen tasaisella tuulella. Molempien mittausten data näyttäisi olevan samankaltaista tällä pienellä otoksella, jossa tilastollisen merkittävyyden kriteerit eivät täyty. Mittauksen A datasta piirrettiin kuvassa 12 oleva RCS-kuvaaja, joka on otettu 40 sekunnin ajanjaksona. Kuvaajassa näkyy paljon lyhyempi- ja pidempijaksoisia tuulenpuuskia.





Kuva 12 Kovan tuulen mittauksen RCS-kuvaaja

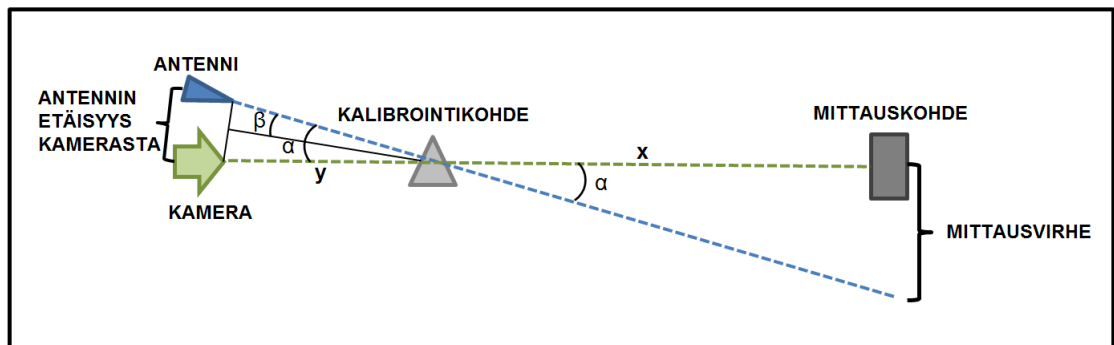
Taulukossa 2 on esitetty tuulimittausten tilastollinen tarkastelu. Keskihajonnaksi muodostui mittauksissa 0.05–0.06 dB, joka kertoo pidempijaksoisen huojunnan olevan luotettavuustarkastelulle merkittävä. Lyhytjaksoisen huojunnan maksimi- ja minimiarvot olivat sen sijaan molemmissa mittauksissa hieman alle 0.2 dB, joka on jo hyvin merkittävä ero sen sattuessa juuri kalibrointiajanhetkelle. Tämän suuruinen systemaattinen virhe haittaa mittaustarkkuutta isommillakin kohteilla, joten tuulista päivää kannattaa välttää mittauksia valmisteltaessa. Tutra tosin määrittää kalibrointimittauksesta keskiarvoistetun tehotason, joten yksittäisten lyhyiden tuulenpuuskien vaikutus kalibroinnin laatuun on täten pienempi. Kovan tuulen vaikutus kalibrointiin on silti todennäköisesti merkittävä pidempijaksoisen huojunnan sattuessa väärään ajanhetkeen.

Taulukko 2 Kovan tuulen mittaustulokset (dB)

Mittaus	A	B
Minimiarvo	14.83	14.82
Maksimiarvo	15.19	15.17
Keskiarvo	15.01	15.01
Keskihajonta	0.06	0.05
Huojuntaväli	0.37	0.35

### 3.3. Kalibrintietäisyyden eroavaisuuden aiheuttama kohdistusvirhe

Tällä alaluvulla halutaan selvittää kalibrintietäisyyden eroavaisuuden aiheuttama kohdistusvirhe, joka on havainnollistettu kuvassa 13. Tämä alaluku keskittyy analyysiin, sillä ainoat mitatut asiat ovat antennien ja kameran keskipisteiden väliset etäisyydet, mitkä on mitattu mittanauhalla. Tästä etäisyydestä ja tutkan mittaamien kohteiden etäisyyksistä analysoidaan, kuinka suuri mittausrvirhe muodostuu.



Kuva 13 Havainnekuva kohdistusvirheestä

Antennin kohdistus tehdään kameran avulla kalibrintikohteeseen, joka on 45,6 metrin etäisyydellä tutkasta. Antennin ja kameran suorat linjat kohteeseen leikkaavat kohdistuksen jälkeen kalibrintikohteen etäisyydellä ja tähän pisteeseen asetetaan kohdistusmerkki. Kun antennit kohdistetaan kohdistusmerkin avulla kääntöpöydälle 235,6 metrin etäisyydelle, ovat nämä risteävät linjat poikenneet toisistaan määrän, joka riippuu antennin etäisyydestä kameran nähden. Kaikille antennille on taulukossa 3 laskettu kohdistusvirhe sekä metreinä että asteina.

Taulukko 3 Antennin ja kameran kohdistusvirhelaskemat

Taajuusalue	S	C	X-Ku	Ka
Antennin etäisyys kamerasta (m)	1,41	0,31	0,56	1,43
Pienin mahdollinen (m)	1,39	0,29	0,54	1,41
Isoin mahdollinen (m)	1,43	0,33	0,58	1,45
Vastainen kateetti antennilla (m)	0,71	0,16	0,28	0,72
Etäisyys y (m)	45,6	45,6	45,6	45,6
Etäisyys x (m)	190,0	190,0	190,0	190,0
Kulma $\beta$ kalibrointietäisyydellä (rad)	0,015	0,003	0,006	0,016
Kulma $\alpha$ kalibrointietäisyydellä (rad)	0,031	0,007	0,012	0,031
Vastainen kateetti mittauspöydällä (m)	2,94	0,65	1,17	2,98
Kokonaisvirhe mittauspöydällä (m)	<b>5,88</b>	<b>1,29</b>	<b>2,33</b>	<b>5,96</b>
Virhe - (m)	0,08	0,08	0,08	0,08
Virhe + (m)	0,08	0,08	0,08	0,08
Kokonaisvirhe asteina (°)	1,77	0,39	0,70	1,80
Virhe - (°)	0,03	0,03	0,03	0,03
Virhe + (°)	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
Antennin keilan oikea paikka	Vas. Alhaalla	Alhaalla	Ylhäällä	Vas. Ylhäällä

Laskelmista selviää, että virhe on suurimmillaan jopa noin kuusi metriä Ka- ja S-alueen antenneilla tehtävillä mittauksilla. Kulmalukemana virheiden suuruus on noin 1,8 astetta, joka on kohtuullisen suuri varsinkin antennien pystytason keilanleveyteen verrattuna. Alaluvussa 3.1 tehdyistä keilanleveyden mittauksista voidaan todeta, että X-alueella tehdyssä mittauksessa 3 dB:n vaimeneminen tapahtuu pystykeilan osalta vain 0,91 asteen poikkeutuksella. Antennin oikea keila sijoittuu X-alueella kuvitellun kohdan yläpuolelle, joten 0.70° kohdistusvirhe on lähellä 3 dB:n keilan leveyttä muodostaen kaikissa mittauksissa vaikuttavan merkittävän virheen. Ohjekirjan antamilla arvoilla X-alueen 3 dB:n vaimeneminen pitäisi olla pystytasossa 2.5° ja vaakatasossa 5° sekä S-alueella molemmille tasoille 5° [23, s. 55-56].

Kohdistusvirhe aiheuttaa siis todennäköisesti useiden desibelien virheitä nykyisellä kalibrointiasetelmalla. Virheen voisi poistaa tekemällä kalibroinnin samalla etäisyydellä mitattavien kohteiden kanssa, joten kalibrointiasetelmaa voisi helposti kehittää tällä tavalla. Tämä virhe on suurin yksittäinen virhebudjetin ulkopuolinen virhe, jota ei nykyisessä kalibrointiasetelmassa voida huolellisuudella poistaa. Tämä virhe on käytännössä poikkeuksetta vaikuttanut saman verran samoilla taajuusalueilla kaikkiin mittauksiin, joita on tehty nykyisellä kalibrointiasetelmalla. Periaatteessa aiempia tuloksia voi korjata sekä taulukoiden 1 ja 3 että ohjekirjan ja lisämittausten avulla. Mikäli tätä virhettä ei jatkossa korjata, tuottaa nykyinen toimintatapa jatkossakin suuren systemaattisen virheen tuloksiin.

### 3.4. Monitie-etenemisen aiheuttamat epävarmuudet

Tällä mittauksella haluttiin selvittää tutkan ja mitattavan kohteen korkeuden variaatioina monitie-etenemiselle herkkiä kombinaatioita, eli säteilyn kulkeutumista muita reittejä kuin suorinta mahdollista. Se ei kuitenkaan tuottanut haluttua dataa mittauksissa paikallaan olleen kohteen vuoksi. Mittaus tehtiin iteroimalla tutkan ja kohteen korkeutta, minkä muodostamista HRR-kuvista pyrittiin havainnoimaan monitie-etenemisen aiheuttamia heijastumia. Tutkan korkeutta vaihdeltiin arvoilla: 5 m, 9 m, 14 m, 19 m, 24 m ja 28 m ja kohteen korkeutta arvoilla: 0 m, 1 m ja 2 m. Mittaus tehtiin chirp-taajuuspyyhkäisyillä sekä 4.4–5.9 GHz:n että 8.2–10.7 GHz:n taajuuksilla.

Tämän mittauksen HRR-kuvista on hyvin vaikea arvioida monitie-etenemisen aiheuttamia herätteitä, sillä ne eivät paikallaan olevalla pöydällä juuri erotu maassa olevien kivien tai muun välkkeen seasta. Tätä asiaa varten tulisi kehittää uusi menetelmä, jossa tarkasteltaisiin kääntöpöydällä liikkuvaa korkean herätteen kohdetta. Tämä helpottaisi monitie-etenemisen aiheuttamien heijasteiden löytämistä kohteen ja heijasteen liikkeessä samassa vaiheessa mittauksen aikana. Tämä mittaus on raportoitu lähinnä jatkotutkimuksen tarpeen vuoksi.

### 3.5. Kiinnityksen aiheuttamat epävarmuudet

Tällä alaluvulla haluttiin selvittää erilaisia vaihtoehtoja kiinnitykselle sekä tukimenetelmille suppealla kirjallisuuskatsauksella ja analyysillä. Vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia tarkastellaan ylimääräisen välkkeen vähentämisen kannalta. Tässä alaluvussa ei oteta kantaa mittauskohteen ja tuen välisen vuorovaikutuksen aiheuttamaan epävarmuuteen muuten, kuin olettamalla, että epävarmuus lisääntyy kohteen ja tuen kontaktipinnan kasvaessa. Tällä analyysillä pyritään vastaamaan kysymykseen, miten voidaan minimoida kohteiden kiinnityksen ja tukemisen aiheuttamat virheet.

Mittausalueen kääntöpöydän rakenteiden tulee kestää suuria kuormia, minkä vuoksi rakenteissa on käytössä vahvasta teräksestä tehtyjä osia, jotka aiheuttavat luonnostaan suuria herätteitä. Niiden tulee kestää sääolosuhteiden, mittauspöydän pyörimisen ja kallistamisen aiheuttamat rasitukset, joten kääntöpöydän materiaalia ei voi järkevästi vaihtaa. Kääntöpöydän välkettä on kuitenkin pyritty minimoimaan asettamalla RAM-levyjä saranoiden eteen ja peittämällä loivilla tulpilla pöydän pinnassa olevat kiinnitysreiät, jotta ne eivät muodostaisi pieniä tutkasoppeja pöydän kallistuessa. Kääntöpöydän voisi maalata RAM-maalilla, mutta raskaiden kohteiden mittauksen yhteydessä täytyisi huomioda, että maaliin muodostuisi ajan kuluessa suuria nirhaumia ja reikiä, jotka tuottaisivat dynaamisempaa välkettä. Mitattavat kappaleet kiinnitetään mittauspöytään isoilla pulteilla, joiden herätteet saattavat olla pienisherätteisten kohteiden tasoa. Näiden pulttien maalaamista RAM-maalilla voidaan suositella, sillä ne tuottavat isoimmat herätteet Lakialassa käytetyistä kiinnikkeistä.

Jotta mittaustulokset olisivat mahdollisimman puhtaat, tulisi kohde saada mahdollisimman etäälle kaikesta välkettä aiheuttavasta materiaalista. Kohde tulisi siis saada tutkalle näyttämään ilmassa leijuvalta kappaleelta. Tästä tavoitteesta lähdetään jokaiselle kohteelle yleensä rakentamaan omaa mahdollisimman kevyttä tukiratkaisua, joka kuitenkin kestää kohteen massan asettamat vaatimukset riittävällä tasolla. Näin ollen kaikki tukiratkaisut ovat aina kompromisseja optimaalisten mittaolosuhteiden ja turvallisten sekä edullisten tukiratkaisujen väliltä. Tämän mahdollistamiseksi kirjallisuudessa luetellaan erilaisia käytössä olevia keinoja mittaustulosten tukemiseksi. Knott et al. listaa mahdollisiksi keinoiksi:

- Matalatiheysisestä muovivaahdosta tehdyt pylvää
- Kestävät ei-metalliset kiinnityslinjat
- Metalliset tolpat, jotka on päällystetty absorboivalla materiaalilla
- Ontot kovasta muovista tehdyt pylvää.

Listan ensimmäinen tukiratkaisu on yleisimmin käytetty, ja listan viimeinen on harvinaisin. Lakialassa on käytetty pääasiassa ylintä tukimenetelmää. [10, s. 465]

Matalatiheyksistä muovivaahtoa on olemassa useita erilaisia tyyppisiä kaupallisilta valmistajilta. Muovivaahto antaa tutkaherätteitä kahdella mekanismilla. Ensimmäisenä vastaan tulee muovivaahdon pintakerros, joka heijastaa tiheydensä vuoksi enemmän kuin itse vaahdomassa. Tämän voi huomioida muotoilemalla pylvään reunojen kallistusta siten, ettei tutkaa kohti muodostu suoraa pintaa, vaan muotoilu heijastaa tutkasäteilyn muihin suuntiin. Vastaavan suuruinen heijaste tulee myös muovivaahdon takapinnasta, jonka suuruus on lähes yhtä iso kuin etupinnalla, koska itse vaahto on radioaallolle lähes tyhjää ilmaa vastaava väliaine. Toinen mekanismi on itse vaahdomassalla, jonka kennorakenteen miljoonat kulmat toimivat erittäin pieninä heijastavina säteilijöinä, minkä merkittävyys riippuu muovivaahdon perusraaka-aineesta ja tiheydestä. [10, s. 466]

Polystyreeni on yleisin rakennusteollisuuden käyttämä eriste, josta on tehty monia kaupallisia tuotteita erilaisiin tarpeisiin. Polystyreenin huono puoli on, ettei sitä saa kaupasta yhtenä isona kappaleena, vaan kaupalliset tuotteet valmistetaan helposti kuljetettaviksi ja asennettaviksi polystyreenilevyiksi. Mikäli siis halutaan käyttää kaupallisesti valmiina olevia tuotteita, täytyy tarvittava tukirakenne liimata useista levyistä. Tällaisessa tapauksessa liima saattaisi myös aiheuttaa heijasteita, joten hyvä liima eristelevyjen kiinnitykselle on polyuretaanipursote, jonka tiheys on polystyreeniäkin pienempi ja se reagoi tutkasäteilylle samantapaisesti. Tukirakenne kannattaa tehdä vaakatasossa toisiinsa yhdistetyistä levyistä, jolloin isoimmat tiiviit pinnat eivät ole kohtisuorassa tutka-antennin kohden, vaan ne heijastavat säteilyä johonkin toiseen suuntaan. Toinen vaihtoehto tukirakenteelle olisi polyuretaani, josta voisi muotilla tehdä haluamansa muotoisen tukirakenteen, jonka sisällä ei olisi heijastavia tiiviimpiä pintoja. Sen pienempi tiheys, ja samalla kantavuus, ei tosin välttämättä riitä isojen tutkimuskohteiden kohdalla. Lisäksi pursotettavan massan hankkiminen ja muotin valmistus voi olla haasteellista Lakialan pienillä henkilöstöresursseilla. [10, s. 466]

Tukirakenteen muodolla on myös väliä. Täysin pyöreästä tukirakenteesta tutkalle takaisin tuleva heijaste pysyy suhteellisen vakiona jokaiselta kulmalta. Tämä voisi olla hyvä ratkaisu polyuretaanipylvään tapauksessa, jossa pyritään kartion muotoon vähentämällä tutka-antennille kohtisuoria pintoja. Boeingin käyttämä tukirakenne on timantin muotoinen, jolloin tukirakenteen pinnasta tulee heijasteita vain neljään hyvin kapeaan sektoriin, jotka voi oikein asemoimalla erottaa pienen herätteen RCS-kuvasta. Tällä rakenteella tuen pienin heijaste voidaan optimoida mitattavan kappaleen pienimmän heijasteen kohtaan, jolloin erottelukyky pysyy parhaana. [10, s. 470]

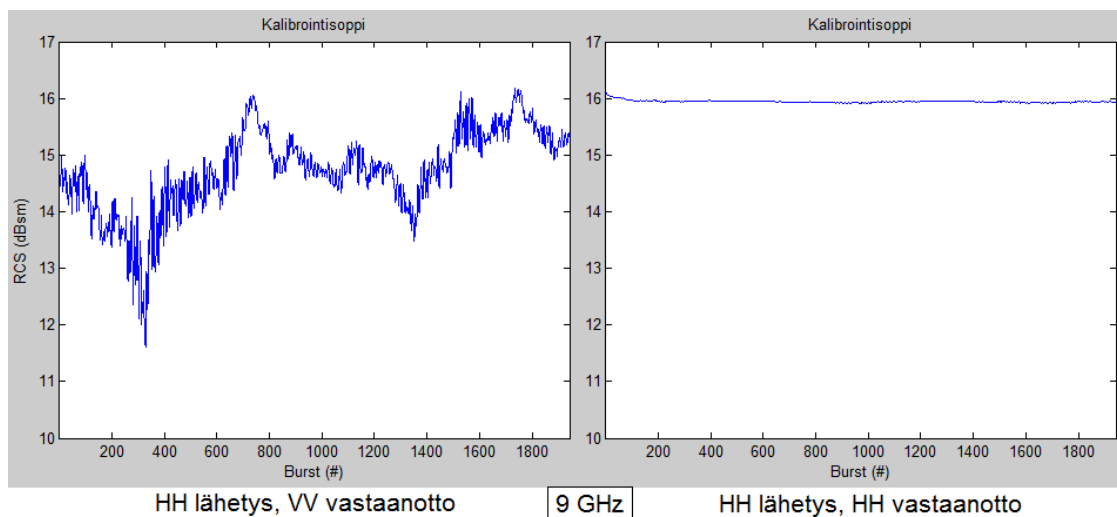
On myös olemassa mahdollisuus kiinnittää kappale pelkästään kiinnitysliinoilla, jolloin tätä tarkoitusta varten pitäisi rakentaa kaksi tornia kantamaan pääkannatusliina, jonka varaan kohde ripustetaan. Tornit pitäisi sijoittaa pääkeilan ja etäisyysportin ulkopuolelle, jotta niiden aiheuttama välke poistuu tuloksista. Pääliinan varaan laitetaan tasaisen pyörittämisen mahdollistava kiinnike ja kappale sidotaan kääntöpöytään tiukasti. Tämä menetelmä vaatii erittäin vakaat olosuhteet ja kärsivällisyyttä tutkijoilta, mutta välkkeen määrä on menetelmien pienimmästä päästä. Mittauksia varten tulee valita kiinnitysliinoja, jotka eivät sisällä metallia ja ne täytyy kiinnittää mahdollisimman kauas kohteesta riittävän erottelukyvyn aikaansaamiseksi. [10, s. 471]

Häivemateriaalilla päällystetyt metallitolpat ovat uusimmasta päästä menetelmiä. Tolpat ovat muotoiltu timantin muotoisiksi ja suunnattu siten, että niistä tulee mahdollisimman pienet herätteet. Näitä on esiintynyt kirjallisuudessa enimmäkseen sisäradoilla, mutta tällaista vinoa häivetolppaa voidaan suositella myös Lakialan seuraavaa kalibrointiasetelmaa varten. [10, s. 470]

### 3.6. Ristipolarisaation aiheuttamat epävarmuudet

Tällä mittauksella haluttiin selvittää ristipolarisaatioksi kääntyvän säteilyn tasaisuus, sekä kuinka suuri osa säteilyn polarisaatiosta kääntyy tutkasopessa. Mittauskohteena käytettiin Lakialan kalibrointikohdetta, koska kolmesta kolmiolevystä tehty tutkasoppi kääntää puhtaan HH-polarisaation vain osittain VV-polarisaatioksi. Tutkasopen polarisaation kääntöominaisuudet muuttuvat merkittävästi tutkavalaisun muuttuessa, koska vaihe-erot ja heijastukset saattavat kumota kääntynyttä polarisaatiota paljonkin.

Mittaus tehtiin kalibroimalla ensin molemmat kanavat, minkä jälkeen kalibrointisoppea mitattiin HH-polarisaatiolla. Saadusta datasta analysoitiin VV-polarisaatioksi muuttuneen energian määrä, josta tehdään johtopäätökset. Kuvasta 14 havaitaan, että lähetettäessä HH-polarisaatiolla vaihtelee vastaanotettava VV-polarisaatio yli 4 dB HH-polarisaation tason alapuolelle. Näin rajut erot voivat johtua tutkasopen tukena käytetyn puun aiheuttamista ilmiöistä. Pystysuuntaisen puun herätteet VV-polarisaatiolla saattavat olla kertaluokaltaan yli satakertaiset HH-polarisaatioon verrattuna. Tästä esimerkkinä tarkasteltiin myös kalibrointituen kohinatason mittausta, joka tehtiin samalla tavalla, kuin tämä mittaus, mutta tutkasoppi oli otettu pois. HH-polarisaatiolla vastaanotetut tutkaherätteet olivat puun kohdalla hieman alle -4 dB, mutta VV-polarisaatiota tarkasteltaessa herätteet vaihtelevat 13-14 dB:n välillä samassa mittauksessa. Tämän vuoksi kalibrointikohteen tuen ongelmat nousevat esiin erityisesti tämän mittauksen tarkastelun yhteydessä.



Kuva 14 Ristipolarisaatiokanavan RCS-kuvaaja

Isommat erot VV-polarisaation muutoksessa saattavat johtua tutkasopen valaisun muuttumisesta pystysuuntaisen heilunnan vuoksi, koska mittausalueella on paljon enemmän VV-polarisaatiolle näkyviä kohteita kuin HH-polarisaatiolle näkyviä kohteita. Herätetasot saattavat siis vaihdella eri kohteiden vaikuttaessa heiluvaan antennikeilaan eri suuruisilla komponenteilla. Näin ollen tutkasopen ja tuen yhteisvaikutukset ja vaihe-erot saattavat tässä tapauksessa aiheuttaa merkittäviä ongelmia VV-polarisaation tulosten luotettavuudelle niiden vaihdellessa jo pienelläkin tuulella paljon.

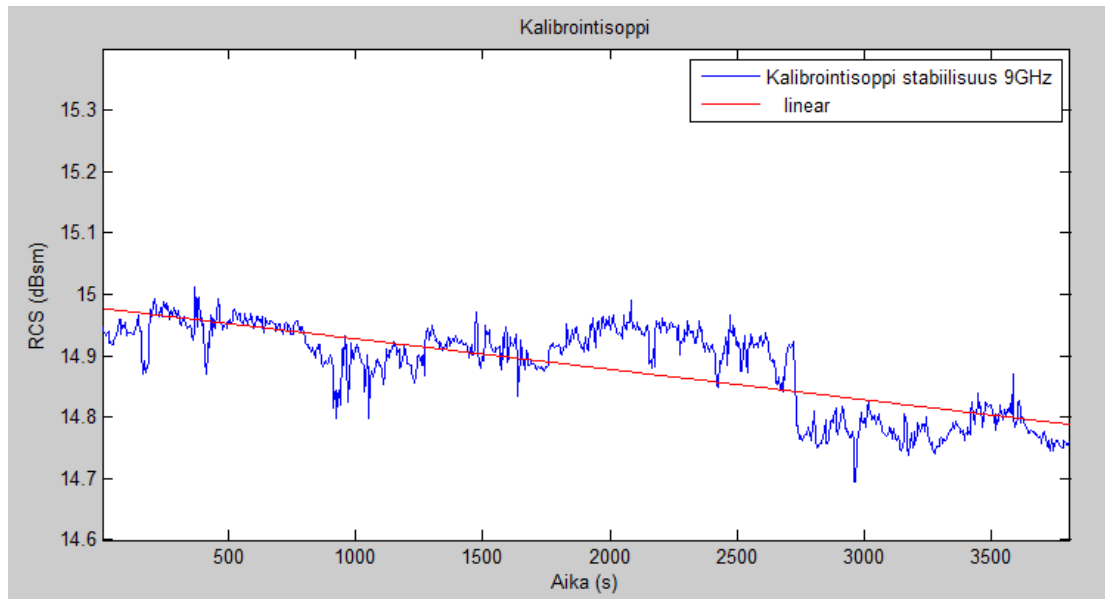


Mittauksen kesto oli 81 sekuntia, jolloin pienempi huojunta kuvassa on luultavasti pienen tuulen aiheuttamaa antennin pystytason heiluntaa. Heilunta aiheutuu antennien pystytason kiinnityksestä, joka on selkeästi jäänyt liian kevyeksi rakenteeksi tuulisella säällä tehtäviä mittauksia ajatellen. Edellisessä pystykiskon uusinnassa tehtiin vaakataso suuntaista heiluntaa merkittävästi pienemmäksi. Seuraavassa päivityksessä suositellaan tämän rakenteen parantamista, koska VV-polarisaation arvot vaihtelevat pienelläkin tuulella hyvin paljon. Vertailevaa tutkimusta tehtiin vastaavalla analyysimenetelmällä kovan tuulen mittauksista, joissa VV-polarisaation herätetasot vaihtelivat jopa 20 dB verran. Tämä vahvistaa oletusta pystytason kiinnitysten heikkoudesta, ja sen aiheuttamasta huojunnasta VV-polarisaation herätetasossa.

### 3.7. Stabiilisuustesti

Tällä mittauksella haluttiin selvittää pysyykö Tutran mittaustulos vakaana ylipitkässä mittauksessa ja ilmaantuuko tänä aikana odottamattomia virheitä. Tämän mittauksen perusteella määritetään virhebudjetin 4. testikohteeseen epävarmuusarvio. Mittaus suoritetaan hieman yli tunnin yhtäjaksoisena mittauksena 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla pienellä 1 kHz:n PRF:llä, jotta tiedoston koko ei kasva liian suureksi. Alkuperäinen hypoteesi oli, että tutka on hyvin vakaa ja heräte ei muutu pitkänkään mittauksen aikana.

Mittausajankohdaksi valittiin mahdollisimman pienen lämpötilamuutoksen aika keskipäivän jälkeen, jotta lämpötilan muutos ei aiheuttaisi mittaukseen suurta vääristymää. Tästä huolimatta voidaan näin pitkän mittauksen kohdalla osa muutoksesta todeta lämpötilan vaihtelun aiheuttamaksi. Mittauksia ulkoilmassa tehtäessä ei olosuhteita voida ikinä vakioida täysin, vaikka tässä mittauksessa olosuhteiden vaikutus onkin pyritty minimoimaan. Suhteellisen vakioista olosuhteista ja tarkasta tutkasta huolimatta 64 minuutin mittauksen aikana havaittiin selvä trendi alaspäin. Tuloksista piirrettiin kuvassa 15 näkyvä keskiarvoistettu lineaarinen RCS-kuvaaja. Kuvaajan kulmakertoimelle laskettiin kolme taulukossa 4 näkyvää arvoa. Tunneliksi muutettuna tutkan stabiilisuuden kulmakerroin on noin -0.18 dB/h.



Kuva 15 Stabiilisuusmittauksen RCS-kuvaaja

Taulukko 4 Stabiilisuustestin kuvaajan kulmakerroin

$y = p1 \cdot x + p2$	
<b>p1 (s)</b>	-0,0000497 dB/s
<b>p1 (h)</b>	-0,179 dB/h
<b>p1 (½h)</b>	-0,089 dB/30min
<b>p2</b>	14,98 dB

Jos arvoa pyöristää vielä enemmän, saadaan Drift:n osalta isoimmaksi epävarmuusarvoksi -0.2 dB/h, joten jos virhetarkastelua tehdään puolen tunnin mittausta vaativasta kohteesta, tulee sen virhebudjettiin laittaa 0.1 dB:n epävarmuusarvio. Useimmiten kalibrointimittaukset kestävät huomattavasti vähemmän aikaa, jolloin kalibroinnin epävarmuusarvosta muodostuu reilusti alle merkityksellisyyden rajana pidetyn 0.01 dB:n verran.

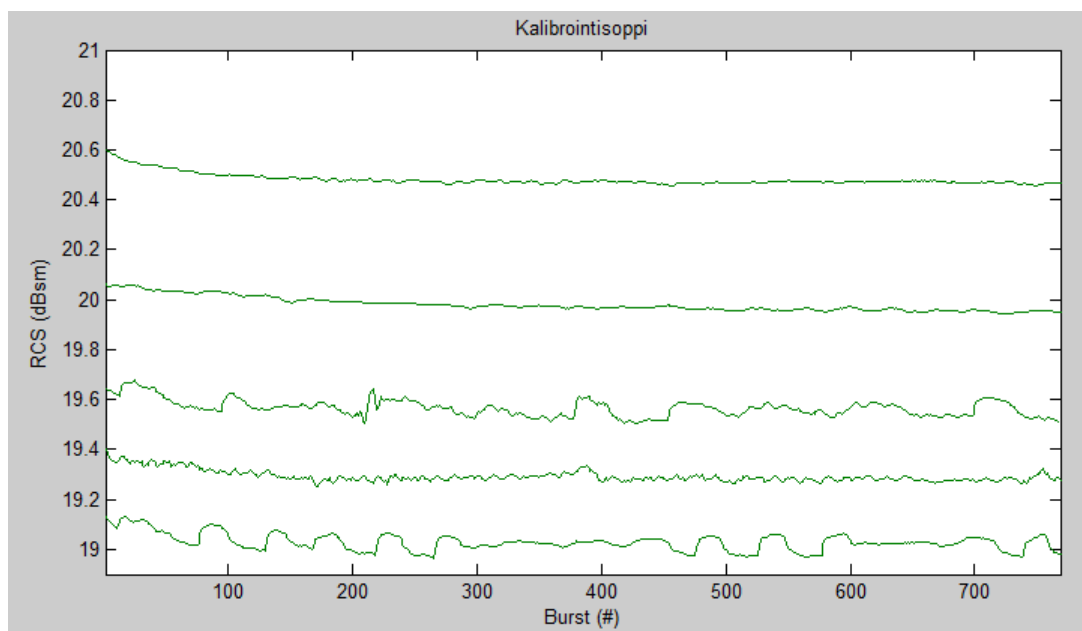
### 3.8. Lämpötilan muutoksen aiheuttamat epävarmuudet

Tällä mittauksella haluttiin selvittää, kuinka suuren virheen lämpötilan muutos aiheuttaa eri mittausten välillä ilman kalibrointia. Tämän mittauksen tarkoituksena on kuvata säännöllisen ja riittävän tiheän kalibroinnin tärkeys. Mittaukset tehtiin kolmella eri taajuudella, jotta saadaan selvitettyä, onko muutos suurempi jollakin toisella taajuudella. Mittaus tehdään mittaamalla kalibrointikohdetta tunnin välein ympäristön lämpötilavaihtelun ollessa suurta. Ennen ensimmäistä mittausta tutka kalibroidaan normaalisti.

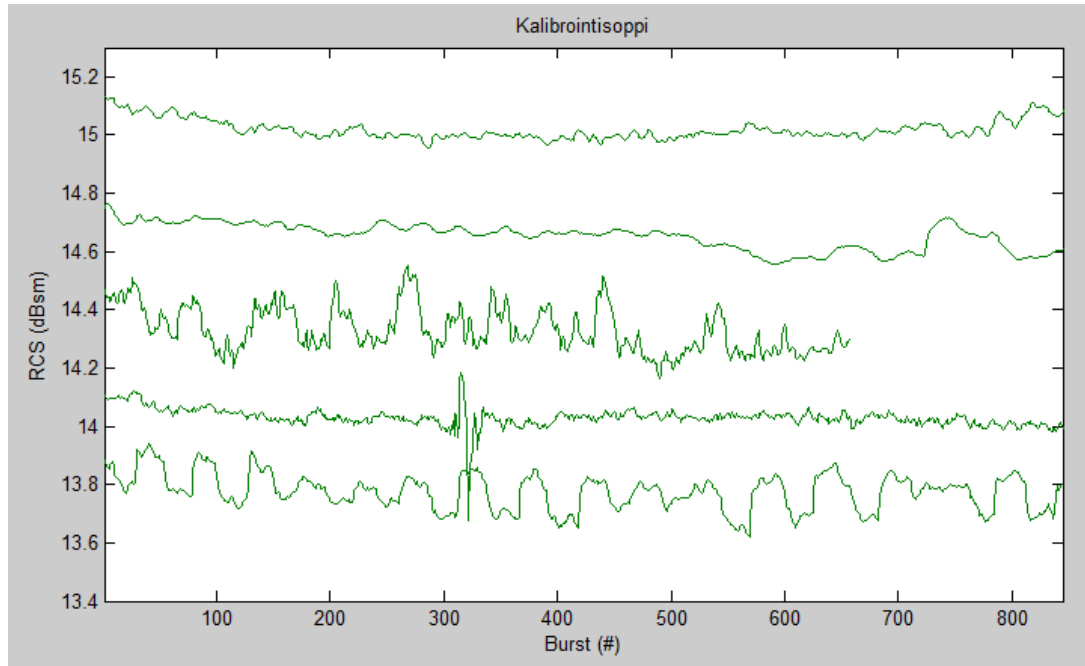
Tämä mittaus on lähellä Driftin tarkastelua, mutta sillä haetaan äärimmäisiä arvoja helpottamaan lämpötilan nopeiden muutosten vaikutuksen arviointia. Taulukkoon 5 on koottu mittauskellonajat, lämpötilat ja mitatut tutkaherätteet. Mittaukset aloitettiin aamulla ja viimeiset niistä tehtiin iltapäivän puolella. Ulkoilman lämpötila oli tällä välin noussut noin kuusi astetta, joka voisi kuumana kesäpäivänä tai kylmänä pakkaspäivänä olla vieläkin suurempi muutos lyhyemmässä ajassa. Näistä mittauksista voi muodostaa arvioita virheen suuruudesta, jos mitausten väleissä ei ehdi tekemään kalibrointia tai jos kalibroinnin tekeminen unohdetaan. Eri taajuuksilla tehdyissä mittauksissa vastaanotetut herätteet pienenevät samassa suhteessa muutoksen vaihdella 0,25-0,51 dB:n välillä tunnin välein tehdyissä mittauksissa. Kuvista 16, 17 ja 18 näkee lämpötilan myötä pienentyneiden herätetasojen muutoksen.

Taulukko 5 Lämpötilavirheet (dB)

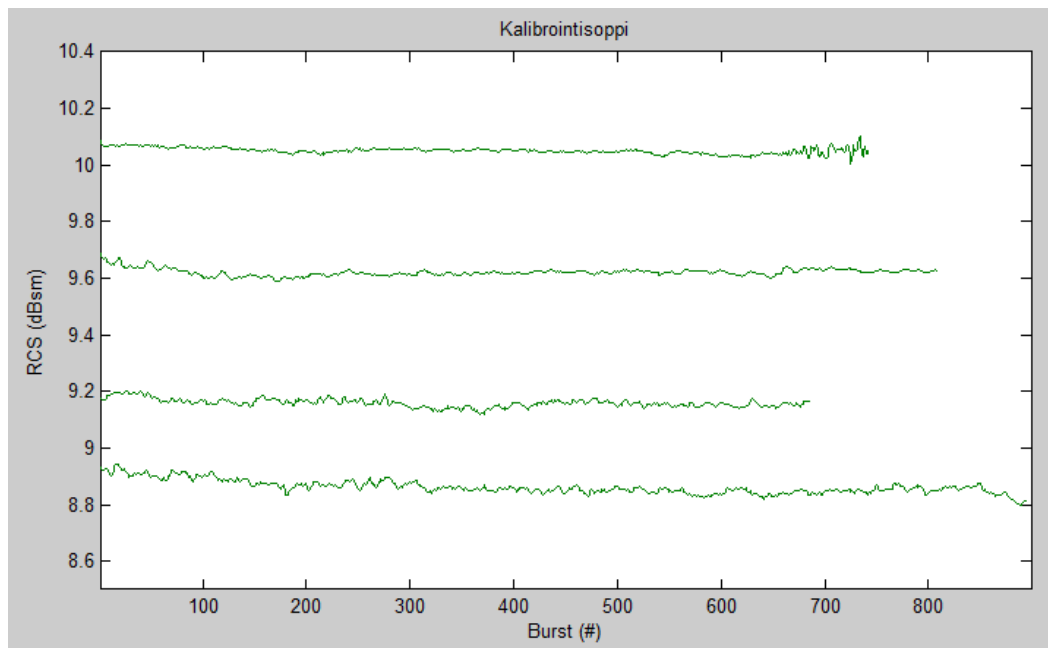
Kellon aika	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00
Lämpötila	6 °C	7 °C	9 °C	10 °C	12 °C
17 GHz	20,48	19,97	19,57	19,29	19,03
<i>Muutos</i>		0,51	0,40	0,28	0,26
9 GHz	15,02	14,66	14,33	14,03	13,78
<i>Muutos</i>		0,36	0,33	0,30	0,25
5 GHz	10,05	9,62	9,16	8,86	
<i>Muutos</i>		0,43	0,46	0,30	



Kuva 16 Lämpötilan vaikutus kalibroimattomaan 17 GHz:n mittaukseen



Kuva 17 Lämpötilan vaikutus kalibroimattomaan 9 GHz:n mittaukseen



Kuva 18 Lämpötilan vaikutus kalibroimattomaan 5 GHz:n mittaukseen

### 3.9. Kaukokenttäehdon täytyminen

Tällä alaluvulla halutaan selvittää täyttääkö kalibrointiasetelma yleisen kaukokenttäehdon 9 GHz:n taajuudella. Analyysissä käytetään yleistä kaukokenttäehtoa määrittämään lähikentän raja-arvoja, koska työn laajuus ei mahdollista tässä tutkimuksessa moniselitteisempien analyysimetodien käyttämistä. Säteilyaallon tarkempi analyysi suhteutettuna mitattavan kohteen kokoon on hyvin tutkittu [24] ja sitä suositellaan tarkemmin tehtäväksi Lakialan avoimelle radalle.

NISTIR:n virhebudjetissa käsitellään ensimmäisessä ja kahdeksannessa kohdassa tasoallon tasaisuutta mitattavan kohteen tilavuudessa. Kun tarkastellaan äärettömyyteen etenevää aaltoa, se lähestyy täysin suoraa tasoaltoa ääretöntä etäisyyttä lähestyttäessä. Eli mitä lähempänä antennia havaintasija on sitä pyöreämmältä aalto vielä näyttää. Jotta antennin säteilemän kentän ominaisuudet olisivat muodostuneet lähelle tasoaltoa, tulee kaukokenttäehdon täytyä mitattavan kohteen tilavuudessa.

Kaukokenttäehdolle on olemassa useita erilaisia kaavoja. Yleinen kaukokenttäehto on peukalosääntö etäisyydestä suhteessa taajuuteen, jossa edellytetään, että vaihe-erot ovat korkeintaan  $\pi/8$  rad ( $22.5^\circ$ ) [10, s. 460]. Kaukokentän täyttymiseen vaikuttaa myös mitattavan kohteen suuruus, mutta tässä kaavassa sitä ei huomioida. Vankka toteaa yleisestä kaukokenttäehdosta seuraavaa: ”Kaukokentän alueella säteilyominaisuudet eivät juuri riipu etäisyydestä ja kenttä pienenee kääntäen verrannollisesti etäisyyteen. Yleensä lähi- ja kaukokentän rajana pidetään etäisyyttä  $r = 2 D^2 / \lambda$ , jossa D on antennin suurin mitta säteilysuuntaa vastaan kohtisuorassa tasossa.” [25, s. 310]

Tarkastellaan X-alueen antennia HH-polarisaatiolla, jonka  $D = 0.48$  m ja  $\lambda = 0.033\dots$  m. Arvoksi kaukokentälle saadaan  $r \approx 13.8$  m, joka on yli kolme kertaa pienempi etäisyys kuin kalibrointipuun etäisyys. Tästä voidaan arvioida, että kaukokenttäehto täyttyy tällä antennin, taajuuden, polarisaation ja kohteen yhdistelmällä selkeästi. Ongelmia saattaa nykyisellä kalibrointiasetelmalla muodostua pienimpien taajuuksien antennilla, jossa ero rajaetäisyyteen ei ole yhtä iso kuin X-alueella. Tämän analyysin perusteella voidaan myös todeta, että kalibrointiasetelma olisi selkeämmin kaukokentässä kaikilla taajuuksilla kääntöpöydän etäisyydellä.

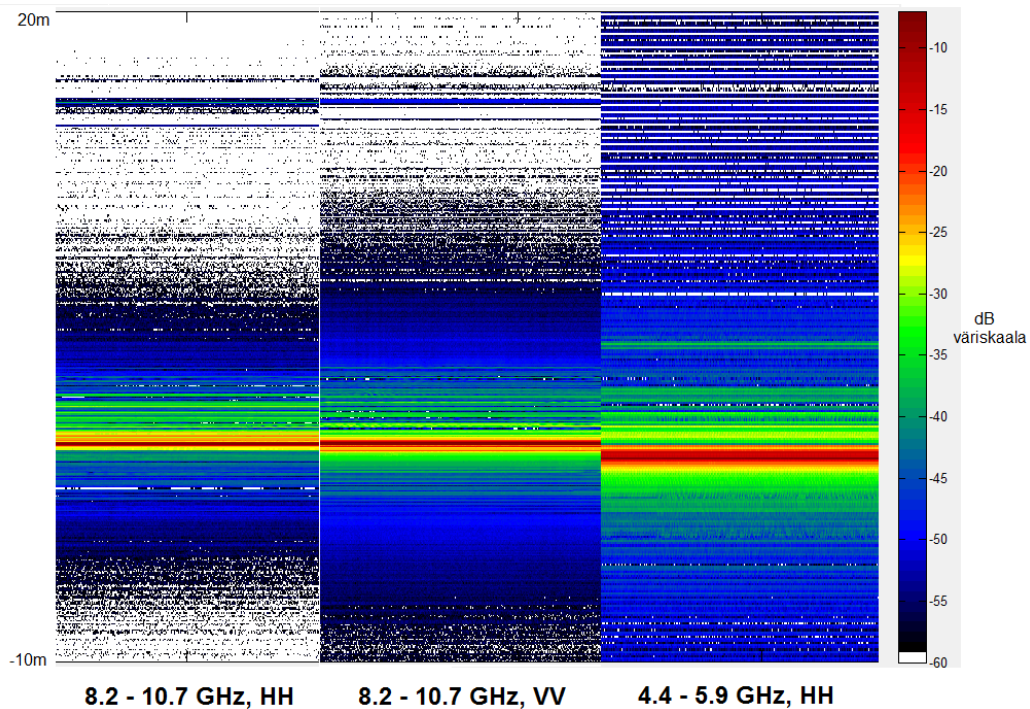
### 3.10. Kohinatasot kalibroinnissa

Tällä mittauksella haluttiin selvittää, kuinka suuri kohinataso pelkästä kalibroitituesta ympäristöineen tulee. Mittausta varten kalibroitinsoppi poistettiin tuestaan, ja kalibroitintuetta mitattiin eri polarisaatioilla, askelluksilla ja taajuuksilla. Mittauksella tuetaan virhebudjetin signaali-kohinasuhteen epävarmuusarviota. Taulukossa 6 esitetään käytetyt parametrit ja niillä saadut RCS:n arvot, jotka on poimittu noin 2 metrin etäisyydeltä HRR-kuvasta.

Taulukko 6 Kalibroitinsopen tuen herätteet

Taajuus (GHz)	Polarisaatio	RCS (dB)
8.2-10.7	HH	<b>-4,26</b>
9	HH	<b>-1,51</b>
8.2-10.7	VV	<b>-3,30</b>
4.4-5.9	HH	<b>-4,71</b>

Kalibroitinkohteen tuen herätteet nousevat selkeästi esille kalibroitintuetta kohinatasosta. Kalibroitintuetta antamat herätteet vaihtelevat  $-1 \text{ dBm}^2$ :n ja  $-5 \text{ dBm}^2$ :n välillä, eikä pystypolarisaatiolla tehdyssä mittauksessa tule merkittävää herätetason kasvua. Tutkasopen herätteet vastaavilla taajuuksilla kalibroinnissa ovat logaritmisella asteikolla yli 15 dB suuremmat, joten sen vaikutuksen voidaan sanoa olevan merkityksetön. Toisaalta voidaan myös todeta, että tällä kalibroitintasetelmalla ei voida käyttää sylinterikalibroitintuetta, jossa kalibroitintuettaiden herätteet vaihtelevat välillä  $-15$ – $0 \text{ dB}$ . Kuvassa 19 on yhdistetty HRR-kuva alla luetelluista taajuuksista, josta voi havaita tukipuun selkeän herätepiikin, joka nostaa kalibroitintuetta kohinatasoa.



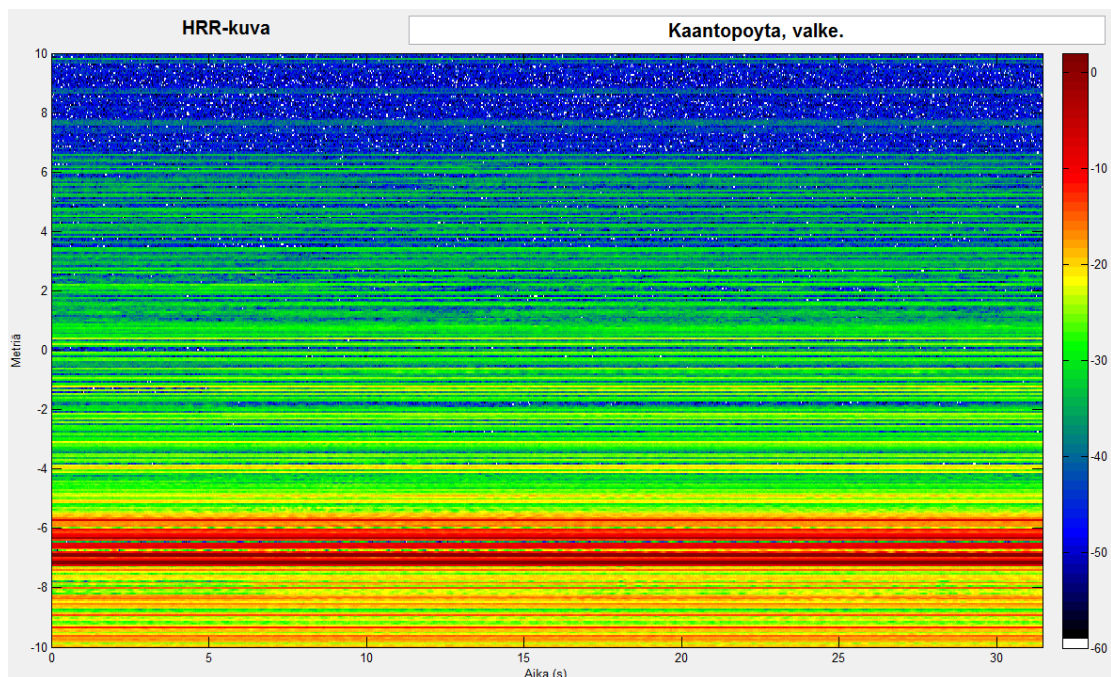
Kuva 19 Kalibrintialueen HRR-kuvakoonnos

Virhebudjetissa käsitellään 9 GHz:n taajuutta, joten taulukosta poimitaan signaalikohinasuhteen epävarmuusarviota varten saman taajuuden HH-polarisaation tuottama RCS -1.51 dB. Tätä arvoa käytetään tutkimuksen virhebudjetin 9. kohdan epävarmuusarvion määrittämisessä.

### 3.11. Kohinatasot kääntöpöydällä

Tällä mittauksella tehdään vertailevaa tutkimusta nykyisen kalibrointiasetelman kohinatasolle, sekä tarkastellaan vaihtoehtoista kalibrointiasetelmaa. Mittauksesta tehtiin HRR-kuva ja RCS-kuvaaja, jonka RCS on mitattu suurin piirtein  $\pm 3$  metrin etäisyydeltä kääntöpöydän keskipisteestä.

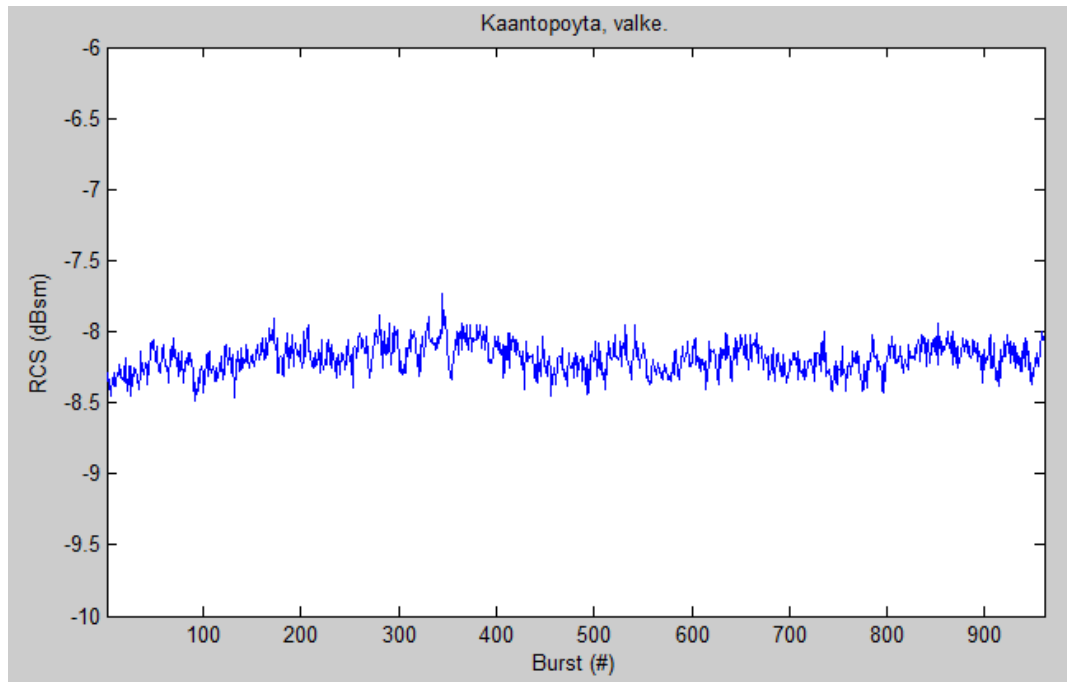
Kuvasta 20 voi havaita, että kääntöpöydän alueella suurimmat herätteet ovat alle  $-20 \text{ dBm}^2$ . Näin ollen yksittäiset herätteet kääntöpöydän alueella ovat tutkapaikkipinta-alaltaan alle  $0.01 \text{ m}^2$ . Nämä yksittäiset herätteet lienevät korkkeja, joilla peitetään kääntöpöydän kiinnikereikiä. Kuvasta näkee, että kääntöpöydän etupuolelta tulee RAM-levyistä huolimatta suhteellisen isoja herätteitä kääntöpöydän kallistusmekanismin saranoista. Isoja herätteitä tulee myös kivituhkaisesta alamäen pinnasta, joka laskee järveen asti. Nämä yksittäiset herätteet ovat noin  $0.1 \text{ m}^2$ . Täten kääntöpöydän kohinatason voisi tämän yhden päivän mittauksen perusteella arvioida olevan noin  $-21 \text{ dBm}^2$ . Tämä vaikuttaa matalaherätteisten kappaleiden mittaukseen, koska tätä pienempiherätteisten kohteiden havaitseminen Lakialan avoimelta radalta vaatii joko toimenpiteitä kohinan vähentämiseksi tai uusia menetelmiä mittaustulosten käsittelylle.



Kuva 20 Kääntöpöydän kohinatason HRR-kuva

Kuvassa 21 on piirrettyä noin kolmen metrin alue kääntöpöydän keskuksesta, jolle muodostuu noin  $-8 \text{ dBm}^2$ :n tutkapaikkipinta-ala. Tämä arvo kasvattaa täysimääräisenä ison kohteen tutkapaikkipinta-alan arvoa, mikä asettaa rajoituksia tutkittavien suurten kohteiden herätetäsolle.

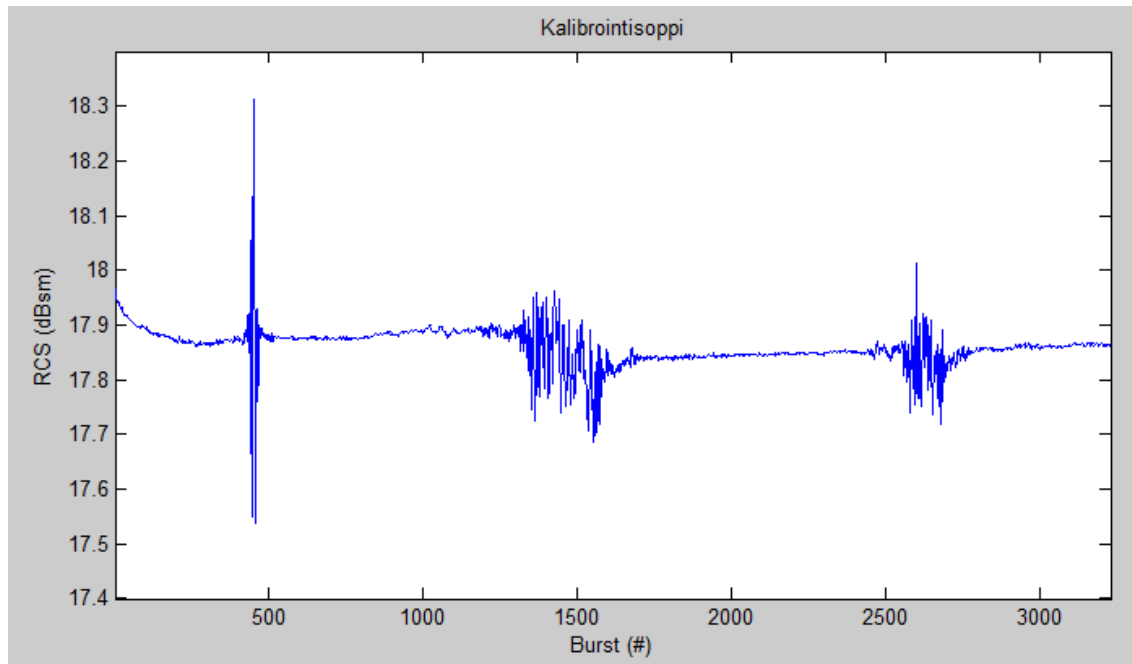




Kuva 21 Tyhjän kääntöpöydän RCS-kuvaaja

### 3.12. Kaapelien liikkeen aiheuttamat epävarmuudet

Tällä mittauksella haluttiin selvittää, kuinka suuren virheen antennitelineen kaapelinipun heilahtaminen voi saada aikaan. Kaapelien heiluntaa voi aiheuttaa joko tuuli tai antennien liikkeen aiheuttama jatkuvuus. Heilunta on sitä todennäköisempää mitä korkeammalla antennilla mitataan, koska silloin tuulella on enemmän pinta-alaa ja massaa heilutettavana. Heiluntaa simuloidaan heilauttamalla kaapelinippua kädellä jatkuvan mittauksen aikana. Kaapeleita heilutettiin kohtuullisesti 1300–1700 ja 2600–2700 burstin kohdalla. Kuvassa 22 näkyy mittauksesta piirretty RCS-kuvaaja, josta voidaan havaita, että heilautuksen aiheuttama huojunta on molemmissa tapauksissa suurimmillaan noin 0.27 dB. Se on jo merkittävä epävarmuustekijä virhebudjetin ulkopuolisena virhelähteenä.

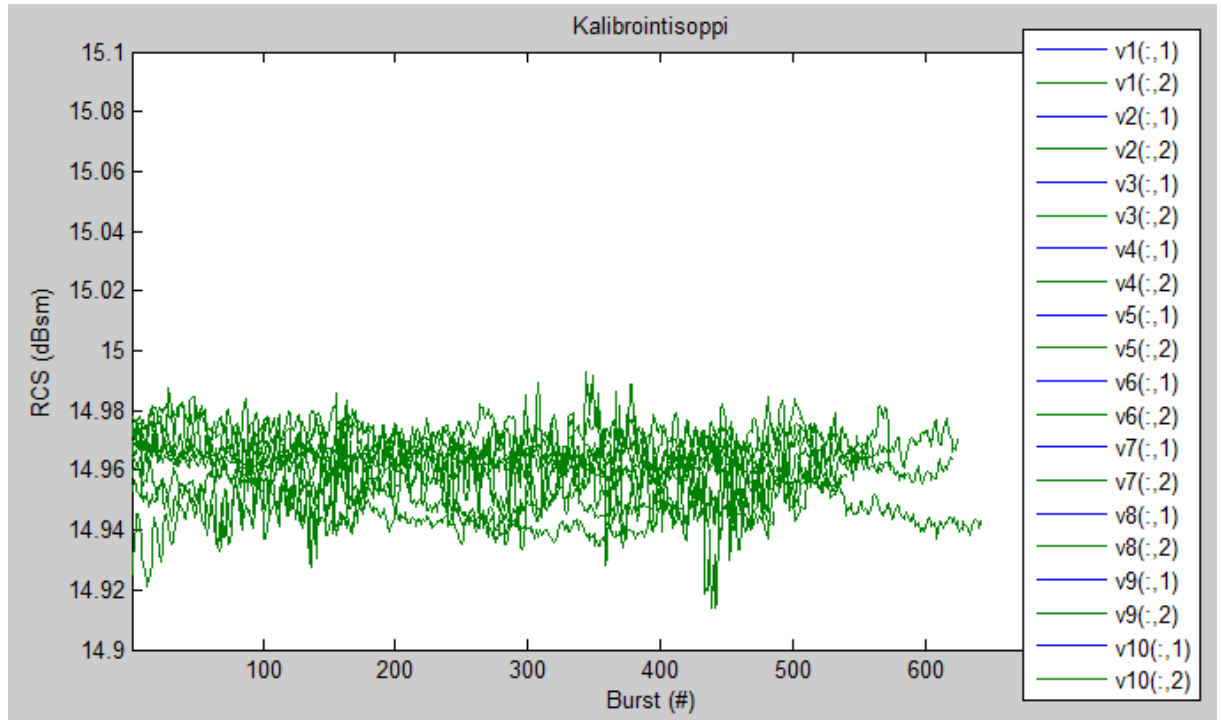


Kuva 22 Kaapeleiden liikkeen vaikutusten RCS-kuvaaja

### 3.13. Tilastolliset epävarmuudet

Tällä mittauksella haluttiin selvittää mahdollisten satunnaisten virheiden suuruusluokkaa ja kartoittaa Tutran kykyä toistaa mittauksia peräkkäisinä mittauksina. Tämä mittaus olisi kuulunut NIST:n 18-kohdan virhebudjettiin, mutta sen ajateltiin antavan lisäarvoa tutkimukselle mahdollisista satunnaisista virheistä.

Kalibrointi tehtiin järjestelmälle ennen ensimmäistä mittausta, jonka jälkeen samaa 9 GHz:n pistetaajuuden kalibrointimittausta toistettiin kymmenen kertaa, mistä piirrettiin kuvassa 23 näkyvä RCS-kuvaaja. Kuvaajan arvoista tehtiin taulukko 7, jossa näkyvät keskiarvot, keskihajonnat sekä minimi- ja maksimi-arvot. Keskihajontojen keskiarvo oli 0.0071 dB, joten lyhyet mittaukset ovat keskimäärin hyvin vakaita. Suurinta mahdollista virhettä haettiin pienimmän minimiarvon ja suurimman maksimi-arvon erotuksella, joksi muodostui 0.08 dB, joka sekin on pieni ottaen huomioon, että sen sisälle mahtuvat kaikki satunnaiset virheet. Tilastolliset virheet voidaan siis todeta merkityksettömiksi.



Kuva 23 Tilastollisten virheiden yhdistetty RCS-kuvaaja

Taulukko 7 Tilastollisten virheiden tarkastelu

Nro	RCS keskiarvo	Keski-hajonta	Minimi	Maksimi	TUNNUSLUVUT	
1	14,94	0,0070	14,91	14,97	Keskiarvojen keskiarvo 14,96	
2	14,96	0,0094	14,93	14,98	Keskihajontien keskiarvo 0,0071	
3	14,96	0,0070	14,93	14,99	Pienin arvo 14,91	
4	14,97	0,0048	14,96	14,98	Suurin arvo 14,99	
5	14,97	0,0081	14,94	14,98	Suurin vaihteluväli 0,08	
6	14,95	0,0064	14,94	14,97		
7	14,96	0,0088	14,93	14,98		
8	14,97	0,0094	14,93	14,99		
9	14,97	0,0060	14,95	14,98		
10	14,96	0,0038	14,95	14,97		

## 4. VIRHEBUDJETTI NISTIR 5019

Tässä luvussa käydään toisessa luvussa valittu virhebudjetti läpi. Virhebudjetin testikohteille määritetään epävarmuusarviot, joista koostetaan kokonaisvirhearvio virhebudjetin mukaisesti. Virhebudjetti on rajattu kalibroinnin alakohtaan, joten virhebudjetissa käytetään suurempia virhearvioita kuin ylemmän tason virhebudjetissa käytettäisiin. Virhebudjetin epävarmuudet arvioidaan todennäköisyydelle, joka kattaa kahden keskihajonnan etäisyyden virheiden keskiarvosta [2, s. 48]. Kokonaisuutena tutkimuksen virhebudjetin ja kolmannen luvun mittaus-ten pitäisi parantaa mittauksia tekevän tutkijan tietoisuutta kalibroinnissa vaikuttavista epävarmuustekijöistä.

### 4.1. Virhebudjetin epävarmuusarvojen raportointi

Tässä alaluvussa käydään läpi virhebudjetin epävarmuusarvojen esittämistapa. Tutkimuksessa tarkastellaan suuretta  $\sigma$  (tutkapaikkipinta-ala):

$$\sigma = \sigma_0 \pm \Delta\sigma, \quad (4)$$

jossa  $\sigma_0$  kertoo mittaajan parhaan arvion ja  $\Delta\sigma$  kuvaa mittaustuloksen epävarmuutta. [20, s. 1] Epävarmuutta ei virhebudjeteissa välttämättä ilmaista symmetrisesti, vaan sillä on myös epäsymmetrinen esitysmuoto. Yksinkertaistamisen vuoksi tässä tutkimuksessa epävarmuuksia käsitellään kuitenkin symmetrisillä rajoilla yhtälön (4) periaatteen mukaisesti. Jos epävarmuuksissa olisi suuria suhteellisia eroavaisuuksia, löytyisi lähteenä käytettävästä standardista menetelmät niiden ilmaisemiseen.

Koska mittauksissa mitataan tutkapaikkipinta-alaa, joka alaluvun 2.3 mukaisesti ilmaistaan logaritmisena esitysmuotona desibeleissä, ilmaistaan myös epävarmuusarvot logaritmisella esitysmuodolla:

$$\Delta\sigma'_{\pm}(dB) \equiv 1 - \log\left(1 \pm \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}\right). \quad (5)$$

Virhebudjetissa käsiteltävien epävarmuuskohtien tulisi olla toisistaan riippumattomia, jotta kokonaisvirhearvion laskentakaava ei toista samaa epävarmuustekijää useammassa kohdassa. Jokainen epävarmuuskohta tarkastellaan omassa kappaleessaan, ja lopputuloksena voi olla joko virhearvio, n.a (ei vaikuttava) tai neg. (merkityksetön). Ei vaikuttava lopputulos tarkoittaa, että testikohteetta ei voi soveltaa tarkasteltavaan mittaukseen. Merkityksetön taas tarkoittaa, että testikohteelle on arvioitu pienempi kuin 0.01 dB epävarmuus, jolloin kohta ei käytännössä vaikuta kokonaisvirhearvioon. Testikohtien epävarmuudet ovat taulukoissa aina logaritmisina lukuina, mutta kokonaisvirhearvion yhteenlaskentaa varten luvut muutetaan suhteelliseksi seuraavalla muunnoksella:

$$\frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_0} = 1 - 10^{-\Delta\sigma_i/10}. \quad (6)$$

Yhteenlaskenta suoritetaan RSS (Root Sum of Squares) -menetelmällä, jossa epävarmuusarvojen neliöiden summasta otetaan neliöjuuri. Kokonaisvirhearvio, eli epävarmuusarvojen yhteisvaikutus, lasketaan yhtälöllä:

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_0}\right)^2, \quad (7)$$

jossa  $\Delta\sigma_i$  kuvaa suhteellisia epävarmuusarvoja. [2, s. 47]

Tämän virhebudjetin kaavat perustuvat aina yleiseen tutkayhtälöön, joka virhebudjetissa on esitetty tuntemattoman ja kalibrointikohteen tutkapoikkipinta-alojen suhteena:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = \left(\frac{R}{R_s}\right)^4 \left(\frac{G_s}{G}\right)^2 \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 \frac{P_{st} P_r}{P_t P_{sr}}, \quad (8)$$

jossa alaindeksi s tarkoittaa kalibrointikohteen (standard) suureita ja

- $\sigma$  on tutkapoikkipinta-ala  $m^2$
- $R$  on etäisyys  $m$
- $G$  on antennin vahvistus
- $f$  on taajuus  $s^{-1}$
- $P_t$  on lähetetty teho  $W$
- $P_r$  on vastaanotettu teho  $W$ .

## 4.2. Virhebudjetin testikohteet

Taulukossa 8 esitetään NISTIR 5019:n testikohteet, joiden teoreettinen pohja käydään tässä alaluvussa läpi. Testikohtien sisältöä tarkastellaan kalibroinnin kannalta, mutta niiden sisältöä verrataan myös tutkimuskohteiden mittauksiin.

Taulukko 8 NISTIR 5019 virhebudjetin testikohteet

1.	Average illumination - Valaisun kohdistus
2.	Background-target interaction - Kohteen ja tuen yhteisvaikutukset
3.	Cross polarization - Ristipolarisaatio
4.	Drift - Siirtymä
5.	Frequency - Taajuus
6.	Integration - Keskiarvoistus
7.	I-Q imbalance - I-Q -epätasapaino
8.	Near field - Lähikenttä
9.	Noise-background - Taustakohina
10.	Nonlinearity - Epälineaarisuus
11.	Range - Etäisyys
12.	Target orientation - Kohteen asento
13.	Reference RCS - Mittauksen vertailukohde
14.	RSS - Kokonaisvirhearvio

### 1. Average Illumination – Valaisun kohdistus

Tässä testikohteessa käsitellään tutkittavan kohteen ja kalibrintikohteen tilavuudellisia eroja. Koska kohteet eivät yleensä ole täysin samanlaisia, kalibrintikohteen ja tutkittavan kohteen tilavuuteen osuva keskiarvoinen valaisu on hieman erilainen. Testikohteessa tarkastellaan, mitä virheitä muodostuu, kun erilaisten tutkittavien kohteiden kulmissa ei ole täysin samanmuotoinen ja -vaiheinen tasoaalto. Staattisella radalla, joka Lakialassa on, kalibroinnin virhelähteeksi muodostuu siis tasoallon epäyhtenäisyys testattavan kohteen tilavuudessa. Toisin sanoen kuinka varmasti voidaan olettaa juuri tietyn maksimivahvistuksen osuvan mitattavaan kalibrintikohteeseen. Testikohteessa oletetaan, että vaikuttava aalto koostuu ideaalisesta tasoallosta ja sen epäyhtenäisestä komponentista, jonka vaikutuksiin keskitytään testikohteen 8 kohdalla. Tässä testikohteessa tarkastellaan kuitenkin antennin vahvistuksen ja sen tuottaman sähkökentän suurimpia eroja antennikeilan huippualueella. Tämä testikohde on suurempi ongelma dynaamisilla testiradoilla, joissa kohde liikkuu ja antenni pyrkii seuraamaan sitä, jolloin kohteen asema antennikeilassa muuttuu jatkuvasti. Virhebudjetissa kehoitetaan arvioimaan antennin mahdolliset vahvistuksen erot ja käyttämään arvioitua lukuarvoa, mutta tässä tutkimuksessa arvio määritetään mittauksen perusteella. [2, s. 48]

Virhebudjetissa todetaan kalibroitikohteesta myös, että mikäli se on staattinen, voidaan kalibroitikohteen tilavuudessa käyttää keskimääräistä antennin vahvistusta vertailutasona, jolloin tässä kohdassa voitaisiin epävarmuus arvioida nollassi. [2, s. 49] Eräässä lähteessä tämän kohdan mittauksissa liikutettiin kalibroitikohtetta pystysuunnassa, jolloin tarkastelussa oli vertikaalisen keilan muoto ja tasaisuus [26, s. 15]. Tässä testikohteessa suurinta mahdollista virhettä arvioitaessa tehdään myös antennikeilan huipun tasaisuuden tarkastelua. Tämän tutkimuksen järjestelmällä voidaan antennikeilaa tarkastella antennin suuntaa muuttamalla kalibroitikohteen ollessa staattisesti paikallaan.

Koska alempien tasojen epävarmuuskartoituksissa käytetään suurimman mahdollisen virheen arvoa, tälle testikohteelle arvioitiin epävarmuusarvio alaluvussa 3.1., jossa tarkasteltiin horisontaalisen antennikeilan huipun tasaisuutta 9 GHz:n taajuudella.

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.11$  dB.

## **2. Background-Target Interactions – Kohteen ja tuen yhteisvaikutukset**

Tässä testikohteessa tarkastellaan kohdetta koskettavien ja lähellä kohdetta sijaitsevien rakenteiden vaikutusta heijastuvaan säteilyyn. Staattisella radalla tämä testikohde muodostuu kohteen ja kannatusrakenteiden yhteisvaikutuksista, joille voisi laatia kokeellisen mittausohjelman kannatusrakenteita vaihtelemalla. Kokonaisvaltainen analyysi tämän kohteen osalta on todettu virhebudjetissakin epäkäytännölliseksi, joten tähän kohteeseen tehdään arviot muiden lähteiden perusteella. On hyvä kuitenkin tiedostaa, että tämän kohteen virhearviot ovat olleet vuonna 2007 vielä suhteellisen ohuella tutkimuspohjalla. [2, s. 49]

Epävarmuusarvo on määritetty tutkimuksen tekijän arviona asiantuntijoiden haastattelun perusteella, koska kattava kokeellinen ja analyttinen tarkastelu todetaan ohjedokumentissa hyödyttömäksi.

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.2$  dB.

## **3. Cross Polarization – Ristipolarisaatio**

Tässä testikohteessa tarkastellaan antennin asentovirheestä tai rakenneongelmasta johtuvaa epätäydellistä polarisaatiota. Jos mittauskohde kääntää polarisaation tasoa suuresti, se muodostaa suuren virhelähteen, vaikka antennilla olisi hyvä polarisaation isolaatio. [2, s. 49]

Kalibroinnin epävarmuuden määrittämiseen käytetään hieman erilaista yhtälöä kuin mitattavan kohteen osalta. Määritetään säteilyn koordinaatisto toimivaksi seuraavilla parametreilla

$R_m$  on vastaanottava antenni

$S_m$  on lähettävä antenni

$T_{nm}$  on säteilijä eli kohde,

joissa  $n$  ja  $m$  ovat  $v$  vertikaaliselle polarisaatiolle ja  $h$  horisontaaliselle polarisaatiolle. Vastaanotettu signaali on monostaattiselle mittausjärjestelmälle [2, s. 50] silloin:

$$S \propto R_v T_{vv} S_v + R_v T_{vh} S_h + R_h T_{hv} S_v + R_h T_{hh} S_h \quad (9)$$

tai

$$S \propto R_v T_{vv} R_v + 2R_v T_{vh} R_h + R_h T_{hh} R_h. \quad (10)$$

Kalibroitinkohde Lakialassa on kolmilevyinen tutkasoppi, joka ei ole polarisaatiota puhtaasti kääntävä. Se ei siis käännä kaikkea säteilyn polarisaatiota päinvastaiseksi. Se kääntää polarisaatiota kuitenkin osittain riippuen antennikeilan kohdistuksesta ja säteilyn vaiheista. Voidaan olettaa, että  $T_{vv} \approx T_{hh}, T_{hv} \approx 0$ . Tästä voidaan johtaa toisen asteen yhtälö:

$$\left| \frac{\Delta S}{S} \right| \approx \left| \frac{R_h}{R_v} \right|^2. \quad (11)$$

Tästä on virhebudjetissa muodostettu ristipolarisaation epävarmuusyhtälö:

$$\Delta\sigma(dB) = -20 \log(1 - 10^{-\epsilon_p/10}), \quad (12)$$

jossa  $\epsilon_p$  on antennin polarisaation isolaatio (polarization isolation). [2, s. 50]

Asiantuntijahaastattelusta ilmeni, että yleisesti tämän tyyppisillä antennille käytetään arvoa 15 dB, joka ei tule kirjallisuudessa ilmi usein. Tämän haastattelun perusteella päädytään määrittämään polarisaation isolaatiolle  $\epsilon_p = 15$  dB.

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.28$  dB.



#### 4. Drift – Siirtymä

Kaikki fyysiset järjestelmät ovat jossain määrin epävakaita, mikä voidaan havaita pitkäkestoisen mittauksen tulokseen muodostuvasta siirtymästä (drift). Tätä testikohdetta voidaan tarkkailla pitkällä kohteen mittauksella, jonka aikana siirtymää tarkkaillaan seuraamalla toista mittauskohdetta tai tasaisin väliajoin mittaamalla kohteen asentoa. Siirtymän voidaan olettaa olevan suhteellisen tasaista, joten esimerkiksi tunnin mittauksen aikana huomattua virhettä voidaan lineaarisesti interpoloida tarkastelussa olevan lyhyemmän mittauksen epävarmuuksien arviointia varten. Jos esimerkiksi tunnissa siirtymäksi on muodostunut 0.1 dB, voidaan puolen tunnin mittauksen epävarmuusarvoksi antaa 0.05 dB. [2, s. 51]

Tutkimuksen alaluvussa 3.7. arvioitiin tunnin pituisen mittauksen epävarmuusarvoksi 0.2 dB. Tässä kohdassa tarkastellaan kuitenkin alle minuutin mittaista kalibrointia.

Epävarmuusarvo arvioidaan merkityksettömäksi.

#### 5. Frequency – Taajuus

Tässä testikohteessa tarkastellaan taajuuden tarkkuuden aiheuttamaa epävarmuutta. Mikäli tutka lähettää hieman eri taajuuskaistaa kuin sitä, mitä yritetään lähettää, muodostaa tämä epävarmuustekijän. Mikäli taajuus muuttuisi merkittävästi ja tutkittavassa kohteessa olisi samankaltaisia heijastuskohtia samalla etäisyydellä, saattaisivat ne vuorovaikutuksen avulla kääntää vaiheen täysin päinvastaiseksi, joka interferoisi tutkaheijasteen maksimista nolllaksi. Nykyajan tutkissa tämä virhelähde on kuitenkin yleensä merkityksetön järjestelmien kehityksen vuoksi kuten myös Lakialassa. [2, s. 51]

Kehittyneen järjestelmän vuoksi tämän kohdan taajuuspoikkeama on niin pieni, ettei se vaikuta lopputulokseen.

Epävarmuusarvo arvioidaan merkityksettömäksi.

## 6. Integration – Keskiarvoistus

Tässä testikohteessa tarkastellaan epävarmuutta, joka muodostuu kohteen liikkeestä. Tutka laskee kohteen sijainnin keskiarvoja, jos se liikkuu mittauksen aikana. Ongelma on yleisempi dynaamisilla radoilla, mutta Lakialan tapauksen staattisellakin radalla tämä tulee vastaan kääntöpöytää pyöritettäessä. Epävarmuuksia voi pienentää hidastamalla pyöriksen nopeutta, jotta mittauksen aikana kohteen sijainnit olisivat mahdollisimman vähän erillään toisistaan. Toinen vaihtoehto pienentää epävarmuutta on pysäyttää kohde tasaisin väliajoin, jolloin mitaustulos vakiintuu, eikä siihen voida laskea tätä epävarmuutta. Tämän tutkimuksen tapauksessa keskiarvoistus ei vaikuta, sillä kalibrointikohde ei liiku kalibroinnin aikana. [2, s. 51]

Epävarmuusarvoa ei voida tässä tapauksessa määrittää.

## 7. I–Q Imbalance – I–Q -epätasapaino

Nykyajan tutkat käsittelevät tutkamittaustuloksia mieluiten I–Q-muodossa, koska se on helppo tapa syöttää ja ottaa tietoa vastaanottimelta. Nämä ovat siis amplitudi ja vaihe, joita määritellään I–Q-muotoon:

$$\begin{aligned} I &= A \cos(\omega t + \phi) ; \textit{reaaliosa} \\ Q &= A \sin(\omega t + \phi) ; \textit{imaginääriosa}. \end{aligned} \tag{13}$$

I–Q-muodossa signaali kiertää 360° kehää, joka sisältää eri neljänneksillä neljä eri polarisatiota, jotka ovat VV, VH, HH ja HV. I–Q-arvoja lasketaan reaaliosan avulla. Tässä virhelähteessä on muutama vaihtoehto, joista epävarmuutta voi syntyä. I–Q-ympyrä on ideaalitapauksessa täysin pyöreä, jonka keskipiste on I- ja Q-kanavien koordinaatiston nollakohdassa. Virheinä saattaa olla ympyrän keskipisteen siirtymä, joka on englanninkielisellä termillä dc offset, tai toisen kanavan painottuminen, mikä muodostaa I–Q-ympyrästä ellipsoidin. [2, s. 26]

Tämän tutkimuksen järjestelmässä I–Q-tasapainon eteen on nähty huomattavasti vaivaa jo sen aiempien versioiden kohdalla [10, s. 42], joten tämän testikohteen arvo on luultavasti hyvin pieni. Tässä tutkimuksessa tämän kohdan käsittely jäi puutteelliseksi riittämättömien testien vuoksi, joten epävarmuusarvo joudutaan arvioimaan ulkoisista lähteistä. I–Q tasapaino on kuitenkin harvoin täydellinen, joten tässä kohdassa yliarvioidaan epävarmuutta suurimman arvioidun virheen saavuttamiseksi.

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.1$  dB.

## 8. Near field – Lähikenttä

Tässä testikohteessa tarkastellaan staattisen radan ja kalibroinnin aiheuttamien ominaisuuksien vuoksi samankaltaista asiaa kuin ensimmäinen testikohde. Lähikentän osalta tarkastellaan, kuinka hyvin antennista lähtenyt aalto on muuttunut tasoaallosi mitattavan kohteen tilavuuden etäisyydellä. Kattava arvio tasoallon vaikutuksista kohteessa olisi hyvin vaikea tehdä ja usein kovin hyödytön mittaustulosten kannalta. Virhebudjetti määrittelee, että kohteen mittauksessa voidaan käyttää epävarmuustekijän arvioimiseen raakaa menetelmää, jossa arvioidaan huippuamplitudien eroa kohteen tilavuudessa. [2, s. 52]

Alaluvussa 3.9. laskettiin 9 GHz:n antennille yleisen kaukokenttäehdon mukainen raja-arvo, joka oli 13.8 m. Tällä kaavalla 45.6 m:ssä sijaitseva kalibroitukohde jää selkeästi kaukokentän puolelle. Kaukokentän ja lähikentän välillä on häilyvä raja tai alue, jonka aikana lähikentässä tapahtuvat ominaisuudet vähenevät ja aaltokuvio lähestyy kaukokentässä olevaa tasoaaltoa. Näiden kenttien ominaisuuksien vaihtumiseen vaikuttaa myös kohteen koko suhteessa antennin muodostamaan aaltorintamaan nähden. Lakialan kalibroitukohde on suhteellisen pieni mitattava kohde, joten tämä puoltaa kalibroitukohde sijaintia kaukokentän puolella. Näiden tietojen valossa todetaan, että kohde on selkeästi kaukokentän puolella ja lähikentän tuomat epävarmuudet eivät vaikuta kalibroinnissa.

Epävarmuusarvo arvioidaan merkityksettömäksi.

## 9. Noise-Background – Taustakohina

Tässä testikohteessa tarkastellaan kohteesta riippumatonta epävarmuutta. Taustakohinan taso kertoo, kuinka pieniä kohteita tutkalla voi erotella taustakohinasta. Testikohteen ominaisuudet ovat siis hyvin riippuvaisia mittaustajuuudesta ja mitattavan kohteen tutkapoikkipinta-alasta, eli herätteiden tasosta. Mittaus tehdään suoralla mittauksella ilman kohdetta, jotta kohdealueen kohinatasoa voidaan tarkastella kaikkia mahdollisia kohinatasoa pienentäviä keinoja käyttäen. Jäljelle jääneestä kohinatasosta etsitään huippuarvo, jota laskuissa käytetään. Tähän kohinatasoon verrataan mitattavaa signaalia ja siitä voidaan laskea mitattavalle signaalille epävarmuusarvo:

$$\Delta\sigma' = -20 \log(1 - 10^{-\varepsilon_n/20}), \quad (14)$$

jossa  $\varepsilon_n = 20 \log|S/N|$ . Joissain tapauksissa kannattaisi välke ja kohinatasot arvioida erikseen ja antaa tähän arvoksi niiden RSS (Root Sum Square), mutta tässä tutkimuksessa epävarmuusarvo lasketaan vain kohinataso huippuarvon perusteella.

Tätä kohdetta varten tarvitaan taustakohinan mittaus tarkasteltavalla taajuudella. Alaluvuissa 3.10. ja 3.11. tarkastellaan kalibrointipaikan sekä kääntöpöydän kohinatasoja, joista ensimmäisestä otetaan tässä virhebudjetissa käytettävä virhearvio. Alaluvussa 3.10. mitattiin kohinatason arvoksi  $N = -1.51$  dB. Kalibrointikohteen RCS käytetyllä taajuudella poimitaan alaluvusta 3.13., jossa kalibrointikohteen RCS:n mittausta toistettiin 10 kertaa ja tuloksille laskettiin keskiarvo. Tulokseksi saatiin  $S = 14.96$  dB. Signaali-kohinatason arvo  $\varepsilon_n = 20 \log |S/N| \approx 39.88$  dB sijoitetaan yhtälöön (14).

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.09$  dB.

### 10. Nonlinearity – Epälineaarisuus

Tässä testikohteessa tarkastellaan tutkan vastaanottimen lineaarisuutta. Tutkan vastaanottimen lineaarisuudella tarkoitetaan sisään menevien ja ulostulevien signaalien samantasoisuutta, eli mihin suuntaan vastaanotin puoltaa käsiteltäessä signaaleja, ja kuinka suuria virheitä tästä aiheutuu. Tämän epävarmuustekijän voi testata syöttämällä kalibrointikohteen signaalitasoa suoraan vastaanottimelle ottaen antennin pois ketjusta. Sen jälkeen syötettävän signaalin vaimennusta muutetaan lineaarisesti tarkkuusvaimentimella. Tästä saadaan lineaarisesti muuttuva signaalitaso, jota voidaan verrata vastaanottimen havaitsemiin signaaleihin. Vastaanotin ei ikinä anna absoluuttisesti samoja arvoja, vaan ne poikkeavat joko negatiiviseen tai positiiviseen suuntaan tästä syötetystä signaalitasosta. Näistä poikkeamista tarkastellaan satunnaisten poikkeamien maksimiarvoja suhteutettuna eri skaaloihin. [2, s. 53]

Epälineaarisuutta aiheuttavat järjestelmässä useat erilaiset ilmiöt, joita ovat muun muassa korkeiden signaalitasojen kompressio, matalat signaalitasot, jännitteen siirtymä ja ajelehtiminen sekä järjestelmän epävakaudet ja oskillaatiot. Myös jokaisessa signaalin vahvistusvaiheessa kanavat voivat saturoitua, jolloin logaritmistien funktioiden arvoihin voi tulla virheitä. Tyypillisesti mittauksia tehdään hyvin dynaamisella asteikolla. Keskivälissä asteikkoa ulostuleva signaali vastaa tyypillisesti hyvin lineaarisesti sisään mennyttä. Mitä korkeammalle signaalitasoissa mennään sitä enemmän epätarkkuuksia alkaa ulostulevaan signaaliin muodostumaan. Alapäässä skaalaa sen sijaan muodostuu yleensä hieman vääristymää (bias). [2, s. 27]

Tämän tutkimuksen tapauksessa tarkastellaan kalibroinnin lineaarisuutta, jonka signaalitaso on Lakialassa suhteellisen keskimääräinen. Tämän mittauksen voidaan jo valmiiksi olettaa olevan hyvin lineaarinen, mutta koska kalibroinnissa käytetään referenssitasona kalibroinnin tasoa, voidaan tämän testikohteen arvoksi asettaa 0. [2, s. 53]

Tämän kohdan epävarmuusarvoksi asetetaan 0, koska kalibroinnissa käytetään referenssitasona kalibroinnin tasoa.

Epävarmuusarvo arvioidaan merkityksettömäksi.

### 11. Range – Etäisyys

Tässä testikohteessa tarkastellaan mittauksissa käytettävän etäisyyden tarkkuutta. Nykyaikaisissa tutkimustutkissa etäisyydenmittaus on niin tarkkaa, että etäisyyden epävarmuus harvoin on merkittävä. Etäisyyden epävarmuus:

$$\Delta\sigma' = -40 \log\left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right) \quad (15)$$

pohjautuu yhtälöön (8). [20, s. 10]

Yhtälöön (15) sijoitetaan arvioitu  $\Delta R = 0,02$  m, joka tuottaa tulokseksi noin 0,008 dB, joka on tässä virhebudjetissa merkityksetön.

Epävarmuusarvo arvioidaan merkityksettömäksi.

### 12. Target Orientation – Kohteen asento

Tässä testikohteessa tarkastellaan kohteen poikkeavan asennon aiheuttamia epävarmuuksia, jotka saattavat olla suuria erityisesti tutkapoikkipinta-alaltaan isoilla kohteilla. Epävarmuutta voi arvioida seuraavalla yhtälöllä:

$$\Delta\sigma' = -10 \log\left(1 - \frac{\partial\sigma}{\partial\theta} \frac{\Delta\theta}{\sigma}\right), \quad (16)$$

jossa  $\sigma$  voi olla odotettu tai mitattu arvo ja  $\theta$  on arvio poikkeavasta asennosta. [2, s. 53]

Tälle testikohteelle on vastaavassa virhebudjetissa suunniteltu simulointeja kulmamuu-  
toksen vaikutuksesta, josta voisi määrittää hyvin tarkkoja arvioita kulmavirheen vaikutuksista.  
[26, s. 35] Käytettävän kalibrintikohteen, eli kolmiseinäisen tutkasopen, riippuvuus kulma-  
muutoksista on myös kohtuullisen pieni, mutta tarkan arvon voisi simuloida tietokoneella  
sopivaksi arvioidun kulmavirheen perusteella. Tässä tutkimuksessa ei suunniteltu tällaisten  
simulaatioiden tekemistä niiden laajuuden ja vaativuuden vuoksi, joten epävarmuusarvio mää-  
ritetään järjestelmää käyttävän tutkijan arvion avulla.

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.1$  dB

### **13. Calibration Target – Reference RCS – Mittauksen vertailukohde**

Tässä testikohteessa tarkastellaan tutkan referenssiä, jonka tarkkuus määrittää suoraan, kuinka  
tarkasti tutka voi parametrinsa säätää. Tarkasteltaessa tuntematonta kohdetta käytetään refe-  
renssinä nimenomaan kalibroinnin tarkkuutta. Tarkasteltaessa kalibroinnin tarkkuutta, kuten  
tässä tutkimuksessa, referenssinä käytetään kalibrintikohteen tarkkuutta laskennalliselta ja  
valmistukselliselta kannalta.

Kalibroinnissa tutkalle määritellään mahdollisimman tarkasti, mikä mitattavan kohteen tutka-  
poikkipinta-ala on. Tämän vuoksi kalibrintikohteiksi valitaan mahdollisimman yksinkertaisia  
kohteita, joiden tutkapoikkipinta-alan laskeminen olisi yksinkertaisempaa. Toinen vaikuttava  
asia on kohteen valmistustarkkuus. Jotta kohteen pinta-ala voidaan laskea, tulee kohteen fyy-  
sisten mittojen olla mahdollisimman tarkasti juuri matemaattista mallia vastaavia. Tämän  
vuoksi maailmalla käytetään pääasiassa sylinterin muotoisia kalibrintikohteita, jotka voidaan  
valmistaa suurella tarkkuudella alumiinista. Tällaisen tarkan kalibrintikohteen kohdalla tä-  
män testikohteen arvoksi tulee kalibroinnissa yleensä merkityksetön. Muita käytössä olevia  
kalibrintikohteita ovat levyt ja sopet, joissa on vaihteleva määrä sivuja. Lakialassa kalibroi-  
ntikohteena käytetään kolmisivuista tutkasoppea, jonka valmistustarkkuus on kohtalainen. Täl-  
laisten kalibrintikohteiden epävarmuusarvoiksi tulee yleensä useita desibelin kymmenyksiä.  
[2, s. 54]

Tässä testikohteessa joudutaan arvioimaan kalibrointikohteen vertailukohteesta muodostuvia epävarmuuksia suurpiirteisesti. Epävarmuudet muodostuvat tietokoneen laskeman tutkapoikkipinta-alan epävarmuuksista ja itse kalibroinnissa käytetyn tutkasopen valmistustarkkuudesta. Käytettävälle tutkasopelle ei löytynyt valmistajan määrittämiä arvoja valmistustarkkuudesta, mutta käsin tarkasteltaessa voidaan todeta, että tutkasopen hitsaussaumamat saattavat olla yli puolen sentin korkuisia. Mittasuhteet sivujen pituuksissa ovat noin 2 mm:n tarkkuudella oikeita, joten itse heijastava pinta-ala on kohtuullisen oikea. Suurin osa pinta-alasta on tasaista alumiinilevyä, joten saumojen ongelmat eivät vaikuttane suuremmin kokonaisuuteen. Lähteenä käytetyssä vastaavassa virhebudjetissa tarkalle sylinterille oli annettu epävarmuusarvoksi 0.1 dB, joten tälle kohdalle arvioidaan näillä perusteilla selkeästi isompi arvo.

Epävarmuusarvoksi arvioidaan  $\Delta\sigma = 0.6$  dB.

### 4.3. Kalibroinnin kokonaisvirhearvio

Tässä tutkimuksessa käytetään yksinkertaista RSS (Root Sum Square) -menetelmää, jossa virhebudjetin kaikkien epävarmuusarvojen neliöiden summasta otetaan neliöjuuri. Tätä menetelmää käyttää alun perin NISTIR 5019:n virhebudjetti [20, s. 13] ja uudempana julkaisuna IEEE:n standardi [2, s. 54].

Kokonaisvirhearvion muodostamiseen on olemassa useita muitakin vaihtoehtoja, jotka vaihtelevat yksinkertaisesta hyvinkin monimutkaisiin menetelmiin. Tutkimuksen kirjallisuuskatsauksessa sopivimmalta vaikuttava menetelmä kokonaisvirhearvion muodostukseen löytyi AMTA:n konferenssijulkaisusta [12], joka oli laadittu NIST:n RSS-menetelmää kehittämään. Menetelmässä otetaan paremmin huomioon se, että mitattujen epävarmuustekijöiden arvot kulkevat testattavan asian kaavassa eteenpäin noudattaen erilaisia sääntöjä [11, s. 45-92]. Työn laajuuden paljastuessa menetelmiä pyrittiin lopulta yksinkertaistamaan mahdollisimman selkeiksi ja yksiselitteisiksi. Monimutkaisempien menetelmien käyttäminen tarkempien epävarmuusarvioiden hankkimiseksi todettiin mielekkäämmäksi sitten, kun kaikkiin virhebudjetin kohtiin on voitu tehdä mahdollisimman tarkat ja kokeelliset arviot.

Kaikille epävarmuusarvoille lasketaan ensin absoluuttinen arvo yhtälöllä (6). Tämän jälkeen kaikille absoluuttisille arvoille lasketaan yhtälöllä (7) neliöiden summa, josta otetaan neliöjuuri. Tästä saadaan absoluuttinen kokonaisvirhearvio, joka on noin  $\Delta\sigma = 0.16$ . Tämä absoluuttinen arvo muunnetaan desibeleiksi laskemalla yhtälö (6) toisinpäin:

$$\Delta\sigma' = -10 * \lg(1 - \Delta\sigma). \quad (17)$$

Kokonaisvirhearvioksi muodostuu  $\Delta\sigma = 0.74$  dB

Kaikkien epävarmuusarvojen ja kokonaisvirhearvion koonnos on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9 Virhebudjetin epävarmuusarvot

1.	Average illumination - Valaisun kohdistus	0.11 dB
2.	Background-target interaction - Kohteen ja tuen yhteisvaikutukset	0.2 dB
3.	Cross polarization - Ristipolarisaatio	0.28 dB
4.	Drift - Siirtymä	neg
5.	Frequency - Taajuus	neg
6.	Integration - Keskiarvoistus	n.a
7.	I-Q imbalance - I-Q -epätasapaino	0.1 dB
8.	Near field - Lähikenttä	neg
9.	Noise-background - Taustakohina	0.09 dB
10.	Nonlinearity - Epälineaarisuus	neg
11.	Range - Etäisyys	neg
12.	Target orientation - Kohteen asento	0.1 dB
13.	Reference RCS - Mittauksen vertailukohde	0.6 dB
14.	RSS - Kokonaisvirhearvio	0.74 dB



## 5. YHTEENVETO

### 5.1. Luotettavuustarkastelun pohdintaa

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella nykyaikaisen ja teknisesti kehittyneen MkV-tutkimustutkan mittaustulosten luotettavuutta kalibroinnin osalta Lakialan avoimella mittausradalla. Tutkimuskysymyksenä oli: Miten virhebudjettimenetelmä soveltuu tutkaherätemittausjärjestelmän kalibroinnin epävarmuustekijöiden arviointiin ja tutkaherätemittausten luotettavuuden tarkasteluun? Tarkastelua tehtiin pilotoimalla virhebudjettimenetelmää luotettavuustarkastelun osaksi. Tutkimuksen ohessa oli tarkoitus tehdä myös kalibrointiaselman kehitystyötä tarkastelemalla järjestelmän luotettavuutta mahdollisten huolimattomuusvirheiden näkökulmasta. Virhetarkastelua ei ollut aiemmin kattavasti tehty työmäärän ja soveltamisen laajuuden ollessa tuntematonta. Tämän vuoksi tämä tutkimus tuottaa uutta tietoa menetelmien ja laadun kehittämisen kannalta.

Tutkimuksen teoriaosuuden kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin laitteistoon, luotettavuustarkasteluun ja erilaisiin virhebudjettikäytäntöihin maailmalla. Alun perin tutkimuksen luotettavuustarkasteluun oli tarkoitus soveltaa NIST 18-term error budget -listaa, joka on suunniteltu lähikenttäantennien mittauksia varten. Kirjallisuuskatsauksen myötä esitettyyn aiheeseen löydettiin kuitenkin paremmin kontekstiin sopiva virhebudjetti NISTIR 5019. NIST:n 18 kohdan listan käyttö hylättiin, koska sen soveltuvaksi muotoilu olisi vaatinut useiden testikohteiden hylkäämistä ja joidenkin testikohteiden uudelleensuunnittelua. NISTIR 5019 sen sijaan oli suunniteltu Lakialan järjestelmää vastaavan järjestelmän virhetarkasteluun. Tutkimuksen ensimmäisenä tuloksena voidaan siis pitää tämän kohdennetun virhetarkastelumenetelmän löytymistä ja luotettavuustarkastelun laajuuden kartoittamista. NISTIR 5019 -virhebudjetilla voi etukäteen suunnitella luotettavuustarkastelun resurssit ja tarkkuuden vaatimukset.

Virhebudjetin vaihtaminen johti siihen, että soveltamiseen tarkoitettu mittaussuunnitelma oli laadittava uudelleen nopeutetussa aikataulussa. Tutkimustutkan vuosihuollon lähestyessä mittaussuunnitelmat muokattiin virhebudjetin testikohteita tukeviksi aikataulun rajallisuuden vuoksi osittain ennen mittauksia ja osittain mittausten jälkeen. Tämän vuoksi mittauksissa on sekä kohdistetumpia mittaushohtia että avoimempia analyysikohtia. Tutkimuksessa tehtiin mittauksia NISTIR 5019:n testikohteita varten noin 9 GHz:n taajuudella HH-polarisaatiolla. Virhebudjetti NISTIR 5019 määrittelee kolmetoista itsenäistä virhelähdettä, joista tutkimuksessa muodostettiin perusteltu kokonaisvirhearvio 9 GHz:n taajuuden kalibroinnista.

Kirjallisuuskatsauksella löydettiin myös IEEE:n voimassa oleva standardi, joka yhtenäistää tutkaherätemittausratojen suositeltuja käytäntöjä sisältäen myös NISTIR 5019 -virhebudjetin. Standardi on tehty vastaamaan Yhdysvalloissa vallinneeseen menetelmien ja dokumentoinnin kirjoon, jotta mittausten tilaaja voisi arvioida saamiensa tulosten tarkkuutta. Tähän standardiin on sisällytetty laadintaohje ”The Range Bookille”, joka sisältää menetelmien, ohjeiden, epävarmuuksien, laitteistojen, välineiden ja henkilöstön dokumentoinnin yksien kansien välissä. Ohjeistus sisältää myös kattavan epävarmuuksien tarkastelun kaikista taajuusalueista ja herätetasoista, kalibroinnista sekä yleisimmistä mittauskohteista.

”The Range Bookin” laadinta Lakialan avoimelle radalle varmistaisi mittaustulosten laadun ja menetelmien jatkuvuuden myös mahdollisten henkilöstövaihdosten yhteydessä. Lisäksi kirjallinen ohjeistus nopeuttaisi järjestelmän käytön omaksumista ja mahdollistaisi pitkäjänteisen kehittämisen. Henkilöstöressurssien vähäisyyden vuoksi täydellisen ohjeistuksen laatiminen olisi erittäin hidasta ja todennäköisesti mahdotonta, mutta näillä perusteilla suositellaan ohjeistustyön aloittamista epävarmuuksien kohdalta. Lopullisen tuotteen tekemisessä suositellaan hyödynnettävän IEEE:n standardista löytyviä rakenteita ja ideoita.

Ensimmäisellä mittauksella kartoitettiin antennikeilan tasaisuutta ja muotoa. Tällä mittauksella saatiin tietoa sekä virhebudjettia että yleistä luotettavuustarkastelua varten, koska kaikille antennien kohdistamisessa tapahtuville virheille voidaan täten määrittää suuruusluokka. Toisella mittauksella selvitettiin, että kova tuuli tekee nykyisen kalibroinnin käytännössä järjetömäksi. Samasta mittauksesta tehtiin myös vertailevaa tutkimusta ristipolarisaatiomittaukseen. Tuulen havaittiin aiheuttavan antennitelineeseen erityisesti pystysuuntaisen heilunnan, joka vaikuttaa negatiivisesti pystypolarisaatiolla tehtävien mittausten luotettavuuteen. Toisena tutkimuksen tuloksena voidaan siis pitää merkittävien pystypolarisaatiomittausten luotettavuusongelmien havaitsemista, mikä aiheutuu antennitelineen pystytason kiinnikkeiden riittämättömästä tukevuudesta.

Kolmannella mittauksella keskityttiin mittaamaan antennitelineen ja kalibrointiasetelman aiheuttamia kohdistusongelmia. Kalibrointikohteen etäisyyden ollessa huomattavasti pienempi kuin kääntöpöydän muodostuu tutkan kohdistukseen merkittävä ero kahden etäisimmän antennin taajuuksilla. Tutkijan hypoteesi kalibrointietäisyyden vaikutuksesta osoittautui suuremmaksi, mikä tekee nykyisen kalibrointiasetelman epäedullisemmaksi kuin osattiin arvella. Tämän havainnon perusteella kalibrointiasetelmaa suositellaan siirrettäväksi samalle etäisyydelle mittauspaikan kanssa. Tätä havaintoa ja kehitysehdotusta voidaan pitää tutkimuksen kolmantena tuloksena.

Neljännellä mittauksella tarkasteltiin monitie-etenemisen ongelmia, minkä ohessa testattiin kalibrointisopen kiinnittämistä muovivaahtopylvään seinään. Kolmilevyisen tutkasopen kohdistaminen suoraan tutkaa kohti havaittiin erittäin vaikeaksi, minkä vuoksi käytettäessä tutkasoppea kalibroinnissa kannattaa se kiinnittää paremmin säädettävään tukeen.

Viides kohta keskittyi analysoimaan tukiratkaisuja tutkalle näkymättömyyden kannalta. Tämän perusteella todettiin, että mittausalueen kalibrointiasetelmaan sopisi häiveominaisuuksilla varustettu vino metallinen tukitolppa, joka mahdollistaisi kiinteän kalibrointiasetelman. Muovivaahto todettiin kuitenkin parhaaksi tukimateriaaliksi, joka on tutkalle lähes näkymätön. Neljännessä mittauksessa käytettiin Finnfoam-materiaalista tehtyjä tukiratkaisuja, joita mittaamalla voitiin havaita kirjallisuudessa mainitut hyvät ominaisuudet. Tällä perusteella Finnfoam-materiaalia suositellaan käytettäväksi suurempaa herkkyyttä vaativien mittausten tukimateriaaleina. Samalla materiaalilla voitaisiin myös kehittää kalibrointia lähteissä havaitun sylinterikalibroinnin [26, s. 10] avulla. Suuren työmäärän ja henkilöstötarpeen vuoksi sylinterikalibroinnilla ei voida Lakialassa korvata täysin kiinteällä tutkasopella tehtävää kalibrointia. Sylintereillä tehtävä kalibrointi voisi kuitenkin olla mahdollisuus kehittää järjestelmää, millä mahdollistettaisiin tarkempien mittausten tekeminen yhä pienemmistä kohteista. Näiden kehityskohteiden havaitsemista voidaan pitää tutkimuksen neljäntenä tuloksena.

Kuudennen mittauksen, eli ristipolarisaation, avulla tuotettiin virhebudjetin testikohteelle virhearvio, sekä havaittiin ongelmia, jotka mainittiin kovan tuulen mittausten yhteydessä. Seitsemännellä mittauksella tuotettiin myös virhearvio virhebudjetin testikohteelle. Kahdeksannella mittauksella havaittiin, että lämpötilan muutos on suurin yksittäinen virhettä aiheuttava epävarmuustekijä, jos tutkaa ei kalibroida mittausten väleissä. Yhdeksännellä mittauksella havaittiin lähikentän vaikuttamattomuus virhebudjetin testikohdetta varten. Kymmenennellä mittauksella saatiin mitattua kalibroinnin kohinataso virhebudjetin testikohteelle.

Loput mittaukset olivat järjestelmän käyttäjän toimintaa tukevia mittauksia. Yhdennessätoista mittauksessa havaittiin, että kääntöpöydän kohinataso vaikeuttaa pieniherätteisten kohteiden mittaamista. Mittausjärjestelyjä voi harkita muokattavaksi esimerkiksi kääntöpöydän sijoittamisella mäen huipulle, jolloin taustakohina pienenesi. Näin ison muutoksen tapahtuessa tulisi tosin tarkastella myös ilmakehän kohinatasoa, joten tätä huomautusta voi pitää jatkotutkimuskohteena. Kahdennessätoista mittauksessa havaittiin, että mikäli antennitelineestä roikkuvat johdot pääsevät heilahtamaan, heilahtavat myös antennit aiheuttaen mittaustuloksiin merkittäviä virheitä. Kolmannessaatoista mittauksessa ei löydetty aiemman virhebudjetin pohjalta suunnitellussa mittauksessa mitään yllättävää tilastollista virhettä.

Mittausten jälkeen kaikille virhebudjetin testikohteille saatiin määritettyä virhearviot, joiden perusteella laskettiin alaluvussa 4.3. kalibroinnin kokonaisvirhearvio. Kokonaisvirhearvioksi muodostui 0.74 dB. Tämä lukema itsessään ei ole tämän tutkimuksen tulos, mutta sen muodostaman prosessin onnistuminen Lakialan järjestelmälle voidaan nähdä tutkimuksen päätuloksena. Virhetarkastelumenetelmä on ollut toimiva, ja ohjeistus on ollut riittävä.

Tutkimuksen tavoite on täytynyt virhebudjetin laadinnan onnistuessa. Tässä tutkimuksessa on käsitelty mahdollisimman yksinkertaisesti eri testikohtia ja noudatettu virhebudjetissa suositeltuja oletuksia, jolloin tulosten muodostaminen on ollut mahdollista ilman syvempää asiantuntemusta. Joihinkin moniselitteisempiin kohtiin on käytetty asiantuntijahaastattelua, jolloin kaikkiin virhebudjetin kohtiin on voitu muodostaa perusteltu arvio.

Virhebudjettia voidaan vielä tarkentaa suunniteltujen mittausten ja resurssien avulla, joten se on hyvin resursseihin skaalautuva työkalu. Se on selkeä itsenäisistä virhelähteistä muodostuva puun juuriston kaltainen kokonaisuus. Tuloksen tarkkuus riippuu yksittäisten arvioiden laadusta, joka taas riippuu menetelmien tarkkuudesta. Virhebudjettia voidaan tehdä pidempänä prosessina, jossa voi esimerkiksi kohdistaa resursseja yksittäisten kohtien epävarmuusarvioihin puolivuositain. Kokonaisvirhearviossa voidaan käyttää myös aiemmissa luotettavuustarkasteluissa arvioituja epävarmuuksia, mikäli käytettävät parametrit ja laitteistot ovat yhteneviä tarkasteltavan testikohteen osalta. Myös tämän tutkimuksen avulla tuotettujen epävarmuusarvojen hyödyntäminen on siis mahdollista varsinkin laajemman luotettavuustarkastelun alkuvaiheessa.

Virhebudjetti on tehty ainoastaan yhden antennin keskitaajuuden kalibrointiin, joten kattavat mittaukset vaatisivat koko taajuuskaistalle tasaisin välein tehdyn kalibroinnin virhebudjetin. Kalibroinnin virhebudjettia voidaan hyödyntää kaikissa tutkimuskohteiden virhebudjeteissa, koska se ei muutu jatkuvasti, ja se on yksittäinen kohta ylemmän tason virhebudjetissa.

Tämän tutkimuksen pilottiroolia kuvaa se, että kalibrointisoppi poistettiin jo tutkimuksen aikana, ja sen siirtoa kääntöpöydän etäisyydelle ollaan harkitsemassa tutkan huollon jälkeen tutkimuksen tulosten myötävaikutuksesta. Tutkimuksessa tehty kalibroinnin kokonaisvirhearvio on myöhempien mittausten kannalta hyödytön, koska seuraavalle asetelmalle täytyy tehdä oma tarkastelu. Tutkimuksen karkealla virhebudjetilla ja mittauksilla on silti löydetty suurimpia epävarmuuksia ohjeiden mukaisesti. Tällä perusteella tarkempien ja resursseja enemmän kuluttavien mittausten laatiminen olisi tässä vaiheessa ollut tarpeetonta.

Tutkimusta voi tarkastella myös hankenäkökulmasta tutkaherätemittauskyvyn hallinnan kannalta. Koska äärettömän tarkkaa mittaustulosta voidaan ainoastaan lähestyä, tulee järjestelmää hankittaessa ja suunniteltaessa määrittää sille sallittu epävarmuusarvo, johon virheiden tulee mahtua. Käytännössä suorituskykyä, eli tutkaherätemittauskykyä, hankkivan organisaation tulisi päättää, kuinka häiveellisiä kohteita halutaan järjestelmällä tutkia. Tämän perusteella voidaan määrittää laitteen herkkyyttä ja dynaamisuutta, eli laaja-alaisuutta, mutta se asettaa myös tarpeita laitteiston tarkkuudelle ja luotettavuudelle. Käytännössä mitä pienempiä kohteita halutaan luotettavasti tutkia, sitä pienempiä sallitut epävarmuudet järjestelmässä saavat olla. Tätä sallittua epävarmuutta hyväksikäyttämällä voidaan mittausten menetelmien kehitystä suunnitella kustannustehokkaasti, jolloin kaikista tarkimpia järjestelmiä ja menetelmiä ei kannata ottaa käyttöön, mikäli tarve on vain suuntaa antaville tuloksille. Mitä tarkemmin mittaukset halutaan tehdä, sitä kalliimmiksi mittausten menetelmät ja -laitteet yleensä muuttuvat. Tämän vuoksi Suomen kokoisessa maassa joudutaan monesti kehittämään vain kustannustehokkaimpia osioita suorituskyvyistä. Tämä huomio kohdistuu lähinnä kalibroitimenetelmän kehittämiseen, sillä mikäli jossakin kohdassa on suuri virhe, voi jonkin toisen ongelmakohteen pienentäminen olla silti kustannustehokkaampaa.

## 5.2. Johtopäätökset ja jatkotutkimuskohteet

Tutkimus on vastannut vähemmälle huomiolle jääneeseen luotettavuustarkastelun kokonaisuuden pilotoimalla toimivan menetelmän onnistuneesti. Luotettavuustarkastelu ei ole kokonaisuus, jonka voi saada valmiiksi, vaan siinä tehtävä pohjatyö muodostaa perusteet päivittämisen työn ohessa pidettävälle tutkimuksen luotettavuuden tarkastelulle. Tähän voidaan vastata hyvin IEEE:n standardilla [2], jota kattavasti soveltamalla voidaan mittausten luotettavuus saada kansainväliselle tasolle.

Tutkimuksen tulosten myötä voidaan nähdä kaksi selkeää kehityskohdetta. Kalibroitimijärjestelyt ovat nykyisellään olleet isoja virheitä aiheuttavat ja niitä tulisi ehdottomasti kehittää luotettavuuden parantamiseksi. Isoimpia virheitä oli aiheutunut lähellä sijainneesta kalibroitimikohteesta, joka oli aiheuttanut antennin kohdistamiseen aiemmin tuntemattoman kohdistusvirheen. Tämän perusteella kalibroitimikohteen etäisyysongelmat pakottavat nykyisellä kalibroitimiasetelmalla arvioimaan antennin keilan oikean sijainnin kääntöpöydän etäisyydellä suurpiirteisesti. Koska tutkimuksessa tarkastellaan muuten tarkkaa järjestelmää, suositellaan kehityskohteeksi tämän virheen korjaamista kalibroitimikohteen siirtämisellä samalle etäisyydelle mittauspöydän kanssa.

Toinen kehityskohde havaittiin antennitelineen kiinnityksissä. Niissä erityisesti pystytason rakenteet joustavat mahdollistaen antennin heilunnan pienelläkin tuulella. Tämä heiluminen tekee pystypolarisaatiolla saatavat mittaustulokset luotettavuudeltaan kyseenalaisiksi, koska antennikeilan liike kulkee kalibroinnissa kalibrointisopen ja pystysuuntaisen tukirakenteen välillä aiheuttaen suurta herätetason vaihtelevuutta. Tämä rajoittaa päiviä, jotka mahdollistaisivat luotettavien tulosten aikaansaamisen tuulelle alttiilta avoimelta radalta, joten tiukalle aikataululle suunniteltavat tarkat mittaukset eivät välttämättä onnistu.

Jatkotutkimusta voisi tämän tutkimuksen perusteella kohdentaa erityisesti tämän tutkimuksen pilotoiman virhebudjetin laajempaan toteuttamiseen. Tätä kokonaisuutta voi pilkkoa pienemmiksi kohteiksi tutkimalla esimerkiksi yksittäisen taajuuden sisältämät kaikki kohdat tai tekemällä koko taajuusalueelle yhden testikohteen kattavan tarkastelun.

Toinen jatkotutkimuskohde löytyi mittausalueen esineiden vaikutuksista mittauksiin. Koska mittausalue on lyhyellä etäisyydellä sijaitseva staattinen paikka, voisi mittausalueen kiinteitä välkkeen aiheuttajia tutkia tarkemminkin. Pääkeilan alueelle sijoittuu Lakialassa väkisin kohtuullisen paljonkin erilaisia rakenteita ja pinnanmuotoja, joita voi rajata tuloksista pois etäisyysporttia säätämällä. Etäisyysportilla ei kuitenkaan voi poistaa sivuttaissuunnassa samalla etäisyydellä olevia pieniä välkkeenaiheuttajia. Niiden määrää on kääntöpöytää rakennettaessa pyritty vähentämään, mutta olisi ehdottomasti tutkimisen arvoista tietää, kuinka paljon pääkeilan laitaan sijoitetut erikokoiset esineet vaikuttavat mittaustuloksiin. Samassa yhteydessä voisi tutkia vastaavaa asiaa, mutta tuomalla häiriötekijöitä tutkalle sivukeilojen kautta. Veden ja maanpinnan sekä esineiden aiheuttamaa välketasoa voisi luultavasti vähentää pienilläkin toimilla ja samalla tunnettaisiin mittausalueen läheisyydessä sijaitsevien esineiden vaikutukset tuloksiin paremmin.

Kolmas jatkotutkimuskohde on alaluvussa 3.4. tarkasteltu monitie-etenemisen epävarmuus. Tämän kohdan jatkotutkimus vaatisi paljon teoreettista perehtymistä, jolla selvitetäisiin erilaiset mahdolliset monitie-etenemisen ilmiöt, minkä jälkeen ne voitaisiin kattavilla testimittauksilla tutkia. Lakialan avoimen radan sijainti järven rannalla ja mäen juurella ei ole erityisen hyvä paikka tutkaherätämittauksia varten. Heti mittauspöydän takana on korkea kuusikko, joka saattaa myös aiheuttaa kohinaa lisäämällä ongelmia mittaustuloksiin. Tämän jatkotutkimuskohteen ajatuksena olisikin tutkia, minkälaisia ongelmia nykyisestä mittauspöydän sijoittelusta aiheutuu ja kuinka suuria ne ovat. Mittauspöydän siirtämistä voisi harkita esimerkiksi takana sijaitsevan mäen laelle. Tällä asettelulla pääkeila siirtyisi entistä kauemmas järven pinnasta ja mittausalueen takana ei olisi mitään, millä saataisiin luultavasti parannettua alaluvussa 3.11. käsiteltyä kohinatasoa.



## 6. LÄHDELUETTELO

- [1] Signature Measurement Standards Group / Range Commanders Council. Radar Cross Section (RCS) measurement facility catalog 801-98. New Mexico, 1998.
- [2] IEEE Std 1502-2007. 2007. IEEE Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures. New York: IEEE. 70 s.
- [3] Ghanem, Roger. Error Budgets: A Path from Uncertainty Quantification to Model Validation. Los Angeles 22.8.2005, University of Southern California. Luentomateriaali. 55 s.
- [4] SPC. System Planning Corporation: Radar: MkVe Instrumentation Radar. [viitattu 16.4.2015]. Saatavissa:  
[http://www.sysplan.com/capabilities/radar/mkve\\_instrumentation\\_radar/index.html](http://www.sysplan.com/capabilities/radar/mkve_instrumentation_radar/index.html)
- [5] Mensa, Dean L. High Resolution Radar Cross-Section Imaging. 2<sup>nd</sup> rev. Norwood: Artech House, Inc, 1991. 270 s. ISBN 0-89006-389-3.
- [6] Gallman, Philip G. Radar Reflectors for Cruising Sailboats. Ulyssian Publications, 2005. 172 s. ISBN 978-1930580732.
- [7] Stimson, George W. Introduction to Airborne Radar. 2<sup>nd</sup> edition. Mendham: SciTech Publishing, Inc, 1998. 566 s. ISBN 1-891121-01-4.
- [8] IEEE Std 686-1997. 1997. IEEE Standard Radar Definitions. ISBN 1-55937-958-8
- [9] Barton, David K. Radar System Analysis and Modeling. Rev ed. Norwood: Artech House, Inc, 2004. 566 s. ISBN 978-1-58053-681-3.
- [10] Knott, E., Shaeffer, J. & Tuley M. Radar Cross Section. 2<sup>nd</sup> edition. Norwood: Artech House, Inc, 1993. 611 s. ISBN 0-89006-618-3.
- [11] Taylor, John. An introduction to Error Analysis. 2<sup>nd</sup> edition. Sausalito: University Science Books, 1997. 327 s. ISBN 0-935702-42-3.
- [12] LaHaie, I., Fischer, B. & Conn T. An analytical error model for propagating RCS measurement uncertainties. In: Annual meeting and symposium; 20th, Antenna Measurement Techniques Association, Montreal 26.-30. lokakuuta 1998. AMTA. pp. 227-233
- [13] Dybdal, Robert B. Methodology to Project RCS Measurement Accuracy. In: Antennas and Propagation Society International Symposium, San Jose 26.-30. kesäkuuta 1989. AP-S. Digest. pp. 314-317.
- [14] Salminen, Ari. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasa: Vaasan yliopisto, 2011. 43 s.
- [15] Newell, Allen C. Error Analysis Techniques for Planar Near-Field Measurements. In: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 36 no.6. Boulder: NBS, 1988. pp. 754-768 ISBN 0018-926X

- [16] Hiatt, Ralph E. The IEEE Antennas and Propagation Society 1949-1982. IEEE. [viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: [http://www.ieeeaps.org/images/pdfs/HistoryAPS1949\\_1982.pdf](http://www.ieeeaps.org/images/pdfs/HistoryAPS1949_1982.pdf)
- [17] AMTA. AMTA History. [viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://hw.amta.org/index.cfm/ID/69/hw.amta.org/history/>
- [18] Oldfield, L., Elliott, T. & Brewitt-Taylor, C. Calibration and error budget in RCS measurements. In: Annual meeting and symposium; 20th, Antenna Measurement Techniques Association, Monterey Bay 4.-8. lokakuuta 1999. pp. 75-78.
- [19] Signature Measurement Standards Group/Range Commanders Council. Radar Cross Section (RCS) certification for static and dynamic RCS measurement facilities Vol1. New Mexico: SMSG/RCC, 2001.
- [20] Wittmann, R., Francis, M., Muth, L. & Lewis, R. NISTIR 5019 - Proposed uncertainty analysis for RCS measurements. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994. 20 s.
- [21] Signature Measurement Standards Group / Range Commanders Council. Radar Cross Section (RCS) certification for static and dynamic RCS measurement facilities Vol2. New Mexico: SMSG/RCC, 2001.
- [22] ANSI/ NCSL Z540.1-1994. Calibration Laboratories and Measuring and Test Equipment—General Requirements.
- [23] SPC. PvTT Operators Manual. Arlington: System Planning Corporation, 2005.
- [24] Kouyoumjian, R. Range requirements in radar cross-section measurements. In: Proceedings of the IEEE vol 53 iss 8, Columbus: IEEE, 1965. pp. 920-928
- [25] Vankka, Jouko. Maavoimien taktisen verkon tekniikat ja standardit. 1. painos. Helsinki: Edita Prima Oy, 2009. 383 s. ISBN 978-951-25-2025-1
- [26] Muth, L., Diamond, D. & Lelis, J. Uncertainty Analysis of Radar Cross Section Calibrations at Etcheron Valley Range. Colorado: NIST, 2004. 37s.