

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Ilkka Salonen

KESKINÄISKYTKENNÄN VAIKUTUS

MATKAVIESTINJÄRJESTELMIEN ANTENNIRYHMISSÄ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa
15. helmikuuta 1999

Työn valvoja

Professori

Pertti Vainikainen

Työn ohjaaja

TkT

Anssi Toropainen

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Ilkka S. Salonen	
Työn nimi:	Keskinäiskytken vaikutus matkaviestinjärjestelmien antenniryhmissä	
Päivämäärä:	15. helmikuuta, 1999	Sivumäärä: 140
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professuuri:	Radiotekniikka	Koodi: S-26
Työn valvoja:	Professori Pertti Vainikainen	
Työn ohjaaja:	TkT Anssi Toropainen	
<p>Tässä diplomityössä tutkitaan antennien välistä kytkentää ryhmäantennissa. Keskinäiskytkentä saattaa vääristää ryhmän suuntakuviota. Toteutetun ryhmän suuntakuviota poikkeaa tavoitellusta. Keskinäiskytkenstä aiheutuu myös ongelmallinen takaisheijastus ryhmän syöttöjen epäsovituksista johtuen.</p> <p>Keskinäiskytken aiheuttama suuntakuvien vääristymä voidaan korjata muuttamalla syöttökertoimia. Lineaarinen syöttöjännitteiden korjausmenetelmä on toteutettu ja testattu käytännössä. Korjaus toteutettiin käyttämällä matriisin pseudoinvarianssia. Se on virheen pienimmän neliösumman menetelmä. Lineaarinen korjaus antaa hyviä tuloksia kun käytetään kriteerinä korjatun ja tavoitteellisen suuntakuvion välistä korrelaatiota. Teoreettisia ja mittaukseen perustuvia tapoja tavoitesuuntakuvien luomiseksi on kokeiltu. Suuntakuvien ortogonaalisuutta ja lineaarista riippuvuutta on tutkittu ja tehty kokeita antennien paikkatietojen virheiden vaikutuksista korjauksen onnistumiseen. Substraatin reunat vaikuttavat mikroliuska-antennin tapauksessa. Ne aiheuttavat eroja elementtien suuntakuvioihin. Nämä erot korjautuvat yhdessä keskinäiskytkenstä aiheutuvien erojen kanssa.</p> <p>Useita tapoja ryhmäantennin sirontamatriisin määrittämiseksi on esitetty ja verrattu keskenään. Mahdollisuutta käyttää ryhmäantennin sirontamatriisia sen suuntakuvien korjaukseen kokeiltiin. Tulokset osoittavat, että sirontamatriisin käyttö korjauksessa antaa selvästi huonompia korjaustuloksia kuin käytetty pseudoinvarianssi. Työssä on osoitettu sokeiden suuntien mahdollisuus kuuden elementin lineaarisen mikroliuska-antenniryhmän tapauksessa, kun elementit ovat hyvin lähellä toisiaan. Sokeita suuntia tutkittiin sirontamatriisin ominaisvektorien avulla.</p>		
avainsanat:	Ryhmäantenni, keskinäiskytkentä, sirontamatriisi, suuntakuviot, lineaarinen korjaus, matkaviestinjärjestelmä	

Author:	Ilkka S. Salonen	
Name of the thesis:	Mutual coupling in mobile communication group antennas.	
Date:	February, 15, 1999	Number of pages: 140
Department:	Department of Electrical and Communication Engineering	
Professorship:	Radio Engineering	Code: S-26
Supervisor:	Professor Pertti Vainikainen	
0Instructor:	D. Sc. (Tech.) Anssi Toropainen	
<p>In this master's thesis mutual coupling effects in antenna arrays were studied. Mutual coupling between antenna elements can distort array pattern; resulting pattern differs significantly from desired pattern. Increased reflected power to antenna feed system due to poor impedance matching is also a problem resulting from mutual coupling phenomena.</p> <p>Pattern distortion due to mutual coupling can be corrected changing feed voltages. A linear feed voltage correction method was established experimentally. Linear correction was implemented using matrix pseudoinvariance, which is a least square error (LSE) method. Linear correction gives good results in sense of correlation between desired and corrected patterns. Theoretical and experimental desired pattern evaluation methods were tested. Pattern orthogonality and linear dependency were examined. The effect of antenna position difference in measurement and calculation on correction was also studied. Substrate edge effect takes place when microstrip antennas are used. This effect causes antenna element pattern differences, which can be corrected within those caused by mutual coupling.</p> <p>Several methods for finding array scattering matrix were demonstrated and compared with each other. Possibility to correct pattern using scattering matrix was proved. Results show that correction method using scattering matrix is not effective compared with the method using pseudoinvariance. It was demonstrated, that scan blindness effect can take place also in microstrip linear array with six elements, when the elements are very close to each other. Scan blindness was examined using scattering matrix eigenfunctions.</p>		
Keywords: Antenna array, mutual coupling, scattering matrix, antenna patterns, linear correction, mobile communications		

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty radiotietoliikennetekniikan kehittyviin tarpeisiin. Nykyaikaisen matkaviestinjärjestelmän tukiasema-antenneilta odotetaan entistä parempaa suorituskykyä ja samalla yksinkertaisuutta. Antennien pakkaaminen pienempään tilaan aiheuttaa niiden välisen kytkennän kasvun. Tutkittavana oleva aihe keskinäiskytkentä on melko vaativa ja työläs diplomityöaihe. Käsitykseni mukaan ongelman kanssa nousee seinä melko nopeasti pystyyn, jos halutaan syvällisempää ymmärrystä. Ongelmien ratkaisussa helposti jäädytään tai palataan alkutilanteeseen. Tärkeimpänä työn tavoitteena olen ymmärtänyt olevan osoittaa keskinäiskytkennän aiheuttamien vääristymien korjausmahdollisuuden olemassaolon ja toimivuuden sekä samalla vähentää keskinäiskytkentään liitettäviä pelkoja.

Tämä työ on tehty Teknillisen korkeakoulun radiolaboratoriossa. Olen kiitollinen kaikesta saamastani huomiosta ja siitä, että olen saanut tehdä ajankohtaista työtä, joka ei ole aivan tavanmukainen. Työn valvojaa Pertti Vainikaista ja ohjaajaa Anssi Toropaista haluan kiittää lämpimästi pohdiskelevista palavereista ja kärsivällisyydestä. Erityisen kiitoksen haluan lausua lisäksi kaikille niille, joilta olen saanut neuvoja ja kannustusta tämän työn aikana. Haluan myös kiittää perhettäni (Irina ja Kuisma) ymmärtämyksestä ja suvaitsevaisuudesta.

Helsingissä, 15. helmikuuta 1999

Ilkka Salonen

PS. Työhön liittyviä aforismeja

Alussa on toivoa

Lähtökuoppaan ei pidä hautautua

Mihin voisi käyttää kissaa, joka pyydystää pahvihiiiriä?

Hyvä yritys on arvo sinänsä (an sich)

Lohta kannattaa pyytää vaikka viemärin suulta

Radiotekniikka ei perustu toiveisiin

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Esipuhe	4
Sisällysluettelo	5
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	7
1. Johdanto	10
2. Teoreettiset perusteet, laskentamenetelmät ja kehitetyt kaavat	13
2.1 Antennijärjestelmä lineaarisena moniporttina	13
2.1.1 Passiivisen moniportin sähköiset ominaisuudet.....	13
2.1.2 Antenniryhmä lineaarisena N -porttina	15
2.1.3 Suuntakuviomittaus lineaarisena $N+1$ -porttina	15
2.1.4 Suuntakuviomittaus $N+M$ -porttina	17
2.2 Kompleksinen suuntakuvio	18
2.3 Matemaattiset menetelmät.....	19
2.3.1 Pseudoinvarianssin ja muiden matemaattisten menetelmien käyttö.....	19
2.3.2 Laskennan toteutus	20
2.3.3 Suuntakuviot vektoreina ja matriiseina.....	20
2.3.4 Suuntakuvioiden välinen korrelaatio	21
2.4 Suuntakuvioiden matriisiesitys ja syöttökertoimien korjaaminen.....	21
2.5 Pienen apertuurin kytkentämalli	23
2.5.1 Mallin toimivuuden rajat	25
2.6 Ekvivalenttien virtojen laskeminen	27
2.7 Sokeiden suuntien mahdollisuus.....	28
2.8 Apertuurikytkennän erottaminen sirontamatriisista	31
2.9 Sirontamatriisin määrittäminen suuntakuvioista oikosulkujen avulla.....	32
2.10 Suuntakuvioiden kehittäminen erisuurilla syöttökertoimilla.....	33
3. Mittaukset	37
3.1 Mittausten tavoitteet ja mittaustavat	37
3.2 Mitatut antennit	39
3.2.1 Antennien nimeäminen ja merkitseminen.....	39
3.2.2 Antennien ominaisuudet ja käyttö mittauksissa	40
3.2.3 Antennien suunnittelu ja valmistus	44
3.3 Mittauksissa käytetyt laitteistot ja mittausjärjestelyt	46
3.4 Mittausvirheiden kontrollointi	48
4. Tulosten tarkastelu	53
4.1 Havaintoja mitatuista elementtien suuntakuvioista.....	53
4.1.1 Elementtien suuntakuvioiden symmetriaominaisuudet	53
4.1.2 Vaihetiedon merkitys.....	54
4.1.3 Ryhmän suuntakuvioiden vertailu erillisantennien suuntakuvioihin.....	56
4.2 Ryhmäsuuntakuvioiden vääristymien kompensointi parhaalla sovituksella	58
4.2.1 Laskennalliset tavoitesuuntakuviot.....	58

4.2.2	Kompensointitulokset tasasyötöllä eri antenniryhmillä	59
4.2.2.1	Esimerkkejä kompensoinnista	59
4.2.3	Kompensoituminen erisuurten syöttökertoimien tapauksessa	63
4.2.4	Antenniryhmien kohdistamisen ja mitoituksen merkitys kompensoinnissa	66
4.2.4.1	Pyöritysakselin paikan merkitys	66
4.2.4.2	Laskennallisen elementtivälin vaikutus	70
4.2.5	Kahden antennin tapaus	71
4.2.6	Peittämistekniikan onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä	72
4.2.7	Jakajan ja peittelyn samanaikainen käyttö	76
4.3	Kompensoiminen sirontamatriisin avulla	77
4.4	Yhteenveto kompensointituloksista	84
4.5	Sirontaparametrien määrittäminen	84
4.5.1	Suoraan mitatut sirontamatriisit	84
4.5.2	Sirontaparametrien määrittäminen suuntakuviosta oikosulkujen avulla	85
4.5.3	Sirontamatriisin eri määrittelytavat	90
4.5.4	Mittaukset kolmen elementin ryhmillä	92
4.6	Sirontaparametrit ja ryhmän sovitus	92
4.6.1	Syöttökertoimet ja ryhmän sovitus	92
4.6.2	Sovitus ja suuntakuviot	93
4.6.3	Keilan kääntäminen ja sokeat suunnat	94
4.7	Elementtien itsenäinen osuus ryhmässä	97
4.8	Ekvivalentit virrat	103
4.9	Suuren takalevyn käyttö	105
4.9.1	Takalevyn käytön merkitys	105
4.9.2	Takalevyn ongelma kompensointimenetelmässä	107
4.10	Yhteenveto mittaustuloksista	108
5.	Mittaus- ja laskentatulosten valikoiva arviointi	112
5.1	Kompensoinnin onnistumisen tarkastelu	112
5.1.1	Lineaarisen korjauksen toimivuus	112
5.1.2	Korrelaatioiden suuruudesta	112
5.1.3	Korrelaation ilmaisemisen vaihtoehdot	113
5.2	Kompensointimenetelmän kehittäminen ja yleinen soveltaminen	114
5.2.1	Lineaariseen kompensointiin liitettävät kriteerit	114
5.2.2	Minimeitä korostava tapa arvioida kompensointimenetelmän hyvyttä	116
5.2.3	Korjattavuuden arviointi	117
5.2.4	Koko avaruuskulman suuntakuvioiden kompensointi	118
5.2.5	Kompensointimenetelmän käyttö polarisaatio huomioiden	118
5.3	Kompensoiminen ja samanaikainen sovittaminen	118
5.4	Mukautuvat (adaptiiviset) antennit ja keskinäiskytkentä	119
5.5	Arvio keskinäiskytkennän merkityksestä mikroliuska-antenniryhmissä	122
5.6	Keskinäiskytkentä ja antennien miniatyrisointi	123
5.7	Ortogonaalisten funktioiden käyttö	123
6.	Johtopäätökset	126
7.	Lähdeviitteet	128
LIITE I	Esimerkki sirontaparametreista	131
LIITE II	Parhaan ja huonoimman sovituksen syöttökertoimet	132
LIITE III	Korjauskertoimet ja laskemisjärjestys	134
LIITE IV	Kytkeämatriisi ja energiaperiaate	137
LIITE V	Suuntakuviomittauksen täydellinen sirontamatriisi	139
LIITE VI	Pienen apertuurin malli ja antennien epäsovitus	140

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

Merkinnät

- A** syöttömatriisi, diagonaalimatriisi, jonka diagonaalelementit ovat vektorin **a** elementtejä
- a, \bar{a}** antennin syöttövektori, dimensio $N \times 1$, antenniporotteihin etenevät (tai niistä heijastuneet) jännitteet
- b, \bar{b}** antenniporotteista heijastuneiden jännitteiden vektori, dimensio $N \times 1$
- C** kytkentämatriisi, kuvaa kytkentää ryhmäantennista avaruuteen/suuntakuviioon
- d** antennielementtien välinen etäisyys
- d** antennin paikkavektori
- E** matriisi, joka kuvaa ekvivalentit virrat suuntakuvioksi
- f** taajuus
- F** suuntakuviomatriisi
- F^{tav}** tavoitteellisten, suunniteltujen suuntakuvioiden matriisi
- F^{mit}** toteutuneiden, mitattujen suuntakuvioiden matriisi
- g** koordinaatiston nollakohtaan asetetun antennin suuntakuvio
- I** yksikkömatriisi
- \bar{I}** ekvivalenttien virtojen yksikön mittaiseksi normeerattu vektori
- j** imaginääriyksikkö i
- \bar{J} , **J**** substraatin pinnassa olevien ekvivalenttien virtojen vektori
- K** kompensatiomatriisi, ryhmäsuuntakuviion paranteluun käytetty matriisi
- k** korrelaation arvo
- k** verrannollisuuskerroin
- k** aaltoluku
- \bar{k}** aaltovektori
- N, n** antennielementtien määrä ja indeksi ryhmissä
- P** teho
- Q** suuntakuviomatriisin ortonormaaliksi kannaksi kuvaava matriisi
- r** elementtien suuntakuvioiden keskinäiskorrelaatioiden neliöllinen (rms) keskiarvo
- S** sirontamatriisi

	S_{ij}	sirontamatriisin alkio
SII		diagonaalimatriisi, joka sisältää sirontamatriisin diagonaalielementit
T		matriisin transpoosi
	U_i^+, U_i^-	syöttöporttiin i saapuva ja siitä heijastunut jänniteaalto
	\bar{U}^+, \bar{U}^-	syöttöportteihin saapuvien ja niistä heijastuneiden jänniteaaltojen vektori
U		suuntakuviomatriisi vaihtelevien päätteiden kokeessa, muut portit sovitettusti päätettyjä
V		suuntakuviomatriisi vaihtelevien päätteiden kokeessa, muut portit päätettyinä oikosuluilla
	X_j	porttiin j kytketyn päätteen päätetekijä
XII		päätetekijöiden diagonaalimatriisi
	z	suuntakuviopolynomin kompleksimuuttuja
Z		impedanssimatriisi
	Z^0	50 Ω :iin suhteutettu suhteellisten impedanssien matriisi
*		kompleksinen konjugaatti
‘		yläpilkku, Matlab-ohjelman mukainen merkintä adjunktio-operaatiolle *T
λ		aallonpituus
λ		sirontamatriisin ominaisarvo
θ		suuntakulma poikkeamana vaakatasossa vasemmalle suunnasta suoraan eteenpäin
φ		pystysuunnan suuntakulma
ε_r		suhteellinen permittiivisyys
$\Psi, \bar{\Psi}$		suuntakuvio ja sen vektoriesitys

Lyhenteet

<i>2MonoTaka</i>	kahden johtavan tason päälle asetetun monopoliantennin säädettävän etäisyyden ryhmäantenni
<i>ES11, RH1, RH2, RH3, RH4</i>	käytettyjä ryhmäantenneja
<i>pinv</i>	pseudoinvarianssi

Pr1, Pr2 yhden elementin perusantenneja
RH2ER1, RH2ER2, RH2ER3, RH2KK1 1-2 elementin vertailuantenneja
TEM Koaksiaalikaapelissa etenevä aaltomuoto.

1. Johdanto

Antenniryhmä on useamman lähekkäisen antennin ryhmä, jota käytetään haluttujen suuntaominaisuuksien aikaansaamiseksi radioaaltojen lähetyksessä ja vastaanotossa. Ryhmäantenni on kiinteästi toteutettu antenniryhmä. Sen erikoistapauksena on lineaarinen tasavälinen ryhmä, jossa antennit ovat yhdessä rivissä vakiovälein. Tässä työssä on mittauksin tutkittu ainoastaan tasavälisiä lineaarisia ryhmiä. Silti suuri osa tuloksista on yleistettävissä. Antenniryhmien käyttö on lisääntymässä, koska radiotietoliikennetekniikassa ollaan siirtymässä enenevässä määrin kohti adaptiivisten l. mukautuvien antennien käyttöä. Antennien syöttökertoimia muuttamalla saadaan aikaiseksi erilaisia suuntakuvioita. Lisäksi usean usean antennin vastaanotto ja signaalien sopiva yhdistely on tärkeä osa ns. toisteparannustekniikkaa. Työssä tutkitut antennit ovat olleet pääasiassa mikroliuska-antenneja, koska ne ovat potentiaalisia tulevaisuuden antenniratkaisuja. Ne ovat levymäisinä melko helposti yhdistettävissä erilaisiin rakenteisiin.

Keskinäiskytkennällä tarkoitetaan ryhmäantennien yhteydessä sitä, että syötettäessä jotain ryhmän antenneista, kytkeytyy osa syötetystä tehosta toisen antennin kautta sen syöttöporttiin. Tämä merkitsee suoraan sitä, että osa lähetystehosta palautuu lähetinjärjestelmään. Välillisesti keskinäiskytkennän olemassaolo kertoo, että antennit vaikuttavat toisiinsa ja sillä voi olla vaikutus myös suuntakuvioihin. Keskinäiskytkennän määrittäminen porttien signaalisuhteina ns. sirontamatriisin muodossa on mittausteknisesti ja matemaattisesti selkeä tapa. Laajemmassa mielessä on keskinäiskytkennän yhteydessä syytä tarkastella lisäksi ainakin ryhmän antennien vaikutusta toistensa suuntakuvioihin.

Keskinäiskytkennästä on ryhmäantennien toteutuksessa sellainen selkeä haitta, että ryhmän suuntakuviosta ei tule haluttua. Tyypillisesti keskinäiskytkentä alentaa suunniteltuja maksimiarvoja, leventää kapeita keiloja ja nostaa minimien ja sivukeilojen tasoja, siirtää keiloja ja niiden välissä olevia minimikohtia- ja arvoja. Tasaiseen ryhmän suuntakuvioon keskinäiskytkentä taas voi aiheuttaa vaihtelua [1].

Keskinäiskytkennällä on ennustettu olevan myös suorituskykyä alentava vaikutus adaptiivisissa antenniryhmissä [2].

Keskinäiskytkennän poistaminen toteutetusta antenniryhmästä on hankala tai lähes mahdoton tehtävä. Keskinäiskytkentää voidaan pienentää asettamalla antennien väliin esteitä [3,4]. Vaihtoehto edelliselle on lineaarinen korjausmenetelmä, jossa ryhmäantenneille etsitään sellaiset korjatut syöttökertoimet, että ryhmäsuuntakuvio vastaisi mahdollisimman hyvin suunniteltua. Suunnitellun ryhmäsuuntakuvion voidaan olettaa olevan identtisten, esimerkiksi isotrooppisten antennien, muodostama suuntakuvio.

Tässä työssä pyritään arvioimaan keskinäiskytkennän merkitystä, laskennallista mallittamista, mittaamista sekä tapoja keskinäiskytkennän vaikutusten eliminoimiseen. Päätaavoite on tutkia ja arvioida keskinäiskytkennän aiheuttamien suuntakuviovääristymien korjaamista. Keskeisessä asemassa ovat suuntakuviomittaukset ja niiden käyttö laskennassa. Korjauksen tuloksena saadaan korjatut syöttökertoimet, jotka toteuttavat halutun suuntakuvion tai niille korjausmatriisi. Myös sirontamatriisimittauksia syöttöjohdoista käytetään. Sähkömagneettinen kenttäsimulointi rajattiin pois työn menetelmistä. Tämä työ on siten täydennyksenä kentälaskennalle.

Keskinäiskytkentä vaikuttaa melko työläältä hallita ja teoreettisesti varsin hankalalta ilmiöltä, joka tuo lisävaikeutta antennisuunnitteluun. Tässä työssä on päädytty käyttämään runsaasti lineaarialgebraa ilmiöiden hallinnassa. Lineaarialgebran käyttö on perusteltua, koska antennisysteemi ja sen mittaustilanteet voidaan kuvata lineaarisena moniporttina. Lineaarialgebra on hyvin hallittua, mutta ei selitä ilmiöiden taustaa.

Työtä varten on jouduttu kehittämään jonkin verran mittaustapoja ja laskentaa ja suorittamaan mallien tarkastelua. Käytetyt suuntakuvioden matriisi- ja vektoriesitykset sekä käytetyt kaavat on esitetty yksityiskohtaisesti kohdassa 2, jossa on myös perusteltu mittausten mallit. Mittaustavoitteet, järjestelyt ja tutkitut antennit on kuvattu kohdassa 3. Kohdassa 4 esitellään ja samalla pohditaan mittausta- ja

laskentatuloksia. Syvällisemmät johtopäätökset mittaus- ja laskentatuloksista on valikoiden esitetty kohdassa 5, jossa keskitytään työssä saatuihin keskeisiin havaintoihin ja myös jonkin verran pohditaan yleisempiä yhteyksiä. Johtopäätöksissä kerrotaan lyhyesti keskeiset antennisuunnitteluun vaikuttavat havainnot. Kirjallisuusluettelon lisäksi työn lopussa on liiteosa. Liitteisiin on kerätty hankalimpien kaavojen erittelyjä ja todistuksia, jotka eivät pyrikään olemaan aukottomia.

Suurin osa työstä painottuu suuntakuvioiden mittaamiseen ja korjaamiseen mallisuuntakuviolla. Keskeisellä sijalla on lineaarisen korjauksen toimivuuden arvioiminen. Lineaarisen korjauksen yhteydessä tarkastellaan erityisesti tapoja toteuttaa mallisuuntakuviot ja korjauksen onnistumista korrelaatioiden avulla. Myös mittauksen järjestelyjen ja mittausgeometrian vaikutusta tarkastellaan. Sirontamatriisin hyödyntäminen ryhmän suuntakuvioiden korjaamisessa on myös kiinnostava asia. Tätä varten on mietitty useita tapoja määrittää tai arvioida sirontamatriisia suuntakuviomittauksilla. Iteroimalla on pyritty löytämään antennien säteilypintoihin l. apertuureihin redusoitu sirontamatriisi. Tässä yhteydessä antennien apertuureihin on käyty "kurkistamassa" myös suuntakuviosta laskennan kautta määräytyvien 'ekvivalenttien virtojen' avulla.

2. Teoreettiset perusteet, laskentamenetelmät ja kehitetyt kaavat

2.1 Antennijärjestelmä lineaarisena moniporttina

Keskinäiskykentä ryhmäantennissa kahden elementin välillä voidaan määrittää syöttämällä toista antenna ja vastaanottamalla signaali toisesta antennista. Ryhmäantenni toimii tällöin lineaarisena moniporttina. Siksi on paikallaan lyhyt esitys moniporteista.

2.1.1 Passiivisen moniportin sähköiset ominaisuudet

Passiivisen moniportin tärkeimmät ominaisuudet ovat lineaarisuus ja resiprookkisuus. Lineaarisuudesta seuraa, että moniportti voidaan hallita sirontamatriisilla. Sirontamatriisi kuvaa moniportin toiminnan täydellisesti tietyllä syöttöjohtojen impedanssilla, joka on radiotekniikassa tyypillisesti $50\ \Omega$. Resiprookkisuus tarkoittaa sitä, että kahden portin välinen sirontakerroin on molempiin suuntiin sama. Poikkeuksena resiprookkisuudesta ovat mm. plasmailmiöt ja ferriitti [1].

Sirontamatriisin elementti S_{ij} määritellään $50\ \Omega$:n järjestelmässä portista i tulevan (l. heijastuneen) jänniteaallon U_i^- suhteena porttiin j syötettyyn jänniteaaltoon U_j^+ , kun porttiin j on kytketty $50\ \Omega$:n generaattori ja portti i on kaikkien muiden porttien tavoin päätetty $50\ \Omega$:n kuormalla. Sirontakerroin S_{ij} on kompleksinen suure, mikä tarkoittaa sitä, että se sisältää sekä amplitudikertoimen että vaiheensiirron. Sirontakerroin määritellään yhtälöllä

$$S_{ij} = \frac{U_i^-}{U_j^+}. \quad (2.1)$$

Sirontamatriisi \mathbf{S} kuvaa portteihin syötetyt jännitteet (vektori \vec{U}^+), porteista heijastuneiksi, pois päin eteneviksi jännitteiksi (vektori \vec{U}^-)

$$\bar{\mathbf{U}}^- = \mathbf{S}\bar{\mathbf{U}}^+ . \quad (2.2)$$

Sirontamatriisin vertailupisteiksi asetetaan mittauksen kalibroinnissa tavallisesti N -portin syöttöportit, tässä tapauksessa N :n elementin ryhmäantennin syöttöportit.

Resiprookkisuus merkitsee sitä, että mittaustulos portista i porttiin j on sama kuin portista j porttiin i . Resiprookkisuuudesta seuraa se, että välttämättä ei tarvitse mitata kaikkia sirontamatriisin elementtejä, vaan voidaan sijoittaa $S_{ij} = S_{ji}$. Jos molemmat kertoimet (S_{ij} ja S_{ji}) on mitattu, ne asetetaan tarkkuuden parantamiseksi yhteiseen keskiarvoonsa. Kahden antennin välisen radioyhteyden resiprookkisuuus on myös hyvin tunnettu asia [5, 6, 7].

Impedanssimatriisi (\mathbf{Z} -matriisi) on vaihtoehtoinen tapa kirjoittaa sirontamatriisiin liittyvä tieto. Impedanssimatriisi määritellään porttien jännitteiden, vektori $\bar{\mathbf{U}}$, ja porttien virtojen, vektori $\bar{\mathbf{I}}$, avulla yhtälöllä

$$\bar{\mathbf{U}} = \mathbf{Z}\bar{\mathbf{I}} . \quad (2.3)$$

Impedanssimatriisin elementit, elementtien i ja j välinen keskinäisimpedanssi Z_{ij} saadaan portin j herätevirran ja portin i jännitteen suhteena muiden porttien ollessa ilman herätettä ja päätettyinä sovitetusti, jolloin pätee

$$Z_{ij} = \frac{U_i}{I_j} . \quad (2.4)$$

Yhteys \mathbf{S} - ja \mathbf{Z} -matriisin välillä saadaan helposti sijoittamalla yhtälöön (2.3) alla olevat yhtälöt:

$$I_i = I_i^+ - I_i^- = \frac{U_i^+}{Z_i} - \frac{U_i^-}{Z_i} , \quad (2.5)$$

$$U_i = U_i^+ + U_i^- , \quad (2.6)$$

missä Z_i on portin i kuorma ja I_i^+ ja I_i^- ovat portissa ulkoa katsoen porttiin päin etenevän jännitteen U_i^+ ja portista pois päin etenevän jännitteen U_i^- aiheuttamat virrat.

Sijoitus antaa

$$\bar{\mathbf{U}}^+ + \bar{\mathbf{U}}^- = \mathbf{Z} \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_1} & 0 & 0 & \dots 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_2} & 0 & \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Z_N} \end{pmatrix} (\bar{\mathbf{U}}^+ - \bar{\mathbf{U}}^-). \quad (2.7)$$

Kun lisäksi huomioidaan, että 50Ω :n järjestelmässä kaikilla i on voimassa $Z_i = 50\Omega$, voidaan \mathbf{Z} -matriisin elementit jakaa 50Ω :lla ja kun merkitään näin saatua matriisia \mathbf{Z}^0 :lla, voidaan kirjoittaa hyvin tunnettu kaava suhteellisille impedansseille \mathbf{Z}^0 matriisimuodossa

$$\mathbf{S} = (\mathbf{Z}^0 + \mathbf{I})^{-1}(\mathbf{Z}^0 - \mathbf{I}), \quad (2.8)$$

missä \mathbf{I} on yksikkömatriisi [3]. Tässä työssä mitataan vain sirontamatriisia käyttäen mittalaitteena vektoripiirianalysointia. Matriisi \mathbf{Z} esiintyy useissa viitteiden kaavoissa.

2.1.2 Antenniryhmä lineaarisena N -porttina

Kun N :n elementin ryhmän jokaiseen antenniin on kytketty oma liittimensä, voidaan mitata sirontamatriisi, joka on $N \times N$ -matriisi. Antenniryhmän sirontamatriisi on lineaarinen ja resiprookkinen. Avaruuteen etenevän säteilyn johdosta systeemi on myös häviöllinen.

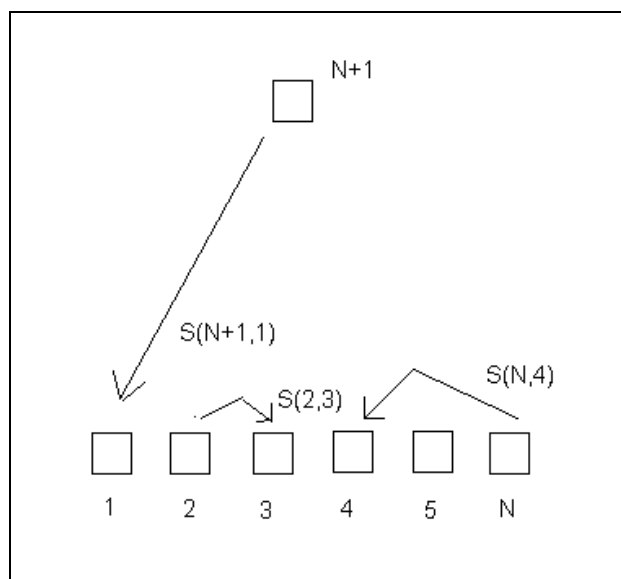
Sirontamatriisi mitataan sellaisessa tilassa, jota voidaan pitää vapaana tilana. Lineaarisuus merkitsee, että antennien syöttöporttien muodostama moniportti on hallittavissa sirontamatriisilla jolloin ulostulot määräytyvät lineaarisesti sisäänmenoista.

2.1.3 Suuntakuviomittaus lineaarisena $N+1$ -porttina

Suuntakuviomittauksessa N :n elementin ryhmän suuntakuvio mitataan käyttämällä toisena antennina vertailuantennia, joka on tarpeeksi kaukana, ns. kaukokentässä. Systeemi toimii $N+1$ -porttina, jossa yhden portin paikka muuttuu suuntakulman (θ)

mukana. Vertailuantenni sijoitetaan tarpeeksi kauas, jotta se ei vaikuttaisi mitattaviin ryhmän elementteihin ja niiden väliseen kytkentään. Mitattavina suureina ovat lähetyssuunnasta riippuvat sirontakertoimet vertailuantennista ryhmän antenneihin ($S_{i,N+1}(\theta)$, $i \leq N$), tai päinvastoin, ryhmästä vertailuantenneihin. Sirontaparametrin suuntariippuvuudesta käytetään tässä nimitystä suuntakuvi. Se on yleisessä tapauksessa kompleksinen suure. Kompleksiarvoisuutta ei aina erikseen korosteta puhuttaessa suuntakuviosta. Nimitystä säteilykuvi käytetään yleisesti kompleksisena ja polarisaatiot huomioivana suuntariippuvuutena ja suuntakuviomittauksia käytetään skaalatusta amplitudin suuntariippuvuudesta [5,7]. Tässä työssä suuntakuvioita 1. kompleksiarvoista suuntariippuvuutta käytetään sellaisenaan mitattuina kompleksisina lukuarvoina. Jos niitä kuitenkin skaalataan, skaalataan kaikkien antennielementtien kompleksiset suuntakuviot samoin, jotta niiden summan suunnasta riippuvat suhteellisen amplitudin muutokset ja vaiheen vaihtelut säilyisivät.

Suuntakuviomittauksen käyttö samalla tavoin sekä lähetyksessä että vastaanottotilanteessa perustuu resiprookkisuuteen, joka, kuten jo ylempänä tuli esille, on myös radiotien yhteydessä hyvin tunnettu ja perusteltu tosiasia [5,6,7]. Vertailuantennin kytkeytyminen erikseen ryhmäantennin eri elementteihin on myös resiprookkinen tapahtuma. Kuvassa 1 on havainnollistettu kytkentää N :n elementin ($N=6$) mittaussysteemissä porttien välillä.



Kuva 1 Suuntakuviomittauksen tapahtuma lineaarisena $(N+1)$ -moniporttina N :n antennielementtien ryhmälle. Suuntakuviomittauksessa määritellään portin $N+1$ suhteellisten kompleksisten sirontakertoimien riippuvuus porttiin $N+1$ kytketyn antennin suunnasta.

Systeemin lineaarisuus merkitsee myös yhdessä kenttien superpositioperiaatteen kanssa sitä, että ryhmäantennin kompleksinen suuntakuviota saadaan summaamalla erillisten antennien suuntakuvioita

$$\psi(\theta) = a_1\psi_1(\theta) + a_2\psi_2(\theta) + \dots + a_N\psi_N(\theta), \quad (2.9)$$

missä kertoimet a_i ovat normalisoituja kompleksisia syöttöjännitteitä ja $\psi_i(\theta)$ ovat antennielementtien suuntakuvioita. Suuntakuvioita mitataan riittävän kaukana ns. kaukokentässä. Koska vertailuantenni voi olla mitä tahansa tyyppiä ja etäisyys mielivaltainen, liittyy suuntakuvioihin aina mielivaltainen kompleksinen skaalaus.

Yleisessä tapauksessa ei suuntakuviolla eli vertailuantennin suunnasta riippuvilla sirontaparametreilla portista $N+1$ portteihin $1 \dots N$ ole mitään yhteyttä ryhmän porttien $1 \dots N$ välisiin sirontaparametreihin. Kaikkia sirontaparametreja on pidettävä itsenäisinä parametreina. Mitään suoraa ehtoa kahden sirontaparametrin väliselle riippuvuudelle ei voida esittää. Myöhemmin käsiteltävissä apertuurikytkentämalleissa näin ei välttämättä ole, vaan niissä voi olla lisäehtoja, jotka määräävät sirontaparametrien yhteyden toisiinsa. Mittattuja porttien signaaleita ja systeemin sisäisiä häviöitä sitoo vain energiaehto: energian häviämättömyys (ja lisääntymättömyys).

2.1.4 Suuntakuviomittaus $N+M$ -porttina

Jos suuntakuviota mitataan M erillisessä suunnassa voidaan jokaiseen suuntakulman asemaan (M kpl) kuvitella asetetuksi antenni ja portti. Tällöin suuntakuviomittauksen tilanne muodostaa lineaarisen ja häviöllisen $N+M$ -portin. Vertailuantennin vierekkäisiin paikkoihin asetetut portit eivät tällöin ole kytkeytyneet toisiinsa, kun kun valitaan tarpeeksi suuntaava kuviteltu vertailuantenni. Jos kaikkiin suuntiin asetetaan portit molemmille polarisaatioille ja vertailumittaukset kalibroidaan sopivasti, voidaan saada aikaiseksi häviötön $N+M$ -ulotteinen sirontamatriisi, joka kuvaa täydellisesti suuntakuviomittauksista ja samalla ryhmän antennielementtien kytkeytymistä. Porttien M sirontaparametrit on tällöin skaalattava yhdellä kompleksisella vakiolla niin, että tehon häviämättömyys toteutuu. Häviöttömän koko mittausjärjestelmän ortonormaalien sirontamatriisin kehittäminen liittyy suuntakuvioiden ortogonalisointiongelmaan ja on

kuvattu liitteessä V. Tällöin systeemissä ei saa olla vaimennushäviöitä. Lisäksi mittaukset olisi ulotettava koko avaruuden ja myös molempien kohtisuorien polarisaatioiden yli. Tämä ei ole helppoa eikä useimmiten järkevää. Suuntakuviomittauksen sirontaparametrit saadaan haluttaessa skaalattua epätäydellisen suuntakuviomittauksen tapauksessa kalibroimalla antennimittaus tehojen ja tehotiheyksien suhteen ja kuvittelemalla vertailuantennin suunta vastaamaan tiettyä avaruuskulmaa ja laskemalla siihen etenevä teho. Tämäkään ei ole yleisesti tärkeää, mutta voi tarvittaessa auttaa mittaustilannetta vastaavan sirontamatriisin rakentamista.

2.2 Kompleksinen suuntakuvi

Suuntakuvioita (säteilykuvioita) mitattaessa ei aina kiinnitetä huomiota vaihetietoon. Ryhmäantennien tapauksessa vaihetieto on oleellinen. Vaihetieto on mukana mittauksissa ja ryhmäsuuntakuvion kehittämisessä summaamalla elementtien suuntakuvioista kaavan 2.9 mukaisesti. Säteilyn suuntakuvi, jossa kenttien vaihetieto on mukana, voidaan esittää matemattisesti kompleksimuodossa. Sille ei ole vakiintunutta graafista esitystapaa. Usein vaihetieto liittyy vain antennin sijaintiin ryhmässä, koska elementit ovat hyvin samankaltaisia. Jos antennielementit poikkeavat toisistaan syntyy tästä lisävaikutus kokonaisvaiheeseen ja -amplitudiin. Tässä työssä ei käsitellä tapausta, jossa olisi annettu tavoitteellinen ryhmäsuuntakuvi ilman vaihetietoa. Työssä käytetty suuntakuvion lineaarinen korjausmenetelmä vaatii onnistuakseen elementtien suuntakuviot vaihetietoineen, vaikkapa vakiovaiheina 0. Se antaa korjatun suuntakuvion myös vaihetietoineen. Korjausmenetelmässä epärealistisella vaihetiedolla saadaan oletettavasti huonoja syöttökerrointen korjaustuloksia. Lopullisen ryhmäsuuntakuvion vaihetiedoilla ei silti tavallisesti ole mitään käyttöä. Ainoastaan monitie-etenemistilanteissa ryhmäsuuntakuvion vaihetieto on oleellinen.

Tässä työssä on mitattu lähes pelkästään yhden tason (vaakatason) suuntakuvioita yhdellä polarisaatiolla. Yleisessä tapauksessa suuntakuvi mitataan kaikkiin suuntiin erikseen kahdella ortogonaalisella polarisaatiolla. Tasosuuntakuvi vastaa hyvin työn käytännöllisiä tarpeita, mutta ei ole aina riittävä teoreettiseen tarkasteluun.

2.3 Matemaattiset menetelmät

2.3.1 Pseudoinvarianssin ja muiden matemaattisten menetelmien käyttö.

Pseudoinvarianssi on tavallisesta neliömatriisin kääntämisestä yleistetty käänteismatriisin pienimmän neliövirheen laskentatapa, jota voidaan käyttää silloinkin, kun mitattua dataa on enemmän kuin laskettavia parametreja [8,9,10,11]. Käännettävä matriisi ei ole tällöin neliömatriisi, jolloin sillä on vain toispuoleinen käänteismatriisi. Menetelmä muistuttaa parhaan ratkaisun etsimistä sellaiselle lineaariselle yhtälöryhmälle, jossa on enemmän yhtälöitä kuin tuntemattomia. Pseudoinvarianssia voidaan käyttää käänteisen tehtävän ratkaisuun. Tässä työssä etsitään sen avulla parasta kerroinmatriisia mitattujen ja tavoiteltujen antennielementtien suuntakuvioiden välille. Mittaustekniikassa mittausten määrän lisäämisestä on aina se etu, että toistomittauksia tekemällä satunnaisvirheen vaikutus lopputuloksiin pienenee kääntäen verrannollisena mittausten määrän neliöjuureen, kuten yhden parametrin mittauksissa. Alustavilla kokeilla saatu tulos osoitti, että pseudoinvarianssin käyttö korvaa täysin suuntakuvioiden korjaamisen syöttökertoimia iteroimalla ja on paljon varmempi ja nopeampi tapa.

Ei-neliömatriisin \mathbf{A} pseudoinvarianssi $\text{pinv}(\mathbf{A})$ voidaan määritellä matriisiyhtälöllä

$$\text{pinv}(\mathbf{A}) = (\mathbf{A}^{*T} \cdot \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{*T}. \quad (2.10)$$

Kun matriisi $\mathbf{A}_{M \times N}$ ($M \geq N$) kerrotaan pseudoinvarianssillaan oikealta, on tuloksena $N \times N$ yksikkömatriisi $\mathbf{I}_{N \times N}$. Matlab-ohjelma käyttää merkinnälle *T (transponointi ja konjugointi) lyhyesti merkintää ' (yläpilkku), jota käytetään tästä eteenpäin myös merkinnöissä.

Käytetyistä lineaarialgebran perusasioista on syytä mainita vektorien pistetulo, Pythagoraan lause ja Gram-Schmidtin ortogonalisointiproseduuri. Pistetuloa käytetään kompleksisessä mielessä. Ortogonaalisten vektorien pistetulo on nolla. Pythagoraan lausetta käytetään laajennetussa mielessä moniulotteisen vektorin normeerauksessa.

Tällöin vektorin normina eli pituutena käytetään neliöjuurta pistetulosta itsensä kanssa. Lisäksi Pythagoraan lause pätee, kun vektori hajoitetaan kahdeksi ortogonaaliseksi komponentiksi. Gram-Schmidin ortogonalisointiproseduurissa luodaan vektorijoukon vektoreiden avulla ortonormaali kanta, jossa kaikki joukon vektorit voidaan esittää [11].

Fourier-muunnosta voidaan käyttää ns. pienen apertuurin mallin tapauksessa (kohta 2.5) , jos antennielementtien suuntakuviot ovat sivusiirrosta aiheutuvaa vaihe-eroa huomioimatta identtiset ja jos elementtiväli on yli puoli aallonpituutta [1, 12].

2.3.2 Laskennan toteutus

Laskenta on toteutettu kokonaan Matlab-ohjelmalla, muutamaa EXCEL-ohjelmalla rakennettua ryhmäsuuntakuviota lukuunottamatta. Matlab on erityisesti lineaarialgebran tehtäviin erikoistunut, ohjelmoitava istuntotyyppinen laskentaohjelma.

2.3.3 Suuntakuviot vektoreina ja matriiseina

Antennielementin suuntakuviota voidaan esittää kompleksisina vektoreina. Tässä työssä on mitattu suuntakuviota vaakatasossa asteen välein 359 pisteestä, eli lähes koko 360 asteen kääntökulman verran. Suuntakuviot kootaan vaakavektoreiksi $\vec{\psi}_1$. Ryhmän antennielementtien suuntakuviot kerätään matriisiksi \mathbf{F} , jossa kukin vaakarivi vastaa tietyn elementin suuntakuviota. Rivin indeksi noudattaa elementin järjestyslukua. Kun mitattavalle ja tavoitesuuntakuviolle on saatu omat matriisinsa, voidaan etsiä kerroinmatriisi, joka parhaiten kuvaa mitatun suuntakuviomatriisin tavoitematriisiksi. Kerroinmatriisin avulla saadaan myös korjatut syöttökertoimet.

2.3.4 Suuntakuvioiden välinen korrelaatio

Kahden suuntakuvioiden $\vec{\psi}_1$ ja $\vec{\psi}_2$ välistä samanmuotoisuutta on arvioitu korrelaation avulla. Korrelaatio k on laskettu kaavalla

$$k = \frac{\vec{\psi}_1^T \vec{\psi}_2^*}{|\vec{\psi}_1| |\vec{\psi}_2|}. \quad (2.11)$$

Näin määritelty korrelaatio on varsin geometrinen ja selkeä. Se on sama kuin suuntakuviokvektorin projektiio toiselle vektorille jaettuna koko pituudellaan, eli yhdensuuntaisen komponentin suhteellinen pituus.

Tämä poikkeaa tavanomaisesta korrelaatiosta siten, että odotusarvoksi on pakotettu 0. Tämä on mielekästä, koska suuntakuvioiden skaalautuu aina mielivaltaisesti, kunhan kaikkia yhdistettäviä suuntakuvioiden skaalataan samoin, jos niitä vertaillaan. Mielivaltainen skaalaustekijä on käytännön tosiasia ja seurausta erilaisista etäisyyksistä, vaimennuksista ja vahvistuksista mittausketjussa. Vaiheeseen vaikuttaa suoraan mm. lähetys- ja vastaanottoantennien välinen etäisyys. Kun kaikki vaiheet ovat yhtä todennäköisiä, on mielekäs keskiarvo origossa.

Korrelaation avulla voidaan arvioida vektorien samankaltaisuutta, yhdensuuntaisuutta. Korrelaation puutteena on, että sen avulla ei voida valvoa mittauslaitteiston hitaita tehotason ja vaiheiden muutoksia. Niitä on valvottava erikseen jonkin vertailumittauksen avulla.

2.4 Suuntakuvioiden matriisiesitys ja syöttökertoimien korjaaminen.

Ryhmän elementtien i suuntakuviot $\vec{\psi}_i$ voidaan koota yhteen matriisiksi. Näin saadaan suuntakuviomatriisi \mathbf{F} . Ryhmäsuuntakuvioiden $\vec{\psi}$ voidaan laskea antennielementtien suuntakuviomatriisin \mathbf{F} ja syöttökertoimien $\vec{\mathbf{a}}$ avulla sijoittamalla

$$\vec{\psi} = \vec{\mathbf{a}}^T \mathbf{F}, \quad (2.12)$$

missä syöttövektori $\vec{\mathbf{a}}$ on pystyvektori, jonka dimensio on elementtien määrä N ja suuntakuviokvektori on vaakavektori, jonka dimensio on suuntakuvioiden mittapisteiden

määrä M . Määritellään edelleen kompensaatiomatriisi \mathbf{K} matriisiksi, joka kuvaa toteutetun ryhmän mitattujen suuntakuvioiden matriisiin (\mathbf{F}^{mit}) suunniteltujen suuntakuvioiden, tavoitesuuntakuvioiden, matriisiksi (\mathbf{F}^{tav}) seuraavasti:

$$\mathbf{F}_{NxM}^{tav} = \mathbf{K}_{NxN} \cdot \mathbf{F}_{NxM}^{mit}. \quad (2.13)$$

Tälle yhtälölle etsitään ratkaisua pienimmän neliösumman mielessä etsimällä paras arvo matriisille \mathbf{K} . Suuntakuvioiden pisteiden määrä (M) on yleensä huomattavasti suurempi kuin elementtien tai suuntakuvioiden määrä (N). Esimerkiksi on mitattu $M=359$, kun $N=6$. Kompensaatiomatriisi \mathbf{K} saadaan helposti käänteismatriisin avulla valitsemalla suuntakulmista sellainen alue, jossa on N pistettä. Pienimmän neliösumman virheen mukainen paras ratkaisu löytyy suuremmallekin kulma-alueelle pseudoinvarianssin avulla. Pseudoinvarianssia käyttämällä saadaan paras ratkaisu kompensaatiomatriisille yhtälön

$$\mathbf{K} = (\text{pinv}(\mathbf{F}^{mit}) \cdot \mathbf{F}^{tav})', \quad (2.14)$$

avulla. Yhtälössä käytetään Matlab-ohjelman merkintöjä. Merkinnät on selvitetty kohdassa 2.3.1. Tässä työssä käytetään lähes yksinomaan pseudoinvarianssia, vain poikkeustilanteissa tavallista käänteismatriisia, koska laskentapisteen määrän lisääminen lisää tarkkuutta.

Syöttökertoimet, syöttökerroinvektori $\bar{\mathbf{a}}$, on antennisyöttöjen kompleksinen vektori. Se on paljas luku ja vastaa portteihin tulevia jännitteaaltoja sopivasti skaalattuna [5]. Jäljempänä sitä käytetään myös porteista heijastuneitten signaalien merkintänä. Korjatut syöttökertoimet ($\bar{\mathbf{a}}_k$) saadaan suunnitelluista ($\bar{\mathbf{a}}$) kertomalla kompensaatiomatriisin transpoosilla (\mathbf{K}^T):

$$\bar{\mathbf{a}}_k = \mathbf{K}^T \bar{\mathbf{a}}. \quad (2.15)$$

Menetelmä vastaa viitteessä [13] käytettyä sovitusta pisteittäin. Kompensaatiomatriisin ratkaiseminen pseudoinvarianssilla on suoraviivainen tapa eikä vaadi iterointia. Hyvänä ja huonona puolena on sen yksinkertaisuus. Se ei sisällä muuta mallia kuin lineaariseen moniporttimalliin liittyvän yleisen lineaarialgebran käytön mahdollisuuden. Tästä seuraa se, että antennin kenttiin liittyvää hankalaa sähkömagnetiikkaa ei tarvitse ymmärtää. Näin pseudoinvarianssin käyttö ei anna sopivan kenttämallin rakentamiseen tarpeita, eikä lisää antennisuunnittelun hallintaa ymmärryksen kautta. Pseudoinvarianssi antaa lineaaristen korjausmenetelmien

joukossa aina parhaan sovitustuloksen pienimmän neliövirheen mielessä eikä siten voi olla teoreettisesti perusteltuja lineaarisia malleja huonompi menetelmä.

Pienimmän neliösumman virheen mukaisen korjauksen lisäksi on kokeiltu viitteessä [5] pienille antennille esitettyä tapaa korjata suuntakuviota sirontamatriisin avulla. Korjaustapaa perustelevaa mallia nimitetään tässä pienen apertuurin malliksi ja se esitetään tarkemmin seuraavassa kohdassa 2.5. Mallissa määritellään kytkentämatriisi (\mathbf{C}) kuvaamaan avaruuteen etenevää signaalia ja se saadaan sirontamatriisista (\mathbf{S}) yksinkertaisesti lisäämällä siihen yksikkömatriisi (\mathbf{I}):

$$\mathbf{C} = \mathbf{I} + \mathbf{S}. \quad (2.16)$$

Pienen apertuurin mallin mukaan kytkentämatriisin käänteismatriisi on sama kuin kompensatiomatriisi

$$\mathbf{K}^{\text{PA}} = \mathbf{C}^{-1}. \quad (2.17)$$

missä yläindeksi PA tarkoittaa pienen apertuurin mallia.

Apertuurikytkentä määritellään tässä apertuurien välisenä kytkentänä, sirontakertoimena apertuurien välillä. Määritelmä on mielekäs, jos apertuurifunktiot ovat aina yksikäsitteisiä, yksiulotteisia muuttujia, kuten vaikkapa apertuurijännitteitä V_i, V_j , jolloin

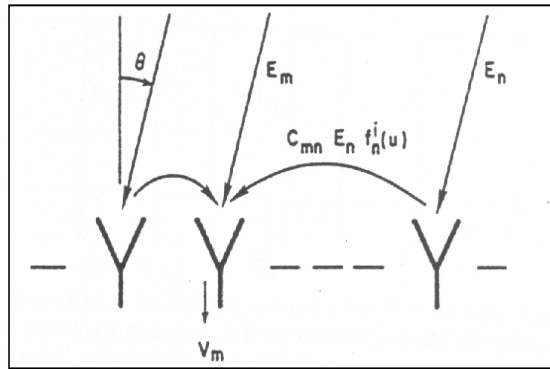
$$\mathbf{S}_{ij}^{\text{ap}} = \frac{V_j}{V_i}. \quad (2.18)$$

Jännite V_j on se jännite, mikä syntyy apertuuriin j , kun apertuuriin i synnytetään jännite V_i . Apertuurikytkennän mielekkyys on yrityksissä korjailta sirontamatriisia (\mathbf{S} -> \mathbf{S}^{ap}) redusoidulla se apertuuriin siten, että kaava (2.17) toimisi suuntakuvioiden korjauksessa mahdollisimman hyvin.

2.5 Pienen apertuurin kytkentämalli

Aallonpituuteen nähden riittävän pieni apertuuri voidaan mallittaa vain yhdellä parametrilla, esimerkiksi jännitteellä. Toisin sanoen, apertuuri on käytännössä fyysisesti pistemäinen tai siinä on aina esimerkiksi kentään tasajakauma. Tällaisessa

tapauksessa pitäisi päteä työssä [5] edellä esitetty tapa kompensoida ryhmäsuuntakuvion keskinäiskytkennästä aiheutuvat muutokset yksinkertaisesti sirontamatriisista \mathbf{S} saatavalla kytkentämatriisilla \mathbf{C} kertomalla mitattujen suuntakuvioiden matriisi kaavojen (2.13) ja (2.17) mukaisesti kytkentämatriisiin käänteismatriisilla \mathbf{C}^{-1} . Sirontamatriisin määrittäminen on varsin vaivaton prosessi, jos antennisyöttöjä ei ole kiinteästi yhdistetty. Kytkentämatriisi saadaan sirontamatriisista \mathbf{S} kaavalla (2.16). Kytkentämatriisi näyttää olevan yksiulotteisen tapauksen fyysisen rajapinnan yli kytkeytyneen kentän moniulotteinen vastine, kun tarkastellaan kytkentää syöttöjen suunnasta eli antennista avaruuteen.



Kuva 2 Pienen apertuurin malli [5]. Keskinäiskytkentä apertuurien välillä tasoaalto määriytyy sirontaparametreilla.

Menetelmää on käytetty kompensointiin viitteen [1] lisäksi menestyksellä myös viitteissä [14] ja [12]. Kohteena ovat olleet pienten dipolien ryhmät. Kytkentämatriisi kertoo viitteen [1] mallin mukaisesti sen, miten antennielementtiin n kytkeytyy tasoaaltoa suoraan (C_m) ja muiden elementtien apertuurien kautta (termit C_{mn} , $m \neq n$). Malli on kehitetty pienille antennille ja tässä työssä siitä käytetään nimeä pienen apertuurin malli. Kuvassa 2 on havainnollistettu tasoallon kytkeytymistä antenniin n ja siitä edelleen keskinäiskytkennän välityksellä toiseen antenniin m . Kytkennässä on mukana myös suuntakuvion vaikutus. Kun muistetaan, että sirontamatriisille \mathbf{S} pätee symmetria diagonaalien suhteen, i. resiprookkisuus, päätellään helposti, että vastaava symmetrian vaatimus kohdistuu myös pienen apertuurin mallin mukaiseen kompensatiomatriisiin \mathbf{K}^{PA} . Mallin mukaisesti keskinäiskytkennän tilanteessa saadaan antennin suuntakuvio $v_m(u)$ ryhmän antennin ideaalisista,

keskinäiskytkennästä vapaista suuntakuvioista $f^i(u)$ kytkentämatriisin kertoimien kautta kaavalla [1]

$$v_m(u) = c_{mm} E_m f^i(u) + \sum_{n, n \neq m} c_{mn} E_n f^i(u), \quad (2.19)$$

missä E_n ja E_m ovat antennielementteihin n ja m saapuva tasoallon kenttä. Matriisimuodossa yhtälön oikea puoli vastaa suuntakuviomatriisin kertomista matriisilla $\mathbf{I}+\mathbf{S}$. Mallin käyttöön liittyy sirontaparametrien redusointiongelma. Sirontaparametrit mitataan tavallisesti syöttöporteista. Mallissa ne on redusoitava apertuureihin. Tätä ongelmaa käsitellään tarkemmin kohdassa 2.9. Kun antennien portit on sovitettu, jolloin $S_{ii}=0$, saadaan apertuurijännitteet suoraan sisään tai ulos tulevista jännitteistä. Epäsovituksen takia tilanne monimutkaistuu. Apertuurien jännitteiden välistä kytkentää ja epäsovitusta on tarkasteltu malliin liittyen liitteessä VI. Apertuurien jännitteille ilman keskinäiskytkentää, \vec{V}_d , kun antennit ovat kaukana toisistaan ja keskinäiskytkennän tapauksessa, \vec{V} , käytetään mallissa yhtälöä

$$\vec{V} = (\mathbf{I} + \mathbf{S})\vec{V}_d. \quad (2.20)$$

Näiden jännitteiden suhde vastaa siis edellä olleen kaavan mukaisesti suuntakuvioiden suhdetta.

2.5.1 Mallin toimivuuden rajat

Pienen apertuurin malli ei toimi, jos seuraavat seikat (osin päällekkäiset) ovat merkittäviä:

- antenni aiheuttaa toisen antennin apertuuriin (iso apertuuri) kenttäjakautuman, jota toisen antennin syöttö ei itse tuota, jolloin tästä jakautuman aiheuttama suuntakuviot ei vastaa antennia suoraan syöttämällä saatavaa suuntakuviota.
- antennin ‘itse lähettämä’ suuntakuviot muuttuu toisen antennin läheisyydessä.
- antenni ei vastaanota tasoaltoa johtuen toisista antenneista
- antennin vaikutus toisen antennin vastaanottoon riippuu lähetyssuunnasta
- antenni on toisen antennin diffraktiokentässä. Toinen antenni ei ole vain pelkkä apertuuri. Se sulkee aina osan vapaata avaruutta sisäänsä. Kaikki apertuurit katkaisevat tasoallon ja niidenkin taakse syntyy diffraktiokenttiä.
- naapuriantennien telien, syöttöjohtojen ja metallointien vaikutus on merkittävä

Mikroliuska-antennin tapauksessa vaikuttaa siltä, että apertuurien kenttäjakautumilla voisi olla merkitystä. Varjostaminen ja diffraktio tuskin ovat merkittäviä rintamasuunnassa. Mikroliuska-antennit ovat niin pieniä, että niiden poistama avaruuden osuus ja vaikutus tasoaaltoon lienee myös vähäinen. Mikroliuska-antennia pidetään kahden pitkän raon säteilijänä, joissa kenttäjakauma on tasainen [15]. Vastaava kenttäjakauma syntyy, kun liuska analysoidaan magneettivirtojen avulla [16]. Raon pituuden vuoksi siihen voi toisen antennin takia syntyä heijastuksena muunkinlainen jakauma, joka säteilee toisenlaisen suuntakuvion kuin tasajakauma. Pitkä rako ei siis ole yhden parametrin apertuuri. Tässä työssä antennit on asetettu poikkeuksellisesti säteilevät reunat vastakkain, joten on mielekästä odottaa, että raosta tuleva tasajakautunut kenttä kytkeytyy toiseen antenniin myös tasajakautuneena kenttänä, jolloin mallin pitäisi toimia, koska apertuurin parametreja on vain yksi. Poikkeamat mallista aiheutuisivat muista reunoista tulevasta säteilystä. Koska ne ovat kauempana, niiden vaikutus lienee vähäinen.

Antennin toiminta voidaan selittää apertuurien kenttäjakauilla. Apertuuri määritellään niin, että se erottaa mahdollisimman yksinkertaisesti antennin ulkopuolisen ja sisäpuolisen osan. Esimerkiksi torviantennin apertuuri asetetaan torven suuaukkoon [5]. Apertuurin valinnassa on tärkeää, että kentät voidaan määrittellä apertuuripinnalla. Näin sähkömagnetiikalle saadaan antennin sisä- ja ulkopuolisen ratkaisun reunaehdot. Apertuuriantennien suuaukkoihin syntyvät kentät, joista suuntakuviota voidaan laskea, määräytyvät syöttöjohdossa etenevien aaltomuotojen mukaan. Jäljempänä apertuurilla tarkoitetaan antennin sisä- ja ulkopuolisen avaruuden erottavaa pintaa, joka ei välttämättä ole kohtisuorassa tehoa kuljettavaan Poyntingin vektoriin nähden, eikä apertuurissa välttämättä osata ratkaista kenttäjakamaa. Mikroliuska-antennin tapauksessa kentät raossa ovat lähes pystysuoria. Koska sellaiset kentät säteilevät vapaassa tilassa vaakasuuntaan, täytyy metalloinneilla olla merkitystä, koska mikroliuska-antenni säteilee enemmän ylöspäin metallipinnasta. Kentät taipuvat raon jälkeen ylöspäin ja mikroliuskan ulkopinnalle syntyy mahdollisesti merkittäviä virtoja. Apertuurit lienee syytä valita suljetuiksi pinnoiksi niin, että ne sulkevat mahdollisimman täydellisesti sisäänsä kaiken, mikä vaikeuttaa vapaan tilan mallin soveltamista apertuurin ulkopuolella. Tässä työssä ei

tähän laskennan osuuteen syvennyttä, mutta voidaan pitää mielessä, ettei mikroliuska-antennien kytkeytymisessä toisiinsa suora yhteys, kenttien eteneminen pintaa pitkin resonaattorista toiseen, ole välttämättä ainoa merkittävä kytkeytymistapa.

2.6 Ekvivalenttien virtojen laskeminen

Suuntakuvioista on laskettu antennielementtien tasossa olevia virtoja, jotka voisivat aiheuttaa suuntakuviot. Ekvivalenttien virtojen avulla on haluttu alunpitäen arvioida keskinäiskytkeä ja yritetty saada aikaiseksi apertuuriin redusoitu sirontamatriisi. Ekvivalentit virrat ovat tässä virtoja, jotka voivat olla antennin substraatin pinnan tasossa tai sen välittömässä läheisyydessä olevassa tasossa ja aiheuttavat samanlaiset suuntakuviot kuin on mitattu. Ekvivalentti virta korvaa suuntakuvion synnyttäviä todellisia virtoja ja kenttiä. Ne voivat olla todellisuudessa muuallakin kuin valitussa tasossa. Ekvivalentti virta saadaan viitteiden [5], [6] ja [7] kaavoilla virta- tai kenttäelementtien aiheuttamista suuntakuvioista kääntämällä lineaarikuvaus esimerkiksi pseudoinvarianssilla. Ekvivalentit virrat on laskettu yhtälöstä

$$\mathbf{E}_{M \times L} \tilde{\mathbf{J}}_{L \times N} = (\mathbf{F}_{N \times M})^T \quad (2.21)$$

ratkaisemalla muodostetusta yhtälöstä pseudoinvarianssilla kääntäen virtavektori \mathbf{J} . Vektori \mathbf{J} on substraatin pinnan tasossa olevien virtojen vektori. Matriisi \mathbf{F} on mitattujen suuntakuvioiden matriisi ja matriisi \mathbf{E} kuvaa jokaisen virta-alkion vastaavaksi kaukokentän virta-alkion suuntaiseksi sähkökentän vektoriksi, i. suuntakuvioksi. Ryhmän elementtien määrä on N , virta-alkioiden määrä L ja suuntakuvion mittapisteiden määrä on M . Matriisin \mathbf{E} alkiot ovat muotoa

$$E_{m,n} = b \cdot \cos(\theta_m) \cdot e^{jkl_n \sin(\theta_m)}, \quad (2.22)$$

jossa kerroin b on mielivaltainen vakio, kun ollaan kiinnostuneita vain jakauman muodosta. Suuntakulma θ on poikkeama ryhmän rintamasuunnasta vaakatasossa ja l_n on virta-alkion n etäisyys vertailupisteestä. Jos virta-alkio on suuntakuvion mittaustasoon nähden kohtisuorassa suunnassa, pitää kertoimesta jättää pois kosinitekijä. Virta-alkio on saman suuntainen kuin sen kaukokenttään aiheuttama sähkökenttävektori.

Toteutettu laskentatapa vastanee momentti- l. Galerkinin menetelmää pulssifunktioita käyttäen, joka vastaa myös pistesovitusta [6]. Täydellisempi kolmiulotteinen mittaus- ja laskentatapa tuloksineen on esitetty viitteessä [17]. Fourier-muunnos voidaan käyttää laskennassa, jos eksponenttitekijän edessä ei ole kosinitekijää. Näin on siinä tapauksessa, että tarkastellaan virtoja ja kenttiä, jotka ovat suuntakulmamittauksen kääntöakselin suuntaisia.

Ekvivalentit virrat on tässä työssä laskettu mittauserometrian yksinkertaisuuden vuoksi asettamalla kaikki virrat substraatin tasoon ryhmän yhdys suoralle ja yhdys suoran suuntaisiksi. Täydellisen kaksiulotteisen ekvivalenttien virtojen jakauman selvittäminen vaatisi suuntakuviopisteiden mittaamista ainakin puoliavaruuden yli kahdella polarisaatiolla. Tämä on käytössä olevilla resursseilla poissuljettu vaihtoehto. Vain muutamassa tapauksessa on suuntakuviomittauksessa poikettu suuntakuvion mittauksesta substraattiin nähden kohtisuorassa ja ryhmän yhdysjanan suuntaisessa tasossa ja saatu mahdollisuus kaksiulotteisen virtajakauman määrittelyyn.

Suuntakuvioiden tasoleikkausmittauksista saadut ekvivalentit virrat ovat mikroliuska-antennissa todellisten virtojen projektoiden summia, kun kaikki virrat projisoidaan samalle vaakasuoralle. Näin virrat kasautuvat yhteen ulottuvuuteen. Niiden pistetulon avulla määritellyn päällekkäisyyden avulla voidaan arvioida elementtien i ja j keskinäiskytken S_{ij} ylärajaa. Kun merkitään yksikön mittaiseksi normeerattuja virtavektoreita \mathbf{I}_i ja \mathbf{I}_j voidaan kirjoittaa epäyhtälö

$$S_{i,j} \leq \langle \bar{\mathbf{I}}_i, \bar{\mathbf{I}}_j \rangle, \quad (2.23)$$

missä pistetulo $\langle \bar{\mathbf{I}}_i, \bar{\mathbf{I}}_j \rangle$ lasketaan kompleksilukuvektorien pistetulona. Yläraja keskinäiskytkenälle on seurausta siitä, että laskentatapa kasaa virrat samalle suoralle, jolloin niiden päällekkäisyys lisääntyy, mikä merkitsee samalla lasketun kytkennän kasvua.

2.7 Sokeiden suuntien mahdollisuus

Kun keskinäiskytkentäisen ryhmäantennin keilaa käännetään, on pelättävissä ns. sokeiden suuntien syntyminen. Kun keskinäiskytkentä on voimakasta, on mahdollista, että tietyillä syöttökertoimilla ryhmäantenni tulee täysin epäsovitetuksi. Sokeiden suuntien ongelma koskee ennen kaikkea tilanteita, joissa antennikeilaa käännetään. Antennikeilaa käännetään käyttämällä progressiivisesti muuttuvia syöttökertoimia [6,7]. Jos huonon sovituksen syöttökertoimet ovat sellaiset, että ne toteutuvat antennikeilaa käännettäessä, voi vastaavassa kääntösunnassa antennikeila pienentyä tai pahimmillaan hävitä kokonaan, jolloin puhutaan ‘sokeasta suunnasta.’

Sokeiden suuntien osuminen lineaarisessa ryhmässä keilattaviin suuntiin lienee erittäin epätodennäköistä. Lineaarisissa ryhmissä on keskinäiskytkentä tavallisesti kokonaisuutena niin vähäistä esimerkiksi vastaavaan saman antennietäisyyden kaksiulotteiseen antenniryhmään verrattuna, ettei niiden yhteydessä täydellinen epäsovitus ole varmastikaan merkittävä huolen aihe. Kaksiulotteisessa ryhmässä on huomattavasti enemmän naapurielementtejä jotka voivat aiheuttaa toistensa syöttöportteihin takaisinheijastuksen eli tehon paluun järjestelmään.

Sovituksen ongelmaa voidaan lähestyä niin, että etsitään mahdollisimman huonon sovituksen aiheuttavat kertoimet. Vastaavasti voidaan etsiä sellaisia kertoimia, joilla sovitukset ovat mahdollisimman täydellisiä. Todellinen sovitus on aina näiden väliltä. Porteista heijastuneiden signaalien vektori saadaan kaavalla (2.2). Kun käytetään syöttöjohdon impedanssiin normalisoituja syöttökertoimia \mathbf{a} ja \mathbf{b} [1], saadaan sirontamatriisin \mathbf{S} ja syöttöaaltojen \mathbf{a} avulla heijastuneet jänniteaallot \mathbf{b} kaavalla

$$\bar{\mathbf{b}} = \mathbf{S}\bar{\mathbf{a}}. \quad (2.24)$$

Takaisin heijastunut, palannut teho P^{takas} voidaan laskea kaavalla

$$P^{\text{takas}} = |\bar{\mathbf{b}}|^2 = \bar{\mathbf{b}}^* \bar{\mathbf{b}} = (\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}})^* \cdot \mathbf{S}\bar{\mathbf{a}} = \bar{\mathbf{a}}^* (\mathbf{S}^* \mathbf{S}) \bar{\mathbf{a}}. \quad (2.25)$$

Täydellinen sovitus vastaa sirontamatriisin \mathbf{S} ja syöttövektorin $\bar{\mathbf{a}}$ välillä yhteyttä

$$\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}} = \mathbf{0}. \quad (2.26)$$

Yhtälö toteutuu kun \mathbf{S} on singulaarinen, eli $\det(\mathbf{S})=0$. Jos kaikki \mathbf{S} -matriisin alkiot ovat 0 tai lähes nollia, toteutuu yhtälö hyvin syöttövektorista riippumatta. Ainoastaan matriisin \mathbf{S} diagonaalelementit voidaan sovittaa tavanomaisesti sovituspireillä

nolliksi. Keskinäiskytken tapauksessa sovitus riippuu sirontamatriisin kautta syöttökertoimista. Yhtälöstä (2.26) seuraa yhtäpitävä yhtälö

$$(\mathbf{I} + \mathbf{S})\bar{\mathbf{a}} = \bar{\mathbf{a}}. \quad (2.27)$$

Tästä nähdään, että täydellinen sovitus saadaan aikaiseksi vain, jos matriisilla $\mathbf{I} + \mathbf{S}$, yksikkö- ja sirontamatriisin summalla, on ominaisarvo 1. Ominaisarvot ratkeavat helposti Matlab-ohjelmalla. Paras sovitus toteutuu syöttövektorilla, joka on jokin matriisin $\mathbf{I} + \mathbf{S}$ ominaisvektoreista ja sen ominaisarvo on lähinnä reaalilukua 1. $\mathbf{I} + \mathbf{S}$ on syöttöjen suunnasta nähty kytkentämatriisi \mathbf{C} .

Täydellistä epäsovitus voidaan etsiä kaavalla

$$|\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}}| = \sqrt{\bar{\mathbf{a}} \cdot \bar{\mathbf{a}}} = |\bar{\mathbf{a}}|, \quad (2.28)$$

$$\text{tai } \mathbf{S}\bar{\mathbf{a}} = \lambda \cdot \bar{\mathbf{a}}, |\lambda| = 1.$$

Täydellinen epäsovitus ei välttämättä toteudu. Huonoin sovitus löytyy helpoimmin ratkaisemalla sirontamatriisin ominaisvektorit ja ominaisarvot. Jälkimmäinen yhtälö vastaa, jos ehto ominaisarvolle λ poistetaan, sirontamatriisin ominaisarvoyhtälöä. Sitä on sovellettu valitsemalla antenniryhmän syöttöamplitudivektoriksi sirontamatriisin ominaisvektori, jonka itseisarvo on lähinnä ykköstä. Sovitustehtävä voidaan ratkaista täysin matriisien \mathbf{S} tai $\mathbf{I} + \mathbf{S}$ ominaisvektorien ja -arvojen avulla. Asia on esitetty liitteessä II. Syöttövektorin hajottaminen ominaissyöttövektorien kantaan saattaa myös helpottaa laskentaa.

Sirontamatriisin ominaisvektorit ja -arvot saadaan helposti Matlab-ohjelmalla. Saadusta ominaissyöttövektorista on vaikea päätellä, minkä tyypisessä suuntakuviossa se voisi toteutua. Kun haluttu suuntakuviio ja sen kääntämisessä käytetyt syötöt tunnetaan, voidaan heijastuneet signaalit ja tehot laskea kaavoilla (2.23) ja (2.24). Jos käännetään keilaa, voidaan etsiä huonojen sovitusten syöttökertoimet ja tarkistaa, että niistä pysytään keilaa käännettäessä riittävän kaukana, jottei mitään yllättäviä lähetetyn tai takaisinheijastuneen tai palanneen tehon muutoksia keilaa käännettäessä tapahtuisi.

Koska ryhmän antennit vaikuttavat toistensa suuntakuvioihin muutenkin kuin vain apertuuriensa kautta, esimerkiksi varjostamalla, ei ole mitenkään poissuljettua, etteikö

kuolleita, tai liian pienen tehon kulmia voisi syntyä muistakin syistä kuin sovituksen takia. Mikroliuska-antenneilla myös kytkeytymisen pinta-aalloksi substraatin pintaan on osoitettu voivan aiheuttaa täydellisen epäsovituksen ja sokeiden suuntien syntymisen [18]. Kytkeytymiseen pinta-aalloksi voi hyvinkin liittyä kasvava säteilemätön häviövaimennus. Pinta-aallon vähäisestä merkityksestä on kuitenkin viitteenä koe eripaksuisilla substraateilla [29].

2.8 Apertuurikytkennän erottaminen sirontamatriisista

Kohdassa 2.1 todettiin moniporttimallin yhteydessä, että sirontaparametrit ovat erillisiä, toisistaan riippumattomia. Kompensointimatriisiin tarvitaan apertuurien välisiä sirontaparametreja, kun käytetään pienen apertuurin mallia. Apertuurikytkennät eivät välttämättä ole sama asia kuin mitattu tai laskettu sirontamatriisi. Jos apertuurikytkennät saadaan jonkin järkevän mallin puitteissa erotettua sirontamatriisista, voidaan saada näin aikaiseksi kohdassa 2.5 esitetty kompensatiomatriisi, joka kuvaa sirontamatriisia paremmin apertuurien välistä kytkentää. Kompensatiomatriisiksi saadaan apertuurijännitteiden välisen riippuvuuden matriisin \mathbf{S}^{ap} avulla vaikkapa matriisi $(\mathbf{I} + \mathbf{S}^{ap})^{-1}$. Voidaan olettaa, että mikroliuska-antennien kytkentäelinten toteutuksesta aiheutuva epäsovitus ei vaikuta apertuurien väliseen kytkentään ja pyrkiä erikseen poistamaan se sirontamatriisista.

Mikroliuska-antennissa voidaan keskinäiskytkentä portista i porttiin j ajatella kytkentöjen ketjuna: portti i - resonaattori i - apertuuri i - apertuuri j - resonaattori j - portti j . Voidaan olettaa, että resonaattorien ja porttien välisillä kytkennöillä ei ole vaikutusta suuntakuvioiden muotoihin. Jos porttien syötöt ovat huonosti sovitettut resonaattoreihin, koostuu porttien sovitus moniporttimallissa (S_{ij}) lähinnä resonaattorien sovituksesta. Kun vielä huomioidaan kulkumatkaviive syöttöporteista apertuureihin voidaan apertuurien kytkennälle kirjoittaa likiarvo

$$S_{ij} = (1 + S_{ii})S_{ij}^{ap}(1 - S_{jj})e^{j\phi}, \quad (2.29)$$

missä Φ on vaiheviive syöttöportista apertuureihin ja takaisin, $S_{ij}^{ap} = 0$, kun $i = j$.

Tästä saadaan apertuurikytkennän sirontamatriisiin \mathbf{S}^{ap} ei-diagonaalitekijät

$$\mathbf{S}^{ap} = (\mathbf{I} + \mathbf{SII})^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{I} - \mathbf{SII})^{-1} e^{-j\Phi}, \quad (2.30)$$

missä \mathbf{SII} on diagonaalimatriisi, jonka diagonaalialkiot ovat \mathbf{S} :n diagonaalialkiota. Matriisin \mathbf{S}^{ap} diagonaalialkiot on erikseen nollattava. Kyse on approksimaatiosta, josta resiprookkisuuskin puuttuu.

Toinen ääritapaus saadaan, kun antennit voidaan ajatella täysin sovitetuksi eli ($S_{ii}=0$) ilman keskinäiskytkennän vaikutusta.. Epäsovitus syntyy nyt toisen antennin vaikutuksesta. Osa syöttöportista heijastuvista kentistä on käynyt havaitsemassa toisen antennin olemassaolon. Näin vastaava ketjutus ja antennin syötön epäsovituksen erottaminen ei tule kyseeseen. Tällöin voidaan approksimoida

$$S_{ij}^{ap} = S_{ij} e^{-j\Phi}, \quad \mathbf{S}^{ap} = \mathbf{S} e^{-j\Phi}, \quad (2.31)$$

missä vaihetekijä on ainoa ero sirontamatriisien välillä.

Jos kumpikaan ääritapaus ei vaikuta realistiselta, voidaan yrittää eteenpäin laittamalla yhtälössä (2.30) olevien matriisien \mathbf{SII} kertoimiksi lisätekijä k , $k \in [0,1]$. Esitetty ketjutustapa voi olla epämielekäs esimerkiksi tilanteessa, jossa antenniryhmän substraattiin muodostuu pinta-aaltoja. Pinta-aalloista mikroliuskaryhmissä on olemassa havaintoja [19,3].

2.9 Sirontamatriisin määrittäminen suuntakuvioista oikosulkujen avulla

Antenniryhmän sirontaparametrit määritetään tavallisesti syöttöportista mittaamalla ne esimerkiksi vektoriipiirianalysointorilla. Sirontaparametrit voidaan määrittää myös suuntakuvioista käyttämällä erilaisia päätteitä. Tämä vaihtoehtoinen menetelmä on melko hankala mittausten osalta, jos sitä verrataan sirontaparametrien määrittämiseen syöttöjohdoista käsin. Mitatuista suuntakuvioista voidaan määrittää helposti antennin sirontaparametrit S_{ij} , kun i ja j ovat erisuuria. Menetelmää on käytetty sirontamatriisin määrittämiseen ja välillisesti pienen apertuurin mallin hyvyuden arvioimiseen mikroliuska-antennin tapauksessa.

Laskenta on tapahtunut matriisimuodossa, jossa suuntakuviot ja sirontaparametrit ovat matriiseita. Kaikki muut portit kuin portti, josta suuntakuvio on mitattu, on päätetty sovitetusti yhdessä mittauksessa ja oikosuluilla toisessa mittauksessa. Näin on määritelty 12 kpl suuntakuvioita 6 antennin ryhmälle. Käytetyt matriisiyhtälöt ja niiden perustelut on esitetty kohdassa 4.2.2, missä tarkastellaan mittauksia ja niihin liittyviä ongelmia.

Matriisimenetelmä on kehitetty mittausjärjestelystä, jossa sirontaparametrit liitetään suuntakuvioihin ja erotetaan niistä. Sirontaparametrien määrittäminen suuntakuvioista on vaihtoehtoinen tapa syöttöporttimittauksille (kaava (2.1)). Menetelmä voidaan perustella seuraavasti. Jos ryhmän antennielementin i suuntakuvio mitataan niin, että portissa j on heijastava pääte (esimerkiksi oikosulku) ja muut ryhmän portit on päätetty sovitetusti, saadaan mitatuksi suuntakuvioiksi $V(i)$ porttien i ja j suuntakuvioiden yhdistelmä

$$V(i, \theta) = U(i, \theta) + X(j) \cdot S_{ij} \cdot U(j, \theta) \quad (2.32)$$

missä $U(i, \theta)$ merkitsee elementin i oikeata suuntakuvioita, joka saadaan, kun kaikki muut elementit on päätetty sovitetusti (käyttämättä oikosulkuja). $X(j)$ on päätetekijä, joka huomioi porttiin j kytketyn kaapelin pituuden ja sen, millainen pääte (oikosulku tai joku muu) sen päässä on. Yksinkertaisimmillaan päätetekijä on lukuarvo -1 , kun portti on sovitettu ($S_{jj}=0$) ja päätteenä on porttiin asetettu oikosulku. Kun päätetekijä X tunnetaan ja suuntakuviot V ja U on mitattu saadaan yhtälöstä (4.5) helposti ratkaistua sirontakerroin S_{ij} . Diagonaalelementit S_{ii} saadaan parhaiten tavalliseen tapaan piirianalysaattorin porttimittauksista piirianalysaattorin heijastuskertoimina S_{11} tai S_{22} .

2.10 Suuntakuvioiden kehittäminen erisuurilla syöttökertoimilla

Keskinäiskytkennän aiheuttamien haittojen eliminoimisen kannalta on tärkeää tutkia sen vaikutusta realistisissa tilanteissa. On tutkittu, miten keskinäiskytkentä vaikuttaa, kun on käytetty muita kuin tasasyöttöä. Tasasyötöllä ei saada aikaiseksi haluttua antennikeilaa. Erityisesti on haluttu tarkistaa, miten keskinäiskytkentä pilaa Tshebsheff-ryhmän suuntakuvioita. Suuntakuvioita, joiden syöttökertoimet

poikkeavat tasasyötöstä, on toteutettu kahdella tavalla, ensinnäkin niin sanottuna Schelkunoff-synteesinä jossa asetetaan suuntakuvion nollakohdat, ja toiseksi alhaisen sivukeilatason antavalla Dolphy-Tshebysheff-synteesillä. Schelkunoff-synteesi antaa tuloksena ryhmäsuuntakuvion ja Dolphy-Tshebysheff-synteesi syöttökertoimet [7,20].

Schelkunoff-synteesissä antenniryhmä kuvataan kompleksisena polynomina, jonka asteluku on yhtä pienempi kuin elementtien määrä. Isotrooppisen tasavälisen ryhmän kompleksinen suuntakuviokuva voidaan kirjoittaa seuraavasti [7,20]:

$$\psi(\vec{\mathbf{k}}, \vec{\mathbf{a}}) = a_1 + a_2 e^{j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}} + a_3 e^{2j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}} + a_4 e^{3j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}} + a_5 e^{4j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}} + a_6 e^{5j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}}, \quad (2.33)$$

missä yhteenlaskettavat kuvaavat antennielementtejä ja vektorin $\vec{\mathbf{a}}$ kertoimet a_i ovat elementtien kompleksisia syöttökertoimia, normalisoituja jänniteamplitudeja. Tekijä $\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}} = kd \sin \theta$ on yhden elementtivälin etäisyyden aiheuttama vaihesiirto suunnassa θ rintamasuuntaan nähden. Tässä on asetettu ensimmäisen elementin vaihe vertailuvaiheeksi eli vaiheeksi 0° . Vertailun vaihe voidaan kuuden elementin ryhmässä asettaa ryhmän keskelle kertomalla polynomi tekijällä $e^{-\frac{5}{2}j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}}$. Todellisen ryhmän suuntakuviokuva saadaan tästä vaihtamalla eksponenttitekijöiden paikalle elementtien ryhmässä mitatut suuntakuviot (vrt. kaavaan (2.12)). Yllä oleva lauseke on eksponenttitekijän 5. asteen polynomi. Tunnetusti kompleksimuuttujan viidennen asteen polynomilla on viisi nollakohtaa. Suuntakuviokuva voidaan esittää tulomuodossa, jossa on mukana kompleksitasen nollakohdat z_i

$$\psi(z) = a_6 (z - z_1)(z - z_2)(z - z_3)(z - z_4)(z - z_5), \quad (2.34)$$

missä $z = e^{j\vec{\mathbf{k}} \cdot \vec{\mathbf{d}}}$ ja a_6 on viimeisen elementin syöttökertoimen.

Schelkunov-synteesissä asetetaan haluttuihin suuntiin θ_i nolla-arvo asettamalla $z_i = e^{j\vec{\mathbf{k}}(\theta_i) \cdot \vec{\mathbf{d}}} = e^{jkd \sin \theta_i}$. Kompleksitasen nollat voidaan asettaa myös sellaisiin "suuntiin", jotka eivät näy suuntakuviossa. Tällaiset arvot saadaan, kun eksponentiksi asetetaan suurempi arvo kuin kd , jolloin vastaava $\sin \theta$ olisi suurempi kuin yksi. Näillä näkymättömillä suunnilla on sellainen merkitys antennisuunnittelussa, että jos suunnitellun isotrooppisen ryhmän, jonka syöttökertoimet on asetettu, elementtiväliä kasvatetaan, niin näkymättömissä oleva suuntakuviokuva siirtyy aina osittain näkyvälle alueelle [20]. Nollakohdat voidaan asettaa myös mille tahansa z -arvolle, yksikköympyrän sisälle tai ulkopuolelle. Koska todellinen z saa arvoja vain

yksikköympyrältä, ei näistä aiheudu isotrooppisten antennien suuntakuvioiden nollasuuntaa. Syöttökertoimet saadaan kirjoittamalla tulomuotoisen suuntakuvioiden polynomi (2.34) kertolaskut suorittamalla ylempänä olevaan muotoon (2.33). Matlab-ohjelmalla toteutettiin mahdollisuus antaa nollasuunnat, eksponentit suoraan tai koko nollasuunnan eksponenttilauseke z_i suoraan. Ohjelma laskee näiden perusteella elementtien syöttökertoimet a_i . Syöttökertoimien ratkaiseminen toteutettiin pseudoinvarianssin avulla. Pyrkimyksenä oli löytää sellaisia suuntakuvioiden, joilla on sopivan levyinen pääkeilataso ja alhaiset sivukeilatasot. Käytettäessä todellisia antennia, on ryhmäsuuntakuvioiden isotrooppisen ryhmäsuuntakuvioiden ja antennielementtien suuntakuvioiden tulo, jos ryhmän elementtien suuntakuviot ovat identtisiä [7]. Koska mikroliuska-antennin suuntakuvioiden isotrooppisen kaltainen laakea suuntakuvioiden isotrooppisista elementeistä kehitetyt suuntakuviot antavat myös mikroliuskarühmissä suoraan melko hyviä suuntakuvioiden. Kompensoinnilla ne saadaan korjattua halutuiksi. Syöttökertoimia muuntelemalla voidaan saada aikaan kohtuullisen helposti tyydyttävä suuntakuvioiden, kun käytettävissä on vain mitatut elementtien suuntakuviot ja syöttökertoimien lähtöarvot.

Tietoliikenteen tukiasema-antenneille asetetaan tyypillisesti vaatimus keilanleveyden ja sivukeilataso suhteen. Tutkittavilla ryhmillä lasketut keilat ovat olleet tavallista leveämpiä ja sivukeilataso n. 20 dB ... 30 dB Isotrooppisten antennien ryhmien optimaaliset kertoimet saadaan Dolphy-Tshebysheff-synteesillä, missä käytetään hyväksi Tshebysheff-polynomien ominaisuuksia. Tshebysheff-kertoimet laskettiin toteutettujen antenniryhmien elementtiväleille viitteen [7] suunnittelukaavojen avulla. Tshebysheff-tyypin polynomissa, jos potenssi on parillinen, yksi nolla tulee symmetriseen asemaan $z = -1$. Koska mikroliuska-antenni ei ole isotrooppinen, eivät Tshebysheff-kertoimet ole aivan optimaaliset. Hyviä kertoimia voidaan hakea kokeilemalla kaavan (2.34) avulla. Viitteen [20] kaavojen käyttö ei onnistunut sellaisenaan. Viitteen kirjain kaava parillisille elementtimäärille antaa hyviä tuloksia, kun $N \geq 12$. Kuuden antennin ryhmä toteutuu melko hyvin viitteen kaavoilla, jos elementtien määräksi asetetaan 7. Näin yksi elementti jää syöttöamplitudille nolla, eli ilman syöttöä.

Kun tavoiteltu suuntakuvio on kehitetty edellä esitellyillä tavoilla, aiheuttaa elementtien poikkeaminen isotrooppisista antenneista muutoksia suuntakuvioon. Varsinaisina vääristyminä on pidettävä elementtien suuntakuvion erilaisuuden aiheuttamia muutoksia. Keskinäiskytkeä on tällainen vääristävä tekijä, kun ryhmän elementtimäärä ei ole suuri [1]. Toteutettuihin suuntakuvioihin täytyy soveltaa korjausta.

3. Mittaukset

3.1 *Mittausten tavoitteet ja mittaustavat*

Suuntakuviomittaukset on suoritettu heijastuksettomassa huoneessa. Sirontaparametrit on mitattu laboratorihuoneessa mahdollisimman vapaassa tilassa. Ryhmien elementtien suuntakuviot on mitattu yksi kerrallaan siten, että muut antennit on päätetty sovitetusti. Ryhmän suuntakuvio voidaan rakentaa näiden suuntakuvioiden lineaarikombinaationa kaavan (2.9) mukaisesti käyttäen sopivia, esimerkiksi tasasyötön syöttökertoimia.

Elementtien ideaaliset suuntakuviot ovat usein suunnittelun lähtökohta, ja niistä summaamalla saaduista suuntakuvioista poiketaan todellisuudessa keskinäiskytkennän ja muiden epäideaalisuuksien takia. Kompensointimenetelmässä korjataan ryhmän elementtien suuntakuvioita todennäköisimmin niin, että niistä tulee paikkariippuvuutta vaille identtisiä. Kompensointimenetelmä antaa korjatut syöttökertoimet ja edellyttää tavoitesuuntakuvioita jokaiselle elementille. Tavoitesuuntakuvioita on haettu protoantennin suuntakuvion avulla ja peittelymenetelmällä. Ne kuvataan tarkemmin jäljempänä. Näiden lisäksi on käytetty tavoitesuuntakuvioina ryhmän keskielementillä rakennettua suuntakuvioita. Mitattujen sekä osittain laskettujen suuntakuvioiden lisäksi on käytetty myös puhtaasti laskennallisia tavoitesuuntakuvioita.

Antenniryhmän sirontamatriisin suora mittaus on suoritettu vektoripiirianalysointilaitteella. Kuten suuntakuviomittauksissa, on sirontaparametrimittauksissa kaikki muut kuin mitattava/mitattavat elementit päätetty sovitetusti. Sirontamatriisi kertoo sellaisenaan keskinäiskytkennän vaikutuksen antenniryhmässä, kun keskinäiskytkentää katsotaan syöttöpiiristä. Käyttäen sovitettujen päätteiden lisäksi oikosulkuja antavat suuntakuviomittaukset mahdollisuuden määrittää sirontamatriisi myös mitatuista suuntakuvioista jäljempänä (kohta 4.5.2) esitettyjen kaavojen avulla. Suuntakuvioista voidaan määrittää mikroliuska-antennin tapauksessa myös substraatin pinnan tasossa olevat ekvivalentit virrat ja laskea näiden pistetulon avulla arvio sirontamatriisille (kohta 2.5.3). Antennien suuntakuvioiden välistä korrelaatiota voidaan myös käyttää

arviona apertuurien välisestä keskinäiskytkenästä, joka on sama kuin apertuureihin redusoitu sirontamatriisi. Sirontamatriisin määrittäminen liittyy kiinteästi yritykseen kompensoida keskinäiskytkenän vaikutus pienen apertuurin mallin mukaisesti sirontamatriisia käyttäen (kohta 2.6).

Määrittämällä sirontaparametrit suuntakuviosta käyttäen vuorotellen oikosulkuja ja sovitettuja päätteitä pyrittiin kehittämään vaihtoehtoinen tarkka tapa mitata sirontaparametrit. Tapa perustuu siihen, että suuntakuviomittauksiin liitetään mukaan kertoimiksi sirontaparametreja. Tätä sirontamatriisin mittaustapaa on käytetty arvioitaessa pienen apertuurin mallin mukaista mahdollisuutta korjata suuntakuvioita sirontamatriisin avulla [1]. Johtopäätöksiä voidaan tehdä vertaamalla näin saadusta sirontamatriisista laskettua kompensatiomatriisia, suoran sirontaparametrimittauksen antamaa kompensatiomatriisia ja tavoitesuuntakuviolla luotuja kompensatiomatriiseja keskenään. Oletus oli, että pienen apertuurin mukaisen kompensointimatriisin olisi oltava hyvin lähellä pienimmän neliösumman menetelmän mukaista kompensatiomatriisia, jos pienen apertuurin malli on realistinen lähtökohta mikroliuska-antennien suuntakuvioiden korjaamiseen. Suuntakuviosta mitatun sirontaparametrin osuus tässä tarkatelussa on se, että jos se antaa riittävän tarkasti sirontamatriisin, ei syy kahden muun mainitun matriisin eroihin ole suuntakuviomittausten epätarkkuudessa.

Peittelymittauksilla etsittiin alunpitäen kompensointimenetelmään sopivia tavoitesuuntakuvioita, joita keskinäiskytkenä ei olisi pilannut. Lähtökohtana oli estää kytkentä elementtien välillä eliminoimalla toinen elementti resonaattorina peittämällä se vaimennuslevyllä tai siirtämällä sen resonanssitaajuutta. Loppua kohti tapa tarkentui siten, että sillä pyritään identtisiin elementtien tavoitesuuntakuvioihin. Tämä tarkoittaa, että peittelyllä pyritään eliminoimaan kaikki suuntakuvioiden epäidenttisuuden syyt, paikkatietoa lukuunottamatta. Tärkeäksi osoittautunut poistettava tekijä on reunadiffraktion vaikutus. Peittelyyn käytettiin alumiinifolioita ja vaimennuslevyjä. Alustavasti kokeiltiin erilaisia vaimennusmateriaaleja ja etsittiin sopivia suuren permittiivisyyden peittolevyjä. Kokeiltiin mm. suolaliuoksella kyllästettyä puulevyä. Sen käyttö osoittautui liian epävarmaksi. Peittelyn lisäksi käytettiin elementin syöttöelimen oikosulkemista tapana eliminoida keskinäiskytkenä

liuskaryhmän tapauksessa. Pääasiallisesti peittämismateriaaliksi valikoitui n. 3 mm:n paksuinen Emerson&Cuming-yhtiön silikonikuminen vaimennusmateriaali.

Mittauksissa antennielementtiin on kytketty mittauskaapeli tai pääte. Antenniryhmät eivät aina ole sellaisia, että niissä antennielementeillä olisi erilliset syöttöportit. Tästä syystä kokeiltiin myös tilannetta, jossa kaikki elementit on jatkuvasti kytketty mittaukseen jakajan avulla. Kompensointimatriisi pyrittiin löytämään mittauksilla, joissa osa elementeistä oli peitetty ja osa peittämättä, eri tavoin kombinoiden. Tapa vaatii mutkikasta matriisilaskentaa elementtien suuntakuvioiden erottamiseksi mittauksista.

Takalevyn käytöllä pyrittiin estämään takaa tulevat häiriöt. Mikroliuska-antennit toteutetaan takalevyllä, joka toimii maatasona. Reunadiffraktion vaikutuksen pienentämiseksi takalevy haluttiin mahdollisimman suureksi. Suuri takalevy ei tilan ahtauden takia ole käytännössä mahdollinen. Takalevy valmistui vasta lopuksi, eikä sillä ehditty suorittaa kuin muutama tarkistusmittaus.

3.2 Mitatut antennit

3.2.1 Antennien nimeäminen ja merkitseminen

Useampi mikroliuska-antenni ja -antenniryhmä valmistettiin. Mittaustietojen järjestämisen helpottamiseksi annettiin mitattaville mikroliuska-antenneille nimi ja se kirjoitettiin antenneihin. Ryhmäntennien elementit numeroitiin etupuolelta katsoen vasemmalta oikealle numeroin 1-6. Valmistettuihin antenneihin piirrettiin varmuuden vuoksi myös koordinaatisto, jonka akselit olivat edestä katsoen ylös ja oikealle. Takapuolelle liittämiin piirrettiin samat numerot kuin etupuolelle.

Seuraavia nimityksiä käytetään tästä eteenpäin myös esityksen yksinkertaistamiseksi mittaustulosten tarkastelussa.

Taajuuden 2,16 GHz ryhmät

ESII Radiolaboratoriossa aiemmin rakennettu 2,16 GHz:n ryhmä. Ryhmässä on kaksi 8 elementin riviä. Elementit ovat neljännesaallon mittaisia, toisesta päästä oikosuljettuja mikroliuska-antennielementtejä. Ne olivat ilmaeristeisiä ja toteutettu kuparista taivuttamalla. Ryhmä on kuvattu tarkemmin diplomityössä [21].

2MonoTaka 2,16 GHz:n kahden neljännesaallon mittaisen monopolin ryhmä säädettävällä antennien etäisyydellä. Monopolit olivat johtavan tason päälle rakennettuja ja siten etusuunnassa toiminnallisesti puolen aallon mittaisia dipoleja. Toista antennia voitiin siirtää pitkässä urassa. Antenni on valmistettu aiemmin radiolaboratoriossa.

Suunnittelutaajuuden 5,3 GHz ryhmät ja erillisantennit.

Nämä ovat mikroliuska-antenneista valmistettuja 6 elementin ryhmiä ja niiden kaltaisia erillisantenneja.

Pr1, Pr2 protoantenneja, erillisiä mikroliuska-antenneja kehittämissä vaiheista

RH1 6 elementin mikroliuskar ryhmä, elementtietäisyys puoli aallonpituutta

RH2 6 elementin mikroliuskar ryhmä, elementtietäisyys puoli aallonpituutta

RH3 6 elementin ryhmä, elementtietäisyys n. kolmannes (0,3) aallonpituutta

RH4 6 elementin ryhmä, elementtietäisyys n. 0,93 aallonpituutta

RH2ER1, RH2ER2, RH3ER3 Ryhmän *RH2* elementtejä 4,5 ja 6 kuvaavia erillisantenneja

RH2KK1 Ryhmän *RH2* elementtejä 4 ja 5 kuvaava kahden antennin ryhmä.

3.2.2 Antennien ominaisuudet ja käyttö mittauksissa

Kahdeksan elementin ryhmällä *ESII* tehdyt mittaukset olivat harjoittelua tulevaa varten. Kahdeksan elementin ryhmä toteutettiin peittämällä alarivi absorbaattorilla ja oikosulkemalla sen elementit. Ryhmällä kokeiltiin kompensointia käyttäen tavoitesuuntakuviota ja kytkentämatriisia. Myös Fourier-muunnosta pienen apertuurin mallin mukaiseen kompensointiin viitteen [1] mukaisesti kokeiltiin huonolla menestyksellä. Syynä oli ilmeisesti elementtien suuntakuvioiden erilaisuus. Ryhmän antennien sähkökentän polarisaatiosuunta oli kohtisuorassa ryhmän yhdyssuoraan nähden. Yhdyssuora oli mittaustasossa.

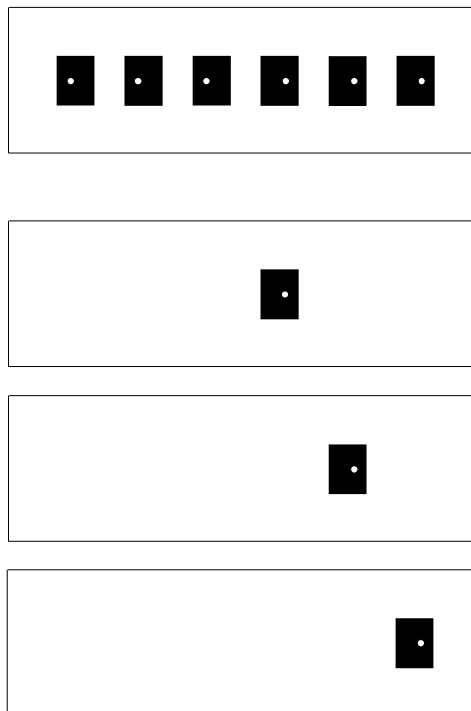
Pariantennia *2MonoTaka* käytettiin testaamaan onko sirontaparametrit mitattavissa suuntakuvioiden avulla käyttämällä oikosulkua ja avointa liitintä toisessa elementissä. Tulos antoi viitteen, että menetelmä on tarkkuuden rajoissa mielekäs. Menetelmällä saadut tulokset on mikroliuska-antennin tapauksessa kuvattu kohdassa 4.4.2.

Mikroliuska-antenneilla oli tarkoitus suorittaa kaikki lopulliset mittaukset ja jättää muut antennit harjoitusantenneiksi. Ryhmän elementit valmistettiin Rogersin duroid-substraatille. Oletettiin, että suuren permittiivisyyden ϵ_r substraatilla olisi mahdollisuus päästä suuriin keskinäiskytkennän arvoihin. Käytetyn duroidin ϵ_r oli vain 2,94. Lisäksi duroidin mahdollisena haittapuolena on se, että se on myötävä materiaali, jonka takia ryhmän vääntyminen on mahdollista. Alunperin tarkoitus oli käyttää suuren ϵ_r :n TMM-substraattia (Rogers). Se osoittautui keraamisena komposiittimateriaalina liian vaikeaksi työstää laboratorion pajassa. Antenniryhmiä tehtiin 4 kpl. Niiden elementit ovat identtisiä, mutta eri ryhmissä eri etäisyyksillä toisistaan. Etäisyydet ovat $0,3\lambda$, $0,5\lambda$ ja $0,9\lambda$ antennille järjestyksessä *RH3*, *RH1*, *RH2* ja *RH4*. Kahdessa ryhmässä (*RH1*, *RH2*) on sama $0,5\lambda$:n etäisyys. Osoittautui, että elementtien resonanssitaajuudet vaihtelevat välillä 5,18 GHz ... 5,30 GHz. Tästä seuraa suuri sovitusten vaihtelu 5,30 GHz:llä, jolloin paluuvaimennus vaihteli välillä -5 dB ... -35 dB. Näin elementit eivät toteuta hyvin identtisyyden vaatimusta. Resonanssitaajuuksien virittämisestä samoiksi leikkaamalla mikroliuskoista paloja luovuttiin, koska oli epäily, että samalla olisivat aaltomuodot muuttuneet ja tällä on samoin kuin resonanssitaajuuksilla vaikutuksensa elementtien väliseen kytkentään. Ryhmien *RH1*, *RH2*, *RH3* ja *RH4* antennien sähkökentän polarisaatiosuunta oli yhdensuuntainen ryhmän yhdyssuoraan nähden. Yhdys-suora oli suuntakuvioiden mittaustasossa. Protoantennit olivat mittauksissa samoin päin kuin ryhmien antennit. Antennien suunta ryhmässä valittiin siten, että niiden säteilevät reunat tulivat vastakkain. Näin tavoiteltiin mahdollisimman suurta kytkentää antennien välille. Suuntakuvioiden mittaukset suoritettiin pistetaajuuksilla 5,20/5,22/5,24/5,26/5,28/5,30 GHz, joista suunnittelutaajuuden 5,30 GHz mittaukset analysoitiin.

Kolme antenniryhmää (*RH2*, *RH3*, *RH4*), joissa antennielementtien vakioetäisyydet ovat erilaiset, on symmetrisoitu asettamalla elementtien syötöt symmetrisesti ryhmän

keskikohdan suhteen. Tällä tavoiteltiin ryhmäantenniin mahdollisimman suurta symmetrisyyttä ja haluttiin parantaa mahdollisuutta käyttää vertailuantenneja *RH2ER1*, *RH2ER 2* ja *RH2ER3* mallisuuntakuvioiden rakentamiseen. Näitä ryhmäantenneja on kaukokenttien saamiseksi samaan vaiheeseen syötettävä tasasyötön tapauksessa antisymmetrisillä syöttökertoimilla $(-1,-1,-1,1,1,1)$. Esitetyissä tuloksissa tasasyötöllä tarkoitetaan näiden antennien tapauksessa suuntakuvioiden antisymmetrian poistavaa syöttövektoria $(-1,-1,-1,1,1,1)$. Näin kertoimet pyritään kirjoittamaan jäljempänä niin kuin ne ovat vastaavalle normaalisyöttöiselle, virtojen suhteen symmetriselle ryhmälle, kuten *RH1*, jotta sekaannus tuloksia tarkasteltaessa olisi mahdollisimman pieni. Jos syötön paikalla on merkitystä, ei antisymmetrisiä antenneja voida pitää tasavälisinä.

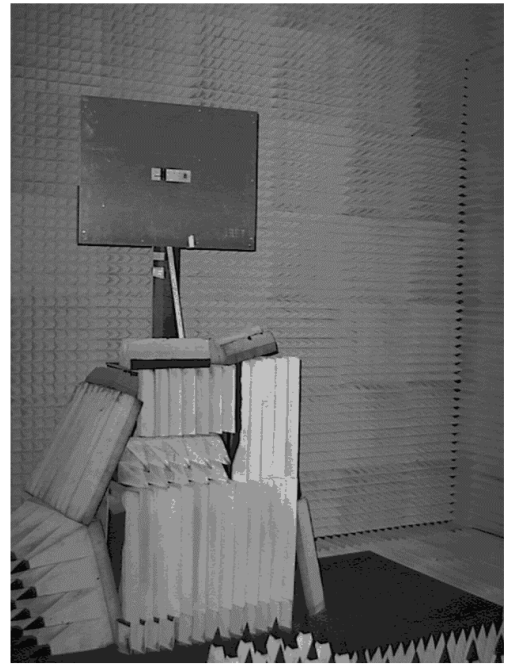
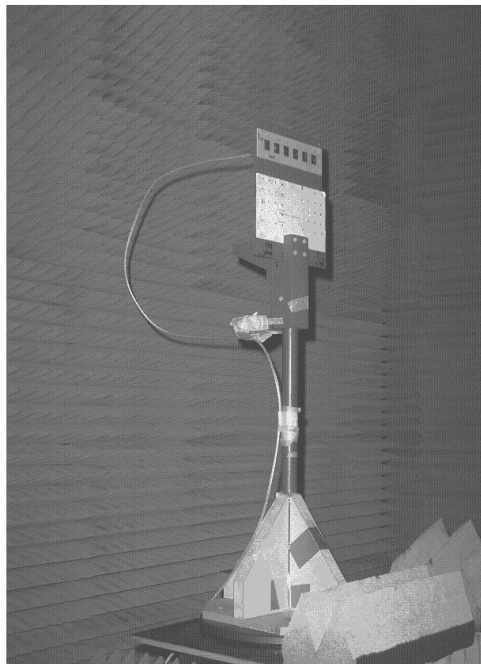
Kaksi ryhmää on valmistettu niin, että kaikkia syöttöjä ei ole juotettu heti paikalleen. Näillä välivaiheen ryhmillä on saatu tietoa, mikä on pelkän antennin resonaattorin läsnäolon vaikutus muihin antenneihin. Näissä antenneissa oli vain kolme toimivaa elementtiä.



Kuva 3. Ylinnä mikroliuska-antenniryhmä *RH2*, jossa elementtien etäisyys on $0,5\lambda$. Alemmissä kuvissa on vastaavan kokoiset substraattilevyt, joilla on kullakin vain yksi suorakaiteen muotoinen elementti ylläolevan ryhmän vastaavan elementin kanssa samassa paikassa. Alemmat antennit toimivat keskinäiskytkemättömien antennien malleina. Antennien syöttöjen paikat on symmetrisoitu ryhmäantennin keskikohdan suhteen ja ne on piirretty kuvaan kaksinkertaisella suurennoksella.

Kuvassa 3 on ylinä kuva kuuden elementin mikroliuskaryhmästä *RH2*, jossa elementtien välinen etäisyys on noin puoli aallonpituutta. Alempana vertailuantennit, joiden avulla saadaan yhden elementin ideaalinen suuntakuviokuva keskinäiskytken suhteen. Elementtiä eivät muut ryhmän elementit ole häiritsemässä. Erilliselementit vastaavat ryhmän elementtejä 3-6. Erillisantennien suuntakuvioista on rakennettu ryhmän elementtien suuntakuvioita elementeille 1-3 (järjestyksessä edestä vasemmalta oikealle) laskennallisen peilauksen avulla tai mittaamalla suuntakuviokuva erillisantenni ylösalaisin käännettynä.

Valmistetut antennitelineet on esitetty kuvassa 4. Vasemmalla on teline ilman erillistä metallista takalevyä ja oikealla teline metallisella takalevyllä varustettuna. Vasemmalla oleva teline on valmistettu PVC-muovista ja sillä suoritettiin suurin osa mittauksista. Teline on kevyenä käytännöllinen, mutta ei välttämättä tarpeeksi jäykkä. Takalevyllä olevan erillisantennin (*RH2Er1*) päälle on asetettu esimerkin vuoksi myös yksi käytetty absorptiolevy, joka on kuuden elementin ryhmän antennin 2 kohdalla, kun erilliselementti on ryhmän antennin 6 kohdalla. Takalevy on alumiinia ja sen tasomitat ovat n. 90 cm x 70 cm.



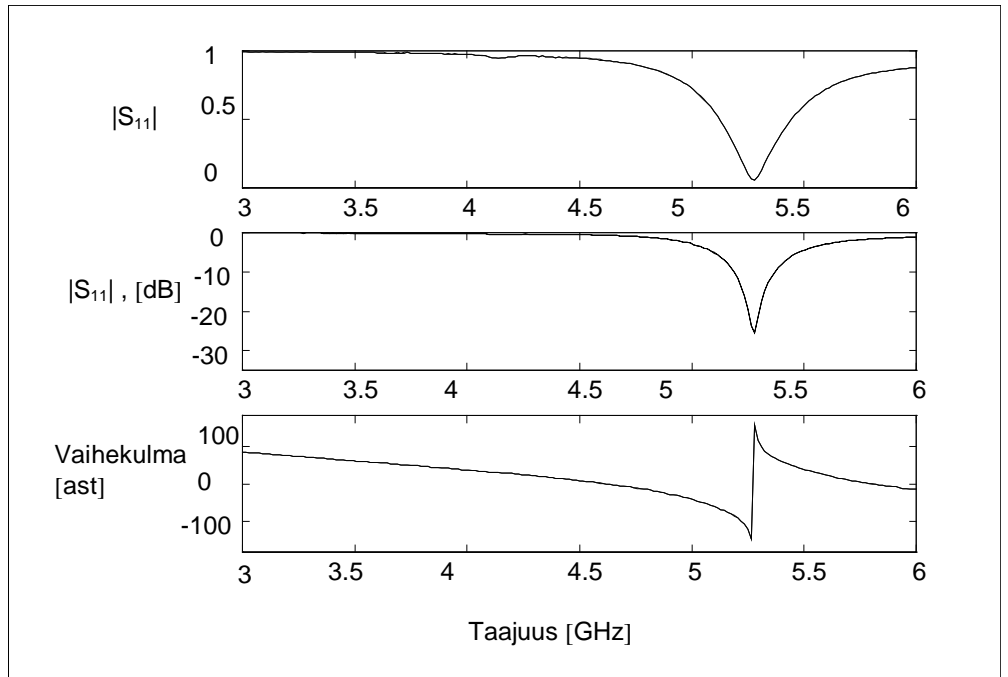
Kuva 4 Käytetyt antennitelineet suuntakulmamittauksen pyörityslaitteen päällä. Vasemmassa kuvassa on PVC-muovinen teline, jolla pääosa mittauksista suoritettiin. Sen yläreunassa näkyy ryhmä *RH2*. Sen alapuolella on jäänyt valkoinen paperi, jonka alla on

ryhmän kiinnityslevyn kiinnitysreiät varsinaiseen telineeseen. Mittauskaapeli on asetettu mahdollisimman loivalle kaarelle. Oikeanpuoleisessa kuvassa on teline, jossa on suuri alumiininen takalevy. Levyyn on kiinnitetty erillisryhmä *RH2ERI*, jossa elementti on asemassa 6. Elementtiä 2 vastaavaan paikkaan on asetettu esimerkin vuoksi käytetty vaimennuslevy. Erillisryhmän substraatti näkyy vaaleana ja se on samankokoinen kuin vasemmanpuoleisen kuvan substraattilevy.

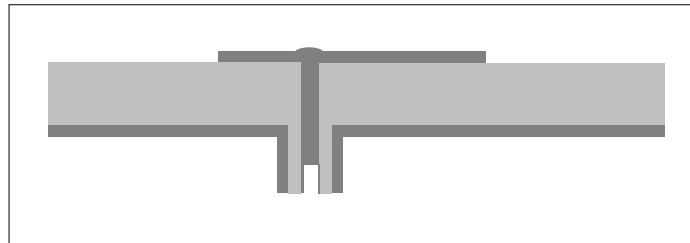
3.2.3 Antennien suunnittelu ja valmistus

Rakennettavien antennien tyypiksi valittiin mikroliuska-antenni. Antennit toteutettiin duroid-substraatille. Antennit ovat puolen aallon mittaisia resonaattoreita. Tavoitteena oli kohtuullisen kokoinen antenni, jolle voitaisiin toteuttaa yli 10λ :n suuruinen takalevy. Mitoitus tapahtui oppikirjan [15] kaavoilla. Myös teoksesta [22] löytyvistä yksinkertaistetuista kaavoista oli käytännössä hyötyä. Antennien mitoituksessa laskettiin mikroliuskajohdosta leikatun puolen aallon resonaattorilevyn mitat ja syöttöpisteen paikka. Laskennassa huomioitiin päätykapasitanssien vaikutus. Impedanssin sovitus 50Ω :iin syöttöpisteen paikan valinnalla toteutettiin seuraavasti: Ensin tehtiin laskelmien perusteella kaksi koeantennia, joissa syötön paikat olivat lähellä laskettua, mutta poikkesivat hieman siitä ja toisistaan. Koeantennien syötön sovitus mitattiin piirianalysointilaitteella taajuuden funktiona. Näiden mittausten avulla valittiin uudestaan syötön paikka, kunnes päädyttiin tyydyttävään sovitukseen suunnittelutaajuudella 5,30 GHz. Protoantennin *Pr2* sovituksen (heijastuskertoimen) taajuusriippuvuus on esitetty kuvassa 5. Toteutunut resonanssitaajuus on n. 5,26 GHz ja 3 dB:n kaistanleveys n. 50 MHz. Resonanssiipiikki on kohtuullisen symmetrinen. Paluuvaimennus on resonanssitaajuudella yli 20 dB.

Toteutettujen mikroliuska-elementtien mitat ja parametrit olivat: mikroliuskajohdon leveys 20,1 mm, puolen aallon resonaattorin pituus 15,4 mm ja syötön paikka pidemmästä reunasta lukien 4,50 mm. Substraatin paksuus on 1,524 mm ja sen pinnalla olevan metalloinnin paksuus on 0,035 mm. Substraatti on Rogersin duroid-eriste (Rogers RT/duroid 6002), jonka suhteellinen permittiivisyys ϵ_r on 2,94. Mikroliuska-antennin poikkileikkaus on esitetty havainnekuvassa (kuva 6). Metalloinnit on piirretty tummina ja eristekerrokset vaaleina. Koaksiaalinen syöttö on sivussa keskiakselilta antennin sovituksen takia.



Kuva 5 Protoantennin *Pr2* syöttöportin heijastuskertoimen taajuusriippuvuus. Ylimmässä kuvassa itseisarvo lineaarisella asteikolla ja keskimmissä kuvassa desibeliasteikolla. Alimmassa kuvassa on vaiheen riippuvuus taajuudesta.



Kuva 6 Mikroliuska-antennin poikkileikkaus. Havainnekuva, jossa mitat on vääristetty. Keskellä on eristemateriaalista valmistettu substraatti. Sen yläpinnalla on suorakaiteen muotoinen kuparinen mikroliska-levy, johon on liitetty koaksiaaliliittimen sisäjohtin. Substraatin alapinta on kokonaan metalloitu ja se muodostaa maataason. Syöttö on sijoitettu sopivasti sivuun impedanssisovituksen toteuttamiseksi. Poikkitaissuunnassa se on keskellä liuskaa. Mikroliuska on kuvan vaakasuunnassa puolen aallon resonaattori.

Mikroliuska-antennit piirrettiin tietokoneella ja valmistettiin syövytystekniikalla sähköosaston laboratoriossa. Substraatin alapuolelle jätettiin yhtenäinen maadoituslevy. Myöhemmin radiolaboratorion pajassa antenneihin juotettiin liittimet. Liittimen kanta juotettiin alaosaan kiinni ja yläpinnan tasolle katkaistu sisäjohtimen tappi ylhäältä resonaattoriin. Osassa antennija juotetippa hiottiin tasaiseksi.

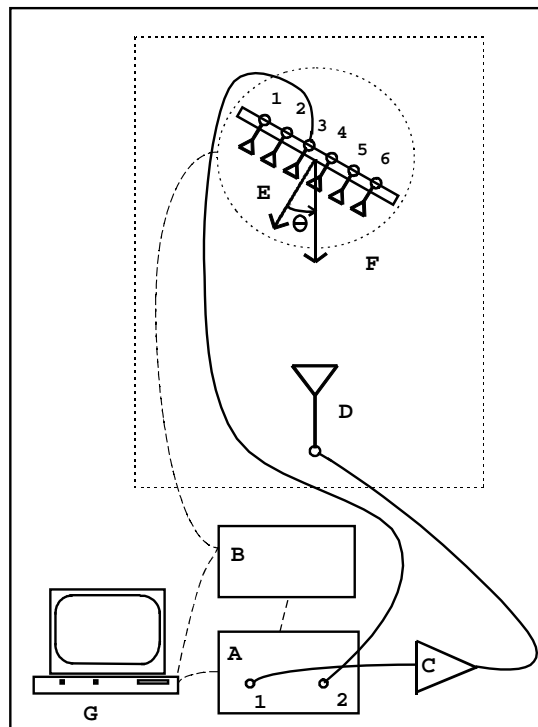
Substraatin reunoihin porattiin n 17 mm välein reiät muoviruuvi kiinnitystä varten. Ryhmien *RH1*, *RH2* ja *RH3* substraattilevyt leikattiin tai hiottiin samankokoisiksi. Niiden mitat olivat 56 mm x 192 mm. Ryhmän *RH4* substraatin mitat poikkesivat muista ja olivat n. 100 mm x 450 mm.. Ryhmiä varten valmistettiin samankokoisia tukilevyjä PVC-muovista, joihin antenniryhmät kiinnitettiin muoviruuveilla. Lisäksi valmistettiin erillisantenneja, joilla ryhmien *RH1-3* kokoisella substraatilla oli vain yksi antennielementti kytkemättömän vertailuantennin toteuttamiseksi. Myös vastaava kahden elementin ryhmä yksinkertaisen keskinäiskytken saamiseksi toteutettiin. Antennien kiinnitysreikien mahdollisimman tarkka asettaminen samoin kaikissa ryhmissä toteutettiin sapluunan avulla. Syöttötappien 1,3 mm reiät porattiin tarkkuusporalla, jossa on kohdistusristikko. Siitä huolimatta ne menivät ainakin yhden antennin osalta hieman sivuun, koska laitteessa olevien tiettyjen porien asettaminen aivan suoraksi on mahdoton tehtävä. Syöttöjen paikoilla on vaikutus resonanssitaajuuteen.

3.3 Mittauksissa käytetyt laitteistot ja mittausjärjestelyt

Sirontaparametrien vektoripiirianalysointimittaukset suoritettiin tavanomaisissa laboratoriotiloissa. Pyrkimyksenä oli mahdollisimman häiriötön tilanne, jossa tutkittava antenniryhmä oli keskilattialla tai absorptiolevyillä toteutettuun "heijastuksettomaan nurkkaan" päin. Sirontaparametrit mitattiin vektoripiirianalysointilaitteella taajuusalueella 3 GHz - 6 GHz (HP 8753D 30 kHz - 6 GHz Network Analyzer). Laitteistoon oli ajoittain kytketty GPIB-väylän avulla tietokone, joka mahdollisti sirontaparametrien taajuuspyyhkäisyjen suoran siirtämisen Matlab-ohjelmaan ja tallettamisen Matlabin tiedostomuotoon.

Suuntakuviomittaukset suoritettiin radiolaboratorion heijastuksettomassa huoneessa. Huone on vaakamitoiltaan n. 8 m x 6 m ja korkeudeltaan n. 7 m:n tila, jonka kaikki pinnat on päällystetty pyramidin mallisilla absorptiopaloilla. Lähetys- ja vastaanottoantenni olivat mitattaessa n. metrin päässä pituussuunnan päätyseinistä. Laitteisto ja mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 8. Laitteisto koostuu vektoripiirianalysointilaitteesta (A), lähetys- (D) ja vastaanottoantenneista (E) ja pyörivästä

antennitelineestä (F). Ohjauslaitteisto on sijoitettu heijastuksettoman tilan pieneen eteiseen. Lisäksi mittauksissa on käytetty 30 dB vahvistinta (C) (Mini-Circuits 15542, ZVE-8G) ennen lähetysantennia, jotta ollaan päästy riittävään dynamiikkaan mittauksissa, 30-40 dB häiriötason yläpuolelle. Häiriötaso määräytyy laitteiston kohinatasosta ja huoneen häiriötasosta. Antennien suuntakuvioissa alhaisin keskimääräinen signaalitaso, etusuunnan tasosta lukien n. -30dB , on ollut mm. suuren takalevyn tapauksessa takasuunnassa. Syvimmät mitatut etusuunnan minimiit ovat olleet $-40\text{ dB} \dots -50\text{ dB}$ kuuden elementin maksimia $+15,6\text{ dB}$ alempana, jolloin mittauksen herkkyyden rajaksi saadaan sama n. -30 dB , kuin takapuolella. Mittauskytkentä ja mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7 Mittauskytkentä ja mittausjärjestelyt. A-vektoriipiirianalysoija, jossa portit 1 ja 2, B-suuntakulman kääntölaitteen ohjaus, C-radiotaajuusvahvistin, D-lähetysantenni, E-vastaanottoantenni, F-suuntakulman kääntölaite, G-PC-tietokone. Katso tarkemmin tekstistä.

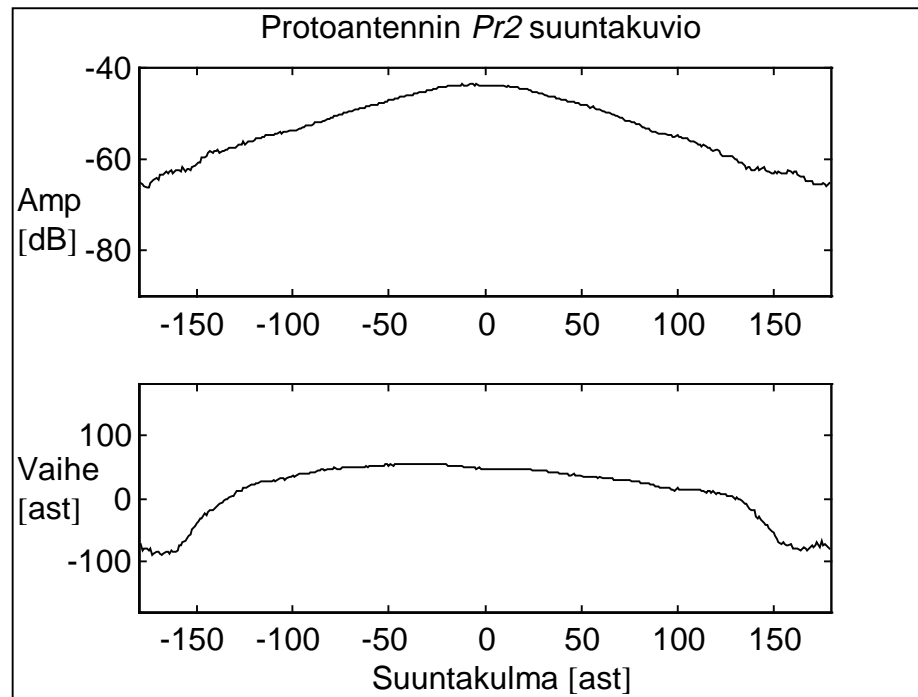
Suuntakuviomittauksissa vektoriipiirianalysoijalla (A) (HP 8722C, 50 MHz - 40 GHz) mitataan sirontaparametria S_{12} . Portti 1 on kiinnitetty lähetysantenniin ja portti 2 vastaanottoantenniin. Lähetysantennina (D) oli H-tason torviantenni ja vastaanottoantennina (F) tutkittavat antennit. Lähetysantennin sähkökenttävektori, mitatut ryhmät ja antennien pääpolarisaatio olivat mittauksissa pääasiassa

vaakatasossa. Laitteistoon kuuluu PC-tietokone (G), jolla olevan ohjelman (Flam&Russelin FR959 Antenna Measurement Workstation) avulla suoritettiin laitteiston ohjaus ja datan keruu. Ohjelmaan liittyvällä erillisellä analyysiosalla (lähinnä katseluohjelma) suoritettiin myöhemmin mittaustiedoston muuntaminen tekstimuotoon, jolloin se voitiin edelleen lukea johonkin parempaan analyysiohjelmaan (esim. Matlab). Tarvittavien mittauskaapeleiden yhteispituus oli n. 10 m. Mittauksissa käytetyt taajuudet olivat n. 2,2 GHz ja 5,3 GHz. Pyöritystelineestä tulevia heijastuksia ehkäistiin antennitelineen juureen aseteltavilla absorptiolevyillä. Telineen kääntämistä ohjattiin Flam&Russelin laitteilla (B) (FR 8502 Positioner programmer/controller ja 8601A Power amplifier-laitteilla). Laitteistolla voidaan kääntää sekä vaaka- että pystykulmaa. Mittaukset on toteutettu kerrallaan useammalla lähekkäisellä pistetaajuudella, esimerkiksi 0,02 GHz:n välein taajuusalueella 5,20 GHz - 5,30 GHz. Suuntakuviot on mitattu vaakatasossa asteen välein, pääasiassa nopeudella $<1^\circ/s$ suuntakulma-alueena lähes täydet 360 astetta.

3.4 Mittausvirheiden kontrollointi

Mittausvirheistä keskeisimmällä sijalla on suuntakuviomittauksen stabiilius. Jonkin verran on viitteitä siitä, että käytetyn vektoripiirianalysaattorin antama vaihekulma ja amplituditaso muuttuvat mittaussarjojen aikana. Mittaussarjoissa on mitattu vuorotellen eri elementeistä. Yksinkertaisinta ja varminta oli mitata aina koko sarja kerralla. Tällainen mittaussarja on esimerkiksi se, jossa mitataan ryhmän elementtien varsinaiset suuntakuviot ryhmässä mittaamalla ne jokaisesta antennielementistä erikseen muiden ollessa päätettyinä sovitetusti. Jokaisessa mittaussarjassa toimittiin siten, että sarjan ensimmäinen mittaus toistettiin sarjan lopuksi. Joka päivä mitattaessa mikroliuska-antenneja päivä aloitettiin mittaamalla protoantennia *Pr2*. Tätä ennen laitteiston annettiin stabiloitua. Mittauspäivän lopuksi mitattiin protoantenni vertailun vuoksi vielä uudestaan, kun mittaus kesti vain päivän. Kun seuraavana päivänä jatkettiin, ei ryhmäantennia aina otettu yöksi pois telineestä ja vertailuantenni, *Pr2*, mitattiin vasta toisen päivän lopuksi. Kontrollimittaukset tehtiin varmuuden vuoksi, eikä niitä kaikissa tapauksissa erityisemmin tarkasteltu. Paras kontrolli ovat onnistuneet mittaukset. Useiden suuntakuvioiden mittaukset ovat pitkiä ja hankalia.

Pahat, mittausten hylkäykseen johtavat virheet näkyvät tuloksissa selvästi. Protoantennin kompleksinen suuntakuviokuva (l. säteilykuviokuva) on esitetty kuvassa 8. Verrattuna muihin tämän työn mikroliuska-antennien suuntakuviokuvaan se on selkeän yksinkertainen. Protoantennin suuntakuviokuva käytettiin kontrollimittausten lisäksi kehittämään kuusielementtisen ryhmän tavoitesuuntakuviokuva.



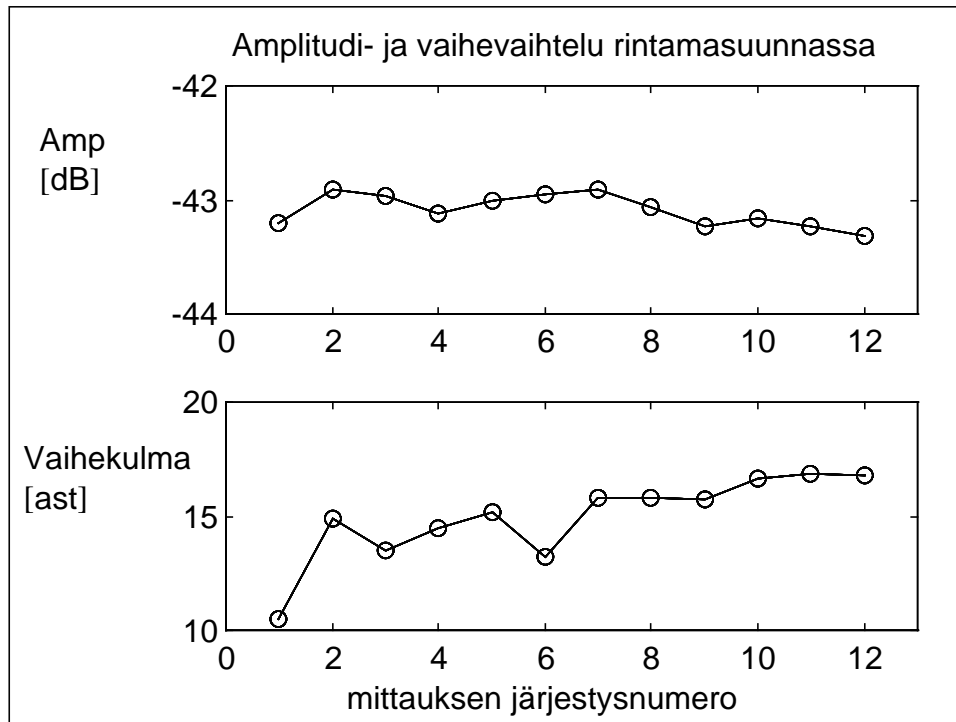
Kuva 8 Protoantennin *Pr2* säteilykuviokuva. Yllä amplitudin, alla vaihekulman riippuvuus suunnasta. Protoantennin suuntakuviokuva mittausta käytettiin suuntakuviomittausten stabiilisuuden referenssimittauksena. Protoantennin suuntakuviokuva tuotettiin myös kompensoinnin tavoitesuuntakuviokuva.

Mittausten tarkkuus ja toistettavuus jäi hieman epäselväksi toistomahdollisuuksien rajallisuuden takia. Muutama toistettu ryhmän suuntakuviomittaus antoi visuaalisesti jonkin verran toisistaan poikkeavan tuloksen. Eri päivien mittauksia ei ole yhdistetty sarjoihin. Sen sijaan sarjoja, joita on verrattu toisiinsa, on tehty eri päivinä. Kääntökulman nollakohta voi siirtyä lähetysantennin paikan siirtymisen takia ja mittausohjelman asetusten muuttumisen takia. Tästä syystä mittaukset on suoritettu samalla mittauskerralla. Väärin menneet kulma-arvot saadaan asetettua vain kulmavälin (tässä 1°) tarkkuudella. Mittausnopeus vaikuttaa suuntakulman mittaus-tarkkuuteen. Mitatut suuntakuviot muunnettiin laskentaa varten vektoreiksi olettaen suuntakulmalukemat samoiksi. Integrointivälin suuntakulman keskiarvot

vaihtelivat mittauksittain ja poikkesivat eri suuntiin tapahtuneissa suuntakuviomittauksissa eniten, 0,2 - 0,3 astetta. Suuntakuvion mittauksen nopeus ja mittaaminen molempiin kääntösuuntiin valittiin sopivasti, jotta mittaussarjoja olisi saatu tehtyä riittävästi sopivalla tarkkuudella.

Protoantennilla *Pr2* suoritetuilla tarkistusmittauksilla on saatu yhdellä mittauskerralla tarkistusmittauksena peräkkäisten mittausten suuntakuvioiden väliseksi korrelaatioksi arvoja 0,9997 peräkkäisille mittauksille ja 0,9984 kun välissä on ollut tuntien tauko. Pyörityssuunnan vaikutus on ollut olematon. Toisaalta toisella mittauskerralla on saatu paljon suurempia vaihteluita tarkistusmittausten suuntakuvioiden. Arvo peräkkäisten mittausten korrelaatiolle on ollut tällöin 0,995 , kun pyöritys on tapahtunut samaan suuntaan ja 0,985 kun pyöritys on tapahtunut eri suuntiin, jolloin pyörityssuunnan vaikutus on ollut merkittävä. Suuntakuvioiden korrelaatiot eivät kerro amplitudi- ja vaihesiirtymistä mittausten välillä. Kontrollimittausten perusteella työssä pääasiallisesti käytettyjen suuntakuviomittausten yleiselle tarkkuudelle voidaan antaa arvioksi amplitudin osalta 0,3 dB - 0,7 dB ja vaiheen osalta 5-10 astetta.

Vertailuvaiheen ja amplituditason säilymistä mittauspäivän aikana tutkittiin perusteellisemmin lopputarkistuksena. Päivän mittaan muiden mittausten välillä tehtiin tarkistusmittaus tietyllä ryhmän elementillä. Mitattava ryhmä oli koko päivän sama, eikä sitä irroitettu välillä telineestä. Kaapeli kiinnitettiin ja irroitettiin mittausten välillä syöttöportista. Kuvassa 9 on esitetty suuntakuvion rintamasuunnan amplitudi- ja vaihevaihtelu näissä tarkistusmittauksissa. Mittausten aikaväli ei ollut vakio. Vaihevaihtelu on noin viisi astetta ja amplitudivaihtelu 0,3 dB. Molempien suureiden muutoksissa on trendi, vaeltelu, joka selittyy esimerkiksi mittauslaitteen vertailutason vaeltelulla. Missään nimessä kysymys ei ole hetkittäisestä kohinasta, koska sivusuunnassa saadut arvojen muutokset noudattivat rintamasuunnan arvojen muutoksia.



Kuva 9 Yläkuvassa amplitudivaihtelu ja alakuvassa vaihevaihtelu suuntakuviassa mittauspäivän aikana. Mittausten väliaika on epäsäännöllinen. Arvot ovat rintamasuunnan ($\theta=0^\circ$) arvoja.

Kuvan 9 mittaukset suoritettiin poikkeuksellisesti käyttämällä vain yhtä kääntösuuntaa. Lisäksi niissä oli mukana uusi mittauskaapeli. Mittaustarkkuuden voidaan arvioida parantuneen verrattuna työssä esiteltäviin mittauksiin. Lopussa mitattiin kahta ryhmää tällä paremmalla mittaustarkkuudella. Tuloksena oli paremmat suuntakuviot ja paremmat tavoitesuuntakuviot ja johtopäätös, että tässä työssä käytetyssä mittaustarkkuudessa on mittausjärjestelyjen osalta parantamista. Erityisesti on suositeltava suuntakuviomittauksen pyörittystä samaan suuntaan. Tämä ei merkittävästi hidasta mittauksia. Tämän työn mittauksissa keskinäiskytkennän ja reunadiffraktion lisäksi voidaan tulokset tietäen arvioida mittaustarkkuudella olevan varteenotettava vaikutus suuntakuvioidiin.

Ryhmäantennin keskinäiskytkennän vaikutusten mittaaminen vaatii tavallista enemmän mittauslaitteita ja -järjestelyiltä. Käytetyn antennimittaushuoneen toimivuutta pitäisi parantaa. Olisi hyvä, jos kaapelit eivät kiertyisi mittausten aikana. Laitteiston stabiilisuus saisi myös olla parempi. Mittaussarjojen yhteydessä pitäisi lisätä vertailumittausten määrää. Siksi vertailuantennin vaihtaminen pitäisi tehdä

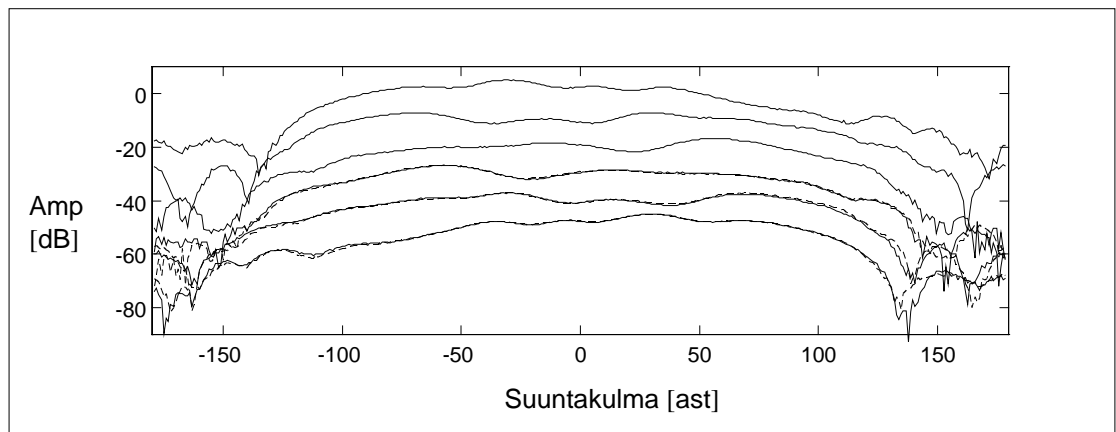
helpoksi mittaustilanteessa. Alustavasti kokeiltu tapa käyttää takalevyymittausten yhteydessä levyn toisella puolella vertailuantennia *Pr1* osoittautui tavaksi hallita stabiilisuusongelma takalevyä käytettäessä. Kaikkien suuntien ja polarisaatioiden mittaaminen pitäisi olla mahdollista samalla kertaa, jos halutaan löytää mahdollisimman yleispätevät korjauskertoimet.

4. Tulosten tarkastelu

4.1 Havaintoja mitatuista elementtien suuntakuviosta

4.1.1 Elementtien suuntakuvioiden symmetriaominaisuudet

Mitattujen mikroliuska-antennien elementtien suuntakuviot ovat melko epäsäännöllisiä. Suuntakuviot poikkeavat muodoltaan protoantennin *Pr2* suuntakuviosta (Kuva 8). Suurin havaittava ero on ryhmän elementtien suuntakuvioiden näkyvä aaltoilu. Kuvassa 10 on esitetty ryhmän *RH3* ($d=0,3\lambda$) elementtien suuntakuviot. Niissä aaltoilu näkyy selvästi.



Kuva 10 Ryhmäantennin *RH3* ($d=0,3\lambda$) elementtien suuntakuviota. Suuntakuviot on esitetty kuvassa ylhäältä alas järjestyksessä 1, ... ,6 vakiosiirrolla 10 dB alaspäin desibeliasteikolla. Kolmen alimman suuntakuvion (elementit 4, 5 ja 6) päälle on piirretty vastaavan symmetrisessä asemassa olevan antennin (3, 2 ja 1) suuntakuvioiden peilikuvat suuntakulman 0-aseman suhteen.

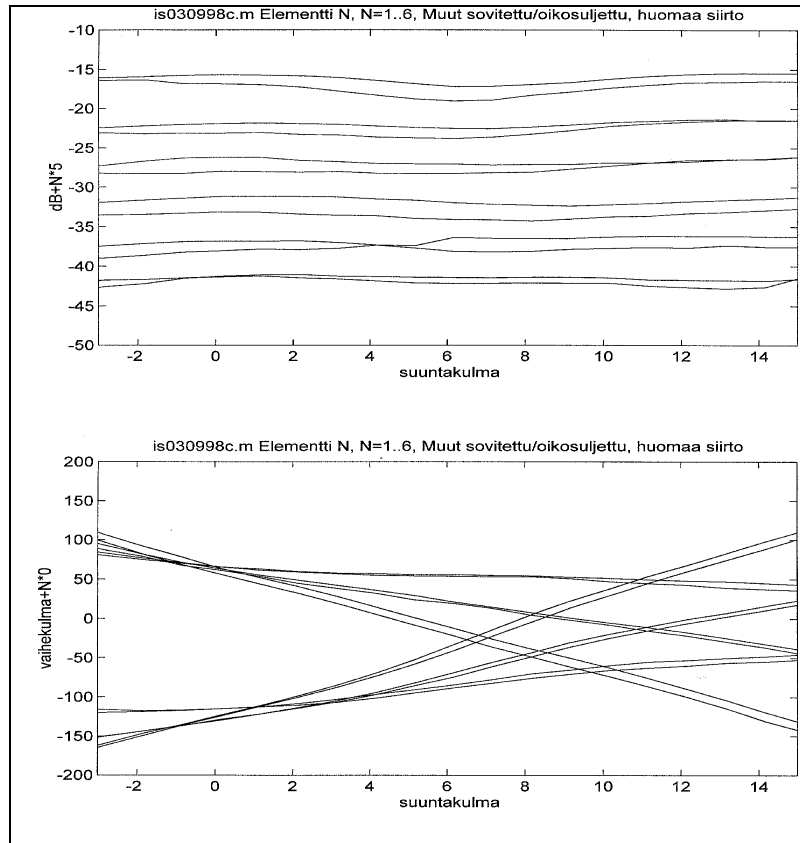
Antennielementit asetettiin liittimiä myöten ryhmään mahdollisimman symmetrisesti, jotta valmistukseen ja mittauksiin liittyvät vaihtelut tulisivat mahdollisimman hyvin esiin symmetrian rikkoutumisena. Kuvan 10 kolmessa alimmassa käyrässä esitetyt suuntakuviot ja kolmen ylemmän suuntakuvion ryhmän symmetrian mukaisesti symmetrisesti peilatut suuntakuviot osuvat niin hyvin päällekkäin, että suuntakuviosta tarkasteltuna voidaan symmetrian toteutumista pitää hyvänä. Poikkeamia havaitaan

lähinnä takasuunnassa, missä ne selittyvät mittauskaapelin erilaisilla asennoilla mittaustilanteessa.

4.1.2 Vaihetiedon merkitys

Kompleksilukujen yhteydessä määritetään sekä amplitudi että vaihe. Molemmat ovat periaatteessa yhtä tärkeitä. Suuntakuviosta esitetään tyypillisesti vain amplituditieto eli itseisarvo. Kun antennielementit ovat isotrooppisia eikä keskinäiskytkentää ole, poikkeavat elementtien suuntakuviot vain vaiheen osalta toisistaan. Suuntakuvioiden vaihe sisältää tällöin vain paikkatiedon, jos antennisyöttö on tasasyöttö samassa vaiheessa. Vaihetiedon visualisoinnin ongelmana on sen 2π -jaksollisuus. Kuvat puuroutuvat helposti epähavainnollisiksi. Kuva 11 havainnollistaa kuinka merkittävällä tavalla mikroliuskaryhmän antennielementtien erilaisuus ryhmässä on sidoksissa vaihetietoon. Kuvan yläosassa on jokaisen elementin amplitudit kahdesta eri tyyppin mittauksesta ja alempana vastaavat vaihetiedot. Ylemmässä kuvassa on käytetty siirtoa desibeliasteikolla erottamaan elementtien amplitudikuviot toisistaan.

Näin kapealla kulma-alueella ei amplitudeissa nähdä normaalisilmällä erityistä informaatiota. Vaihtelua on, mutta on vaikea päätellä, onko se häiriötä vai vaihtelua suuntakuvioissa. Kuvista ei voida suoraan päätellä vaihetiedon mittaustarkkuutta. Toinen elementin suuntakuvion mittauksista oli varsinainen sovitettu joka elementin mittausta erikseen ja toinen oli oikosulkumittaus. Niiden tulosten tuleekin poiketa toisistaan. Kuvassa olevien mittausten samanaikainen käyttö vaatii, että amplitudi- ja vaihetieto eivät muutu mittaussarjojen aikana. Vertailumittauksista protoantennilla saatiin vaiheen mittaustarkkuudeksi erään mittaussarjan aikana vain n. 20 astetta. Tässä vaiheen mittausepävarmuus näyttää kuvan perusteella olevan korkeintaan 10 astetta. Vaiheen mittaustarkkuuden parantamiseen ei ehkä kiinnitetty tarpeeksi huomiota mittauksia tehtäessä. Mittaustyön loppuvaiheessa tehty päivän mittainen stabiilisuustarkastelu antaa sekin noin 4 asteen mittausepävarmuuden (kohta 3.5).



Kuva 11 Ryhmäantennin elementtien amplitudin ja vaiheen muutokset pienellä suuntakulman muutosalueella (-3° ... -13°). Ylemmässä kuvassa on antennielementtien amplitudeja. Elementteihin liittyviä mittaustuloksia on nostettu 5 dB toistensa suhteen, jotta ne erottuisivat. Samassa kohtaa on kustakin elementistä kaksi mittausta. Toisessa suuntakuviassa on elementin suuntakuviokuva muiden ollessa päätettynä sovitetusti ja toisessa suuntakuviokuva, kun muut on oikosuljettu. Alemmassa kuvassa on vastaava vaihemittaus. Elementin etäisyys ryhmän keskipisteestä näkyy vaihekulman laskuna tai nousuna, riippuen kummalla puolella sitä elementti sijaitsee.

Kyseinen tarkistusmittaussarja on suoritettu lisäksi siinä mielessä tarkemmin, että suuntakuviot on mitattu koko ajan samalla antenniryhmällä irrottamatta sitä välillä telineestä ja kulmaa vain samaan suuntaan kääntämällä.

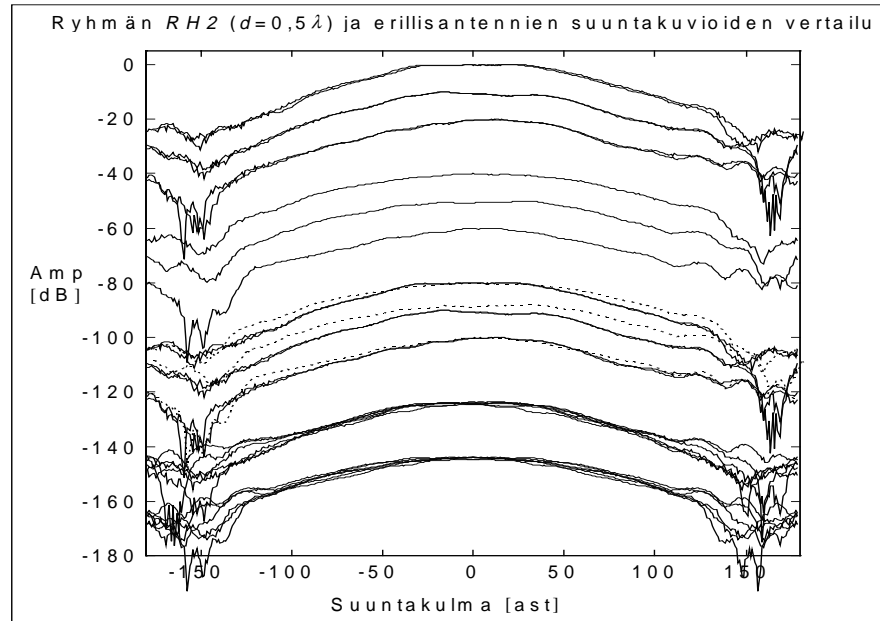
Kuvan 11 vaiheriippuvuudessa ei nähdä mitään huolestuttavaa. Pääpiirteittäin vaiheet näyttävät noudattavan paikkatietoa ollen symmetrisiä ryhmän keskipisteen suhteen. Vaiheessa näyttää olevan keinuntaa, joka vastaa aaltoilua amplitudisuuntakuvioiden. Ylemmissä amplitudisuuntakuvioiden lisäksi kahdessa alimmassa nykämiä, jotka mahdollisesti kertovat mittausten epästabiilisuudesta. Syy ei tästä selviä. Laitteiston epästabiilisuuden lisäksi on kaapelien kiertymien vaikutus mahdollinen. Toistettavuudesta on yleinen havainto, että on syytä mitata kaikki samaan vertailuun kuuluvat mittaukset yhdellä kertaa. Epäuskottavaa on nykämiä kuuluminen

suuntakuviioon esimerkiksi diffraktiovaihteluna. Vastaavat nykämät vaiheessa saattavat jäädä jatkuvan vaihemuutoksen varjoon. Sellainen johtopäätös on paikallaan, että suuntakuviomittauksiin jää epävarmuutta, virheet eivät ole välttämättä kovin stabiileita eli mittaus mittaukselta toistuvia. Ajoittain mittauksessa voi olla oma yksilöllinen “sattumansa”. Kovin kapean suuntakulma-alueen suuntakuvioita ei näistä mittauksista kannata erottaa laskentaa varten. Vaihemuutoksen jyrkkyys reunaelementtien kohdalla merkitsee sitä, että niillä suuntakulman määrittelyn tarkkuus hyvän vaihetiedon saamiseksi korostuu.

4.1.3 Ryhmän suuntakuvioiden vertailu erillisantennien suuntakuvioihin.

Mikroliuska-antenniryhmän elementtien keskinäiskytkenäköiksi malleiksi valmistettiin yhden elementin antennija saman kokoiselle substraatille kuin oli ryhmällä, niin että valittu elementti oli samassa paikassa kuin vastaava ryhmän elementti. Erillisantenneja oli kolme kappaletta ja niistä saatiin vastaavat ryhmän suuntakuviot täydentämällä mitatut kolme suuntakuvioita antisymmetrisillä peilikuvillaan kuuden elementin suuntakuvioiden ryhmäksi. Erillisantennien suuntakuvioita ja niiden peilikuvia on verrattu vastaavan ryhmän *RH2* suuntakuvioihin kuvassa 12.

Koska suuntakuvioissa on aaltoilua riippumatta siitä, onko substraatilla muita antennija vai ei, voidaan päätellä, että aaltoilun yksi syy on mikroliuska-ryhmiä kiusaava reunadiffraktio, joka on tyypillinen ilmiö muillekin takalevyille toteutetuille antenniryhmille [6,23,24,25]. Koska aaltoilu on erillisantenneissa jonkin verran vaimeampaa, voidaan lisäksi päätellä, että aaltoilua aiheuttavat ryhmän suuntakuviioon myös muut ryhmän elementit. Niiden aiheuttama diffraktio vaikuttaa vähintään yhtä sekavalta kuin reunojen vaikutus ja sen merkitys on suoralta kädeltä vaikea arvioida.



Kuva 12 Erillisantennien $RH2Er1$, $RH2Er2$, $RH2Er3$ ja ryhmän $RH2$ antennien ($d=0,5\lambda$) suuntakuvioita. Suuntakuvioita on siirretty pystyakselilla havainnollisuuden vuoksi. Ylimmässä kolmen suuntakuvion ryhmässä allekkain elementtien 4,5,6 suuntakuviot ja niiden päällä symmetristen elementtien 3,2,1 suuntakuviot. Seuraavassa kolmen suuntakuvion ryhmässä ylempiä vastaavien erillisantennien suuntakuviot. Seuraavassa viimeisessä kolmen ryhmässä on ylempät suuntakuviot päällekkäin, missä katkoviivalla on esitetty erillisantennien suuntakuviot. Alimmassa kahdessa suuntakuvioorykelmässä on ylempässä rykelmässä kaikki ryhmän $RH2$ suuntakuviot päällekkäin ja alemmassa vastaavat erillisantennien suuntakuviot ja niiden peilikuvat päällekkäin.

Erillisantennien suuntakuviot vaikuttavat säännöllisemmiltä ja enemmän toistensa kaltaisilta kuin ryhmän antennien suuntakuviot. Käytettäessä niitä kompensointitulokorjauksen ja korjatun suuntakuvioiden visuaalisen vertailun perusteella hyvä. Niiden avulla kehitetyt suuntakuviot olivat kuitenkin niin epämuodostuneita, että ne eivät tule kyseeseen tavoitesuuntakuvioina. Ne olivat jopa korjaamattomia huonompia. Tulos kuitenkin osoittaa, että mitatut suuntakuviot voidaan kuvata tehtyjen erillisantennien suuntakuvioilla. Suuntakuvioiden korjaamiseen soveltuvia tavoitesuuntakuvioita, jotka on saatu muilla tavoin, tosin eri ryhmille, on esitelty seuraavassa kohdassa.

4.2 Ryhmäsuuntakuvioiden vääristymien kompensointi parhaalla sovituksella

Ryhmäsuuntakuvioiden vääristymiä on kompensoitu laskennallisesti käyttämällä mallisuuntakuvioita. Niiden kehittämisessä on käytetty edellä kohdassa 3 esiintuotuja menetelmiä, joista tärkeimmät ovat absorbaattoreita käyttävä peittelymenetelmä ja laskennallisen suuntakuvion käyttö. Korjausmenetelmä on kuvattu kohdassa 2.4. Menetelmässä etsitään kuvausmatriisi mitattujen ja tavoitesuuntakuvioiden matriisiesitysten välille.

4.2.1 Laskennalliset tavoitesuuntakuviot

Mitattujen suuntakuvioiden lisäksi on tavoitesuuntakuvioina käytetty laskennallisia suuntakuvioita. Yksinkertaisin laskennallinen suuntakuviot on isotrooppinen suuntakuviot. Isotrooppisten elementtien suuntakuvioille voidaan $N:n$ elementin tasavälisessä ryhmässä kirjoittaa lauseke

$$\psi_n(\theta) = e^{-jkd \sin \theta \left(\frac{N+1}{2} - n\right)}, \quad (4.1)$$

missä n on elementin järjestysluku ja θ kulma suhteessa ryhmän rintamasuuntaan. Eksponenttilauseke huomioi antennin paikasta aiheutuvan vertailuvaiheen. Identtisille ei-isotrooppisille ryhmille yllä oleva eksponenttilauseke täytyy kertoa origoon asetetun elementin suuntakuvioilla $g(\theta)$. Erilaisten antennielementtien tapauksessa elementtien origoon asetetut suuntakuviot $g_n(\theta)$ poikkeavat toisistaan.

Mikroliuska-antennin E-tason sähkökentälle on annettu lauseke, jota tässä käytetään tavoitesuuntakuviona [15, kaava 8.1]. Tässä siitä käytetään vain kulmariippuvaa osaa

$$g(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{1}{2} k_0 h \sin \theta\right) \cos\left(\frac{1}{2} k_0 \ell \sin \theta\right)}{\frac{1}{2} k_0 h \sin \theta}, \quad (4.2)$$

missä h on substraatin paksuus, ℓ on mikroliuska-elementin pituus ja k_0 on aaltovektorin itseisarvo vapaassa tilassa. Suuntakuvioiden skaalaus kompleksiluvulla jää mielivaltaiseksi vakioksi, kun niistä kehitetään ryhmän tavoitesuuntakuviot. E-taso

on tämän työn mikroliuska-antenneille sama kuin ryhmän yhdysjanan suuntainen substraattia vastaan kohtisuora taso.

Identtiset tavoitesuuntakuviot on saatu myös käyttämällä protoantennin *Pr2* suuntakuviota sekä tutkittavan ryhmän keskielementin suuntakuviota. Myös itsensä tutkittavan ryhmän useamman antennin suuntakuviota on käytetty. Periaatteessa voidaan mallisuuntakuviona käyttää kätevästi myös kaikkien elementtien mitattujen suuntakuvioiden keskiarvoa. Ennen summaamista elementtien suuntakuvioista on kumottava paikkatekijä, kaavan (4.1) eksponentilauseke ja keskiarvosuuntakuviota elementeille käytettäessä taas lisättävä. Suuntakuvioiden keskiarvo on koko ryhmän suuntakuvion laskennan kannalta muutenkin käytännöllinen suure [26].

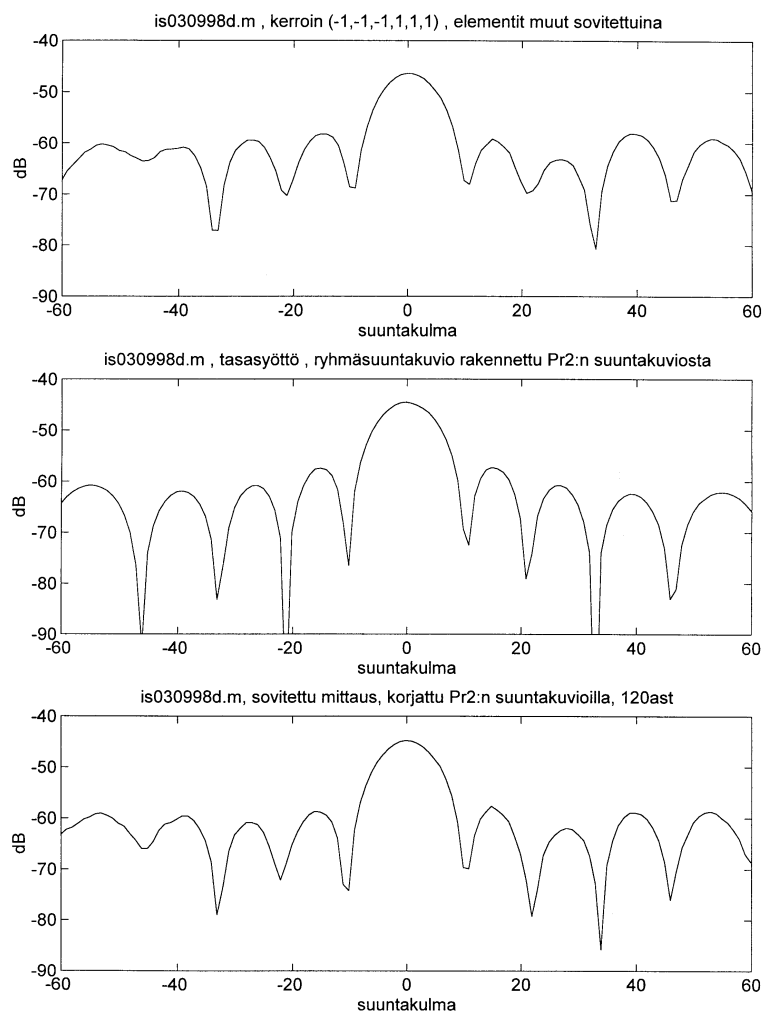
4.2.2 Kompensointitulokset tasasyötöllä eri antenniryhmillä

4.2.2.1 Esimerkkejä kompensoinnista

Ensimmäiset kompensointikokeet suoritettiin 2,16 GHz:n ryhmällä *ES11*. Ryhmää käytettiin 8:n elementin ryhmänä, jossa elementtiväli on $0,7\lambda$. Selvää parannusta suuntakuvioissa oli nähtävissä arvioimalla minimien syvyyttä ja kohdistumista. Samalla ryhmällä saatiin parannusta myös käyttäen pienen apertuurin mallin mukaisesti kytkentämatriisia kompensointiin (kohta 2.5). Ryhmälle luotiin tavoitesuuntakuvioita eliminoimalla naapurielementit työntämällä niiden resonaattoriosaan absorbaattoreita tai oikosulkemalla antennin syöttöelin juurestaan metallinpaloilla. Saatu parannus ryhmän suuntakuviota oli kuitenkin lähinnä viitteellistä luokkaa, eikä sen suuruutta ole tässä syytä enempää arvioida.

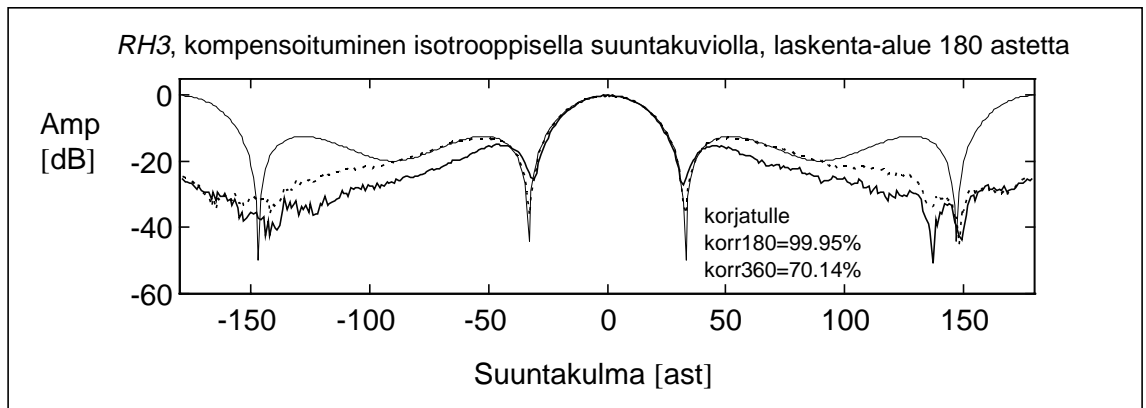
Pääosa mittauksista suoritettiin 5,3 GHz mikroliuskaruuhmillä. Kuvassa 13 on esimerkki kompensoinnin toteutumisesta. Kyseessä on mikroliuska-antennien ryhmä *RH4*, jossa elementtien väli on $0,93\lambda$. Käsittely on tehty mittaustuloksille suuntakulma-alueella $-60^\circ \dots +60^\circ$, eli 120° :een sektorissa. Kompensointitulokset näyttävät paremmalta, jos kuvaa katsoo ylösalaisin. Näkyvä ero suuntakuvioiden välillä on lähinnä minimien syvyydessä. Korjaamaton suuntakuviota on saatu summaamalla antennielementtien kompleksiset suuntakuviot 1. yhden polarisaation säteilykuviot, jotka on saatu mittaamalla kunkin antennielementin suuntakuviota muiden ollessa

päätettynä sovitetusti. Tavoitesuuntakuviosta on rakennettu protoantennin *Pr2* suuntakuviosta.



Kuva 13. Esimerkki kompensoinnista. Ylinnä elementtien suuntakuvioista rakennettu korjaamaton suuntakuviosta. Keskellä tavoitteellinen ideaalinen suuntakuviosta ja alinna kompensointimenetelmällä saatu korjattu suuntakuviosta, joka saadaan ylimmästä suuntakuvioista syöttökertoimia vaihtamalla. Antennielementtien väli on $0,93\lambda$. Tavoitesuuntakuviosta on rakennettu protoantennin (*Pr2*) suuntakuviosta.

Kuvassa 14 on esitetty kompensoinnin tulos ryhmän *RH3* ($d=0,3\lambda$) osalta. Huomiota herättää kompensoinnin erinomainen onnistuminen suurenkin keskinäiskytken tapauksessa. Kuvaan on merkitty myös korjatulle suuntakuvioille lasketut korrelaatiot tavoitesuuntakuvion kanssa etusuunnassa (180°) ja kokoympyrässä (360°).



Kuva 14 Ryhmä *RH3* ($d=0,3\lambda$) kompensoituna isotrooppisilla antenneilla kehitetyillä suuntakuvioilla. Paksu viiva on mitatun ryhmän suuntakuvio, katkoviiva korjatuilla syöttökertoimilla saatu suuntakuvio ja ohut viiva tavoitesuuntakuvio. Käyrien desibelitasoja ei ole asetettu samoiksi. Kompensoinnin laskenta-alue on 180° eli vain etusuunta.

Kompensointitulokset antenniryhmällä *RH4*, jossa oli suurin elementtiväli $d=0,93\lambda$, olivat onnistuneita. Ryhmille *RH1* ja *RH2* käytettiin tavoitesuuntakuvioina vain mitattuja peittelymenetelmällä saatuja suuntakuvioita. Kompensointi ei ollut onnistunut. Syy oli ilmeisesti seuraava: Naapurielementit peitettiin vaimennuslevyillä, jotka olivat saman kokoisia ja peittivät vain antenneja. Tällä tavoiteltiin sitä, että vain keskinäiskytkentä eliminoidaan, aiheuttaen samalla mahdollisimman vähän muita muutoksia. Koska vaimennuslevyt eivät peittäneet substraatin reunoja, tuli peittokokeen ryhmäsuuntakuvioista tavoitesuuntakuvioiksi kelpaamattomia. Oikea peittelytapa olisi ollut peittää myös ryhmän substraattilevyn reunat, kuten tehtiin muilla ryhmillä. Myös mittausvirheellä oli merkittävä osuus tavoitesuuntakuvioiden huonossa laadussa. Erillisryhmien käyttö (kuva 12) ei myöskään tuonut mukanaan hyviä mallisuuntakuvioita. Tuloksista voidaan päätellä, että substraatin reunat ovat merkittävä epäideaalisuuden aiheuttaja. Antennien valmistustarkkuus ei myöskään vaikuta riittävältä. Ryhmän vasemman puolen suuntakuvioiden tavoitteet saatiin peilaamalla laskennallisesti oikean puolen erillisantennien suuntakuviot. Tässä epätarkkuutta aiheutti kenties myös se, että keskiviiva oli millin tai pari sivussa pyöritysakselista. Parempi tavoitesuuntakuvio tuli kun yhden vasemman puolen elementin suuntakuviona käytettiin ylösalaisin mitatun oikean puolen elementin erillisryhmän suuntakuvioita..

Kompensoinnin onnistumista arvioitiin vertailemalla ryhmäsuuntakuvioiden korrelaatioita, jotka laskettiin kaavan (2.11) mukaan. Alla olevassa taulukossa on yhteenveto kaikkein suurimman keskinäiskytkennän ryhmän $RH3$ ($d=0,3\lambda$) kompensointiin liittyvistä korrelaatioista. Kompensointi on laskettu 180 asteen kulma-alueella. Korrelaatiot tavoitesuuntakuvioiden kanssa on annettu ennen ja jälkeen korjauksen kulma-alueilla 180 ja 360 astetta. Sivusiirron ($-0,5$ aallonpituutta) merkitys on siinä, että antenni on sen avulla laitettu paikalle, missä se on ollut mittauksessakin. Jos mitatun 4. elementin paikkatieto olisi riisuttu ennen sen käyttöä ryhmän suuntakuvioiden kehittämiseen ei laskennallista sivusiirtoa olisi tarvittu. Se, että isotrooppisen antennin kohdalla paras arvo saadaan pienellä sivusiirrolla, kertoo mittauksen epätarkkuudesta tai antennielementtien epäsymmetriasta.

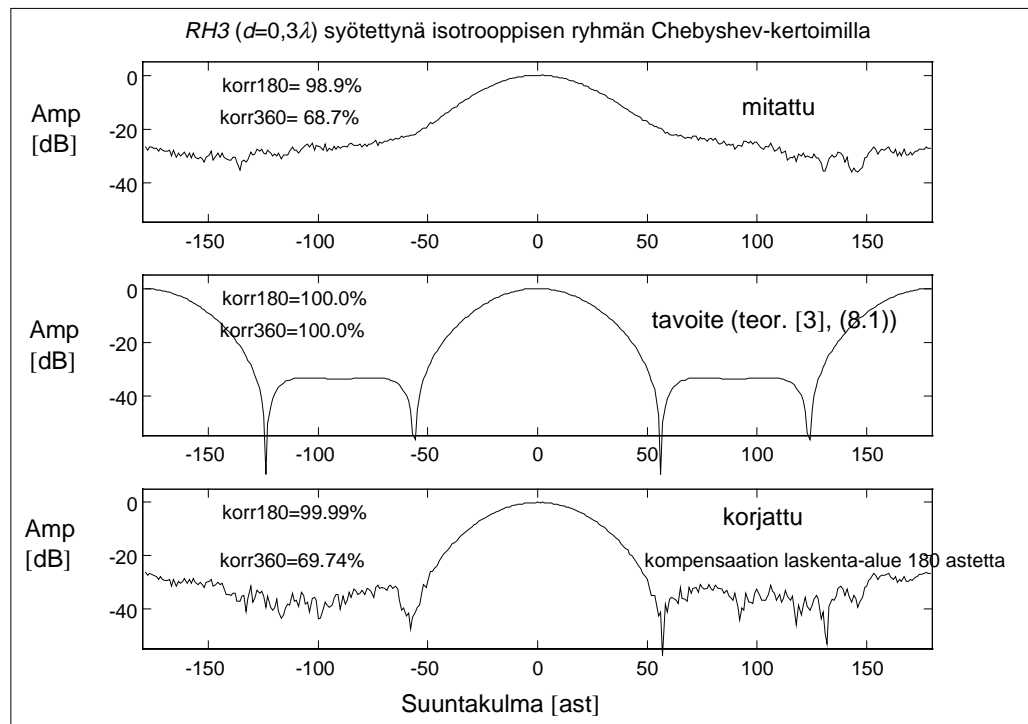
Taulukko 1 Suuntakuvioiden vääristymien kompensoituminen lineaarisessa korjauksessa. Tutkittu ryhmä on $RH3$ ($d=0,3\lambda$). Kompensoinnin tavoitesuuntakuviot ovat vaihdelleet. Kompensaation ja korrelaation laskenta-alue on joko koko taso (360°) tai vain etusuunta (180°).

kompensoinnin onnistuminen $RH3$ -ryhmän suuntakuviolle							
elementtiväli $d=0,3\lambda$							
tavoiteryhmä	laskenta-alue	korrelaatiot				sivusiirto /aallonpituutta	visuaalinen arvio parannuksesta
		korjaamaton		korjattu			
		korr180	korr360	korr180	korr360		
isotrooppinen	180	98,18	68,44	99,92	70,18	0,1	hyvä
	360	ei	68,42	ei	70,27	0,1	hyvä
vaimennuslevykoe	180	99,84	98,61	99,88	99,6	ei	hyvä
	360	98,84	98,61	99,87	99,61	ei	hyvä
vaimennuslevykoe, 4. elementti	180	99,3	99	99,65	99,34	-0,5	hyvä
	360	ei	98,98	ei	99,35	-0,5	hyvä
teoreettinen, kaava (4.2)	180	98,9	69,1	99,94	70,08	ei	erinomainen
	360	ei	69,1	ei	70,1	ei	erinomainen
mitatun ryhmän 4. elementti	180	96,2	95,4	99,35	99,14	-0,5	vaatimaton
	360	ei	95,4	ei	99,17	-0,5	mitätön

Taulukossa 1 olevien tavoitesuuntakuvioiden keskinäiset korrelaatiot ovat vaihdelleet välillä 97,9% - 99,5%. Kaikki tavoitesuuntakuviot ovat olleet tavoitteeksi sopivia, symmetrisiä ja selvät minimi sisältäviä mitattuihin suuntakuvioiden varrattuna. Voidaan päätellä, että lineaarinen kompensointi toimii hyvin erilaisissa tapauksissa. Mitään yksikäsitteistä tavoitetta ei sinällään ole, jos sitä ei aseteta.

4.2.3 Kompensoituminen erisuurten syöttökertoimien tapauksessa

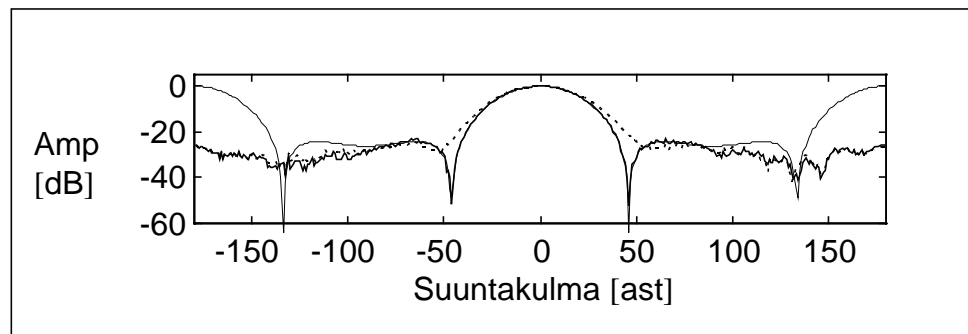
Kompensointia on tutkittu myös tilanteissa, joissa ryhmää on syötetty erisuurilla syöttökertoimilla. Tyypilliseksi tilanteeksi on valittu Tshebysheff-ryhmä. Tshebysheff-kertoimilla pyritään suuntakuvioon, jossa sivukeilataso pidetään tietyn rajan alapuolella ja pääkeilan reunat mahdollisimman jyrkkinä.



Kuva 15 *RH3*-ryhmä syötettynä isotrooppisen elementin Tshebysheff-kertoimilla. Kompensaation tavoitteeksi asetettu mikroluska-antennin teoreettisen suuntakuvioiden generoima ryhmäsuuntakuvio, kaava (4.2). Syöttökertoimet ovat [1,68 ; 3,88 ; 5,67 ; 5,67 ; 3,88 ; 1,68]. Ne on laskettu sivukeilatasolla 20 dB. Mitattu suuntakuvio tarkoittaa tässä, että elementtien suuntakuviot on kerrottu vastaavilla syöttövektorin komponenteilla ja summattu ryhmäsuuntakuvioksi.

Esimerkkinä erisuurten syöttökertoimien korjaustapauksesta on kuvan 15 tilanne. Siinä Tshebysheff-kertoimilla syötetty korjaamaton ryhmä antaa melko huonon suuntakuvioiden. Tavoitteena on teoreettisella mikroluska-antennin suuntakuviolla rakennettu ryhmäsuuntakuvio. Korjaus on toteutettu esikorjauksena etusuunnan -90° ... $+90^\circ$ suuntakuviolle. Esikorjauksessa käytetään suunniteltuja syöttökertoimia

korjatuille tasasyöttöisille suuntakuvioille, joissa on huomioitu syöttöjen antisymmetrisointi $[-1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1]$ Ryhmän etusuunnan (kulma-alue 180°) suhteen laskettu korrelaatio on lähes täydellinen. Takasuunnan amplituditason pysyminen alhaalla on toivottu asia. Jäljelle jäävän epätasaisuuden korjaamiseen ei ole tässä tapauksessa mitään toivoa. Samalla ryhmällä kuin kuvan 15 tapauksessa on toteutettu korjaus edellisistä Tshebysheff-kertoimista poikkeavilla syöttökertoimilla. Tapaus on esitetty kuvassa 16, jossa mitattu, tavoitteellinen ja korjattu suuntakuviokuva on esitetty päällekkäiskuvana. Kompensaation laskenta on toteutettu vain antennin etusuuntaan. Syynä on se, että takasuunnassa tavoite on epärealistinen. Korjaus on onnistunut hyvin ja on hyvä myös minimien kohdalla. Korjattu suuntakuviokuva poikkeaa tavoitteesta lähinnä takasuunnassa, missä se on lisäksi mitatun tapaan rosainen. Korrelaatio etusuuntaan verrattuna tavoitesuuntakuviokuvaan on korjaamattomalle suuntakuviolle 99,2% ja korjatulle 99,99%. Koko ympyrän suuntien alueella korrelaatiot ovat olleet korjaamattomalle suuntakuviolle 69,0% ja korjatulle 69,8%. Antennin takaosalla suuntakuviot poikkeavat huomattavasti, mikä kertoo siitä, että 70% :n korrelaatio ei ole lähestulkoonkaan tyydyttävä arvo. Tässä tapauksessa toteutunut suuntakuviokuva on lisäksi parempi kuin tavoite, koska takasuuntaan halutaan alhainen säteilytaso. Koska mukana olevat antennit eivät ole isotrooppisia, eivät Tshebysheff-kertoimet ole optimaaliset. Optimaaliset kertoimet on erikseen yritettävä löytää, vaikkapa iteroimalla. Asian näkee myös vertaamalla kuvia 15 ja 16. Kuvan 16 tapauksen kertoimet poikkeavat melkoisesti "optimaalisista" Tshebysheff-kertoimista. Silti keila on kapea ja sivukeilat kohtuullisen alhaalla (n. -20 dB). Mielekäs tapa valita tavoiteltu sivuleilataso on asettaa se ryhmän takasuunnan kanssa samalle tasolle, kun käytetään Tshebysheff-kertoimia. Tämän voi päätellä takasuunnan tasoista kuvissa 15 ja 16.



Kuva 16 Ryhmä $RH3$ ($d=0,3\lambda$) syötettynä kertoimilla (2 4 5 5 4 2). Katkoviivalla on piirretty mitattu suuntakuvio, ohuella viivalla tavoitesuuntakuvio ja paksummalla viivalla korjattu suuntakuvio. Kompensointi on laskettu 180° :een kulma-alueella. Korrelaatiot tavoitteen kanssa ovat 180° :een kulma-alueella mitatulle suuntakuviolle 99,2% ja korjatulle suuntakuviolle 99,98%. Tavoitesuuntakuvio on rakennettu teoreettisella suuntakuviolla viitteestä [3].

Jos antennin valmistaja suorittaa korjauskertoimien ratkaisemisen ja syöttöjen korjaamisen, suoritetaan korjaus todennäköisesti tasasyöttöiselle ryhmälle. Nämä matriisikertoimet toimivat myös erisuurten syöttökerrointen tapauksessa. Jos on tiedossa, mitkä kertoimet tulevat käytettäviksi, voidaan käyttää korjausta sen jälkeen, kun suuntakuviomatriisit (toteutunut ja tavoite) on ensin kerrottu syöttökertoimilla eli käyttää jälkikorjausta. Korjattujen ja tavoitesuuntakuvioiden täydellisen identtisyyden tapauksessa ei korjausjärjestyksellä tietenkään ole väliä, mutta yllättäen sillä ei ole myöskään pseudoinvarianssia suuntakuviomatriiseille käytettäessä mitään merkitystä. Tulos oli sama molemmissa järjestyksissä kymmenenkin desimaalin tarkkuudella. Korjaukset on esitetty yhdessä liitteessä III. Tasasyötön korjaus on sama kuin edellä kohdassa 2.4 esitetty. Myös riippumattomuus järjestyksestä on perusteltu liitteessä III. Todistuksessa käytetään hyväksi pseudoinvarianssin määritelmää. Liitteessä on osoitettu lopuksi myös, että korjaavan matriisin käytössä ei syöttökertoimilla ole vaikutusta. Havainto riippumattomuudesta järjestyksestä yhdistettynä hyviin kompensointitulokseen on omiaan rauhoittamaan ja valamaan uskoa menetelmän laajempaan toimivuuteen. Yhden ainoan korjausmatriisin olemassaolo kaikille syöttökertoimille samanaikaisesti on mainittu myös viitteessä [5].

4.2.4 Antenniryhmien kohdistamisen ja mitoituksen merkitys kompensoinnissa

Mitattaessa ja laskettaessa korjauskertoimia antennien suuntakuviosta aiheutuu virhettä siitä, että antenniryhmää ei ole asetettu tarkasti pyörityslaitteen akselille. Mitattaville antennille ei edes ole olemassa sovittua oikeaa akselin paikkaa. Mikroliuska-ryhmälle luonnollinen akselin paikka on ryhmän keskellä substraatin pinnalla. Akselin paikan valinnan epämääräisyys voi olla merkittävä, kun käytetään korjaukseen laskennallisia suuntakuvioita. Käytettäessä peittelymenetelmää ideaalisten suuntakuvioiden kehittämiseksi ei pyöritysakselin paikalla ole merkitystä korjauskertoimien ratkaisemisessa, jos se on aina sama korjattavalle ja tavoitesuuntakuviolle. Vastaava teoreettisten tavoitesuuntakuvioiden vääristymä mitattuihin nähden voi syntyä, jos antennien elementtiväli on huonosti tunnettu tai mitattu.

Kompensoinnin herkkyys antennin paikan vaihtelulle selvitettiin siirtämällä teoreettista tavoiteryhmää pyöritysakselin suhteen. Seuraava tarkastelu pyrkii selvittämään laskennallisten elementtivälien kohdistamisen merkityksen. Korjauskertoimet on laskettu vain etusuunnan ($-90^\circ \dots +90^\circ$) suuntakuviot huomioiden. Korrelaatiot on esitetty sekä etusuunnassa että koko ympyrässä.

4.2.4.1 Pyöritysakselin paikan merkitys

Pyöritysakseli voi olla mitatun ryhmän suhteen kohdistettuna johonkin muuhun kuin ryhmän keskelle. Järkevä akselin paikka sivusuunnassa on tasavälisen ryhmän elementtien symmetriapisteesä, jos sellainen on. Syvyysuunnassa järkevä akselin paikka on apertuurin tasossa. Kaikki siirtymätarkastelut on tehty ryhmälle *RH3*, joka on syöttöjä myöten symmetrisoitu, joten ryhmän keskipiste löytyy yksikäsitteisesti. Pyöritysakselin kohdistaminen onnistui sivusuunnassa arviolta n. 0,5-1,0 mm:n tarkkuudella, joka on n. 2% aallonpituudesta. Syvyysuunnassa voidaan akseli asettaa mikroliuska-antennin pinnalle hyvin tarkasti, koska metallointi on aallonpituuteen nähden hyvin ohut. Toteutunut asettelun tarkkuus oli samaa suuruusluokkaa kuin sivusuunnassa. Siirtymillä on merkitystä korjauksissa, jos ne poikkeavat korjattavalla

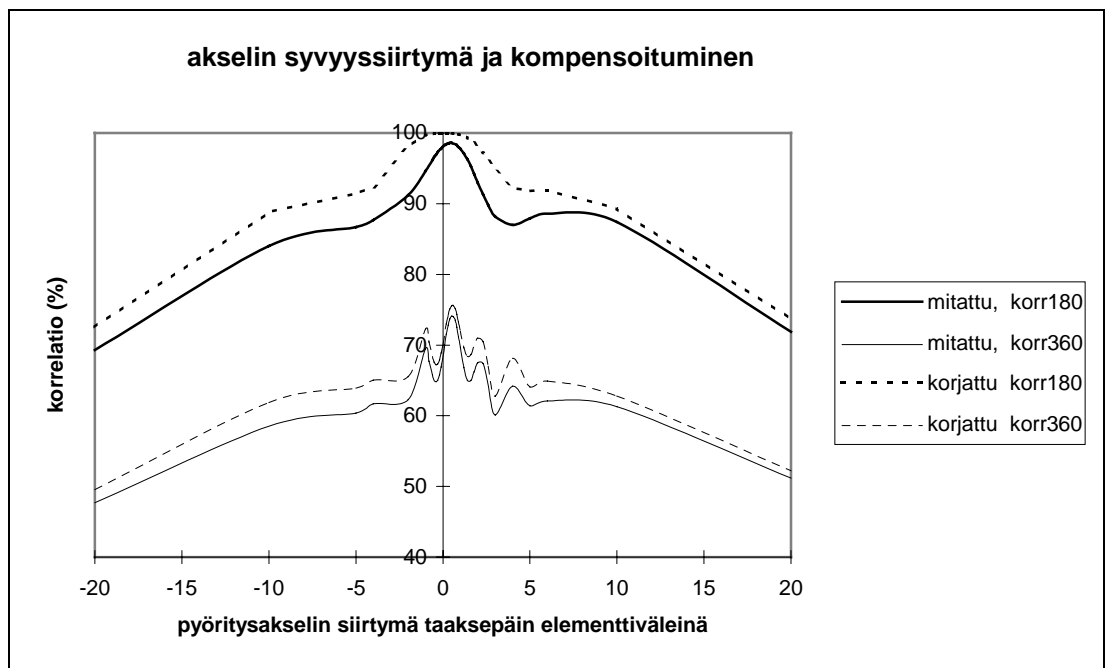
ja tavoitesuuntakuviolla toisistaan. Näin voi hyvinkin käydä kaikissa käytetyissä tavoitesuuntakuvioiden kehittämistapauksissa peittelykoetta lukuunottamatta. Kun elementtien tavoitesuuntakuviot ovat laskennallisia, täytyy oikea akselin paikka asettaa käytettyihin kaavoihin. Koska mitattavan ryhmäantennin kiinnittäminen telineeseen toteutui ruvikiinnityksellä, ei sen siirteleminen ollut mahdollista. Voidaan ajatella, että ei ole oleellista, kumman paikka on virheellinen, mitattavan vai laskennallisen antennin. Suuntakuvioiden määrittäminen mitattavan antennin eri asemissa olisi ollut ikuisuusprojekti ja oli varsin helppo siirtää laskennallisesti tavoitesuuntakuviota.

Pyöritysakselin paikan vaihtaminen vastaa matemaattisesti epälineaarista muunnosta suuntakuvioille. Siksi se ei voi olla kompensoitavissa lineaarisesti samoilla kertoimilla kaikissa pyöritysakselin asemissa. Lisäksi kompensoinnin onnistumisen kannalta siirtymillä täytyy olla optimiarvot.

Syvyys siirtymän vaikutusta tutkittiin käyttämällä ryhmän tavoitesuuntakuviona kaavalla (4.2) kehitettyjä antennielementtien suuntakuvioita. Kompensoinnin onnistumisen riippuvuutta tavoiteryhmän kääntöakselin paikasta syvyys suunnassa tutkittiin suorittamalla kompensointi tavoiteryhmän eri asemissa. Kompensoinnin onnistumista arvioidaan korjatun ja tavoitesuuntakuvion välisellä korrelaatiolla. Korrelaation riippuvuus akselin syvyys siirrosta on esitetty katkoviivalla kuvassa 17. Kuvassa on esitetty myös mitatun (korjaamattoman) ja tavoitesuuntakuvion välisen korrelaation riippuvuus syvyys siirtymästä. Se on esitetty jatkuvalla viivalla. Mielenkiintoista on havaita, että paras korrelaatio ilman korjausta saadaan, kun pyöritysakselin paikkaa siirretään laskennallisen tavoiteryhmäantennin kuvitellussa suuntakuviomittauksessa n . puoli elementtiväliä tavoiteryhmän taakse. Asia liittyy antennien vakiovaihetasoon. Antenneille voidaan löytää suuntakuvioiden vaiheiden redusointipiste, joka vastaa ainakin etusuunnassa isotrooppista pistelähdettä, joka lähettää vakiovaiheista palloaaltoa [5]. Todellisen toteutetun mikroliuska-antennin vaihesuuntakuvio on kuvan 8 perusteella hieman kupera ja suoristuu akselin siirtyessä syvyys suunnassa vastaamaan kaavan 4.2 säteilijän vakiovaiheisuutta, jolloin sovitus paranee. Katkoviivalla esitetty korjatun ja tavoitesuuntakuvion välinen korrelaatio on melko symmetrinen nollasiirtymän suhteen ja pysyy etusuunnan korrelaatioissa korkealla. Tavoitesuuntakuvioita voidaan pitää visuaalisen tarkastelun perusteella

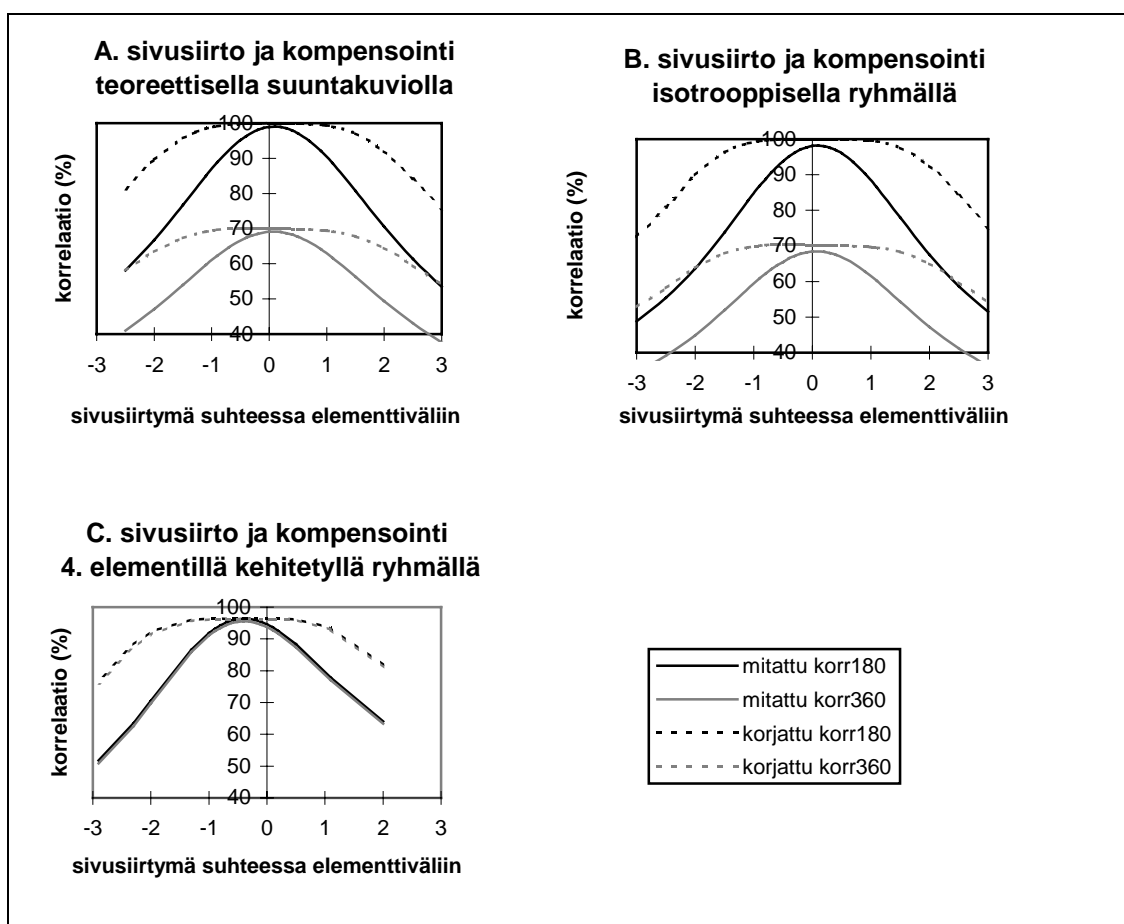
huonoina, kun korrelaatio on huonontunut n. 1% parhaasta arvosta. Käypä raja korrelaation huononemiselle on n. 0,5%, jotta tavoitesuuntakuviot ovat hyviä. Tavoitesuuntakuvioihin tulee siirtymän kasvaessa ylimääräisiä nollia. Vastaava havainto kuin epälineaarilla geometrisilla muutoksilla on tehty viitteessä [27], jossa on havaittu antennien epäidenttisyydestä johtuva ryhmäsuuntakuvion minimien muuttuminen ja uusien minimien syntyminen.

Syvyys siirron riippuvuudesta nähdään, että korrelaation 0,5% alenema vastaa suunnilleen syvyys siirtymää $\pm 1,0$ elementtiväliä d , mikä tarkoittaa, että korjauskertoimien määrittäminen ei ole kovin herkkä syvyys suunnan paikkavirheelle. Suuntakuvioiden korrelaatioiden laskeminen 360 asteen alueella antaa hankalamman riippuvuuden. Sillä ei kuitenkaan ole tässä juurikaan merkitystä, koska laskennallinen tavoitesuuntakuvio on samanlainen taka- ja etusuunnassa, mikä ei ole realistinen oletus mikroliuskaryhmälle ja tästä syystä korrelaatio on alhainen.



Kuva 17 Kompensoiminen teoreettisen tavoiteryhmän avulla. Kompensoitava ryhmä on $RH3$ ($d=0,3\lambda$) ja syötöt ovat tasasyöttöjä. Tavoiteryhmä on isotrooppinen. Kuvassa on esitetty korjatun suuntakuvion ja tavoitesuuntakuvion välisen korrelaation riippuvuus tavoiteryhmän pyöritysakselin syvyys siirrosta. Kompensointi on laskettu 180° :een kulma-alueella joka syvyysasemassa erikseen. Kuvassa on korrelaatiot laskettuna 180° :n ja 360° :n suuntakulma-alueella, merkittynä jatkuvalla viivalla korrelaatiolle ennen korjausta ja katkoviivalla korjauksen jälkeen.

Sivusiirtymän vaikutusta tutkittiin useamman tavoitesuuntakuvioiden tapauksessa. Kuvissa 18a - 18c on esitetty korjauksen onnistumisen riippuvuus, kun on käytetty tavoitesuuntakuvioiden mikroliuska-antennille kehitettyä teoreettista suuntakuviota, isotrooppista suuntakuviota ja ryhmän toisen keskielementin, neljännen elementin, avulla kehitettyjä elementtien suuntakuviota. Kuvista nähdään selvästi vertaamalla kuvaan 17, että korjaus on sivusiirtymän suhteen herkempi kuin syvyys siirtymän. Silti 1% :n suuruinen korrelaation huononnus sallii jopa elementtivälin suuruisen siirtymän.



Kuva 18. Sivusiirron vaikutus kompensoitumiseen. A. Kompensoiminen teoreettisen tavoiteryhmän avulla (kaava (4.2)). B. tavoiteryhmä isotrooppinen ja C. tavoiteryhmä 4. elementin suuntakuviolla kehitetty. Kompensoitava ryhmä on $RH3$ ($d=0,3\lambda$). Kuvassa on esitetty korjatun suuntakuvioiden ja tavoitesuuntakuvioiden välisen korrelaation riippuvuus tavoiteryhmän pyöritys akselin sivusiirrosta. Kompensointi on laskettu 180° :n kulma-alueella. Kuvassa on korrelaatiot laskettuna 180° :n (musta) ja 360° :n (harmaa) suuntakulma-alueella, merkittynä jatkuvalla viivalla korrelaatiolle ennen korjausta ja katkoviivalla korjauksen jälkeen.

Kuvan 18c tilanteessa, jossa tavoiteryhmä on kehitetty korjattavan ryhmän 4. elementillä, asettuu korrelaation riippuvuuden keskikohta elementtivälin puolikkaan

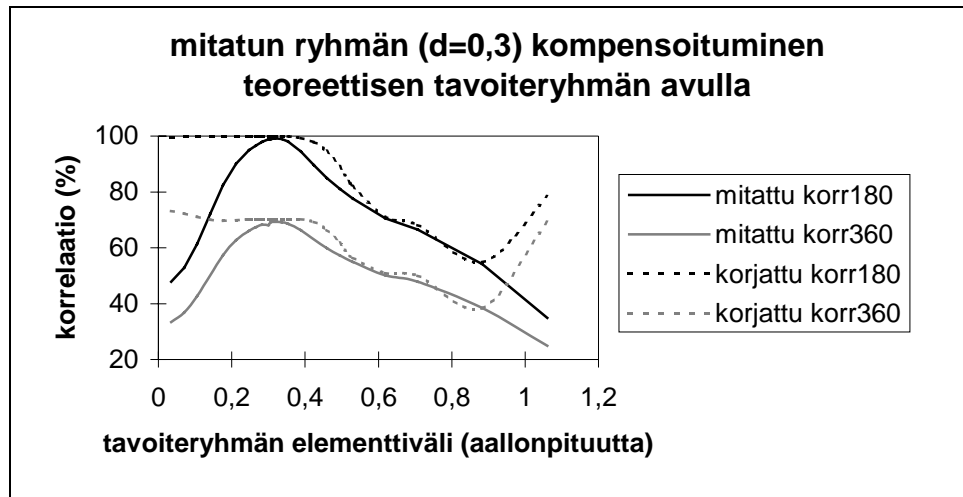
verran sivuun keskeltä. Siirtymän syynä on se, että nollasiirtymässä elementti asetettiin sellaisenaan keskelle, kun sen paikka mittauksessa oli elementtivälin puolikkaan verran sivussa keskilinjalta. Näin kuvassa näkyvä siirtymä vastaa itse asiassa suuntakuvion paikkatiedon mukaista paikkaa.

Mitään suurta merkitystä ei sivusiirtymän vaikutuksen kannalta ole sillä, miten tavoitesuuntakuvio on kehitetty. Vähiten herkkä sivusiirrolle ja tässä mielessä turvallisimmin tavoitesuuntakuvio näyttää olevan mitatusta elementin suuntakuvioista kehitetty ryhmäsuuntakuvio. Sillä on kuitenkin vastaavasti alhaisin korrelaation maksimiarvo. On myös hyvä huomata, että mitään laskennallista korjausta elementtien paikkoihin sivusuunnassa ei esitetyissä tapauksissa tarvita, vaan voidaan käyttää nollasiirtymää hyvän kompensointituloksen saavuttamiseksi.

4.2.4.2 Laskennallisen elementtivälin vaikutus

Ratkaistaessa kompensointia tavoitteena laskennallinen ryhmä, joudutaan asettamaan jokin elementtiväli. Aina se ei ole välttämättä tarkasti tiedossa. Kompensaatiotuloksen riippuvuus tavoiteryhmän elementtivälistä ryhmälle $RH3$ ($d=0,3\lambda$) on esitetty kuvassa 23. Tavoiteryhmän elementin suuntakuvio on teoreettinen kaavan (4.2) mukainen. Kuvan perusteella kompensoinnin herkkyys tavoiteryhmän elementtivälin suuruudelle vaikuttaa käytännön kannalta melko vähäiseltä. Alla olevasta kuvasta voimme päätellä, että pienemmän elementtivälin ryhmä on "helppo tavoite". Valitsemalla sopivasti antennin syöttökertoimet voidaan ryhmäsuuntakuvio saada näyttämään tarkasti pienemmän elementtivälin ryhmäantennin suuntakuviolta. Voidaan myös valita hieman todellista suurempikin tavoiteryhmän antennien väli, niin, että korrelaatio on hyvä. Myöhemmin kohdassa 4.4 esitettävä suurempi lineaarinen riippuvuus pienemmän elementtivälin ryhmässä viittaa myös siihen, että pienen välin ryhmää on helppo kuvata suuremman välin ryhmällä, muttei päinvastoin. Toisaalta pienellä laskennallisella elementtivälillä suuntakuvioiden toteuttamismahdollisuudet ovat pienemmät eikä tästä syystä pienillä väleillä aina saada kiinnostavia suuntakuvioita. Jos kuitenkin suuremman elementtivälin antennilla onnistutaan kuvaamaan hyvin pienemmän elementtivälin ideaalisia suuntakuvioita, voidaan

valitsemalla todellisuudessa tavoitesuuntakuvion elementtiväliä suurempi elementtiväli suoraan vähentää keskinäiskytken vääristävää vaikutusta.



Kuva 19 Kompensoiminen teoreettisen tavoiteryhmän avulla. Kompensoitava ryhmä on *RH3* ($d=0,3\lambda$). Tavoiteryhmä on teoreettinen kaavan (4.2) mukainen. Kuvassa on esitetty korjatun suuntakuvion ja tavoitesuuntakuvion välisen korrelaation riippuvuus tavoiteryhmän elementtivälistä. Kompensointi on laskettu 180° :n kulma-alueella. Kuvassa on korrelaatiot laskettuna 180° ja 360° suuntakulma-alueella, merkittynä jatkuvalla viivalla korrelaatiolle ennen korjausta ja katkoviivalla korjauksen jälkeen.

Kuvassa 19 elementtivälin kasvaessa korrelaatio ensin laskee ja sitten kääntyy taas nousuun. Täysin poissuljettua ei ole, etteikö se tässäkin tapauksessa voisi nousta niin korkealle, että pienen elementtivälin ryhmällä voitaisiin kuvata tyydyttävästi suuremman elementtivälin ryhmää.

4.2.5 Kahden antennin tapaus

Keskinäiskytken vaikutuksen arvioimiseksi valmistettiin erillisantennit ja yksi kahden elementin antenniryhmä. Niiden elementit olivat samoissa kohdissa kuin vastaavat kuuden elementin ryhmän *RH2* antennit. Elementtien asemat olivat *RH2*:n 4. elementin paikalla (*RH2ER3*) ja 5. elementin paikalla (*RH2ER2*). Kahden elementin ryhmässä *RH2KK1* elementit olivat asemissa 4 ja 5. Näiden kahden antennin ja yhden kahden antennin ryhmän elementtien suuntakuvioita vertailtiin.

Elementtien suuntakuvioiden korrelaatiot laskettiin ja tulokseksi tuli vastaavassa asemassa olevien elementtien osalta 98,1%-99,5%. Eri asemassa olevien elementtien

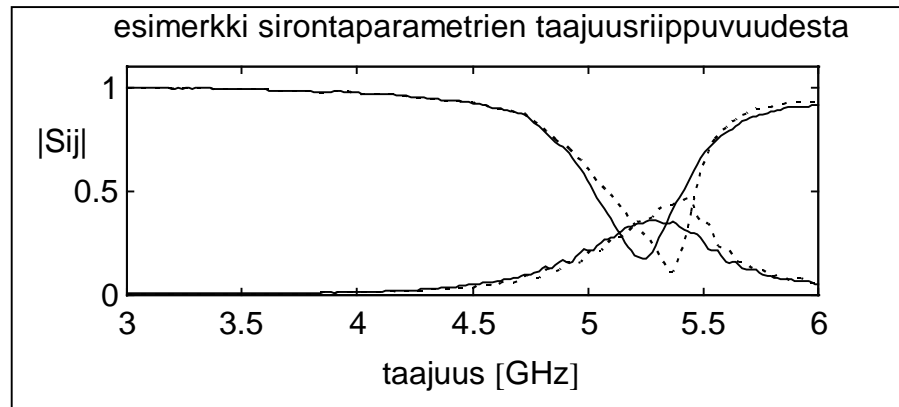
osalta korrelaatiot vaihtelivat välillä 4%-15%. Toinen tarkastelu tehtiin Gram-Schmidtin ortogonalisointiproseduurilla. Erillisantennien suuntakuvioista luotiin ortogonaalinen kanta. Kahden elementin ryhmän elementtien suuntakuvioiden hajoamista tähän kantaan tutkittiin. Asemassa 4 olevan elementin suuntakuvioista kannan ulkopuolisen osan pituus oli 7,8% ja kantaan hajoavan osan pituus 99,7%. Osien neliöiden summa noudattaa Pythagoraan lausetta eli neliöiden summa on 100%. Asemassa 5 olevan elementin osalta vastaavat luvut ovat 4,7% ja 99,9%.

Luetellut tulokset osoittavat, että antennielementtien suuntakuvioiden kuvaaminen ideaalisen ryhmän elementtien suuntakuvioilla ei perustu vain vaihtoehtojen suuren määrän eli sovitumahdollisuuksien kasvun aiheuttamaan sovituksen paranemiseen, vaan keskinäiskytkennän elementin suuntakuvioon aiheuttaman muutoksen lineaariseen riippuvuuteen häiritsevän antennin suuntakuvioista.

4.2.6 Peittämistekniikan onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä

Peittämistekniikassa peitetään antennin viereiset elementit lineaarisen korjauksen tavoitesuuntakuvion aikaansaamiseksi. Tavoitesuuntakuvioista voidaan olettaa, että siinä ei ole keskinäiskytkennän vaikutusta, jolloin suuntakuvio voisi olla ideaalinen, kun keskinäiskytkentä eliminoidaan. Antennielementtien resonanssiominaisuudet vaikuttavat keskinäiskytkentään. Jos vierekkäisten elementtien resonanssitaajuudet poikkeavat toisistaan merkittävästi, aiheuttaa tämä keskinäiskytkennän vähenemistä. Tätä yritettiin käyttää hyväksi siten, että viereisen elementin eteen laitettiin levyjä, joilla oli kohtuullisen suuri suhteellinen permittiivisyys ϵ_r . Näin saadaan aikaan viereisen elementin resonanssitaajuuden aleneminen ja samalla keskinäiskytkennän väheneminen. Tällä tavalla ei saavutettu kuitenkaan kovin alhaisia keskinäiskytkennän tasoja. Syynä lienee se, että resonanssiipiikki on tyvestä leveä ja se, että taajuuden alentuessa toisen harmonisen taajuus vastaavasti lähenee käyttötaajuutta. Myöskään metalloinnin ja substraatin päälle asetettu eriste ei vaikuta kenttiin, jotka ovat lähinnä substraatissa. Kuvassa 20 on esitetty esimerkin omaisesti kahden antennin resonanssikäyttäytyminen l. diagonaalisten sirontaparametrien taajuusriippuvuus ja

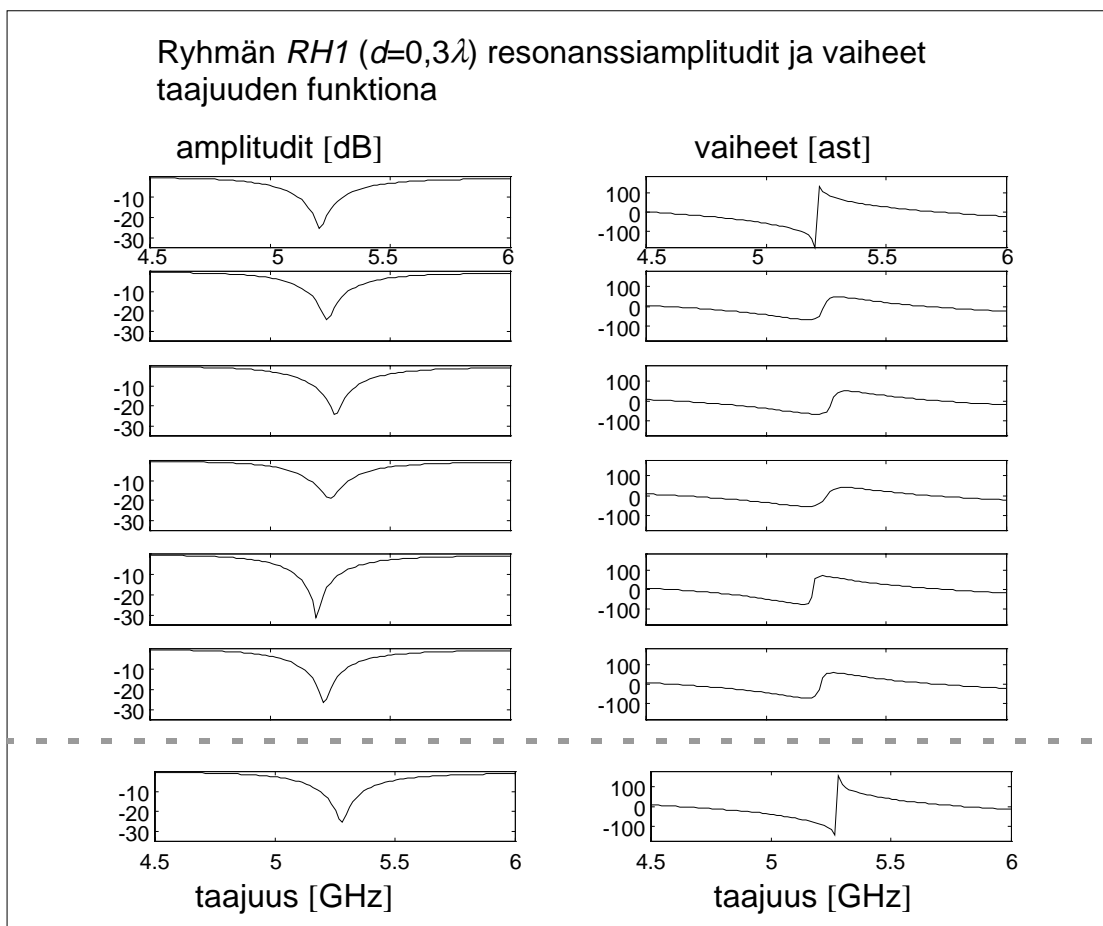
lisäksi kahden naapurielementin keskinäiskytkennän taajuusriippuvuus ryhmässä *RH3*, missä elementit olivat melkein kiinni toisissaan.



Kuva 20 Sirontaparametrien taajuusriippuvuuksia antenniryhmässä *RH3* ($d=0,3\lambda$). Jatkuvalla viivalla on esitetty itseisarvot kertoimista S_{11} (ylempi) ja S_{12} (alempi) ja katkoviivalla vastaavasti S_{33} ja S_{34} .

Toinen tapa pyrkiä keskinäiskytkennän eliminoimiseen on yrittää naapuriantennin resonaattoriipiin häivyttämistä. Kokeilemalla eri vaihtoehtoja päädyttiin käyttämään vaimennuslevyjä naapuriantennien peitteenä. Käytetty vaimennuslevy on kaupallinen radioaaltojen vaimentamiseen tarkoitettu tuote (Emerson&Cuming). Se on silikonikumipohjainen n. 3 mm paksu materiaali, jossa on ilmeisesti seostettuna grafiittia. Tässä esitetyt tulokset on saatu käyttämällä kahta päällekkäistä vaimennuslevyä. Toinen tutkittu tapa poistaa naapurielementtien resonanssit oli käyttää alumiinifoliota naapurielementtien peittämiseen ja estää signaalin kytkeytyminen niihin. Tätä tapaa voitaisiin nimittää “makkarapakettimenetelmäksi”, koska siinä ryhmää peitettiin mitattavan elementin molemmiin puolin foliolla niin, että folioon jäi rypyjä. Rypyt johtuivat ennen kaikkea ryhmäantennin kiinnitykseen käytettyjen muoviruuviin kannoista. Foliota asetettiin naapurielementin yli mitattavan antennin puoleiselle reunalle niin, että se oli millin tarkkuudella reunan päällä. Koska folio on täysin heijastava materiaali, sen reunan paikan valinta on tärkeää. Alumiinifolio eliminoi tehokkaasti naapuriantennit. Sillä ei kuitenkaan saatu yhtään onnistunutta tavoitesuuntakuviota. Syy oli ilmeisesti asettelun epätarkkuus ja kontaktien vaihtelevuus. Tarkoitus ei ollut pyrkiä tiettyyn aivan tarkkaan määrittelyyn folion asettelussa. Tavoite oli kehittää menetelmä, jota voidaan soveltaa helposti. Tarkkaan määritellyt asettelut johtavat siihen, että niiden vaikutusta voidaan ruveta

arvioimaan vaikkapa sähkömagneetiikan avulla laskemalla. Peittämismenetelmän hienous ja filosofia on kuitenkin siinä, että sillä saadaan kohtuullisen helposti aikaiseksi tyydyttävät tavoitesuuntakuviot, joita voidaan käyttää kompensoinnin mallina. Arvailun varaan peittämistavoissa jää, ovatko niillä saadut elementtien suuntakuviot läheskään sellaisia, millaisia ne olisivat ilman keskinäiskyntää. Jos voidaan olettaa, että eri peittämistekniikat antavat kukin lähes ideaalisen suuntakuvion, jossa olisi korjattu vain keskinäiskyntän aiheuttama vääristymä, olisi niiden antamien tulosten välisen korrelaation oltava suurempi kuin korrelaatiot korjaamattoman suuntakuvion kanssa. Tämä voi olla kiinnostavaa, jos halutaan saada selville “oikeat” keskinäiskyntättömät suuntakuviot, mutta ei ole tarpeen eikä tulosten mukaan välttämättä edes riittävää kompensoinnin onnistumiseksi.



Kuva 21 Ryhmäantennin $RH1$ ($d=0,5\lambda$) resonaattoreiden amplitudien (vasemmalla) ja vaiheiden (oikealla) taajuusriippuvuudet kuvassa ylhäältä alas ryhmän järjestyksessä. Alinna protoantennin $Pr2$ vastaavat kuvat.

Toteutettuihin mikroliuskaresonaattoreihin liittyy sellainen ongelma, että niiden resonanssitaajuudet poikkeavat toisistaan merkittävästi. Resonanssiipiikit olivat mikroliuskarakenteiselle antennille varsin tyypillisiä; niiden piikit olivat kapeita, 3 dB:n eli puolen tehon leveydeltään n. 50 MHz ja varsin symmetrisiä. Saavutetut maksimaaliset paluuvaimennukset (kerroin $1/S_{ii}$) vaihtelivat resonanssitaajuuksilla välillä 20 dB ... 35 dB ja mittaustaajuudella (5,3 GHz) 5 dB ... 35 dB. Resonanssitaajuudet vaihtelivat välillä 5,18 GHz ... 5,30 GHz. Koska resonaattorien maksimitaajuudet vaihtelivat merkittävästi (Kuva 21) ja koska tällä on samalla vaikutus keskinäiskytkentään, ei saatuja keskinäiskytkennän arvoja voi pitää yleistettävänä edes samalla tavoin valmistetuille antenneille. Kytkennän suuruusluokka kuitenkin lienee melko pysyvä.

Vaimennuslevyillä suoritetun peittämiskokeen tulos vaikuttaa hyvältä. Peittely symmetrisoi elementtien suuntakuviot suuntakulman nollakulman suhteen ja tekee ne keskenään lähes samanlaisiksi, siis hyvinkin "ideaalisiksi". Onnistumisen edellytys on se, että peitetään myös substraatin reunat. Näin se näyttää vähentävän keskinäiskytkennän ja reunadiffraktion vääristävää vaikutusta. Erillisryhmillä ei saatu hyviä suuntakuvioita ilmeisesti siksi, että niihin jää keskinäiskytkennän poistuttua vielä substraatin reunojen vääristävä vaikutus (Kuva 12). Laskennallisesti selvittää helpommalla, jos kaikille elementeille tehdään peittelykoe, jossa mitataan jokaiselle elementille suuntakuviota siten, että muut elementit on peitetty. Tällöin peittelykokeen tulokset kelpaavat sellaisenaan tavoitesuuntakuvioiksi, koska elementtien paikkatieto on mukana mittauksissa. Jos elementtejä on runsaasti voidaan mitata jokin keskielementti muut peiteltyinä ja kehittää tästä muiden elementtien suuntakuviot siirtämällä suuntakuvioita laskennallisesti, eli kertomalla sen pisteet paikan siirrosta aiheutuvalla vaihetekijällä $e^{jm k_x(\varphi,\theta)d_x + jn k_y(\varphi,\theta)d_y}$, missä kulmat φ ja θ ovat suuntakulmia, k_x ja k_y aaltovektorin \mathbf{k} , ja d_x ja d_y elementtisiirron \mathbf{d} suuntakosineita ja m ja n kokonaislukuja.

Osoittautui, että käytettäessä laskennallista ryhmää kompensoinnin tavoitteena saadaan varsin hyviä tuloksia. Mikroliuska-antennin tapauksessa ei peittelytekniikka olisi ollenkaan välttämätön tavoitesuuntakuvion kehittämistapa. On kuitenkin hyvä,

että tekniikan toimivuus on tullut todettua. Myös ryhmän itsensä yksittäisten elementtien käyttö ideaalisen suuntakuvion kehittämisessä näyttää toimivan, vaikka tulosten perusteella ei niin hyvin kuin isotrooppisesta elementistä kehitetty ryhmä. Syynä lienee hyvinkin epäsymmetria, joka poistuu, kun otetaan vaikkapa kahden keskimmäisen (tässä 3. ja 4.) elementin keskiarvo, kun ne on ensin laskennallisesti siirretty keskelle. Suurissa ryhmissä ei ole, jos elementit ovat identtisiä, paikkatietoa $e^{jkd \sin \theta}$ lukuunottamatta keskielementtien suuntakuvioiden erilaisuuden ja sisäisen epäsymmetrian lähdettä.

Yhteenvedona peittelytekniikasta voidaan todeta, että sillä haettiin tapaa löytää suuntakuviota, joka vastaisi mahdollisimman hyvin suuntakuvioita, jos antennien välistä kytkentää ei olisi. Mitään erityistä syytä ei ole päätyä arvioon, että näin oltaisiin saatu aikaiseksi varsinaisia ideaalisia keskinäiskytkennättömiä suuntakuvioita. Tavoitesuuntakuvioilta edellytetään sitä, että niiden avulla voidaan toteuttaa kompensointi ja päätyä “hyvännäköiseen” lopputulokseen. Hyvännäköisen lopputuloksen edellytys on se, että myös substraatin päätyreunat peitetään. Hyvä peittomateriaali on vaimentava tai mahdollisesti myös suuren permittiivisyyden materiaali. Johtavan materiaalin käytössä pitää peittäminen, kontaktien laatu ja paikka suunnitella tarkasti. Välissä voidaan käyttää eristemateriaalia.

4.2.7 Jakajan ja peittelyn samanaikainen käyttö

Ryhmää *RHI* mitattiin myös jakajaa ja peittelytekniikkaa käyttämällä. Tällöin elementtien suuntakuviot ovat aina mukana mittauksessa. Menetelmä voisi sopia tilanteeseen, jossa elementit ovat tarpeeksi kaukana toisistaan, jolloin yhden elementin poistaminen peittämällä vaikuttaisi vain keskinäiskytkennän vaikutuksen verran, eikä vaikuttaisi muuten muihin antenneihin. Jakajan käyttö perustuu ajatukseen, että on mittaustarkkuuden kannalta parempi, jos mittauksessa olevia elementtejä on kerrallaan useampia ja jokainen elementti on mukana useammassa mittauksessa.

Tavan vaatavuuden takia jakajalla tehtyjä koemittauksia ei analysoitu ajan puutteen vuoksi. Kompensointimenetelmä vaatii suuntakuviot joka elementistä osana

koskematonta ryhmää ja jokaisen elementin suuntakuvioiden erottaminen mittauksesta vaatii hankalaa matriisikäsittelyä. Peiteltyjä antenneja voidaan pitää täysin eliminoituina. Peittelemättömän antennin kohdalta voidaan sitä pitää ideaalisena vain, jos molemmat naapurielementit on peitelty. Kuitenkin mitattaessa jätettiin peittämättä suunnilleen puolet elementeistä, jolloin osa elementeistä on toiselta puolelta kytkettyjä ja toiselta puolen vapaita. Mahdollinen ratkaiseminen tuntuu vaativan pienen apertuurin mallin mukaista ajattelua, jossa elementtien suuntakuviot koostuvat "omasta" ja jokaisen muun peittelemättömän elementin synnyttämästä osuudesta tietyn antennin suuntakuvioiden. Puhtaiden ja häiritettyjen suuntakuvioiden erottaminen on silti hankala ja ehkä mahdotonkin tehtävä. Jokaista erillistä mittausta varten tarvitaan omat valintamatriisinsa, joilla erotetaan suuntakuviot mittauksista.

Jakajan avulla saadaan suoraan tasasyöttöisen ryhmän suuntakuviot. Jakajalla toteutetuissa suuntakuvioiden havaittavissa kohinan tyyppistä häiriöisyyttä, joka johtuu monimutkaisista heijastuksista. Jakajan ulostuloporttien välillä on suuri kytkentä, joka ei näy signaalia jaettaessa tai yhdistettäessä, jos kaikissa porteissa on sovitettut kuormat. Koska ryhmäantenni ei ole sovitettu, syntyy mutkikkaita resonansseja. Jakajan käyttöä mittauksissa näyttää rajoittavan myös se, että sen kalibroiminen mittaamalla osoittautui lähes mahdottomaksi tehtäväksi porttien välisten hankalien heijastusten takia. Käytetty jakaja oli tarkoitettu jakamaan signaali kahdeksaan yhtäsuureen osaan. Kaksi ulostuloa oli päätetty sovitettusti. Jäljelle jäävän 7x7-sirontamatriisin mittaaminen olisi vaatinut vähintään 21:n sirontakertoimen mittaamisen. Jakajan sirontaparametrin huomioiminen olisi huomattavasti hankaloittanut jo ennestään monimutkaista tilannetta, johon ei muutenkaan löytynyt tyydyttävää ratkaisua. Kytkennän voimakkuus ulostuloporttien välillä yhdessä ryhmäantennin epäsovituksen kanssa saattaa olla syy monimutkaisiin heijastuksiin ja herkkyyteen häiriöille.

4.3 Kompensoiminen sirontamatriisin avulla

Kompensoimista sirontamatriisin avulla kokeiltiin pienen apertuurin mallin hyvyden tarkistamiseksi. Esityönä tehdyillä mittauksilla ryhmällä *ESII* oli saatu suuntakuvioiden

visuaalisesti arvioiden lievää kompensointiparannusta sirontamatriisia käyttäen. *ESII*:n toimintataajuus on 2,16 GHz ja siinä oli käytössä 8 elementtiä. Myös 5,3 GHz:n mikroliuska-antenniryhmällä *RH3* ($d=0,3\lambda$) pientä parannusta oli havaittavissa. Havaittu parannus oli keilan kaventuminen. Molemmilla ryhmillä parannusta saatiin tasasyötön ryhmäsuuntakuvioon, kun kompensointimatriisiin käytettiin matriisia **I-S**, eikä kaavojen (2.16) ja (2.17) mukaisesti matriisia **I+S**. Jälkimmäisessä tapauksessa havaittiin keilan leveneminen. Syöttöporteista mitattu sirontamatriisi sijoitettiin näissä tapauksissa sellaisenaan kaavoihin. Mikroliuska-antenniryhmän tapauksessa kytkentämatriisia vielä iteroitiin paremman tuloksen saavuttamiseksi. Iterointi oli tarpeen sirontamatriisin referenssitason asettamiseksi apertuuriin ja myös antennisyöttöjen epäsovituksen ja kalibroinnin puutteellisuuden takia. Pienen apertuurin mallin perustana olevan viitteen [1] yksityiskohtainen paneutuminen kaapelien kalibroinnin ja sirontamatriisin redusoinnin ongelmaan viittaa siihen, että kyseisessä työssä on myös jouduttu iteroimalla sovittamaan sirontamatriisia.

Sirontamatriisista saatavalla kytkentämatriisilla **I+S** tapahtuvaan korjaukseen ei liity tarkkaan määriteltyjä tavoitesuuntakuvioita. Menetelmää käytetään perusmuodossa niin, että korjauksen tulos joko hyväksytään tai hylätään. Mikään ei kuitenkaan estä lopputuloksen vertaamista johonkin tunnettuun suuntakuvioon. Iteroitaessa näin oli tehtävä, koska visuaalinen tarkastelu on suuressa suuntakuviojoukossa mahdotonta. Korjattuja suuntakuvioita verrattiin korrelaation mielessä mikroliuska-antenneille sopivalla suuntakuvion kaavalla (4.2) kehitettyihin suuntakuvioihin. Iteroinnissa etsittiin suurimman korrelaation antava korjattu sirontamatriisi.

Sirontamatriisin mittaukseen vektoripiirianalysointilla kuuluu kiinteästi laitteen kalibrointi. Kalibrointitilillä suoritettu kalibrointi jättää mittauskaapelit yhdistävän naaras-naaras-liittimen vapaan osan sähköisen pituuden verran systemaattista virhettä sirontaparametrien S_{12} vaihemittauksiin. Liittimen aiheuttamaksi vaiheviiveeksi taajuudella 5,3 GHz arvioitiin n. 90° huomioimalla liittimen fyysinen pituus 0,9 cm, aallonpituus ilmassa 5,66 cm ja oletettu ϵ_r 2,8.

Syöttöporteista antennien apertuureihin on matkaa ja välissä on vielä resonaattori. On hyvin mahdollista, että vaihe-ero syöttöporteista apertuureihin on niin suuri, että syöttöporteista mittaamalla saadun sirontamatriisin tekijöiden vaihekulmat ovat kaukana apertuureihin asetetuista. Jo etäisyys syöttöportista resonaattoriin voi olla merkittävä. Tässä tilanteessa on mielekästä etsiä sirontamatriisille sopivaa vaihekorjausta. Resonaattorin pituus puoli aallonpituutta kertoo sen, että etäisyys sen yli on karkeasti sen puolikas eli vaihe-erona n.90 astetta. Mikroliuska-antennin kohdalla yleisessä tapauksessa matka apertuuriin jää vielä keskiarvoksi, koska mikroliuska-antennilla on kaksi säteilevää päätyä. Mikroliuska-antennin keskinäiskytcentöjä voidaankin tarkastella päätyjen välisinä, jolloin kytkentäkertoimien matriisin koko voidaan kasvattaa [28]. Mitään estettä pienemmän, tavallisen kokoisen, matriisin käyttöön ei silti ole näkyvissä. Siinä eri kytkentäreitit yhdistyvät painotettuina keskiarvoina. Mitatusta antenninryhmän *RH3* tapauksessa voidaan olettaa, että kytkentä on vain vierekkäisten päätyjen välistä, jolloin normaalikokoinen sirontamatriisi sopii erityisen hyvin pienen apertuurin mallin tarkasteluun.

Iteroinnissa muutettiin sirontamatriisin diagonaalitekijöiden ja ei-diagonaalitekijöiden vaiheita erikseen vakiovaihesiirrolla. Lisäksi käytettiin kohdassa 2.8 olevan idean mukaisesti kaavassa (2.30) kerrointa k kuvaamaan sellaisten syötettävän elementin takaisinheijastusten osuutta, jotka eivät vaikuta suuntakuvion muotoon. Yhteensä iteroitavia reaaliarvoisia parametreja oli siis kolme kappaletta. Iteroinnin tulos oli suunnilleen se, että paras kerroinmatriisi on kutakuinkin korjaamattomien mitattujen matriisien $(\mathbf{I}-\mathbf{S})^{-1}$ ja $(\mathbf{I}+\mathbf{S})^{-1}$ "puolivälissä". Paras kertoimen k arvo oli 1,0 iteroinnin tarkkuudella 0,1, mikä viittaa siihen, että elementtien epäsovitusta olisi antennielementin omaa epäsovitusta, eikä muiden elementtien aiheuttamaa.

Tasasyötön tapauksessa lähtötilanteen korrelaatio oli 98,85%. Ilman iterointia kerroinmatriisi $(\mathbf{I}-\mathbf{S})^{-1}$ tuotti tasasyötöllä korrelaatiotuloksen 97,00% ja kerroinmatriisi $(\mathbf{I}+\mathbf{S})^{-1}$ korrelaatiotuloksen 97,46%. Parametrin k arvolla nolla oli tasasyötöllä iteroinnin tuloksena saatu paras korrelaatio 98,73 % . Kun iteroinnissa muutettiin myös parametrin k arvoa saatiin iteroimalla k :lle arvo yksi ja korrelaatioksi 99,54%. Iteroimalla saatu k :n arvo 1 kertoo sen, että antennisyöttöjen epäsovitus on

ilmeisesti seurausta epäsovituksista resonaattorin syötössä, eikä sillä ole muuta kuin vakion suuruinen amplitudi- ja vaihevaikutus suuntakuvioidin. Näin keskinäiskytkentä syöttöporttien välillä ei olisi merkittävä suuntakuvioiden muodonmuutosten syy. Pelkästään tämän triviaalin epäsovituksen poistaminen antennien syötöistä jakamalla kunkin elementin i syöttö tekijällä $1+S_{ii}$ nosti korrelaation arvoon 99,18%. Epäsovituksen huomioiminen skaalaamalla syötöt pelkällä tehokijällä $(1-|S_{ii}|^2)^{-0.5}$ olisi myös ollut paikallaan kokeilla. Koska ryhmässä *RH3* elementit ovat melkein kiinni toisissaan, ei apertuurista apertuuriin ole juurikaan viivettä. Tästä syystä olisi ollut mielekästä kokeilla käyttää kompensointiin vain sirontaparametrien itseisarvoja matriiseissa $\mathbf{I}+|\mathbf{S}|$ ja $\mathbf{I}-|\mathbf{S}|$. Kun huomioidaan se, että ryhmässä *RH3* antennielementit ovat aivan vierekkäin, on resonaattorin kenttä ja siitä viereiseen resonaattoriin kytkeytynyt kenttä vastakkaisissa vaiheissa, voisi pienen apertuurin mallin pohjalta toimittaessa olla mielekästä vähentää naapurielementin suuntakuvio kerrottuna -1:llä ja elementtien välisen sirontakertoimen itseisarvolla.

Kompensoimista sirontamatriisilla kokeiltiin myös erisuurten syöttökertoimien [2 4 5 5 4 2] tapauksessa. Lähtökorrelaatioksi tuli 99,25%. Ilman iterointia kerroinmatriisi $(\mathbf{I}-\mathbf{S})^{-1}$ tuotti korrelaatiotuloksen 95,86% ja kerroinmatriisi $(\mathbf{I}+\mathbf{S})^{-1}$ korrelaatiotuloksen 99,16%. Eli korrelaation mielessä mitään parannusta ei tässäkin tapauksessa ole sirontamatriisin suoralla käytöllä. Tosin tekijä $\mathbf{I}-\mathbf{S}$ kaventaa tässäkin tapauksessa keilaa. Iterointi antoi erisuurten syöttökertoimien tilanteessa vain huonoja arvoja Mahdollisesti iterointiohjelma oli vielä jollain lailla keskeneräinen.

Käytetyn iteroinnin eteneminen voidaan kuvata perusteluineen seuraavasti.

1. Korjataan kalibrointivirheen vaikutus sirontamatriisiin. Vaiheistetaan diagonaalialkioita viivellä φ_1 ja ei-diagonaalialkioita eri viiveellä φ_2 , koska heijastus- ja läpäisymittauksissa on eri kalibrointivirhe.
2. Korjataan syöttöjen epäsovituksen vaikutus sirontamatriisiin. Oletetaan epäsovitus osaksi diagonaalialkioita reaalisella kertoimella k ($0 < k \leq 1$), jolloin korjauksessa käytetään edellisestä kohdasta saatua sirontaparametria muodossa kS_{ij} . Tällä korjataan ei-diagonaali-elementit kaavan (2.30) mukaisesti.
3. Kirjoitetaan diagonaali-elementtien paikalle tekijä $(1-k) S_{ij}$.

4. Huomioidaan vaihe-ero syötöstä apertuuriin ja takaisin kaikissa tekijöissä.

Viimeinen toimenpide ei lisää vapausasteita, koska se on ensimmäisen vaiheen toistoa ja se on jätetty pois iteroinnista.

Kysymys matriisien $\mathbf{I+S}$ ja $\mathbf{I-S}$ keskinäisestä paremmuudesta kompensoitaessa sirontamatriisilla ei ole aivan yksinkertainen asia. Jos nähdään apertuurit fyysisinä rajapintoina ja niissä rajapintaheijastus ei kohdassa 2.5 kompensointiin käytetty matriisi $\mathbf{I+S}$ ole välttämättä parempi kompensoinnissa matriisiin $\mathbf{I-S}$ nähden. Koska aiemmin mitatun ryhmän *ESII* käyttötaajuus (2,16 GHz) oli selvästi pienempi kuin mikroliuska-antennilla (5,3 GHz), oli sen kalibroinnin epätarkkuus selvästi pienempi. Näin voidaan hyvinkin asettaa matriisi $(\mathbf{I-S})^{-1}$ parempaan asemaan kompensoinnissa. Matriisin $(\mathbf{I-S})^{-1}$ mahdollista paremmuutta tai huonommuutta käytettynä sellaisenaan kompensoinnissa mikroliuska-antennien tapauksessa voidaan puolustella seuraavalla malliajattelulla. Ensinnä, matriisi $(\mathbf{I-S})$ vastaa apertuureihin asetettuna rajapintatapauksessa kytkentäkerrointa avaruudesta päin. Antennin 2 toisen antennin 1 suuntakuvioon aiheuttama suuntakuvion lisä olisi antennista 1 lähtevä ja antennin 2 apertuurin aiheuttamasta fyysisestä rajapinnasta heijastunut suuntakuvio. Jos apertuurit mielletään rajapinnoiksi, niin heijastuksilla on syöttöportista katsoen vastakkainen etumerkki kuin avaruudesta katsoen. Viitteen [1] tapauksessa käytettyjen dipolielementtien säteilypinnat 1. apertuurit ovat vastakkain, kun mikroliuska-antennin tapauksessa ne ovat ehkä enemmänkin rinnakkain. Toiseksi, kun apertuurit ovat rinnakkaisia tasoja, tapahtumaa voidaan ajatella mallitettavan myös siten, että toisen antennin 1 lähelle tuotu antenni 2 poistaa antennin 1 suuntakuviosta osan, joka olisi edennyt avaruuteen apertuurin 2 alta. Tapahtuu siis vastakkaismerkinen summautuminen. Antennien välinen sirontaparametri S_{12} kertoo sen, miten signaali kytkeytyy antennin 2 apertuurin yläpuolelta. Jos antennin 1 antennin 2 kohdalla aiheuttama vapaa yläpuolelta tuleva kenttä ja alapuolelta etenevä kenttä ovat suunnilleen yhtäsuuret, toteutuu matriisien \mathbf{I} ja \mathbf{S} summan vaikutuksesta ryhmän suuntakuvioon miinusmerkki. Kolmanneksi, keskimääräinen apertuurin etäisyys syöttöportista on vähintään resonanssivälillä, eli 90:n asteen päässä syöttöporttien vaiheista. Kun lisätään pieni etäisyys syöttöportteihin, ollaan lähempänä arvoa 180° .

Kytkentämatriisi ei välttämättä kuvaa tarkasti avaruuteen antennista kytkeytyvää signaalia. Syy tähän on se, että sen käyttö johtaa energiaperiaatteen vastaiseen tilanteeseen. Se voi olla korkeintaan ensimmäinen approksimaatio signaalin, mutta ei tehon suhteen. Asia selviää seuraavasti. Avaruuteen edennyt teho voidaan syötöllä \mathbf{a} kirjoittaa vähentämällä syötetystä tehosta takaisin heijastunut teho

$$P^{a\text{var}} = |\bar{\mathbf{a}}|^2 - |\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}}|^2 = \mathbf{a}'\mathbf{a} - \mathbf{a}'\mathbf{S}'\mathbf{S}\mathbf{a} = \mathbf{a}'(\mathbf{I} - \mathbf{S}'\mathbf{S})\mathbf{a}. \quad (4.3)$$

Kytkentämatriisin mukainen avaruuteen kytkeytyvä teho on

$$P^{\text{kytk}} = |(\mathbf{I} + \mathbf{S})\bar{\mathbf{a}}|^2 = \mathbf{a}'(\mathbf{I} \pm \mathbf{S})'(\mathbf{I} \pm \mathbf{S})\mathbf{a} = \mathbf{a}'(\mathbf{I} \pm \mathbf{S}' \pm \mathbf{S}'\mathbf{S})\mathbf{a}. \quad (4.4)$$

Yllä olevat tehot eivät ole samat. Niitä ei saa samaksi edes pienillä sirontamatriisin tekijöiden arvoilla. Asia on pyritty perustelemaan vielä tarkemmin liitteessä IV.

Sirontamatriisia iteroimalla saadut kompensointitulokset ovat sen verran hyviä, että pienen apertuurin mallia ei tässä valossa pidä hylätä mikroliuska-antennien tapauksessa. Vaikuttaa vahvasti siltä, että sirontamatriisi ei sellaisenaan sovi kytkentämatriisiin kompensointia varten. Sitä on muokattava. Tärkeintä sirontamatriisin käytössä näyttää olevan antennisyöttöjen sovituksen huomioiminen. Niiden vaikutus on lisäksi poistettava kohdassa 2.8 esitetyllä tavalla antennien keskinäisvaikutuksesta, jotta saadaan apertuurien kytkennät esiin.

Kytkentämatriisia iteroitiin käyttämällä kolmea vapaata reaaliuuttujaa. Tavoitesuuntakuvioiden avulla tapahtuvassa sovituksessa pseudoinvarianssia käyttäen valittiin kuusi parasta kompleksista syöttökerrointa, jolloin vapaita reaaliarvoisia parametreja on kaksitoista. Huomioimalla mielivaltaisen skaalaus jää varsinaisia vapaita parametreja jäljelle 10 kappaletta. Sirontamatriisin käyttöön verrattuna vapaita parametreja on paljon. Tämä seikka on omiaan nostamaan sirontamatriisin arvoa korjauksessa, vaikka sillä saatu parannus olikin melko vaatimaton. Tärkeää menetelmän tutkimisessa on kalibrointimittausten tarkentaminen ja antennisyöttöjen tarkempi sovittaminen, jolloin varsinaiseksi ongelmaksi jää syöttöporteista mitattujen sirontaparametrien redusointi antennielementtien apertuureihin.

Sirontamatriisi on käyttökelpoinen kompensointiin mittaamatta suuntakuvioita, jos iterointi voidaan jättää pois. Tämä vaatii sitä, että löydetään mikroliuska-antennin tapaukseen sopiva kaava, jonka avulla korjauskertoimet voidaan laskea mittaamalla syöttöportteihin redusoidut sirontamatriisit. Suurissa ryhmissä sirontaparametrien mittaaminen muodostuu hankalaksi. Silloin on syytä keskittyä vain matriisin diagonaalien läheisiin kertoimiin. Pelkästään suuntakuvioihin perustuvassa kompensoinnissa suuntakuvioiden mittausten määrä kasvaa suoraan verrannollisesti antennielementtien määrään. Suurissa ryhmissä voidaan keskielementejä kuvata yhdellä mittauksella, jolloin mitattavien kertoimien määrä laskee. Kompensoidessa sirontamatriisilla mitattavien sirontaparametrien määrä kasvaa suhteessa antennielementtien määrän neliöön. Mittausten vähentämiseksi voidaan vastaavasti olettaa keskielementtien sirontaparametrien lähikytkennät samoiksi. Pienet kertoimet täytyy ryhmän kasvaessa jättää mittaamatta tai niistä pitää ottaa vain useammalle kertoimelle yhteisiä näytteitä.

Korjausyrityksistä huolimatta sirontamatriisia käyttävän kompensoinnin tulos oli tutkitussa tapauksessa selvästi huonompi kuin pseudoinvarianssia käytettäessä. Tästä voidaan vetää se johtopäätös, että malli ei toimi ainakaan suoraviivaisesti mikroliuska-antennien tapauksessa. Varman mallin hylkäävän johtopäätöksen teko tällä perusteella on kuitenkin vaikeaa, koska mittausvirheet ja muut epäideaalisuudet saattavat aiheuttaa enemmän antennielementtien suuntakuvioiden erilaisuutta kuin keskinäiskytkentä. Yleinen lineaarinen malli kompensoi myös sellaiset mittausvirheet, jotka ovat aiheutuneet siitä, että vektoripiirianalysointorin vertailuvaihe ja amplituditaso muuttuvat mittausarjan aikana. Tämä mittausvirhe siirtyy sellaisenaan korjattuihin syöttökertoimiin. Jopa yhden elementin mittausaikana tapahtuva tasainen muutos lienee sellainen, että se voidaan kompensoida laskennallisesti muuttamalla syöttökertoimia. Yhtä hyvin näyttää kompensoituvan substraatin reunojen aiheuttaman diffraktion vaikutus elementtien suuntakuvioita vääristävänä tekijänä. On vaikea päätellä, mikä osuus suuntakuvioiden vääristymistä on keskinäiskytkennällä ja mikä muilla tekijöillä ja sovittaa nämä mukaan laskentamalliin..

4.4 Yhteenveto kompensointituloksista

Kompensointi pseudoinvarianssilla saadulla kompensatiomatriisilla toimii mittaustulosten valossa hyvin. Kytkeäisten elementtien suuntakuviot voidaan kuvata hyvin tarkasti eri tavoin saatuja tavoitesuuntakuvioita summaamalla. Antennien eliminointi resonaattoreina tavoitesuuntakuvion rakentamisessa ei vaikuta uskottavalta tavalla. Elementtien ideaalisia suuntakuvioita mitattaessa muut antennit voidaan resonaattoreina eliminoida, jolloin antennien välistä kytkentää ei voi olla. Kompensoinnin kannalta parempi lähtökohta on pyrkiä symmetrisoimaan antennien suuntakuviot. Peittelymenetelmässä vain absorboivalla materiaalilla tapahtuva naapurielementtien peittely näyttää toimivan. Peittelyyn käytettävän johtavan materiaalin kontaktien varmistaminen tai estäminen ei toteudu riittävällä varmuudella.

Mittauksista rakennettujen suuntakuvioiden lisäksi voidaan käyttää laskennallisia suuntakuvioita. Tässä saatiin laskennallisilla tavoitesuuntakuvioilla jonkin verran parempia tuloksia. Saadut kompensatiomatriisit vaikuttavat epäilyttävän epäsymmetrisiltä, epäresiprookkisilta, mikä aiheuttaa huolta mittaustarkkuudesta. Antenniryhmien valmistuksessa tavoiteltiin erityisesti ryhmien symmetriaa, mikä näyttää suuntakuvioita tarkastellen toteutuneen. Antennien resonaattoriominaisuuksien vaihtelu taas kertoo muuta. Ilmeisesti resonaattorit ovat huomattavasti herkempiä pienille muutoksille kuin suuntakuviot.

4.5 Sirontaparametrien määrittäminen

4.5.1 Suoraan mitatut sirontamatriisit

Sirontamatriisit on mitattu kaikille antenniryhmille suoraan syöttöporteista vektoripiirianalysointilla. Antenniryhmien $RH3$ ($d=0,3\lambda$) ja $RH4$ ($d=0,93\lambda$) kohdalla on tuloksena saadut sirontaparametrit liitteessä I. Tässä työssä määriteltujen sirontaparametrien suuruusluokka noudattaa aiemmin kokeellisesti ja laskennallisesti alemmilla taajuuksilla 1,4 GHz, 1,6 GHz ja 5 GHz määritellyistä mikroliuska-antennien E-tason keskinäiskytkennän arvoista saatuja etäisyysriippuvuuksia [29,28,30]. E-taso on liuskarakenteen kohtisuora symmetriataso, kun huomioidaan

syötön paikka. E-tason kytkennässä säteilevät reunat ovat vastakkain. Viitteen kuvista nähdään, että kytkentä on suurempaa kun elementit asetetaan säteilevät reunat vierekkäin tyypillisillä aallonpituuden tai sen puolikkaan suuruusluokkaa olevilla etäisyyksillä. Kun elementit ovat lähes kiinni toisissaan, on ei-säteilevien reunojen välillä suurempi kytkentä (H-tason kytkentä). Tässä työssä pyrittiin mahdollisimman suureen kytkentään asettamalla säteilevät reunat ryhmässä vierekkäin. Hyvin pienillä etäisyyksillä olisi ilmeisesti kannattanut toimia päinvastoin.

Sirontamatriisien resiprookkisuus näkyy symmetriana matriisin diagonaalien suhteen. Suhteellinen mittausrvirhe näkyy poikkeamisissa resiprookkisuudesta. Antenniryhmän symmetrisyys näkyy näkyy peilaamalla alkiot vasemman alakulman ja oikean yläkulman yhdistävän diagonaalien suhteen. Sirontamatriiseista voidaan päätellä suuntakuvioiden tapaan antenniryhmien symmetrian hyvä toteutuminen. Elementit ovat mittaustarkkuudella suunnilleen samat molempien diagonaalien yli. Päädiagonaalien alkioiden symmetria ei ole yhtä suuri.

4.5.2 Sirontaparametrien määrittäminen suuntakuviosta oikosulkujen avulla

Sirontaparametrien määrittäminen suuntakuviosta on vaihtoehtoinen tapa sirontaparametrien syöttöporttimittauksille (kaava (2.1)). Se perustuu kahden portin väliseen mittaustilanteeseen, joka on esitetty kaavassa (2.32). Jos mittaukset olisi tehty kyseisellä tavalla päättämällä vain yksi portti kerrallaan oikosululla, olisi tarvittu 6 kappaletta oikeita suuntakuvioita ja jokaista kohti vielä 5 oikosulkukoetta. Näin oltaisiin päädytty 6 elementin ryhmässä 36 suuntakuvion mittaukseen. Resiprookkisuuden avulla mittaukset olisi voitu vähentää 21 kappaleeseen. Tämäkin on vielä hyvin raskasta. Tästä syystä kehitettiin matriisimenetelmä, jolla mittausten määrä saadaan vähennettyä 12 kappaleeseen. Puutteena tässäkin tavassa on, että sirontamatriisien diagonaalialkiot jäävät määrittämättä. Niiden mittaamiseen suuntakuviosta keskinäissironnan tapaan ei löytynyt suoraa tapaa. Jäljempänä esitettävään matemaattiseen malliin ne kuuluvat iteroitavina kertoimina ja saadaan periaatteessa määritettyä.

Matriisimenetelmä sopii sirontaparametrien mittaamiseen suuntakuvioiden avulla, jos sirontaparametrit ovat niin pieniä, että toisen kertaluvun sironta porttien välillä voidaan jättää huomiotta. Kun kaikki elementit mitataan niin, että muihin elementteihin on kytketty joko kaikkiin oikosulku tai sovitettu pääte, voidaan kirjoittaa suuntakuviovektoreille kuuden yhtälön yhtälöryhmä

$$\begin{cases} \vec{V}(1) = \vec{U}(1) + X_2 S_{12} \vec{U}(2) + X_3 S_{13} \vec{U}(3) + X_4 S_{14} \vec{U}(4) + X_5 S_{15} \vec{U}(5) + X_6 S_{16} \vec{U}(6) \\ \dots\dots\dots \\ \vec{V}(6) = X_1 S_{61} \vec{U}(1) + X_2 S_{62} \vec{U}(2) + X_3 S_{63} \vec{U}(3) + X_4 S_{64} \vec{U}(4) + X_5 S_{65} \vec{U}(5) + \vec{U}(6) \end{cases}, \quad (4.5)$$

missä vektori $\vec{U}(i)$ on tavallinen suuntakuvio, joka on mitattu, kun muut antennielementit on päätetty sovitetusti. Suuntakuviovektori $\vec{V}(i)$ on mitattu siten, että muut elementit on päätetty oikosuluilla. Kertoimet S_{ij} ovat sirontamatriisin \mathbf{S} alkioita ja kertoimet X_i päätetekijöitä. Kun jokaiseen yhtälöön lisätään molemmille puolille tekijä $X_i S_{ii} \vec{U}(i)$ ja siirretään tekijä $\vec{U}(i)$ vasemmalle puolelle niin voidaan kirjoittaa suuntakuvioiden matriisiyhtälö

$$\mathbf{V} + (\mathbf{XII} \cdot \mathbf{SII} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{U} = \mathbf{XII} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}. \quad (4.6)$$

Tässä \mathbf{U} ja \mathbf{V} ovat suuntakuvioiden matriiseja, 6×359 , kun mittapisteitä on 359:llä kulma-arvolla. \mathbf{SII} on 6×6 diagonaalimatriisi, jonka diagonaalialkiot ovat matriisin \mathbf{S} diagonaalialkioita ja \mathbf{XII} päätetekijöiden 6×6 diagonaalimatriisi. Pseudoinvarianssin avulla yhtälöstä (4.6) voidaan ratkaista \mathbf{S} . Matlab-ohjelman merkintää ' (yläpilkku = transponointi + kompleksinen konjugaatti) käyttämällä, voidaan kirjoittaa

$$\mathbf{S} = \text{inv}(\mathbf{XII}) \cdot (\text{pinv}(\mathbf{U}') (\mathbf{V} + (\mathbf{XII} \cdot \mathbf{SII} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{U})')'. \quad (4.7)$$

Käytettäessä oikosulkuja ilman kaapeleita ovat matriisin \mathbf{XII} diagonaalitekijät kaikki samoja lukuja -1 , kun sirontamatriisin referenssitaso on syöttöporttien päissä. Merkintä $\text{inv}(\mathbf{XII})$ tarkoittaa tavallista kääntematriisia \mathbf{XII}^{-1} , joka suoraan porttiin kytketylle oikosululle on ykkösistä johtuen sama kuin \mathbf{XII} .

Suuntakuvioista riittää tässä pienempikin näyte. Voidaan mitata vain yhtäkin suuntaa, kunhan mittausaika on tarpeeksi pitkä. Verrattuna sirontaparametrien suoraan mittaukseen porteista mittaus suuntakuvioiden avulla on häiriöisempi, johtuen siitä, että suuntakuvioiden mittauksessa signaalit ovat heikkoja kun käytetään pitkiä kaapeleita. Lisäksi kaapelit vääntyilevät mittauksessa. Toisaalta heijastukseton huone

poistaa ympäristön häiriöitä ja lisäksi mittaushuoneen häiriöiden vaikutusta vähentää, kun mitataan eri suuntia, jolloin seinästä tulevat häiriöt summautuvat epäkoherentisti lopputulokseen. Lisäksi suuntakuviomittauksilla mittausaika oli selvästi pidempi. Oikosulkuja käyttäen mitattiin suuntakuvioita aivan samoin kuin muidenkin tämän työn mittausten yhteydessä.

Mittauksissa käytettiin vain sovitettuja päätteitä ja oikosulkuja kytkettyinä suoraan antenniporttiin. Tällöin askarruttaa kysymys, onko kyseinen pääte tarpeeksi pitkä, jotta se heijastaisi vain *TEM*-aaltoa, joka kulkee koaksiaalikaapelissa [5,16]. Muutoin saattaa tulla ongelmia muiden aaltomuotojen kanssa, jotka myös heijastuvat. Oikosuljettu pääte aiheuttaa oikosulun suoraan liittimen päähän. Matka liittimessä arveltiin tarpeeksi pitkäksi, niin että muut aaltomuodot kuin koaksiaalikaapelissa etenevä *TEM* vaimenevat. Pääteinä käytettiin vain oikosuljettuja päätteitä, koska avoimia päätteitä ei ollut käytettävissä. Syöttöporttien avoimiksi jättäminen jättämällä ne ilman päätettä ei toimintatapana ollut vakuuttava ja tällä tavoin mitatut suuntakuviot jätettiin käyttämättä. Avoimiin liittimiin voi tunnetusti kytkeytyä säteilyä, ne voivat toimia antennina ja säteily voi kiertää portin ja antennin välillä.

Mittaustapahtumaa voidaan pitkälle havainnollistaa kuvalla 2 sivulla 24. Erona kuvan 2 esittämään pienen apertuurin heijastukseen nähden on se, että tässä antennista toiseen heijastuva signaali on ensin kytkeytynyt antennista siirtojohtoon vastaten suuntakuviota ja heijastunut siirtojohtossa päätteestä, kun kuvan 2 tilanteessa on kyse kuvitellusta heijastuksesta apertuurista toiseen.

Sirontamatriisin diagonaalialkiot voidaan ottaa vektoripiirianalysointimittauksen tuloksista. Ne voidaan myös ratkaista yllä olevasta yhtälöstä (4.7) iteroimalla. Järkevimät arvot on saatu ensimmäisellä tavalla. Iteroinnissa diagonaalitekijöiden arvot kasvavat joka iteroitokierroksella. Ilmeisesti tarvittaisiin jokin tapa yllä olevan yhtälön stabiloimiseksi.

Matriisimenetelmä sirontamatriisin määrittämiseksi on melko hankala. Sitä onkin käytetty lähinnä siksi, että saataisiin tietoa siitä, voidaanko sirontaparametrit määrätä

riittävän tarkasti suuntakuviosta. Pienen apertuurin mallin kelpoisuuden tarkistamiseksi tästä oli hyötyä. Näin saadut sirontaparametrit poikkesivat ($RH2$:n valmistusvaiheessa tehdyllä) 3:n elementin väliaikaisryhmällä vektoripiirianalysaattorimittausten arvoista n. 1-2 dB:n verran diagonaalien viereisillä elementeillä, kun kompensatiomatriisin vastaavat arvot poikkesivat vektoripiirianalysaattorimittauksista selvästi enemmän, 3 dB ... 5 dB. Avoimilla liittimillä tehty koe antoi oikosulkukokeeseen verrattuna vain n. 0,4 dB:n eron, mikä viittaa, että myös avoimeksi jätettyjä liittimiä voidaan menetelmässä käyttää päätteinä. Koska kompensatiomatriisin arvot määrätään hyvin samantapaisella mittauksella, tästä tehtiin se johtopäätös, että pienen apertuurin malli ei sovi mikroliuska-antenneille, eikä sirontamatriisista saatava kytkentämatriisi voi toimia hyvin kompensoinnissa. Päätely perustuu siihen, että sirontamatriisin ei-diagonaalikertoimet eivät voi poiketa kovin paljon parhaiten suuntakuvioiden epäideaalisuudet kompensoivan kompensatiomatriisin kertoimista, jos sen käyttö on hyvä tapa suorittaa kompensointi. Tämä oli varsin hankala tapa tehdä johtopäätös, että suuntakuvioiden vääristymien kompensoinnin huono onnistuminen sirontamatriisilla ei johtunut suuntakuvioiden huonosta mittaustarkkuudesta vaan pienen apertuurin mallin heikkoudesta. Koska kuitenkin saadut kompensatiomatriisit olivat melko epäresiprookkisia ja epäsymmetrisiä, ei niitä voida pitää erityisen luotettavina. Lisäksi Jos pienen apertuurin malli toimisikin, ei se voi tuottaa mikroliuskaryhmissä hyviä suuntakuvioita, koska se ei tällöin poista substraatin reunojen vaikutusta.

Edellä ollut ensimmäisen kertaluvun approksimaatio toimii sitä huonommin, mitä lähempänä antennielementit ovat, koska kytkentä tällöin kasvaa. Tästä syystä kehitettiin myös toisen kertaluvun approksimaatio, joka huomioi sironnan antennin yhdestä portista mitattavaan porttiin käyden välillä kolmannessa portissa heijastumassa. Se on samantapainen kuin yllä kaavassa (4.7) esitetty. Sillä tuli jopa huonompia tuloksia, joten sitä ei tässä kannata esittää.

Kaapelitekijän arvon oletaminen arvoksi -1 ei välttämättä ole oikein. Päätetekijöiden arvo voidaan ylläolevassa tapauksessa tarkistaa jälkikäteen sijoittamalla saatu sirontamatriisi matriisiyhtälöön ja ratkaisemalla päätetekijä \mathbf{X} . Näin tekemällä saatiin

kaapelitekijän eli tässä oikosulun heijastuskertoimen arvoksi hieman -1 :stä poikkeavia arvoja. Taitavalla laskennalla tästä voisi olla mahdollisuus kehittää menetelmä sekä sirontaparametrien, että kaapelien ja päätteiden mittaamiseen.

Jos antennit ovat huonosti sovitettuja, täytyy päätetekijälle vaihtaa tarkempi arvo, joka huomioi portin oman heijastuskertoimen. Tätä tarkempaa tapaa käytettiin toteutetuissa laskuissa. Siinä suoritetaan tarkennus

$$X_i \rightarrow \frac{X_i}{1 - X_i S_{ii}}. \quad (4.8)$$

Eryyisesti lienee paikallaan mainita, että tässä esitetty tapa mitata sirontaparametrit suuntakuviosta perustuu laskennan osalta vain matemaattiseen approksimaatioon. Mitään uutta sironnan mallia, jossa olisi vaikeata teoriaa mukana, tässä ei käytetä, vaan tämä perustuu suoraan sirontaparametrien ja suuntakuvioiden määritelmään. Sirontaparametrit määritellään syöttöjohdoista katsoen antennin portista toiseen porttiin kytkeytyvien jännitteiden kompleksilukusuhteena. Menetelmässä takaisin heijastetut suuntakuviot toimivat vain sirontaparametrien kantajina.

Suuntakuviomittauksilla saadut sirontaparametrit poikkeavat ennen kaikkea vaiheeltaan syöttöjohdoilla saaduista. Molempien mittausten referenssitaso on syöttöporteissa. Menetelmällä saatujen parametrien vaihekulmien eroilla ei ollut säännöllisyyttä. Mahdollisina sirontamatriisien poikkeavuuksien syinä voi olla myös lyhyeen liittimeen kytkeytyvät muut aaltomuodot kuin perusaaltomuoto *TEM*.

Sirontaparametrit saadaan suuntakuviosta tarkemmin, jos lähetysantenni on lähempänä. Saapuvan aallon ei tarvitse olla tasoaalto, kunhan vain lähetysantenni ei vaikuta tutkittavan ryhmän kytkentöihin. Tässä sirontaparametrit mitattiin tarkoituksella suuntakuviosta, jotka oli mitattu samoin kuin muut suuntakuviot.

Jos olisi käytettävissä myös sovitetuilla päätteillä mitattuja suuntakuvioita, voidaan toisen kertaluvun kytkeytyminen saada eliminoitua pois laskuista kirjoittamalla ylläolevien yhtälöiden tapaan lisää yhtälöitä, joissa on samoja tekijöitä, mutta vastakkainen merkki. Näin voidaan toisen kertaluvun tekijät supistaa yhteenlaskulla

pois. Tarkista, onko avointen päätteiden käyttö jo mukana, sen jälkeen lisää tähän mahdollisuus käyttää avoimia päätteitä, jolloin mitataa kolmella tavalla ja vähennetään tavallisesta suuntakuviomittauksesta oikosulku- ja avointen päätteiden suuntakuvioiden erotus, jolloin toisen kertaluvun kytkennät jäävät mallista pois). Kolmen elementin ryhmälle, jos käytetään vastakkaisten heijastuskertoimien päätteitä X ja $-X$ voidaan kirjoittaa kaavan (2.32) tapaan yhtälöt eri heijastavia päätteitä käyttämällä saaduille ensimmäisen elementin suuntakuvioille, joissa on mukana toisen kertaluvun termit

$$\begin{aligned}\vec{V}_1(1) &= \vec{U}(1) + X_2 S_{12} \vec{U}(2) + X_3 S_{13} \vec{U}(3) + X_3 S_{13} X_2 S_{32} \vec{U}(2) + X_2 S_{12} X_3 S_{23} \vec{U}(3) \\ \vec{V}_2(1) &= \vec{U}(1) - X_2 S_{12} \vec{U}(2) - X_3 S_{13} \vec{U}(3) + X_3 S_{13} X_2 S_{32} \vec{U}(2) + X_2 S_{12} X_3 S_{23} \vec{U}(3)\end{aligned}\quad (4.9)$$

Kun yhtälöt vähennetään toisistaan ja näin kumotaan toisen kertaluvun termit, voidaan kirjoittaa vastaava matrisiyhtälö kuin kaavassa (4.7), joka pätee vaikka toisen luvun tekijät eivät ole merkityksettömän pieniä.

4.5.3 Sirontamatriisin eri määrittelytavat

Tähän mennessä on tässä työssä esitelty useita eri tapoja mitata ja arvioida sirontamatriisia. Lyhyesti lueteltuna kaikki käytetyt tavat ovat: vektoripiirianalysointimittaus, mittaus suuntakuvioista päätteiden avulla, suuntakuvioiden korrelaatio (kohdan 2.3 määritelmän mukaan), ekvivalenttien virtojen päällekkäisyys pistetulon mielessä ja kompensatiomatriisin käyttö sirontamatriisina. Vektoripiirianalysointilla tapahtuva määrittäminen on syytä pitää määritelmän mukaisena ja siksi "ainoana oikeana" tapana. Muita tapoja voidaan verrata siihen. Mittaus suuntakuvioista päätteiden avulla sisältää sirontaparametrit ja niiden kertoimina suuntakuviomittauksia. Mittaustapa perustuu matemaattiseen approksimaatioon. Suuntakuvioiden välinen korrelaatio kuvaa niiden syynä olevien herätteiden päällekkäisyyden samoin kuin ekvivalentit virrat. Molemmat päällekkäisyydet ovat ainakin sukua keskinäiskytkennälle. Kompensatiomatriisin ja sirontamatriisin ei-diagonaali-alkiot ovat pienen apertuurin mallin mukaan samat. Vain matriisien ei-diagonaali-alkioita on verrattu ja niistäkin lähinnä amplituditasoja. On

nimittäin ollut vaikea nähdä, että vaihe-erot olisivat käyttäytyneet siististi eli olleet vakioita.

Kolmen elementin ryhmällä (keskeneräinen kuuden elementin ryhmä) määritettiin sirontamatriisi vektoripiirianalysointilla ja oikosulkumenetelmällä. Oikosulkumenetelmällä saatiin ei-diagonaalelementtejä, jotka poikkesivat 1 dB ... 2 dB vektoripiirianalysointimittauksista. Vaiheet poikkesivat melko satunnaisesti. Kuuden elementin ryhmällä ($RH4$, $d=0,93\lambda$) saatiin oikosulkumittaukselle poikkeamaksi "ainoasta oikeasta" eli vektoripiirianalysointimittauksesta, 3-4 dB, kun itseisarvo oli diagonaalien viereisillä elementeillä luokkaa -24 dB. Ekvivalenteista virroista määritetyt sirontaparametrit poikkesivat edellisistä n. 6 dB, mutta poikkeama oli pienimmillään selvästi alle 1 dB. Suuntakuvioiden korrelaatiot poikkeavat 2-4 dB diagonaalien vieressä, kauempana diagonaalista huomattavasti enemmänkin. Korrelaatio saattaa välillä kasvaa elementtivälin kasvaessa, kun sirontamatriisin kytkennät laskevat jatkuvasti. Suuntakuvioiden korrelaatiomatriisi ja ekvivalenttien virtojen korrelaatiomatriisi ovat pistetulon käänteisyydestä johtuen resiprookkisia. Kompensaatiomatriisin diagonaalien yli otetut vastinpisteet poikkesivat toisistaan 0-6 dB. Oikosulkukokeen avulla saadut sirontamatriisit vaikuttivat kohtuullisen resiprookkisilta. Vaihevertailussa oikean sirontamatriisin kanssa ei ilmennyt säännöllisyyttä keskinäisissä vaihe-eroissa.

Yhteenvedon yllä olevasta ja mittausten perusteella muodostuneet mielipiteet voidaan tiivistää johtopäätöksiksi seuraavasti: Suuntakuvioiden korrelaatiot antavat sirontamatriisiin kohtuullisen arvion kytkennöistä, kun tarkastellaan vain diagonaalien viereisiä matriisielementtejä, jotka vastaavat kytkentää antennin vierusantenneihin. Ekvivalenttien virtojen määrittelyyn perustuva tapa on hankala ja epävarma. Kompensaatiomatriisi poikkeaa huomattavasti sirontamatriisista. Koska jäljempänä olevan kohdan 4.4 mukaan käytetyllä elementtivälillä ($d=0,93\lambda$) suuntakuviot ovat melkein riippumattomia, voidaan arvioida pienen apertuurin mallin toteutuvan huonosti ja antavan vain kohtuullisia kompensointituloksia. Oikosulkukokeen tulokset poikkeavat oikeasta sirontamatriisista alle 2 dB, jos ei-diagonaalelementtien taso on alle -30 dB, eikä elementtimäärä ylitä huomattavasti kuutta. Eri määrittystapojen redusointipisteiden asettaminen samoiksi on hankala tehtävä. Tämä on hyvinkin

osasy poikkeamiin. Mitään vakiovaihesiirtoa, jolla sirontamatriisit olisi saatu samoiksi ei näyttänyt olevan, joten ongelma ei ole pelkästään redusointipisteen valinta.

4.5.4 Mittaukset kolmen elementin ryhmällä

Kolmen elementin ryhmä saatiin juottamalla kuuden elementin ryhmään vain kolme liitintä. Toinen kolmen elementin ryhmä saatiin käyttämällä valmiissa kuuden elementin ryhmässä kolmen elementin syötöissä jatkuvasti sovitettuja päätteitä. Tällaiset elementit ovat ns. passiivisia elementejä (dummy elements), joita lisätään usein antenniryhmien reunoille, jotta saataisiin aikaan se, että reunaelementit toimivat kuten keskielementit, koska ne tällöin näkevät samanlaisen ympäristön. Ryhmiä käytettiin edellisessä kohdassa esitetyissä oikosulkukokeissa. Kompensoitumista niiden avulla ei tutkittu, koska niissä elementtiväli ei ole vakio, jolloin tavoitesuuntakuvion varmistaminen sopivaksi on vaikeaa, koska suuntakuviolla ei ole tunnettua muotoa. Aktiivisiksi elementeiksi valittiin muut kuin vierekkäiset, jotta olisi saatu etäisyyttä elementtien välille. Ei-vakiovälisen epäsymmetrisen ryhmän puuttuminen mittaustuloksista on silti puute, joka voidaan huomioida tulevaisuudessa.

4.6 Sirontaparametrit ja ryhmän sovitus

4.6.1 Syöttökertoimet ja ryhmän sovitus

Keskinäiskytteisessä ryhmässä on aina mahdollista signaalin takaisinheijastuminen syöttöportteihin, vaikka jokaisen portin oma takaisinheijastus olisi eliminoitu. Takaisin heijastuneen energian osuus riippuu keskinäiskytteisessä ryhmässä syöttöjännitteiden suuruuksien lisäksi niiden keskinäisistä vaihe-eroista. Pienimmän elementtivälin ($d=0,3\lambda$) ryhmälle *RH3* etsittiin sellaiset syöttövektorit, jotka antavat mahdollisimman pienen takaisin heijastuneen energian osuuden ja sellaiset, jotka antavat mahdollisimman suuren takaisin heijastuneen energian osuuden. Lisäksi määritettiin takaisin heijastunut energia muutamalla realistisen tuntuisella syöttövektorilla. Tasasyöttö sekä huonoimman ja parhaan sovituksen syöttövektorien

käyttö antoi *RH3*:lla takaisin heijastuneen energian osuuksiksi: tasasyöttö 25,8%, huonoin tapaus 112,5% ja paras sovitus 0,3%. Viimeksi mainittu on desibeliasteikolla -24,8. Takaisin heijastunut, palannut teho on laskettu summaamalla kaikkien syöttöjohtojen paluutehot kaavalla (2.25). Se, että huono sovitus antoi energiaperiaatteen vastaisesti takaisin syötettyä enemmän, kertoo mittausvirheen osuudesta. Tätä sirontamatriisia mitattaessa liittimet joka kerta irroitettiin ja kiinnitettiin uudestaan ennen mittausta. Lisäksi mitattiin tällä tavoin erikseen sirontamatriisin resiprookkiset peilikuvat diagonaalin yli. Laskentaa varten sirontamatriisia ei symmetrisoitu. Se on esitetty liitteessä I. Myöhempi sirontamatriisin tarkistusmittaus suurta takalevyä käyttäen ja samalla tavoin mitaten antoi paljon resiprookkisemman tuloksen. Sen lisäksi, että käytettiin eri piirianalysointia on mahdollista, että syynä oli takalevyn puuttuessa takaa tulevien häiriöiden osuus. On myös mahdollista, että duroidille toteutettu ryhmä, joka kiinnitettiin muovilevyllä "eli" mittausten aikana, kun metallilevyn päällä kiinnitys oli taas jäykempi. Paras ja huonoin sovitus saadaan sirontamatriisin **S** ja kytkentämatriisin **I+S** ominaisarvojen ja -vektorien avulla. Asia on esitetty kohdassa 2.7 ja liitteessä II. Paras sovitus löytyy käyttämällä matriisin **I+S** syöttöominaisvektoria, jonka ominaisarvo on lähinnä ykköstä. Huonoin sovitus löytyy saman matriisin pienintä ominaisarvoa vastaavasta ominaisvektorista. Sovitusta ei voi syöttökertoimien valinnalla parhaasta sovituksesta enää parantaa tässä ryhmässä, eikä huonoimmasta saadusta vastaavasti huonontaa.

4.6.2 Sovitus ja suuntakuviot

Edellisessä kohdassa paluutehon mielessä vertailtujen huonoimman sovituksen, parhaan sovituksen ja tasasyötön syöttövektorien synnyttämiä suuntakuvioita verrattiin keskenään laskemalla suuntakuvioiden suhteelliset energiat. Ne saatiin suuntakuviovektorin itseisarvon neliöstä. Vertailu suoritettiin tasasyötöllä saatuun suuntakuvioon. Sisään syötettyjen tehojen yhtäsuuruus toteutettiin normeeraamalla syöttövektorit yksikön suuruiseksi. Tulokseksi saatiin, että parhaan sovituksen syöttövektorit antoivat suuntakuvioon n. 180% ja huonoin syöttövektori n. 10% tehosta, joka suuntakuvioon saatiin tasasyötöllä. Suuntakuvioita tarkasteltiin tällöin kokoympyrällä (tasosuuntakuvio, 360:n asteen kulma-alue). Näitä voidaan verrata

edellisessä kohdassa mainittuihin takaisinheijastuneisiin tehoihin, jotka olivat edellämainituille syötöille 0,3% ja 112%, kun tasasyötöstä heijastui takaisin 25,8%.

Tasasyötöllä saatu suuntakuviot on esitetty kuvassa 14. Molemmissa ääritapauksissa (huonoin ja paras sovitus) suuntakuviot olivat sellaisia, että niitä ei sellaisenaan voi kuvitella käytettävän missään tarkoituksissa. Vaikka hyvä sovitus antoi tasasyöttöä paremman kokonaistehon, jäi sen amplitudi suuntakuviossa paikoitellen selvästi tasasyöttöisen alapuolelle. Keskellä parhaan sovituksen syöttökertoimilla saatua suuntakuviota oli epämääräinen melko loiva monttu, kun halutuissa suuntakuvioissa on keskellä yleensä suurten amplitudien alue, jonkinlainen piikki tai vähintään kohouma. Tästä päätellen ei parhaan sovituksen syöttökertoimien aikaansaama ryhmäsuuntakuviot ole käyttökelpoinen.

4.6.3 Keilan kääntäminen ja sokeat suunnat

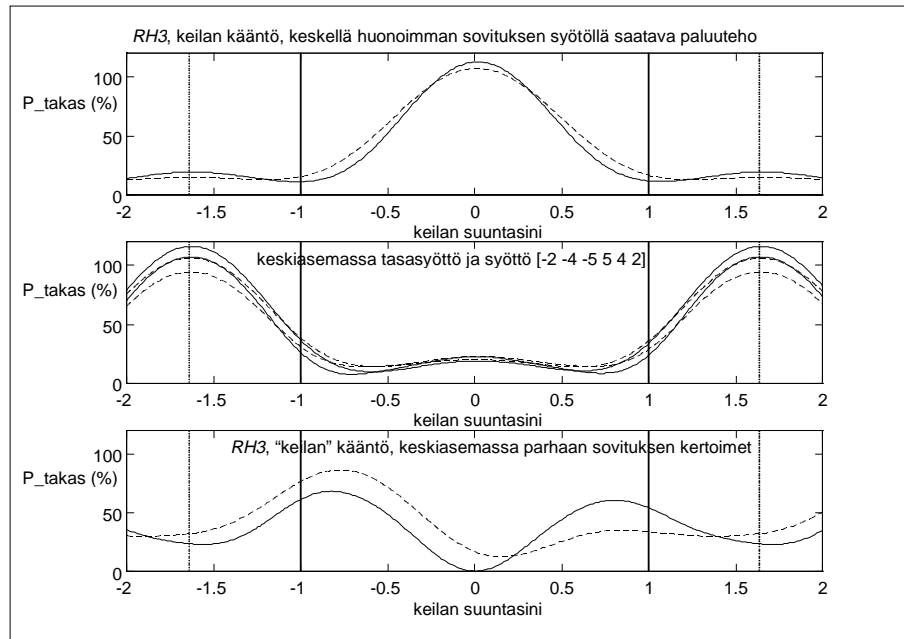
Antennin keilaa käännetään progressiivisten syöttöjen $e^{jnk d \sin \theta}$ avulla [4]. Parhaiten menetelmä toimii isotrooppisille suuntakuviolle. Jos elementtien suuntakuviot eivät ole isotrooppisia, mutta ovat identtisiä, muuttuu keilan amplitudi käännettäessä elementin suuntakuvion mukaisesti [5]. Kun elementit ovat erilaisia ja niiden välillä on keskinäiskytkentää, mutkistuu tilanne. Täydellinen epäsovitus ja sokeat suunnat ovat mahdollisia [18].

Laskennallinen keilankääntökoe toteutettiin ryhmäantennilla $RH3$ ($d=0,3\lambda$). jossa kytkentä oli suurin ja syöttökertoimien vaikutus sovitukseen oli edellisten kohtien mukaisesti tiedossa. Suuntakuviosta katsellen ei löytynyt sellaisia järkeviä suuntakuvioita, joita kääntämällä, ts. niiden kertoimia progressiivisesti muuttamalla, olisi havaittu keilan maksimiarvon äkillinen tipahtaminen suuntakulmilla, jotka ovat ryhmän etusuunnan, eli näkyvän alueen kulmia. Vastaavasti ei löytynyt sellaisia järkeviä kertoimia, joista lähtien olisi näkyvällä alueella päästy keilaa progressiivisella syötöllä kääntämällä huonoimman sovituksen tilanteeseen. Keilan käännessä kokeilla järkevilla syöttökertoimilla ei keilauskuvassa näkynyt ryppyisyyttä. Hyvin loivaa keinuntaa amplituditasossa oli silti nähtävissä. Vastaavaan tulokseen, että keskinäiskytkennästä ei ole haittaa todellisissa tilanteissa keilaa käännettäessä, on

päädytty lineaarisella mikroliuskaryhmällä aiemminkin [29]. Dramaattisemmin käyttäytyivät huonon ja hyvän sovituksen suuntakuviot käännettäessä. Koska niissä ei oltu havaittu varsinaista keilaa, tutkittiin suuntakuvion keskikohdan keskellä olevaa pistettä vastaavan arvon muuttumista tällaista “keilaa” eli suuntakuviota käännettäessä. Melko pienellä, n. 10:n asteen alueella, saattaa desibeliarvo muuttua jopa 20 dB tai ylikin.

Vastaavasti kuin suuntakuvioiden käyttäytymistä keilaa käännettäessä, voidaan tutkia takaisin heijastuneen energian riippuvuutta keilan käännöstä, eli progressiivisten syöttöjen arvoista. Kuvassa 26 on esitetty takaisin heijastuneen tehon riippuvuus keilan kääntökulmasta. Takaisin syöttöjohtoihin heijastunut teho on esitetty osuutena syötetystä kokonaistehosta. Keilankääntökokeessa kuvitellaan tiettyjen lähtökertoimien mukaiset suuntakuviot alussa rintamasuuntaisiksi keiloiksi, joita käännetään. Kuvissa on käytetty muuttujana muuttujaa $u = \sin(\theta)$, joka on tasavälinen syöttökerroinavaruudessa, mutta ei suunta-avaruudessa. Muuttujan θ arvoilla $+90$ ja -90 saa u arvot -1 ja 1 . Väliin jäävä alue vastaa suuntakuviossa näkyvää aluetta. Tämä alue on kuvissa rajattu paksummilla pystyviivoilla. Progressiivisilla syötöillä $e^{jkd\sin(\theta_{\text{kääntö}})}$ on u -avaruudessa 2π -jaksollisuus, joka on kuvissa rajattu himmeämmillä pystyviivoilla, joiden väliin jäävä alue muodostaa periodin. Kuvissa on esitetty takaisin heijastuneen energian riippuvuus suuntasinistä u , kun $u = \sin\theta_{\text{kääntö}}$. Keskellä kuvissa on lähtötilanne $\theta_{\text{kääntö}} = 0$. Parhaan sovituksen suuntakuvion progressiivinen kääntäminen on esitetty alimmassa kuvassa, huonoimman ylimmässä kuvassa. Keskimmaisessä kuvassa on esitetty progressiivisilla syötöillä tapahtuva keilan kääntäminen, kun lähtötilanteena keskiasemassa on käytetty syötökertoimina tasasyöttöä ja syöttöä kertoimilla $[2 \ 4 \ 5 \ 5 \ 4 \ 2]$. Niillä on suuntakuvioissa myös todellinen keila aiemmin tarkasteltujen tulosten mukaisesti (kuvat 14 ja 16). Tasasyöttö on esitetty ohuemmalla viivalla. Kuvissa olevat katkoviivat ovat vastaavia korjatuilla kertoimilla saaduilla suuntakuvioilla toteutettuja keilankääntökokeita. Kertoimien korjauksissa on kaikissa kuvan tapauksissa ollut tavoitesuuntakuviona isotrooppinen suuntakuvio. Nähdään, että korjaus keskiarvoistaa tässä ääriarvoja (voidaan melko helposti tosin päätellä että se siirtää ne vain muualle), mutta ei vaikuta

mitenkään dramaattisesti. Pääasiassa keilauskuvat ovat symmetrisiä, mikä johtuu sirontamatriisin ja lähtösyöttökerrointen symmetriasta.



Kuva 22 Takaisin heijastunut teho käytettäessä progressiivisesti muuttuvia syöttökertoimia antenniryhmässä $RH3$ ($d=0,3\lambda$). Vaakasuoralla asteikolla on esitetty progressiivisia kertoimia vastaavan kääntökulman sini. Ylimmän kuvan keskiasemassa ($\theta=0^\circ$) syöttökertoimina ovat huonoimman sovituksen syöttökertoimet ja alimmassa kuvassa parhaan sovituksen syöttökertoimet. Keskimmäisen kuvan keskiasemassa on ohuemmalla viivalla esitetty tasasyötön ja paksummalla viivalla syötön [2 4 5 5 4 2] paluuteho. Katkoviivalla on merkitty vastaavien korjattujen kertoimien tuloksia.

Huonon ja parhaan sovituksen tapauksessa sovitus muodostaa piikin tai montun kuviin. Näiden piikkien puoliarvoveveydet ovat n. 40 - 50 astetta katsottuna vastaavasta kuvasta kuin kuva 22, mutta suuntakulma-asteikolla varustettuna. Sovitus säilyy todellisten keilojen suuntakuvioilla (keskikuva) kohtuullisen hyvin näkyvällä alueella. Kun mennään näkymättömälle alueelle, saavutetaan huono sovitus, suunnilleen huonointa sovitusta vastaava taso. Tällainen huononeminen voidaan selittää sillä, että kun keila menee piiloon, täytyy energian siirtyä jonnekin, koska syöttöä pidetään vakiona. Mahdollisia paikkoja mihin energia voi siirtyä ovat takaisinheijastus, vastakkainen polarisaatio tai suuntakuvion muut ulottuvuudet kuin tasosuunta. Ensin mainittu vaihtoehto näyttää hallitsevan. Tällä tarkastelulla voidaan perustella sitä, että isotrooppisilla antennilla ei voida toteuttaa ryhmää, jossa ei ole keskinäiskytkentää ja antenniväli on alle $0,5\lambda$. Niiden synnyttämä suuntakuviohan on pyörähdysymmetrinen, jolloin keilan kadotessa näkyvän avaruuden ulkopuolelle ei jää vaihtoehdoksi kuin takaisinheijastus. Vastaavaa takaisinheijastuksen ja keilan

piiloutumisen välistä dramaattista yhteyttä ei ole ryhmissä, joissa elementtiväli on $0,5\lambda$, koska niissä pääkeilan piiloutuessa tulee esiin sen jaksollinen vastine u -avaruudessa. Suuremman elementtivälin ryhmillä keskinäiskytkennän aleneminen vähentää takaisinheijastuksia.

Parhaimman ja huonoimman sovituksen syöttökertoimet ovat seuraavat: parhaan sovituksen syöttökerroinvektori on $[0,476\angle 20,4^\circ; 0,349\angle 166,8^\circ; 0,491\angle -168,8^\circ; 0,361\angle -142,7^\circ; 0,414\angle -170,8^\circ; 0,329\angle 46,2^\circ]$ ja vastaava huonoimman sovituksen syöttökerroinvektori on $[0,263\angle -86,5^\circ; 0,422\angle 82,5^\circ; 0,548\angle -103,2^\circ; 0,519\angle -102,5^\circ; 0,372\angle 84,2^\circ; 0,212\angle -81,4^\circ]$. Antenniryhmän symmetrisoinnista johtuvan syöttövektorien antisymmerian takia tavallisen ryhmän kertoimia $[2\ 4\ 5\ 5\ 4\ 2]$ vastaavat ryhmässä $RH3$ kertoimet $[-2\ -4\ -5\ 5\ 4\ 2]$. Huonoimman sovituksen kertoimet ovat suhteellisilta itseisarvoiltaan hyvin lähellä kertoimien $[-2\ -4\ -5\ 5\ 4\ 2]$ vastaavia arvoja, joten huonoimman syöttövektorin saavuttamista kertomalla progressiivisesti jälkimmäisiä ei pidä ihmetellä. Viimeksi mainitut kertoimet saadaan edellisistä kertomalla ne progressiivisilla vaihetekijöillä $[-\ +\ -\ +\ -\ +]$. Hieman outoa on se, että hyvällä sovituksella ja huonolla sovituksella ei ole progressiivisten kertoimien kautta syntyvää yhteyttä.

Seuraava resepti hyvän keilan aikaansaamiseksi keskinäiskytkentäisessä ryhmässä näyttää toimivan: Symmetrisessä ryhmässä valitaan syöttökertoimet, jotka saadaan kääntämällä progressiivisilla kertoimilla huonoimman sovituksen tapausta 180° u -avaruudessa. Reseptin toimiessa erillistä korjausta ei tarvita. Loppupäätelmiksi sovitustarkastelusta voidaan tiivistää seuraavat seikat. Täydellinen epäsovitus lineaarisessa mikroliuskaryhmässä on mahdollinen. Keilaa ei kannata yrittää kääntämällä piilottaa ei-näkyvään avaruuden osaan, muuten on seurauksena kasvava epäsovitus tai säteily muualle kuin tason suuntakuvion määrittämiin suuntiin.

4.7 Elementtien itsenäinen osuus ryhmässä

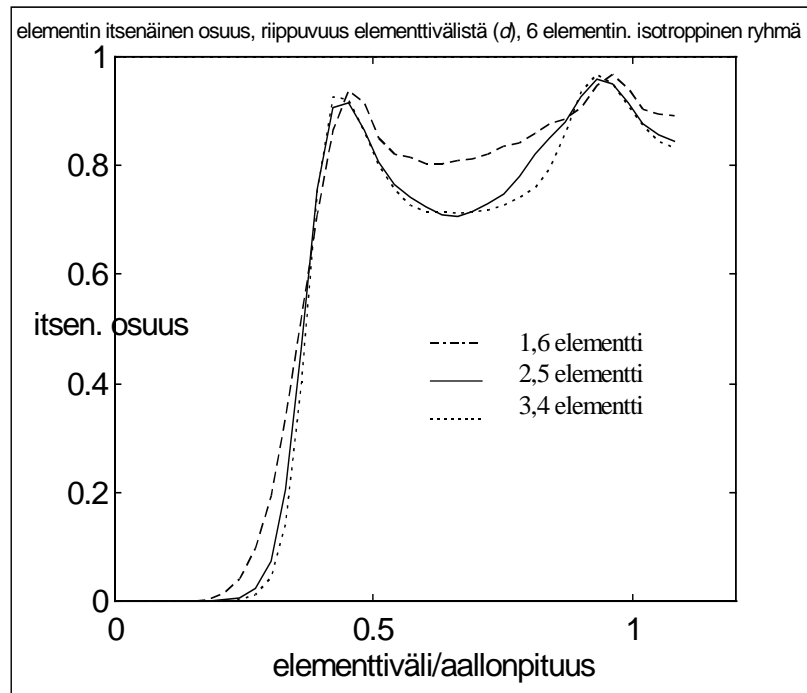
Vektoreita käsiteltäessä on hyvin tärkeää valita niille sopiva kanta. Tyypillisesti kanta on ortogonaalinen Suuntakuvioita käsitellään kuten vektoreita. Vektoreilla tärkeää on

lineaarinen riippuvuus. Suuntakuvioiden kohdalla lineaarinen riippuvuus ryhmän suuntakuvioiden välillä tarkoittaa sitä, että niillä ei hallita niin suurta osaa kaikkien mahdollisten suuntakuvioiden avaruutta, kuin elementtimäärä edellyttäisi ja toisaalta elementtien suuntakuviot voidaan synnyttää muilla ryhmän elementeillä.

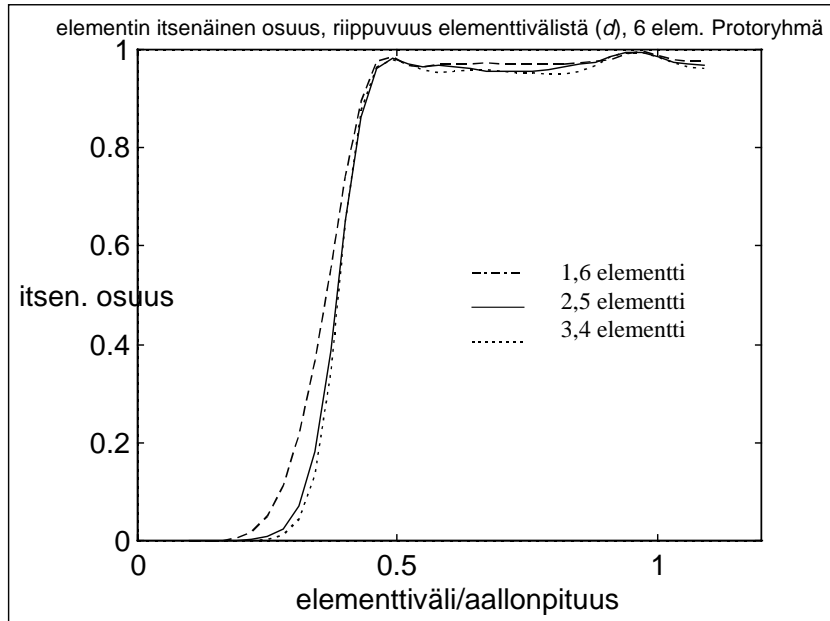
Ryhmäantennin elementtien tasoon rajoittuvat suuntakuviot eivät ole toisistaan riippumattomia, ortogonaalisia, vaikka niiden välillä ei olisikaan keskinäiskytkentää. Ei-kytkentäisten elementtien koko avaruuden suuntakuviot ovat ortogonaaliset ([13,12,31] ja Liite V). Elementtien suuntakuvioiden välistä lineaarista riippuvuutta on arvioitu korrelaation avulla sekä käyttämällä Gram-Schmidtin ortogonalisointiproseduuria. Korrelaatiomatriisin ristikorrelaatiotermit, i. e. diagonaali-alkiot kertovat korrelaation suuruudesta. Koko ryhmää koskevana parametrina on käytetty keskimääräistä ristikorrelaatiotermiä. Ortogonalisointiproseduuria käyttämällä saadaan aikaiseksi ortogonaalinen kanta. Viimeisenä etsittävä kantavektori saadaan hajoittamalla viimeinen suuntakuviovektori muiden avulla muodostettuun kantaan, vähentämällä tämä osuus pois vektorista ja normeeraamalla jäljelle jäänyt osa yksikön pituiseksi. Tämä viimeisen vektorin komponentti muiden kannalle on sen lineaarisesti riippuva osa ja jäljelle jäänyt osa itsenäinen osa. Mitä suurempi on itsenäisen osan pituus suhteessa vektorin pituuteen, sitä enemmän viimeksi lisätty antennielementti antaa mahdollisuuksia erilaisten ryhmäsuuntakuvioiden kehittämiseen. Jos itsenäinen osa on hyvin pieni, voidaan suuntakuvio säilyttää, vaikka antennielementti jää kokonaan pois kun sen poistaminen korvataan muuttamalla muiden antennien syöttökertoimia.

Ortogonalisointiproseduurilla saatuja viimeisen elementin itsenäisen osuuden arvoja on laskettu elementtivälin funktiona. Tulokset on esitetty alla olevissa kuvissa. Lineaarinen riippuvuus on näin arvioiden merkittävää, kun elementtiväli on alle puoli aallonpituutta. Mitattu tapaus elementtivälillä $d=0,3$ valittiin, koska haluttiin mahdollisimman suuri keskinäiskytkentä ja se oli pienin mahdollinen etäisyys, jolla resonaattoriliuskat vielä olivat toisistaan pari milliä irti. Näistä kuvaajista nähdään, että $0,3\lambda$:n antennietäisyyksien ryhmä on selvästi enemmän lineaarisesti riippuva kuin ryhmät yli puolen aallonpituuden elementtiväleillä. Kompensoinnin hyvä onnistuminen saattaa olla jossain määrin seurausta lineaarisen riippuvuuden

voimakkuudesta. Linearisesta riippuvuudesta on se hyöty, että tietty ryhmän suuntakuviota voidaan toteuttaa laajalla syöttökerroinjoukolla, eikä se ole välttämättä niin herkkä syöttökertoimien virheille tai vaihteluille kuin systeemi, jossa ei ole riippuvuutta. Haitta taas on se, että riippuvalla ryhmällä ei saada toteutettua niin suurta joukkoa suuntakuvioita kuin riippumattomalla.



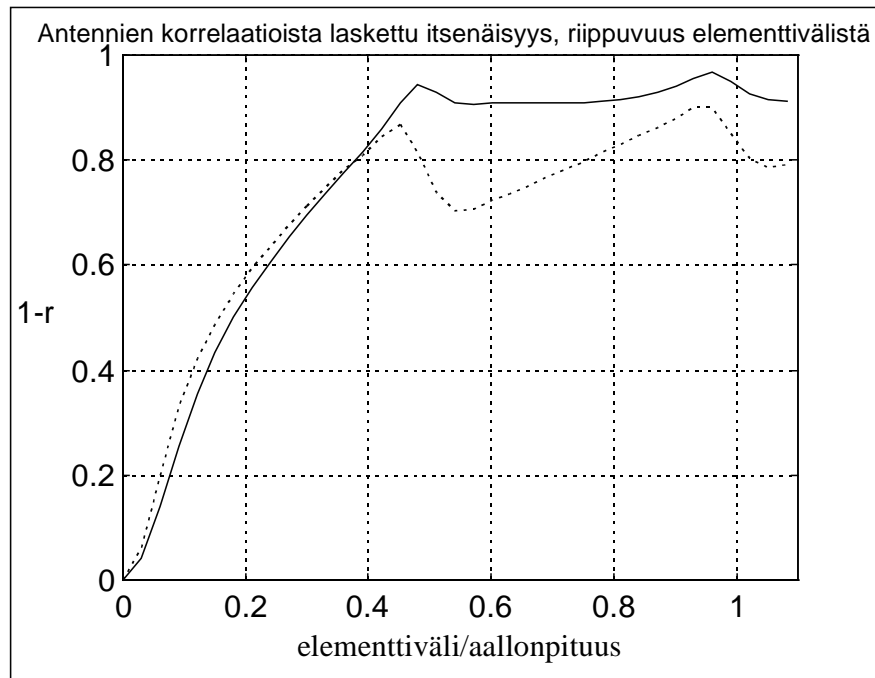
Kuva 23 Isotrooppisten antennien 6-elementtinen ryhmä. Kuvassa näkyvä elementin itsenäinen osuus on ryhmän elementin suuntakuviosta jäljelle jäävä suhteellinen osuus, kun elementin suuntakuviota on hajotettu Gram-Schmidt-ortogonalisointiproseduurilla viimeisenä vektorina muiden vektorien avulla luotuun kantaan. Kuvassa riippuvuus elementtivälistä aallonpituuksina.



Kuva 24 Protoantennilla laskennallisesti kehitetty 6-elementtinen ryhmä. Kuvassa näkyvä elementin itsenäinen osuus on ryhmän elementin suuntakuviosta jäljelle jäävä suhteellinen osuus, kun elementin suuntakuviota on hajotettu Gram-Schmidt-ortogonaalisointiproseduurilla viimeisenä vektorina muiden vektorien avulla luotuaan kantaan. Kuvassa riippuvuus elementtivälistä aallonpituuksina.

Mielenkiintoista on havaita, että lyhimmän elementtivälin tapauksessa yksi elementti keskellä on aina esitettävissä melkein täydellisesti muiden avulla. Kuvia 23 ja 24 vertailemalla havaitaan, että mikroliuska-antennin $Pr2$ suuntakuviolla kehitetyt ryhmän elementtien ryhmäsuuntakuviot eivät ole niin riippuvia, kuin isotrooppisella suuntakuviolla kehitetyt. Mielenkiintoinen sattuma on, että valitut ryhmien elementtivälit $0,48\lambda$ ja $0,93\lambda$ ovat optimaalisia, jos halutaan elementtien suuntakuvioiden riippumattomuutta. Jos kuvien riippuvuudet olisivat olleet tiedossa ennen suunnittelua, olisi hyvinkin valittu nämä arvot. Suurin elementtiväli toteutui jäljelle jääneen substraatin palan koon mukaan, kun vielä haluttiin jättää reunoille tilaa, jotta elementit olisivat jääneet kauas takalevystä reunadiffraktion pitämiseksi pienenä. Elementtietäisyys $0,5\lambda$ valittiin tyyppillisen alueen $0,5\lambda \dots 1,0\lambda$ alarajalta, jotta oltaisiin saatu mahdollisimman suuri keskinäiskytkentä. Yleisesti radiotekniikassa käytetty antenniväli on $n \cdot 0,7\lambda$.

Antennielementtien lineaarista riippuvuutta voidaan arvioida myös keskinäisillä korrelaatioilla. Elementtien korrelaatiomatriisin ristikorrelaatiotermien neliöllisiä keskiarvoja (rms-arvot) voidaan myös käyttää riippumattomuuden mittana. Vastaavat kuvat kuin edellä voidaan rakentaa tästäkin elementin itsenäisyyden mitasta.



Kuva 25 Antennielementtien tasosuuntakuvioiden itsenäisyyden riippuvuus elementtien välimatkasta kuuden antennin ryhmäantennissa. Itsenäisyys on laskettu vähentämällä ykkösestä suuntakuvioiden korrelaatiomatriisin ristikorrelaatiotermien rms-arvo. Pystyakselilla ristikorrelaatiotermi vähennettynä ykkösestä. Jatkuvalle viivalla on esitetty protoantennista kehitetyn teoreettisen ryhmän ja katkoviivalla vastaavan isotrooppisen ryhmän elementtien itsenäisyys keskimääräislausekkeesta $1-r$.

Ristikorrelaatio suurenee elementtivälin pienetessä. Ristikorrelaatiotermeillä voidaan arvioida keskinäiskytkentää. Tämä mahdollistaa keskinäiskytkennän arvioimisen suoraan suuntakuvioista, toki vain paremman tiedon puuttuessa. Ristikorrelaatiotermien suuruusluokka on ollut suunnilleen sama kuin keskinäiskytkennän. Tutkituissa tapauksissa ristikorrelaatiotermi käyttäytyvät kuitenkin mm. jonkin verran periodisesti eivätkä laske yhtä jyrkästi kuin mitattu keskinäiskytkentä.

Vastaavat antennielementtien itsenäiset osuudet ja korrelaatiot on määritetty myös pienimmän elementtivälin antennille *RH3*. Tulokset ovat alla taulukoituna. Teoreettisiin ryhmiin verrattuna todelliset ryhmät koostuvat selvästi itsenäisemmistä

antennielementeistä. Teoreettiset ryhmät ovat joko täysin laskennallisia tai yhdestä mitatusta elementistä generoituja. Tässä mielessä kompensoinnin hyvä lopputulos tuntuu ymmärrettävältä, koska lineaarisesti riippuvamman suuntakuviojoukon kehittäminen on helpompaa kuin itsenäisempien elementtien joukon.

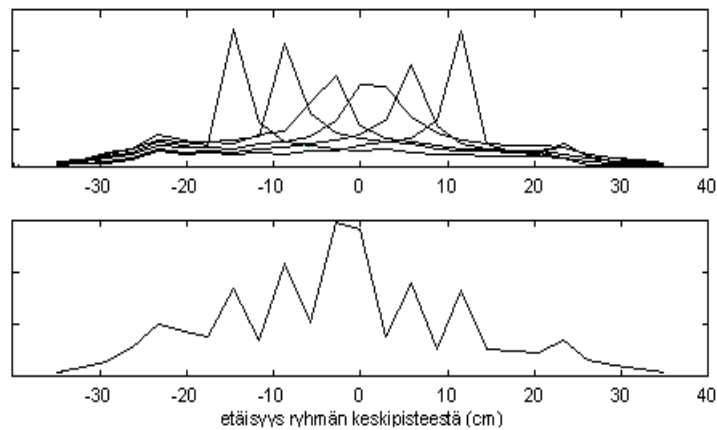
Taulukko 2 Antennien itsenäisyys ja korrelaatio muiden elementtien kanssa ryhmässä, kun elementtiväli on $d=0,3\lambda$. Mukana tarkastelussa on mitattuja ja laskennallisia ryhmiä. Antennielementin itsenäisyys lasketaan hajoittamalla sen suuntakuvioiden kantaan tai antennielementtien korrelaatioiden avulla. Katso tarkemmin tekstistä.

Antennielementtien itsenäisyys ja korrelaatiot ryhmissä elementtiväli 0,3 aallonpituutta									
ryhmä, mitattu ja/tai laskettu	elementtien itsenäinen, lineaarisesti riippumaton osuus (%)						korrelaatioiden keskiarvot (%)		
	elementti						kaikki korrelaatio- termit	risti- korrelaatio- termit r	1-r
	1	2	3	4	5	6			
mitattu ryhmä korjaamattomana	48,51	28,81	18,53	18,97	29,17	53,99	45,88	22,93	77,07
mitatun ryhmän 4. elementti	19,97	8,56	5,02	5,02	8,56	19,97	51,09	33,65	66,35
vaimennuslevyveitto, ryhmä	39,35	16,6	9,85	9,34	14,5	35,67	47,58	26,77	73,23
vaimennuslevyveitto, 4. elementti	21,95	7,57	4,42	4,42	7,57	21,95	48,3	28,28	71,72
protoantennilla rakennettu	19,74	6,14	3,7	3,7	6,14	19,74	49,05	29,78	70,22
isotrooppisilla rakennettu	21,29	8,62	5,23	5,23	8,62	21,29	48,27	28,22	71,78
teoreettinen, kaava (4.2)	21,14	7,36	4,46	4,46	7,76	21,14	47,78	27,2	72,8

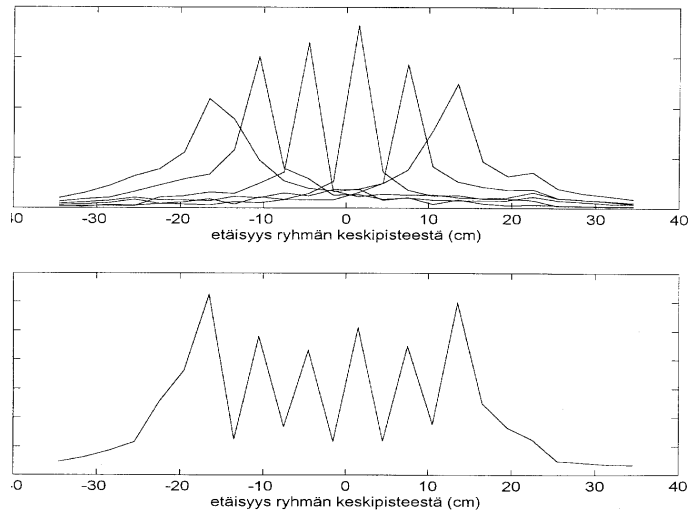
Jos halutaan tarkastella tason sijasta koko avaruutta, pienenee tässä esitettyjen määritelmien mukainen elementtien itsenäisyys, kun on kyse lineaarisesta ryhmästä, koska ryhmän yhdysjanan normaalisuuntaan antennielementit ovat samassa asemassa. Tällöin normaalisuunnan suuntakuviot ovat paikkatietoa myöten samat, eikä lineaarisen ryhmän poikittaissuuntakuviot poikkea elementin poikittaissuuntakuviosta. Kun tavoitellaan käyttökelpoisia avaruussuuntakuvioita, täytyy käyttää kaksiulotteisia ryhmiä. Antennielementtien suuntakuvioiden lineaarinen riippuvuus vaikuttaa siten, että suuressa ryhmässä on paremmat mahdollisuudet korvata vioittuneen elementin vaste muiden elementtien avulla. Tapaa on käytetty valituissa suuntakuvion suunnissa korvaamaan vioittuneen elementin säteilykuviot muiden elementtien säteilykuviolla muuttamalla syöttöjä [32].

4.8 Ekvivalentit virrat

Ekvivalentit virrat määritettiin virroiksi, jotka ovat substraatin tasossa ja synnyttäisivät vastaavat kentät, kuin on saatu suuntakuvio mittaamalla. Eri antennielementtien ekvivalenttien virtojen päällekkäisyydellä arvioitiin kaavan (2.23) mukaisesti keskinäiskytkentää. Määrittystapa on herkkä laskentaparametreille, ennenkaikkea virtojen määrittämissä valinnalle. Eri parametrivalinnoilla saadut sirontakertoimet poikkesivat pienimmillään muutaman desibelin syöttöporteista mitatuista. Enimmillään poikkeama oli kymmenkunta desibeliä..



Kuva 26 Ekvivalenttien virtojen määräytyminen ryhmän $RH4$ ($d=0,93\lambda$) suuntakuvioista. Ylemmässä kuvassa antennielementtien ekvivalenttien virtojen amplitudit. Ne on määritetty erikseen joka elementin säteilykuvioista tasasyötöllä. Alla tasasyötöllä saatu antennielementtien ekvivalenttien virtojen summavirta. Virrat ovat ryhmän akselille koottuja ja sen suuntaisia laskennallisia, ekvivalentteja virtoja.



Kuva 27 Ryhmä RH4. Vastaavat ekvivalenttien virtojen jakaumat ja niiden summavirta laskettuna samoista suuntakuvioista kuin kuvassa 18, mutta poikkeavilla laskentaparametreilla.

Kuvissa 26 ja 27 on esitetty ekvivalenttien virtojen määräytyminen. Kuvien tulokset on saatu eri laskentaparametreilla. Kuvat on valittu tarkoituksellisesti niin, että summavirtojen kuvissa antennielementit erottuvat selvästi toisistaan.

Ekvivalenttien virtojen laskeminen oli hyvin epästabiilia. Laskennan tulos riippui voimakkaasti laskentapistevälistä ja mukaan otettavan alueen pituudesta. Onnistuneessa laskennassa väli oli 0,52 ... 1 aallonpituutta. Tuloksista voidaan arvioida keskinäiskytkennän 1. sirontaparametrien ylärajaa siten, että valitaan laskentaparametreja vaihtelemalla saatujen sirontaparametrien joukosta sellainen, missä kytkentä on pienintä. Tämä perustuu siihen, että tässä on virrat ajateltu mitatun suuntakuviainformaation rajoituksessa tasoon vain samalle suoralle ja vielä samansuuntaisiksi. Tämä lisää virtojen päällekkäisyyttä ja aiheuttaa sen, että arvio antaa päällekkäisyyden 1. kytkennän ylärajan (kaava (2.23)). Näin valittu matriisi vastaa sirontakertoimien pienintä ylärajaa ja sopii vain karkeaksi arvioksi. Näin saatua sirontamatriisia on verrattu muilla tavoin saatuihin kohdassa 4.5.3. Varsin hyvin erottuvat elementit toisistaan virtojen kuvissa 26 ja 27. Lisäksi nähdään, että menetelmä havaitsee substraatin reunat n. 22 cm etäisyydellä ryhmän keskeltä. Tämän ulkopuolella ei virtoja näy. Substraatin pohja on metalloitu, eikä todellisia virtoja tämän tason ulkopuolella voikaan olla. Lisäksi substraatin reunoille näyttää kertyvän virtaa. Tällainen virta vastaa reunavirtoja ja päätydiffraktion synnyttämiä ekvivalenteja säteilijöitä. Puolen aallon mikroluiskaresonaattoria on verrattu kahden

raon säteilijään [15]. Tähän ei näillä tuloksilla voida täysin yhtyä. Päätyrakojen sähkökenttien lisäksi voisi hyvinkin resonaattorilevyn pinnalla olla merkittäviä virtoja. Tarkemmilla mittauksilla ja kaavoilla laskettu tulos [17] voi olla tulkittavissa tässä viitteellisesti näkyväksi keskeltä kohonneeksi jakaumaksi. Käytetyissä kaavoissa ja laskennassa on kehitettävää. Voi olla, että epästabiilius johtuu myös mainitusta laskentaan liittyvästä projektioluonteesta ja poistuu vasta suuntakuvioita täydentämällä. Selvän tuntuinen puute on pystysuorien ekvivalenttien virtojen puuttuminen laskennasta. Koska pystysuoriin virtoihin tulee kulmatekijäksi sini, ovat ne ortogonaalisia vaakatason, eli substraatin tason virtojen kanssa, eivätkä tästä syystä ilmeisestikään vaikuta laskennan stabiilisuuteen, vaan ainoastaan tarkkuuteen. Vaakatason virrat on valittu, koska rakenne on haluttu nähdä planaarisena ja oletettu resonaattorista purkautuvien pystykenttien muuttuvan nopeasti vaakasuuntaisiksi tultaessa ryhmän yläpuolelle asetettuun tasoon. Ryhmään myös säteilee parhaiten etusuuntaan, joka vastaa tasossa olevia virtoja. Seuraava suositeltava askel kohti tarkempaa laskentaa olisi virtoja vastaavan suuntakuvion tarkastelu ja vertaaminen alkuperäiseen. Koska saavutettu laskennan taso on ollut vaatimaton, voidaan ekvivalenttien virtojen tässä esitettyä määrittystapaa käyttää rajoittaen se esimerkiksi antennin toimivuuden tarkastamiseen. Jonkin antennin virran puuttuminen kokonaisvirrasta kertoo kyseisen antennin syötön olevan viallisen.

4.9 Suuren takalevyn käyttö

4.9.1 Takalevyn käytön merkitys

Kun esimitoituksia ryhmällä *ESII* tehtiin, tulivat takalevyongelmat esiin. Mittauksissa havaittiin elementtien erilaisuus. Laitimmaisten antennien suuntakuviot olivat keskenään symmetrisellä tavalla vinoja. Ensi päätelmä oli, että syynä oli keskinäiskytkeä. Toinen arvio oli, että kyse on ennen kaikkea absorbaattorien läheisyydestä. Kun asian tarkistamiseksi absorbaattorit otettiin pois, havaittiin reunaelementtien suuntakuvioiden vinouden kasvu. Tästä jäi näkemys, että syynä oli reunadiffraktio takalevyn reunalta. Siksi suunniteltiin suurempaa takalevyä. Sopiva koko arvioitiin niin suureksi, n. 5 aallonpituutta, että se päätettiin olla toteuttamatta

alemmalla taajuudella, 2,16 GHz. Päätettiin nostaa mittaustaajuutta 5,3 GHz:iin, jolloin takalevyn vaadittava koko pieneni käänteisesti.

Käytännössä suurta takalevyä ei käytetä, koska se tekee antenniryhmästä hankalan käsitellä. Vain, jos on erityinen syy alentaa taakesäteilyä, sitä käytetään. Näin on usein mittaustilanteissa. Yksi tärkeä syy takalevyn käyttöön on mittaускаapeleiden vaikutuksen eliminoiminen. Takalevyn avulla niiden aiheuttamaa häiriötä vähennetään. Häiriö voi olla sekin, että kaapeleiden paikat vaihtelevet mittauksittain. Voi olla melko työlästä pitää kaapelit aina samassa asennossa. Tässä työssä käytettiin jäykkää kaapelia, joka lähti melko kohtisuoraan liittimestä ja oli lähes puoli metriä kaarelle taivutettuna telineen juureen päin, jottei vaiheeseen vaikuttavia mutkia olisi syntynyt kaapeliin (kuva 4).

Takalevy ja sitä kannattava teline valmistuivat työn loppuvaiheessa. Takalevyllä tehty tarkistusmittaus osoitti, että suuri takalevy vähentää huomattavasti elementtien suuntakuvioiden erilaisuutta. Epäsymmetriaa on näin aiheutunut antennien asemasta takalevyyn nähden. Kuitenkin takalevy aiheuttaa suuntakuvioissa reunadiffraktion vaikutuksen voimistumisen. Suuntakuvion diffraktioaaltoilusta tulee silmin havaittava. Ryhmässä *RH4* on selvästi suurempi substraattilevy kuin muissa ryhmissä. Sen suuntakuvioissa oli havaittavissa pientä muhkuraisuutta, fraktaalisuutta, josta syystä epäiltiin juotoksia, koska se oli itse juotettu. Silti antennit vaikuttivat mitattuina hyvin stabiileilta. Vastaava epätasaisuus lisääntyy suuren takalevyn tapauksessa, siten, että vaihtelu nopeutuu suuntakulman funktiona. Amplitudi tosin pienenee. Syynä on reunadiffraktiosta aiheutuvan suuntakuvion lisätekijän vaihetermin nopeutuvat muutokset [6]. Diffraktiotekijä vastaa osittain takalevyn reunaan sijoitettua toissijaista säteilijää. Koska toissijaista säteilijää ei ole syytä sallia, se voidaan yrittää eliminoida peittämällä reuna absorptiomateriaalilla tai reunan rakennetta muuttamalla.

Takalevyä käytettäessä suuntakuvioiden sisäistä epäsymmetriaa jää jäljelle ja epäsymmetrisen suuntakuvion lisän maksimin suunta vaihtelee ryhmässä, mistä voidaan arvioida sen johtuvan eri etäisyyksistä takalevyn reunoista. Summattu ryhmän suuntakuvio on kaukana tavoitteesta. Saadun tuloksen perusteella voidaan sanoa, että suuren takalevyn käyttö on perusteltua vain, jos halutaan eliminoida syöttökaapelien

liittämisestä aiheutuva vaihtelu tai muu vastaava takapuolelta tuleva merkittävä häiriö. Näinkin suuri, mitoiltaan yli 12λ , takalevy osoittautui mittaustarkkuudella riittämättömäksi. Takalevyn vaikutusta häiriötasoon on tutkittu tarkemmin viitteessä [23]. Siinä on tutkittu takalevyn vaikutusta pyöreiden mikroliuska-antennien säteilyyn. Tapaus lienee elementtien sijoittelun suhteen yksikäsitteisempi kuin tässä tutkitun ryhmän tapaus.

Takalevy jäykisti ryhmän ja poisti sirontamatriisimittauksen häiriöitä. Sirontamatriisiin alkioden mittauserpävarmuudeksi tuli parempi kuin 0,05 dB, joka on huomattava parannus esimerkiksi liitteessä I oleviin mittaustuloksiin. Syynä voi olla myös, että käytettiin eri mittalaitetta. Kuvista 10 ja 12 nähdään, että myös pienen elementtivälin ryhmien suuntakuvioiden on keinunaa. Kuvassa 12 olevien erillisantennien suuntakuvioiden amplitudivaihtelu on niin pientä, että voimme päätellä pienillä elementtiväleillä takalevyn reunojen vaikutuksen diffraktiokuvioon antennien keskinäisvaikutusta pienemmäksi. Kun erityisen suurta takalevyä ei voida valita, voidaan takalevyn koon valintaan suosittaa keskinäiskytkentäisessä ryhmässä seuraavaa kriteeriä: takalevy valitaan vain niin isoksi, että takasäteily jää halutun alhaiselle tasolle. Toteutetaan suunnitellut ryhmän syöttökertoimet ja korjataan ne lineaarisella pienimmän neliösumman menetelmällä. Koska elementtien suuntakuviot muuttuvat, kun takalevy asetetaan, täytyy korjattavina suuntakuvioiden käyttäminen takalevyä käyttämällä saatuja suuntakuvioiden. Se, että takalevyn koko rajoitetaan minimiin, johtuu siitä, että suurempi takalevy aiheuttaa nopeampaa vaihtelua suuntakuvioiden ja vaikeuttaa korjausta. Levyn koon mukana vaihtelun amplitudi taas vähenee, jolloin sovitukset tarpeeksi suurella takalevyllä oletettavasti taas paranevat. Ryhmäsuuntakuviot, jotka saatiin 12λ :n suuruisella takalevyllä olivat visuaalisesti arvioituna huonoja ja korjauskelvottomia.

4.9.2 Takalevyn ongelma kompensointimenetelmässä

Kompensointimenetelmä vaatii toimiakseen mallisuuntakuviot. Monen ryhmän antennille voidaan, kun antennit ovat irroitettavissa, mitata jokaiselle erikseen suuntakuvio. Tarpeeksi suurta takalevyä antenniryhmän takana käytetään vähentämään

taaksepäin suuntautuvan säteilyn tasoa. Mikroliuska-antennit toteutetaan aina takalevyille. Mikroliuska-antenneja ei voida irroittaa. Voidaan kuitenkin aina leikata antenni ja osa takalevyä pois. Tämän vaikutusta jäljelle jääviin elementteihin on vaikea arvioida. Tavoitesuuntakuvioiden toteuttamiseksi on tässä työssä mm. valmistettu vertailuantenneja, joissa on ollut vain yksi tai kaksi elementtiä saman kokoisella takalevyllä l. substraatin palalla kuin koko ryhmä. Takalevyn asemaa mittauksissa ja toimintatavan valinnassa voidaan arvioida seuraavilla keskenään ristiriitaisilla näkemyksillä.

- takalevy on osa keskinäiskytkentää
- takalevy on osa antenniryhmää
- takalevy on osa radiotietä
- takalevy on yhteinen antennille ja siten jakamaton
- takalevy voidaan jakaa antennien kesken

Nämä ristiriitaiset lähtökohdat ovat seurausta siitä, että ei ole määritelty, mikä osa toteutetusta rakennelmasta kuuluu anteeniin ja mikä ei. Antennien leikkaaminen takalevyjä myöten toisistaan irti mahdollistaa niiden mittaamisen erillisinä, jolloin saadaan varmasti oikea tapa määrittää elementeille keskinäiskytkennätön suuntakuvio. Tätä tapaa ei käytetty, koska mikroliuska-antenneja käytetään tyypillisesti yhtenäisellä takalevyllä. Vaikeissa tapauksissa saattaa olla mielekäästä toteuttaa tällainen irtileikattujen elementtien ryhmä. Jotta kyseisen ryhmän toiminta olisi kohtuullisen yksikäsitteistä, tulisi elementtien takalevyjen välille jättää sopiva rako, jonka suuruus olisi mittauksissa stabiili. Levyjen yhdistäminen tuntuu väärältä tavalta, koska kontaktien laatua on aina hankala pitää vakiona. Vastaava ongelma kuin mikroliuska-antenneilla syntyy muillakin sellaisilla antenneilla, joissa takalevy on kiinteä osa antennia. Tällainen on esimerkiksi neljännesaallon mittainen monopoli johtavan tason päällä. Jos tasoa pienennetään riittävästi, ei antenni juurikaan säteile suunnitellulla taajuudella.

4.10 Yhteenvedo mittaustuloksista

Kompensointitulokset lineaarisella pienimmän neliösumman menetelmällä ovat olleet parhaimmillaan varsin hyviä. Mikroliuska-antennilla saadaan useilla eri tavoilla aikaiseksi hyviä tavoitesuuntakuvioita. Tavoitesuuntakuviot voi olla teoreettinen (esimerkiksi isotrooppinen tai mikroliuska-antennille kaavalla (4.2) kehitetty), erillisen antennielementin mittauksesta kehitetty tai peittelykokeella aikaansaatu. Kaikissa tapauksissa on käytetty kohdan 2.4 tapaa laskea kompensoidut syöttökertoimet pseudoinvarianssin avulla.

Tavoitesuuntakuvioiden kehittäminen eliminoimalla naapurielementit on toimiva tapa, jos eliminoinnilla saadaan aikaiseksi symmetriset tavoitesuuntakuviot. Kuvan 3 mukainen tapa hankkia tietoa keskinäiskytkenästä valmistamalla tiettyä ryhmää vastaavia erilliselementtejä ei ole kompensoinnin kannalta mielekäs, koska siinä ei symmetrisoida suuntakuvioita. Mahdollisuus suorittaa keskinäiskytkenän vaikutusten tarkka arviointi erilliselementeillä on myös kyseenalainen, koska valmistustapa ei tuottanut riittävää toistettavuutta. Syynä lienee ilmeisesti juotosten ja muiden valmistusprosessiin liittyvien seikkojen vaihtelevuus, joilla on vaikutus sovituksiin, resonanssitaajuuksiin ja aaltomuotoihin. Kompensointitavoitteen suuntakuvioiden symmetrisyyden vaatimus on lähes poikkeuksetta suunniteltujen suuntakuvioiden ominaisuus. Peittelymenetelmässä tämä vaatimus tarkoittaa sitä, että myös substraatin reunat on peitettävä. Käytettäessä peittämismenetelmää tavoitesuuntakuvioiden kehittämiseen on keskeistä suuntakuvioiden tekeminen paikkatietoa lukuunottamatta identtisiksi, mikä mikroliuska-antennin tapauksessa merkitsee nimenomaan suuntakuvioiden symmetrisointia, eikä suinkaan keskinäiskytkenän vähentäminen tai poistaminen, joka tapahtuu suoraviivaisesti eliminoimalla viereiset antennielementit resonaattoreina. Peittämistekniikan etu on se, että ryhmän paikkatietoja ja elementtien etäisyystietoja ei tarvitse mitata ja sijoittaa laskentamalliin, koska ne ovat aina mukana mittauksissa, mikä vähentää virhemahdollisuuksia. Alumiinifolion käyttöä peittelyyn ei voi suositella, koska yhtään onnistunutta sarjaa ei sitä käyttäen tullut. Silti yksittäiset suuntakuviot kertoivat sen, että mahdollisuus onnistumiseen on. Mahdollinen suositeltava tapa käyttää johdelevyä peittämisessä on käyttää ryhmän elementtien edessä jäykkää levyä, jonka takapuolella on eristekerros. Levyssä olisi oltava elementin kokoinen reikä ja levyn olisi kaikkien ryhmän elementtien kohdalle asetettuna ulotuttava substraatin reunojen yli.

Ekvivalentit virrat on määritelty antennielementtien tasosuuntakuviosta. Virtojen jakauma vaikuttaa järkevältä ja antaa samalla mahdollisuuden arvioida keskinäiskytkentää. Parametrien valinta niin, että kytkentä minimoituu on varsin hankala tapa. Laskennan tarkkuuden parantamisessa ja stabiilisuudessa on parantamista. Ekvivalenttien virtojen laskeminen kertoo toimiiko jokainen elementti, ja mikä elementti on viallinen, mutta antaa suoraan sovelletuna todennäköisesti kaikkein huonoimman sirontamatriisin. Syynä on käytetyn laskennan epästabiilius, yksiulotteisuus ja riittämätön laskentapisteiden määrä.

Mittauksilla ja laskennalla on osoitettu, että sirontamatriisi voidaan määrittää useammalla tavalla ja kaikilla tavoilla saadaan vierekkäisten elementtien sirontaparametreista kohtuullinen arvio. Suora mittaus syöttöporteista on suositeltavin tapa. Laskien sirontamatriisit suuntakuviosta käyttäen laskennassa suuntakuvioita, jotka on saatu mittaamalla kukin elementti niin, että muut on päätetty vuoroin sovitettusti ja ja vuoroin oikosululla, saadaan sirontamatriisi määritettyä. Ensimmäisen kertaluvun laskenta tuotti hyvän tuloksen vain, kun elementtimäärä ja elementtien välinen etäisyys oli riittävän pieni. Määrittämisen käytön laajentaminen ryhmiin, joissa on yli 4 elementtiä ja vierekkäisten elementtien kytkentä yli -30 dB vaatisi toisen kertaluvun laskennan kehittämisen, jos halutaan sirontaparametrien määrittämistä paremmalla kuin 10% :n eli $n. 1$ dB:n tarkkuudella. Sovitetut päätteet antaisivat oikosulkujen kanssa käytettynä luultavasti parempia tuloksia.

Ekvivalenttien virtojen avulla tapahtuva sirontamatriisin määrittäminen on hyvin epätarkka tapa johtuen laskentaparametrien valintojen vaikutuksesta. Sen etuna näyttää olevan se, että sen realistisuus ei vähene dramaattisesti, kun tarkastellaan kytkentää siten, että otetaan tarkasteluun ryhmän kauempana toisistaan olevia elementtejä. Elementtien suuntakuvioiden välisten korrelaatiomatriisien sirontamatriiseina käytön tapauksessa tilanne huononee selvästi, kun poiketaan diagonaalilta. Korrelaatiomatriiseista saadut sirontamatriisit poikkeavat silti vain vähän diagonaalin viereisillä termeillä. Kompensaatiomatriisit eivät vaikuta sopiviksi sirontamatriiseiksi. Niiden ongelmana on epäsymmetria, ja se, että sirontamatriisista poiketen sirontaparametrien arvot eivät aina laske elementtietaisyyden funktiona.

Pseudoinvarianssimenetelmällä saadut korjausmatriisit eivät ole olleet riittävän resiprokkisia, symmetrisiä. Tämä on aiheuttanut huolta mittaustarkkuudesta ja antenniryhmien symmetrisoinnin epäonnistumisesta. Tämä vaikeuttaa pienen apertuurin mallin toimivuuden arvioimista.

Pienen apertuurin mallin mukainen keskinäiskyntäisen ryhmän syöttökertoimien korjaaminen sirontaparametrilla saatavalla kytkentämatriisilla tuotti ilman iterointia hyvin vähän parannusta suuntakuvioiden. Mikroliuska-antennien tapauksessa turvaututtiin tulosten parantamiseksi sirontaparametrien muuntelemiseen iteroimalla, muuttamalla mitatun sirontamatriisin vertailupistettä ja kalibrointeja käyttäen vaiheviiveitä. Tuloksena oli johtopäätös, että pienen apertuurin malli tuottaa parannusta, mutta aivan riittämättömästi.

Antennielementtien voimakas lineaarinen riippuvuus pienillä elementtiväleillä ($d \leq 0,3\lambda$) vaikuttaa siten, että ryhmän elementti voidaan korvata muilla elementeillä, niitä sopivasti painottaen ja vaiheistaen. Tästä seuraa, että sopivien syöttökerrointen joukko laajenee. Samalla vaikeutuu mahdollisuus arvioida pienen apertuurin mallin toimivuutta vertaamalla sirontamatriisia ja korjausmatriisia keskenään, koska korjausmatriisi ei ole yksikäsitteinen. Oikosulkujen käyttö suuntakuviomittauksissa keskeneräisellä kuuden elementin ryhmällä *RH2* (3 elementin ryhmä, jossa on 3 liittämätöntä resonaattoria), jolla määritettiin sirontaparametrit, antoi myös varmuutta, että syynä huonoihin tuloksiin ei ole suuntakuviomittausten epätarkkuus. Substraatin reunojen vaikutus on sellainen, että pienen apertuurin kompensointitavalla ei ole edellytyksiä siitä aiheutuvien vääristymien kompensointiin. Itse pienen apertuurin kytkentämallia ei näillä tuloksilla voi itse kytkennän osalta hylätä, mutta sen käyttöä kompensointiin ei voida suositella.

Suuren takalevyn käyttöä ei voida suositella, jos halutaan antenniryhmä, jossa keskinäiskyntä jää ainoaksi epäideaalisuudeksi, joka kertoimia korjaamalla kompensoidaan. Jos kuitenkin lisätään takalevyn reunat peittävät absorbaattorit, tai tehdään reunat muulla tavoin, esimerkiksi taaksepäin taittamalla, sellaisiksi, ettei niistä aiheudu voimakasta diffraktiota, voidaan suurta takalevyä käyttää.

5. Mittaus- ja laskentatulosten valikoiva arviointi

5.1 *Kompensoinnin onnistumisen tarkastelu*

5.1.1 Lineaarisen korjauksen toimivuus

Lineaarinen korjaus onnistui lähes sataprosenttisesti korrelaatioilla arvioiden. Tätä ei työtä aloitettaessa osattu odottaa. Tulokset olivat alusta asti hyviä ja lopussa vieläkin paranivat laskennan tarkentuessa. Kun suuntakuvioiden korjaus on laskettu koko tason alueella 360 asteen kulmassa käyttämällä tavoitesuuntakuvioita, jotka ovat isotrooppisia on saatu etusuunnassa hyviä korjaustuloksia, vaikka korrelaatio jää takasuunnan epäsovituksen takia alhaiseksi. Vaikuttaa siltä, että lineaarinen kompensointi antaa helposti hyviä ja käyttökelpoisia tuloksia. Koska mahdollinen hyvien tavoitesuuntakuvioiden joukko ei näytä rajoitetulta, voidaan olettaa, että tulokset ovat parannettavissa. Käytännön tilanteessa tavoitesuuntakuvio on annettu, jos se on ollut suunnittelun lähtökohta. Kuitenkin erilaiset elementtien tavoitesuuntakuviot voivat antaa saman ryhmäsuuntakuvion, jos tarkastellaan vain amplitudeja. Kokonaisuutena lineaarinen korjaaminen näyttää toimivan hyvin eikä ole erityisen hankala toteuttaa.

5.1.2 Korrelaatioiden suuruudesta

Korrelaatiot on helppo laskea. Niiden arvojen suuruuden merkityksen tulkinta on kuitenkin melko mahdotonta. Vertailemalla eri tavoin toteutettuja kompensointeja, voidaan todeta, että usein kompensointi onnistuu erittäin hyvin, lähes sataprosenttisesti, korrelaatioiden mielessä, mutta suuntakuvioista tarkasteltuna tilanne ei välttämättä ole niin valoisa. Kyse on siitä, että visuaalisessa tarkastelussa minimien syvyys kriteerinä korostuu, mutta vaikuttaa vähäisesti korrelaatioon. Päinvastoin voi käydä, esimerkiksi niin, että korrelaatiot ovat alhaiset, mutta visuaalisesti katsottuna kompensointitulokset on erinomaiset. Suuntakuvioita tarkastellaan visuaalisesti absoluuttiarvoina, useimmiten desibeliasteikolla. Tällöin vaiheiden huono

sovitus ei näy kuvassa mutta painaa korrelaation alas. Huono vaihesovitus voi olla seurausta vaikkapa siitä, että tavoiteltujen erillissuuntakuvioiden vaiheet poikkeavat niin, että toisessa tapauksessa vaihe on nouseva/laskeva ja toisessa vakio. Erityisesti näin voi käydä, kun käytetään teoreettisia suuntakuvioita kompensointiin.

Koska useimmiten ryhmäsuuntakuvioita tarkasteltaessa ei olla kiinnostuneita antennin takasuunnasta, se jätetään huomiotta sovituksessa. Käytännössä tietoliikenteen antennia käytetään useimmiten niin, että vaakatason kaikki suunnat ovat merkittäviä. Takasuunta on yhtä tärkeä kuin etusuunta. Usein tavoite on amplituditason pitäminen takasuunnassa alhaalla. Antennin takakeila saadaan käytännössä eliminoitua käyttämällä suurta takalevyä. Näin ei useinkaan tilan puutteen vuoksi voida tehdä. Jos tavoitteena pidetään isotrooppisesta suuntakuvioista kehitettyä ryhmäsuuntakuvioita, syntyy tavoitesuuntakuviossa antennin takasuuntaan sama suuntakuvio kuin etupuolelle. Sitä taas ei usein tarvita eikä haluta. Käytännössä on melko samantekevää, suoritetaanko laskenta käyttäen vain etupuolten suuntakuvioita vai koko ympyrän suuntakuvioita. Sovitus etusuunnassa on ollut hyvä molemmissa tapauksissa ja takakeila on jäänyt matalalle tasolle johtuen siitä, että pienikin takalevy laskee takasuunnassa säteilytasoa, eikä sovitus vääristy yrityksistä saada se nousemaan isotrooppisen antennin tasolle, koska tehtävä on mahdoton.

5.1.3 Korrelaation ilmaisemisen vaihtoehdot

Kompensoinnin tuloksena saatujen korjattujen suuntakuvioiden ja tavoitesuuntakuvioiden välinen korrelaatio on ollut lähellä sataa prosenttia. Vaikuttaa siltä, että radiotekniikan vaatimat korrelaatiot olisivat usein yli 99%, jos ei suvaita minimien siirtymiä eikä umpeutumista. Korrelaation ilmaisemisen asteikoksi voitaisiin valita joku havainnollisempi asteikko. Yksinkertaisimmillaan voidaan erottuvuuden parantamiseksi muuttaa asteikkoa vaikkapa kokonaisluvuiksi 1 ... 10000. Ongelma on kuitenkin arvojen kasautuminen asteikon yläpäähän. Jos käytetään asteikkoa välillä 0 ... 1, voidaan kasautumista yläpäähän ehkäistä ottamalla lukuarvosta toinen tai jokin korkeampi potenssi. Vaihtoehdoisen asteikon ylärajaksi voidaan myös asettaa ykkösen sijaan ääretön. Tällöin vaihtoehtoinen v tapa ilmaista korrelaatio voisi olla korrelaation k avulla lausuttuna vaikkapa

$$v = \frac{k}{1-k}. \quad (5.1)$$

Tämä vaihtoehtoinen korrelaation ilmaisutapa erottaa hyvin lähellä ykköstä olevat arvot. Esimerkiksi, kun korrelaatio on 98% tai 99% tulee vastaaviksi arvoiksi 4,9 ja 99, jotka poikkeavat toisistaan huomattavasti. Näistä voidaan ottaa vielä desibeliarvot, jolloin saadaan radiotekniikassa yleinen tapa käyttää desibeliarvoja, vaikka ne eivät lisäisikään havainnollisuutta.

Käytetyn korrelaation geometrinen tulkinta on se, että se on vektorin suuntaisen yksikkövektorin projektiio toisen vektorin suuntaiselle yksikkövektorille, kun projektiosta otetaan itseisarvo. Yhdensuuntaisen komponentin lisäksi myös toista vektoria vastaan kohtisuora komponentti voidaan myös määrätä. Näiden pituuksille pätee Pythagoraan lause, jolloin neliöiden summa on yksi. Toisen komponentin voimme nimetä antikorrelaatioksi ja se voi olla havainnollinen tapa erottaa lähellä yhtä olevat lukuarvot toisistaan. Tällainen antikorrelaatio saadaan laskettua kaavasta

$$(\text{korrelaatio})^2 + (\text{antikorrelaatio})^2 = 1. \quad (5.2)$$

Vastaavat asteikon muutosmahdollisuudet kuin korrelaatiolle ovat tietysti olemassa antikorrelaatiolle.

5.2 Kompensointimenetelmän kehittäminen ja yleinen soveltaminen

5.2.1 Lineaariseen kompensointiin liitettävät kriteerit

Ainoana suuntakuvioiden korjaustapana on käytetty kompleksisten suuntakuvioiden 1. säteilysuuntakuvioiden lineaarista kompensointia. Tämä on sopusoinnussa kenttien superpositioperiaatteen kanssa. Periaatteessa voitaisiin käyttää myös epälineaarisia korjaustapoja. Toteutus voi olla piiritekkinen. Se voi olla aina myös puhtaasti laskennallinen. Älykkäissä antennissa sovelletaan suuntakuvioihin digitaalista laskentaa. Lineaarinen kompensointi antaa korjatut syöttökertoimet, kun tavoitteelliset kertoimet on asetettu.

Kompensaation hyvyttä on arvioitu korrelaatioiden avulla ja tarkastelemalla suuntakuvioita desibeliasteikolla. Joissain tapauksissa korrelaatio suuntakuvioiden välillä saattaa olla lähes sata prosenttia. Kuitenkin suuntakuvioita tarkastelemalla

voidaan havaita eroja. Tyypillinen ero on minimien syvyydessä. Lineaarinen kompensointi pseudoinvarianssia käyttäen on pienimmän neliösumman menetelmä. Minimiarvojen sovittaminen on tästä syystä suhteellisessa mielessä kaikkein epätarkinta, koska menetelmässä vaikuttavat absoluuttiset poikkeamat, jotka ovat minimikohdassa aina muita pienempiä ja laskennallisesti vähiten merkitseviä. Usein suuntakuviolta kuitenkin edellytetään minimien syvyyttä ja kohdistustarkkuutta. Johonkin suuntaan halutaan syvä minimi häiriönesto- tai salaussyistä.

Suuntakuvioiden lineaarinen kompensointi perustuu siihen, että ryhmäsuuntakuviot ovat erillissuuntakuvioiden summia. Lineaarialgebraan kuuluvan pseudoinvarianssin käyttö on mielekästä, koska se toteuttaa lineaarisuuden ja sillä saadaan suoraan korjausmatriisi tai korjatut syöttökertoimet virheen pienimmän neliösumman mielessä. Minimeitä voidaan lineaarisessa laskentatavassa korostaa siten, että otetaan suuntakuvioihin mukaan vain ne kulma-alueet, joissa minimi ovat. Tässä on se vaara, että korjaus tuottaa muualla huonoja tuloksia, jopa uusia minimeitä. Ne voidaan välttää, jos minimien ulkopuoliset alueet otetaan laskentaan mukaan harvennetulla näytevälillä, esimerkiksi vain joka kolmas piste. Minimeitä voidaan korostaa muillakin tavoin. Minimit korostuvat, jos suuntakuvion amplitudiarvot esimerkiksi logaritmoidaan. Amplitudit voidaan myös vaikka kääntää käänteiarvokseen. Tällaisilla painotustavoilla ei voida toteuttaa kompensointia, koska sen on oltava lineaarinen. Niitä voidaan käyttää iteroinnin kriteereinä. Ryhmäsuuntakuvio on kuitenkin aina laskettava erillissäteilykuvioiden lineaarikombinaationa.

Jos halutaan jokin muu tapa arvioida sovitusta kuin pienimmän neliösumman menetelmä, täytyy iteroida ohjelmallisesti. Iterointi sovitustapana on paljon aikaavievempi kuin suora pseudoinvarianssin käyttö. Saadun kokemuksen perusteella tuntienkin iterointi jää vielä jälkeen pseudoinvarianssin tuloksesta. Parin tunnin iteroinnilla päästiin parikymmentä prosenttia huonompaan kompensointitulokseen kuin pseudoinvarianssilla. Pseudoinvarianssin laskenta kestää vain sekunteja tai sen osia. Lisäksi iteroitaessa on aina pelko, että juututaan johonkin paikalliseen minimiin.

Yksi syy käyttää epälineaarista kriteeriä on se, että lopulliselta ryhmän suuntakuviolta ei vaadita mitään vaiheominaisuutta. Vaihevirhe voidaan kokonaan unohtaa, koska

tyypillisesti ollaan kiinnostuneita vain amplituditasoista. Jos elementtien tavoitesuuntakuviot valitaan vaihetiedoiltaan kovin poikkeavasti korjattavista, yrittää laskenta huomioida myös vaihetietoa. Yksi mahdollisuus on se, että muunnellaan tavoitesuuntakuvioiden vaihetta ja kompensoidaan iteroimalla pitäen lopullisen suuntakuvioiden amplitudi vakiona tai lähes vakiona. Tässä yhteydessä jää askarruttamaan se tosiasia, että joissakin tapauksissa suuntakuvioiden kompensointi on ollut tyydyttävää visuaalisessa, mutta ei korrelaation mielessä. Asia vaatisi kenties tarkempaa matemaattista analyysia vaiheiden ongelmasta. Joka tapauksessa käytetty kompensointitapa on tuottanut hyviä tuloksia ja ne kelpaavat vähintäänkin iteroinnin lähtöarvoiksi.

5.2.2 Minimeitä korostava tapa arvioida kompensaation hyvyyttä

Kompensaation onnistumisen arvioiminen korrelaatioiden avulla on osoittautunut hieman puutteelliseksi. Puutteena voidaan pitää sitä, että korrelaatio ei huomioi nollasuuntien kompensoinnin onnistumista. Korrelaatio on silti oikea tapa arvioida kompensoinnin tulosta, koska se on myös pienimmän neliösumman luonteinen arviointitapa aivan samoin kuin kompensointimenetelmänä käytetty pseudoinvariassi. Hyväksi tavaksi arvioida kompensoinnin tulosta niin, että myös nollasuunnat tulevat huomioiduiksi, on päädytty esittämään seuraavaa kaavaa

$$k_v(\vec{\psi}_1(m), \vec{\psi}_2(m)) = 1 - \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M 1 - \frac{\min(|\vec{\psi}_{10}(m)|, |\vec{\psi}_{20}(m)|)}{\max(|\vec{\psi}_{10}(m)|, |\vec{\psi}_{20}(m)|)} \right), \quad (5.3)$$

missä M on suuntakuviopisteiden määrä ja $\vec{\psi}_{i0} = \frac{\vec{\psi}_i}{|\vec{\psi}_i|}$.

Vastaavasti kuin varsinainen korrelaatio (kaava 2.11), voi tämä lauseke saada arvoja väliltä $[0,1]$ ja vain suuntakuvioiden ollessa samat tulee arvoksi 1. Tällä tavoin voidaan aina arvioida mitä tahansa kompensointitulosta. Jos kuitenkin halutaan tavoite tämän kaavan mukaiseksi, täytyy kompensointi suorittaa iteroimalla minimoimalla kaavan (5.3) korrelaatio, koska optimaalinen korjaus ei ole suoraan saavutettavissa lineaarialgebran avulla. Kaava huomioi vertailtavien suuntakuvioiden pisteiden itseisarvojen suhteen, joka on yhtäsuuruustapauksessa yksi. Kaava ei huomioi millään tavalla vertailtavien suuntakuvioiden pisteiden absoluuttisia arvoja. Näin se kohtelee minimikohtia samoin kuin muita suuntakuvioiden pisteitä. Huonona puolena yllä

olevassa kaavassa voidaan nähdä se, että se ei ota kantaa vaiheiden täsmäämiseen. Tavallisesti tästä ei ole haittaa. Mittausten häiriötasolla olevat minimiit tuovat mukaan myös väärää sovitusta. Tällaiset pisteet on syytä poistaa laskennasta. Kaavan toimintaa ei ole kokeiltu käytännössä.

5.2.3 Korjattavuuden arvioiminen

Aina ei ryhmäantennia valmistettaessa sen käyttötarkoitus ja siten syöttökertoimet ole antennin valmistusvaiheessa tiedossa. Ryhmäantenneja käytetään entistä enemmän ns. mukautuvissa (adaptiivisissa) systeemeissä, joissa syöttökertoimia vaihdetaan hyvinkin nopeasti. Ennen kuin antennia voidaan käyttää mukautuvassa systeemissä, on oltava riittävän varmoja suuntakuvioiden vääristymien korjauksen onnistumisesta. Koska kaikkia syöttökertoimia ja niiden suuntakuvioiden korjautumista ei voida testata, on hyväksyttävä jokin tapa arvioida korjausmahdollisuuksia. Korjauksen mahdollisuutta voidaan arvioida tällaisessa tapauksessa muodostamalla tavoitesuuntakuviosta Gram-Schmidtin ortogonalisointiproseduurilla ortogonaalinen kanta ja tarkistamalla, miten toteutettujen elementtien suuntakuviot ovat esitettävissä tämän kannan avulla. Numeerisena kriteerinä voidaan käyttää kantaan kuulumattoman osan pituuden suhdetta kantaan hajoavan osan pituuteen..

Ortogonaalisen kannan luonti ei ole mitenkään välttämätön vaihtoehto korjauksessa. Lineaarilla korjauksella pseudoinvarianssia käyttäen saadaan aina virheen pienimmän neliösumman mukainen paras ratkaisu. Korjauksen hyvyys, jos se arvioidaan korrelaatiolla, riippuu kuitenkin syöttökertoimistaja se on aina erikseen laskettava. Ortogonaalisen kannan käyttö on havainnollisempi tapa ja antaa mahdollisuuden arvioida samalla vaihtoehtoisten syöttökertoimien mahdollisuutta. Kun huomioidaan se, että elementtien suuntakuviot voivat riippua toisistaan merkittävästi, voidaan jättää sellainen elementti, joka on huonoimmin kantaan hajoava, mahdollisimman pienille syöttökertoimille korvaamalla sen syöttö muiden antennien syötöllä. Kompensaatiomatriisin häiriöalttius voi olla myös tärkeä arvioitaessa vaihtoehtoisten korjauksertoimien mahdollisuutta [11].

5.2.4 Koko avaruuskulman suuntakuvioiden kompensointi

Lineaarinen kompensointi menetelmä koko avaruuden suuntakuvioiden suhteen ei poikkea periaatteellisesti tasotapauksesta. Koko alueen suuntakuvioiden on kaksiulotteinen kompleksinen kuva pallon pinnalla. Mittapisteet on vain osattava yhdistää vektoreiksi. Ongelma on yleinen kuvankäsittelyssä, jossa käytetään useita laskentatapoja. Kaksiulotteisen kuvan pisteet on vektoroitava yksiulotteiseen jonoon. Miten vierekkäiset pisteet sijoitettu on merkittävää kuvankäsittelyssä, mutta ei suuntakuvioiden tapauksessa, kun suuntakuvioita käsitellään vain kompensoimatriisin avulla. Suuntakuvioiden pisteiden paikkojen vaihtaminen, eli vektoroinnin suoritus tapa. ei vaikuta antennien kompensoitokertoimiin eikä kompensoimatriisiin. Ne saadaan aina samalla pseudoinvarianssilla suuntakuviovektoreista. Tasossa määritellyt korjausmatriisit eivät ole parhaita mahdollisia, kun säteilykuvioita tarkastellaan koko pallopinnalla. Jos pallopinnan paras korjausratkaisu on hyvä, ei tasotilanteen paras ratkaisu voi poiketa siitä huomattavasti, jos korjatut syöttökertoimet ovat yksikäsitteiset.

5.2.5 Kompensaatiomenetelmän käyttö polarisaatio huomioiden

Kun suuntakuvioiden lisätään polarisaatio, saadaan suuntakuviolle joka suuntaan kaksi amplitudia ja vaihetta. Voidaan myös käyttää joka antennille, polarisaatiot erottaen, kahta kahden muuttujan 1. kompleksista suuntakuviota. Amplitudisuhde näiden välillä on määrätty eikä siis riipu antennin syötöstä. Jos polarisaatio halutaan mukaan, voidaan polarisaatioiden suuntakuviot liittää peräkkäin suuntakuviovektoriin. Näin käsittely säilyy muuttumattomana, ainoastaan vektorin dimensio kahdentuu. Samalla painotus vastaa todellista painotusta kertoimella yksi. Jos polarisaatioille halutaan eri painotukset sovituksessa, ne on helppo kertoa eri kertoimilla liitettäessä peräkkäin vektoriksi.

5.3 Kompensoiminen ja samanaikainen sovittaminen

Ryhmän sovituksen riippuvuus syöttökertoimista tuli hyvin esille kohdassa 4.6. Kun valitaan syöttökertoimet, joilla saadaan haluttu ryhmäsuuntakuvioiden, jää ongelmaksi

ryhmän sovitus. Mitään havaintoa siitä, että suuntakuvioiden korjaaminen keskimäärin heikentäisi tai parantaisi sovitusta, ei ole. Tarkastelun kohteena olleessa ryhmässä *RH3* oli antennielementtien tasosuuntakuvioiden lineaarinen riippuvuus huomattavan suurta. Yhden antennin suuntakuvio voidaan lausua muiden suuntakuvioiden lineaarikombinaationa. Tämä antaa mahdollisuuden toteuttaa suuntakuvioiden sovitussiten, että valitaan tietyllä tarkkuudella tietyn ryhmäsuuntakuvion tuottavien syöttövektorien joukosta sellainen, jolla on pienin takaisinheijastus. Tämä merkitsee sitä, että ainakin osa keskinäiskytken aiheuttamasta haitasta voidaan eliminoida myös takaisinheijastuksen kohdalla. Vastaava epäsovitus vaikuttaa myös vastaanottotilanteessa. Myös vastaanotossa voidaan valita ryhmän antennille vastaavasti sopivimmat painokertoimet, jotka tuottavat halutun suuntakuvion. Vastaanotossa ryhmän epäsovitus näkyy vähäisempänä vastaanotettuna tehona. Muuttuvien suuntakuvioiden/painokertoimien antennia, ns. mukautuvia antennia tarkastellaan seuraavassa kohdassa.

5.4 Mukautuvat (adaptiiviset) antennit ja keskinäiskytkentä

Tulevaisuudessa lisääntyy tarve käyttää antennia niin, että sen syöttökertoimia vaihdellaan tarpeen mukaan. Tällaista antennia nimitetään mukautuvaksi antenniksi. Antennin korjaaminen tavallisella tietokoneella Matlab-ohjelmaa käyttäen kestää sekunteja tai sen osia. Tässä mielessä korjauskertoimien laskemista voitaisiin käyttää myös reaaliaikaisesti. Menetelmää varten täytyy olla talletettuna korjausmatriisi. Jos ympäristöolosuhteet ovat jatkuvasti muuttuvat, voi olla paikallaan mitata suuntakuvioita tarpeen vaatiessa käyttötilanteessa. Suuntakuvioiden muutosten syy voi olla vaikkapa ilmasto-olosuhteet tai paikan vaihtuminen. Siirtyvässä tietoliikenteessä suuntakuvioita voitaisiin mitata myös tukiasemaan yhteydessä olevien puhelinten avulla. Tällaisessa tapauksessa täytyy järjestelmän voida suorittaa korjausmatriisin laskeminen.

Mukautuvissa antennijärjestelmissä pyritään saamaan vastaanotetuksi signaalia mahdollisimman hyvällä signaali-kohinasuhteella. Antennielementtien lähetystilan kompleksisia syöttökertoimia vastaa vastaanoton kompleksiset painokertoimet. Niiden

valinnalla pyritään parhaaseen vastaanoton tasoon, kun kriteerinä käytetään signaali-kohinasuhdetta. Mukautuva antenni toimii siten, että kertoimia muutetaan tilanteen mukaan. Kerrointen muuttaminen vastaa suuntakuvion muuttamista. Mukautuvien l. adaptiivisten antennien kohdalla on useita menetelmiä vastaanotetun signaalin laadun parantamiseksi [33].

Tässä työssä on osoittautunut, että suuntakuvioiden lineaarinen korjaus toimii hyvin. Mukautuvien antennien tapauksessa, jos suuntakuviot halutaan korjata, on käytettävä korjausmatriisia, koska kertoimet vaihtelevat. Korjausmatriisi on lähetystilanteessa sama kaikissa suuntakuviotapauksissa eli riippumaton syöttökertoimista (Liite III). Vastaava pätee myös vastaanottoon. Mukautuvissa antenneissa käytetään laskennallista signaalien yhdistelyä [1]. Korjausmatriisin käyttö ei liene liian vaikeaa, varsinkin kun se on kiinteä. Sähköisesti korjausmatriisi voidaan mukautuvassa järjestelmässä toteuttaa lineaarisella moniportilla, jossa sisäänmenot on sovitettu, eikä sisäänmenoporttien välillä ole kytkentää. Kytkentäkertoimien sisäänmenoporteista ulostuloportteihin täytyy ilmeisesti olla samat kuin kompensatiomatriisin transpoosilla (esim. kaavassa (2.15)). Korjaukseen käytetyn moniportin sisäänmenoporttien ja ulostuloporttien määrä on tietenkin sama kuin antenniryhmän porttien. Koska mukautuvissa järjestelmissä painokertoimet valitaan joka tapauksessa optimoimalla, ei välttämättä ole mitään syytä erikseen korjata suuntakuvioita ennen optimointia.

Signaalinkäsittely liittyy kiinteästi radiojärjestelmiin, joiden osana käytetään mukautuvia ryhmäantenneja. Tässä työssä on tarkasteltu lähinnä suuntakuvioiden korjaamista ja keskinäiskytkennän vaikutusta antenniryhmän sovitukseen. Keskinäiskytkennän vaikutus antenniryhmän suorituskykyyn on tärkeä kysymys ja siksi on paikallaan myös muutama melko pinnallinen ja ehkä vääräkin mielipide asiasta. Ryhmän antenneista tulevat signaalit yhdistetään mukautuvassa järjestelmässä optimaalisesti painottaen. Matriisityyppistä antennihaaroihin tulevien signaalien kerrontaa ei yksinkertaisimmissa, tosin hyvin monimutkaisissa, optimointitavoissa ole [33]. Painokertoimien etsiminen vastaa suuntakuvion korjauksessa kiinteän suuntakuvion tapauksessa käytettävää parhaan syöttövektorin etsimistä iteroimalla, joskin kriteeri on eri.

Keskinäiskytkennän vaikutusta mukautuvissa järjestelmissä arvioidaan siten, että vastaanotossa signaali kytkeytyy antennista toiseen, kuten kohdan 2.6 mallissa [2,27]. Antennista toiseen kytkeytyvän signaalin oletetaan olevan häiritsevää interferenssisignaalia. Voimakkaimmillaan keskinäiskytkennän voidaan ajatella yhdistävän tätä ajattelutapaa noudattaen antenneihin tulevat signaalit täysin samanlaisiksi, niin, että kohinatkin korreloivat täysin. Tällöin signaalikohinasuhteen parantaminen ei ole yhdistelyllä enää mahdollista. Näin ei välttämättä ole. Jos ajatellaan kohdassa 2.1.3 esitettyä radioyhteyden moniporttimallia, ei antennielementtien välisestä kytkennästä voida päätellä mitään vastaanottavien elementtien ja lähetysantennin välisistä kytkennöistä ja niitä vastaavien radioteiden riippumattomuudesta, eli että keskinäiskytkentäisessä ryhmässä vastaanotetut signaalit olisivat riippuvampia toisistaan. Kuten tiedämme esimerkiksi Huygensin periaatteen ja Fresnelin ellipsoidin perusteella, koostuu radiotie monimutkaisesta reittien yhdistymisestä, jota keskinäiskytkentä muuttaa. Muutoksen vaikutus voi tapauskohtaisesti olla päinvastainenkin, kuin oletetaan.

Keskinäiskytkentää ja mukautuvia ryhmiä koskevissa esimerkkiviitteissä ei huomioida sitä, että kohinat voisivat korreloida muutenkin kuin keskinäiskytkennän vaikutuksesta, kun antennit ovat lähellä toisiaan [2,27]. Kohdan 2.6 mallin mukaan tasoaallossa kytkeytyy osa antenniin sen suuntakuvion mukaisesti, mikä antennilla olisi ilman keskinäiskytkennän vaikutusta. Osa antenniin tulevasta tasoaallossa kytkeytyy toiseen antenniin. Tällaisesta toiselta antennilta "karkuun päässeen" signaalin kytkeytymisestä toiseen antenniin voi olla jopa hyötyä, jos signaali kytkeytyy sopivassa vaiheessa. Keskinäiskytkennän vaikutuksesta suorituskyky voikin myös nousta. Ennustettu lopputulos riippuu voimakkaasti ryhmän elementtivälistä [2]. Keskinäiskytkennän osalta on vaikutukset antenniryhmän suorituskykyyn vielä puutteellisesti ennustettu ja vailla kokeellista vahvistusta.

Koska kaikkien käsiteltyjen mallien mukaan signaalien kytkentä antennien välillä on lineaarista, siis laskennallisesti matriiseilla hallittavaa, pitäisi keskinäiskytkennän vaikutus myös mukautuvissa järjestelmissä olla kokonaan kumottavissa kääntematriisilla. Näin pitäisi alkuperäisten "antenneihin pyrkivien" signaalien ja

samalla signaalikohinasuhteen korjausmahdollisuuden täydellinen palauttaminen olla mahdollista käyttämällä kytkennän matriisin, sirontamatriisin, käänteismatriisia tai jotain muuta matriisia.

5.5 Arvio keskinäiskytkennän merkityksestä mikroliuska-antenniryhmissä.

On käynyt selvästi ilmi, että keskinäiskytkennällä on vaikutusta suuntakuvioiden. Myös yhtä selvästi on nähtävissä, että se on kompensoitavissa korjatuilla syötöillä. Teollisesti valmistettavien antennien kohdalla on ensiarvoisen tärkeää, että ryhmät olisivat mahdollisimman identtisiä. Tällöin niille kaikille voidaan käyttää samoja korjauksia, jotka voidaan toteuttaa valmiiden piirien muodossa. Kysymys on siis ennenkaikkea valmistustoleransseista. Jos ne saadaan kuriin ja käytetään lisäksi reunojen peittämistä ja passiivisia elementtejä reunoilla, ei keskinäiskytkennästä ole suurta haittaa, koska tällöin kaikki suuntakuviot ovat lähes identtisiä. Kun kytkennän aiheuttama suuntakuvioiden epäidenttisyysmuutokset on vähäinen, voidaan ryhmäsuuntakuvioiden olettaa olevan tyydyttäviä korjaamattominakin. Keskinäiskytkennän aiheuttamat muutokset ovat mikroliuskaryhmän suuntakuviossa melko laakeita, koska ne soveltuvat vastaavilla isotrooppisilla suuntakuvioidella. Jos antenniryhmän epäsovitus on tärkeä kysymys, ei yleisessä tapauksessa onnistumista voida taata.

Vaikuttaa siltä, että keskinäiskytkennästä on tehty jonkinlainen peikko, jota pelätään. Pelko näyttää turhalta. Se on erillisilmiö, josta ei päästä eroon ja se on näillä näkymin hallittavissa suuntakuvioiden osalta ainakin mikroliuskaryhmissä. Tämä ei tarkoita, että ilmiön teoreettinen ymmärtäminen ja hallitseminen olisi helppoa, enemmänkin asia näyttää olevan päinvastoin.

5.6 Keskinäiskytkentä ja antennien miniatyrisointi

Keskinäiskytkentäisessä antenniryhmässä syötön sovitus riippuu syöttökertoimista. Asia kävi ilmi kohdassa 2.6. Jos syöttöjen jakaminen eri kertoimin vaiheistuksineen on helppo toteuttaa ja antennielementit eivät ole ryhmässä sovitettuja, voidaan keskinäiskytkentä mahdollisesti hyödyntää antennin sovituksessa. Jos syötettäviä elementtejä on tarpeeksi, luulisi löytyvän koko joukon sirontamatriisin ominaisarvoja tarpeeksi läheltä nollaa ja niistä jonkin sellaisen, jota vastaava syöttövektori antaa tyydyttävän suuntakuvion.

On huomattava, että vastaavaa koko ryhmän sovittamismahdollisuutta syöttökerrointen valinnalla ei ole niissä ryhmissä, joissa ei ole keskinäiskytkentää. Niissä jokainen elementti on sovitettava erikseen sovituspireillä. Jos antennielementtien keskinäiskytkennän taajuuskaista ulottuu tarpeeksi alhaisille taajuuksille tarpeeksi voimakkaana, on mahdollisuus käyttäen keskinäiskytkentää hyödyksi sovituksessa saada aikaiseksi pienikokoinen antenni, jolla on etuna esimerkiksi käytetyn elementin valmistus- tai kytkentäedut. Mikroliuska-antennien tapauksessa keskinäiskytkennän käyttäminen ei auta tuottamaan huomattavasti aallonpituutta pienempää hyvää antenniryhmää, koska keskinäiskytkennän taajuuskaista ei ulotu riittävän alhaisille taajuuksille (kuva 20), joilla antenniryhmä olisi selvästi aallonpituutta pienempi.

5.7 Ortogonaalisten funktioiden käyttö

Keskinäiskytkentää on tässä tarkasteltu syöttöjen, apertuurivirtojen ja suuntakuvioiden näkökulmasta. Kaikissa tapauksissa kysymys on vektoriesityksestä jolle voidaan aina löytää ortogonaalinen kanta. Ainoastaan syöttöjohtojen vektorit ovat olleet periaatteessa täydellisiä ja kuvanneet kaikki todelliset mahdollisuudet. Suuntakuvioissa ja niistä saaduissa ekvivalenteissa virroissa on mukana vain osa tapahtuma-avaruutta. Suuntakuvioiden (säteilykuvien) tarkastelu on rajoitettu vaakatasoon ja polarisaatioon, jossa sähkökenttä on myös vaakatasossa. Ortogonaalisten syöttövirtojen synnyttämät suuntakuviot ovat ortogonaalisia

integroituina pallopinnan yli [13,12,31]. Eri polarisaatioiden suuntakuviot ovat myös aina keskenään ortogonaalisia. Niitä vastaa substraatin pinnassa ortogonaalisiin suuntiin olevat ekvivalentit virrat.

Tasossa tapahtuvassa suuntakuvioiden sovituksessa joudutaan määrittelemään pistetulo ja samalla ortogonaalisuus tässä tasossa. Tasosovitus vaikuttaa varsin luonnolliselta tietoliikenteen antenniratkaisuissa, joissa ylös ja alas ei ole erityisen tarpeellista suunnata signaalia. Näin sovituksen ja ortogonaalisuuden määrittelemineen vaakatasoon on myös järkevä ratkaisu, kun huomioidaan, että mittausolosuhteissa ei ollut mahdollisuuttakaan määrittellä koko pallopinnan suuntakuvioita.

Ortogonaalisuuden avulla voidaan myös toteuttaa sovitus tehtävä. Ideaalisten tavoitesuuntakuvioiden avulla voidaan muodostaa ortogonaalinen kanta \mathbf{F}^{ORT} Gram-Schmidtin ortogonalisointiproseduurilla, hajottaa tähän kantaan tavoitesuuntakuviot, hajoitustulos matriisi \mathbf{Q}_1 , tehdä vastaava hajotelma mitatuille elementtien suuntakuvioille ja ratkaista mitattujen suuntakuvioiden korjatut kertoimet \mathbf{a}_{korj} asettamalla saadut kerroinmatriisit $\mathbf{a}^T \mathbf{Q}_1$ ja $\mathbf{a}_{\text{korj}}^T \mathbf{Q}_2$ samoiksi, jolloin

$$\bar{\mathbf{a}}^T \cdot \mathbf{F}^{\text{tav}} = \bar{\mathbf{a}}^T \cdot \mathbf{Q}_1 \cdot \mathbf{F}^{\text{ORT}} = \bar{\mathbf{a}}_{\text{korj}}^T \cdot \mathbf{Q}_2 \cdot \mathbf{F}^{\text{ORT}} = \bar{\mathbf{a}}_{\text{korj}}^T \cdot \mathbf{F}^{\text{tav}}. \quad (5.4)$$

Tästä saadaan korjauskertoimet tavallisella neliömatriisin matriisin käänöllä

$$\bar{\mathbf{a}}_{\text{korj}}^T = \bar{\mathbf{a}}^T \cdot \mathbf{Q}_1 \cdot \mathbf{Q}_2^{-1}. \quad (5.5)$$

Tämä ei ole virheen pienimmän neliösumman menetelmä. Syynä on se, että sovitusta halutussa kannassa on laskennan tarkkuudella täydellinen, mutta ei sen ulkopuolella. Pienimmän neliösumman menetelmä antaa mahdollisuuden pieneen epäsovitukseen halutussa kannassa niin, että kokonaissovitus on paras mahdollinen. Tästä ei ole kylläkään mitään hyötyä, jos kannan ulkopuolinen osa on seurausta kohinasta. Kohdassa 4.4 tarkasteltu suuntakuvioiden merkittävä lineaarinen riippuvuus haittaa pienen apertuurin mallin toimivuuden arvioimista. Korjauskertoimet eivät ole laskennallisesti niin stabiileja kuin jos suuntakuviot ovat riippumattomia. Näin suuntakuvioiden riippuvuustarkastelu ei tue pienen apertuurin mallin suoraa hylkäämistä. Lisäksi pienen apertuurin mallin tapauksessa on käytettävä iterointia, jolla haetaan sirontaparametrimittaukselle parasta referenssitilaa.

Tasoon rajoittuvassa suuntakuviossa eivät kohdan 4.6 mukaan edes sellaisten antennien suuntakuviot, jotka ovat isotrooppisia ole täysin ortogonaalisia. Kun suuntakuvioita tarkastellaan u -avaruudessa ($u=kd\sin\theta$) ovat isotrooppisten antennien ryhmän suuntakuviot e^{jnu} harmonisina funktioina ortogonaalisia 2π -periodin alueella [1]. Periodi osuu vain erityistapauksissa puoliympyrään. Elementtivälin on oltava lisäksi yli puoli aallonpituutta. Keilan kääntämisessä käytetty u -avaruus vastaa tasavälisesti syöttökerroinavaruutta mutta ei avaruuden suuntia. Tästä syystä u -avaruus lienee signaalin käsittelyn kannalta parempi, mutta ei sovi yhtä hyvin suuntakuvioille. Suoritetun tarkistuksen mukaan eivät voimakkaan kytkennän ryhmän $RH3$ ($d=0,3\lambda$) elementtien suuntakuviot olleet läheskään ortogonaalisia integroituina tasosuuntien yli painottaen integraalia tekijällä $\cos(\theta)$, joka saadaa yhtälöstä $du=\cos\theta d\theta$.

Ortogonaalisten suuntakuvioiden löytäminen on tärkeää suuntakuvioilla tapahtuvan laskennan selkiyttämiseksi. Ominaisyyttövektoreita vastaavat tasosuuntakuviot eivät sen ortogonaalisempia keskenään kuin elementtien erikseen mitatut suuntakuviot. Ominaisyyttövektoreita vastaavien täydellisten suuntakuvioiden ortogonaalisuus on yritetty perustella liitteessä V. Asia ei ole aivan ongelmaton. Gram-Schmidtin ortogonalisointiproseduurilla voidaan ryhmän tasosuuntakuvioille luoda ortogonaalinen kanta. Pohdittavaksi jää, miten kanta olisi valittava, jotta se olisi mahdollisimman selkeä, kaikkien elementtien suuntakuvioita tasapuolisesti kohteleva ja onko sirontamatriisista apua sen löytymiseen.

6. Johtopäätökset

Keskinäiskytken hallinta on melko työläs tehtävä. Tässä työssä on ongelmaa valaistu keskittyen yhden antennityypin, planaaristen mikroliuska-antennien, ryhmäantenneihin. Kysymyksenasettelu ja ratkaisutavat ovat tarkentuneet työn edetessä. Keskinäiskytkentä ei riipu suoraan antennisuunnittelun tai radiojärjestelmäsunnittelun perusasioista, vaan on melko hankalasti korjattava lisävaiva, jonka merkitys on erikseen tarkastettava.

Saatujen tulosten perusteella näyttää mikroliuskaryhmän antennielementtien syöttökertoimien lineaarinen korjaaminen kompensatiomatriisilla antavan visuaalisesti ja korrelaation mielessä hyviä tuloksia. Keskinäiskytken vaikutuksen alaiset antennielementtien suuntakuviot ovat varsin tarkasti erillisten elementtien tai ideaalisten suuntakuvioiden lineaarikombinaatioita, jolloin ne voidaan esittää viimeksimainittujen avulla käyttämällä kompensatiomatriisia. Kiinteän ryhmäsuuntakuvioiden tapauksessa antennin syöttökertoimet vaihdetaan korjattuihin kertoimiin. Muuttuvan suuntakuvioiden tapauksessa, jolloin syöttökertoimet vaihtelevat, on aina käytettävä korjausmatriisia, joko laskennallisesti tai piiriteknisesti toteutettuna. Korjauksen onnistumisen yleistäminen vaatii kaikkien suuntien ja polarisaatioiden säteilykuvion mittausta.

Suuntakuvioiden vääristymien kompensointi pienille antennille kehitetyn mallin mukaisesti (kohta 2.6) sirontamatriisista saatavalla kytkentämatriisilla ei tuota tyydyttävää tulosta ja osoittaa, että malli kuvaa sellaisenaan huonosti mikroliuska-antennin tapausta. Mallin etu on yksinkertaisuus. Sirontamatriisin käytöllä saatavaa korjausta voidaan huomattavasti parantaa, jos sirontaparametrit redusoidaan antennin säteilypintoihin l . apertuureihin huomioimalla antennisyöttöjen epäsovitus sekä resonaattorien ja kulkutien aiheuttama viive. Tämä vaatii hankalaa laskennallista iterointia eivätkä tulokset ole helposti yleistettävissä.

Ideaalisen suuntakuvioiden etsiminen antennia peittelemällä on toimiva tapa käytettäessä peittelyyn absorptiolevyjä, jos samalla huolehditaan substraatin reunojen

peittämisestä. Peittelymenetelmä on tarpeellinen, kun laskennallista tietoa elementtien suuntakuvioista ei ole saatavilla eikä ole käytettävissä erillistä ideaalista elementtiä, jonka suuntakuviota voitaisiin mitata. Suositeltava tapa mikroliuskaryhmän suuntakuvioiden parantamiseksi on laittaa ryhmän substraatin reunat peittävä vaimennuslevy eli vaimentavat kehykset. Absorpoiva materiaali voitaneen korvata myös suuren permittiivisyyden materiaaalilla.

Keskinäiskytken osuus suuntakuvioiden vääristymiin jäi hieman epäselväksi. Epäideaalisuutta aiheuttavat myös antenniryhmien substraattien reunat. Mittausvirheillä oli myös selvä osuus summaamalla rakennettujen suuntakuvioiden vääristymiin. Ryhmäsuuntakuvion kaikkien lueteltujen epäideaalisuuksien kompensoituminen laskennassa lineaarisella korjauksella on mikroliuskaryhmässä huippuluokkaa. Tästä syystä keskinäiskytken ongelma ei näytä niinkään olevan suuntakuvioiden puolella. Suurempi keskinäiskytken aiheuttama ongelma on takaisinheijastukset syöttöpiiriin. Takaisinheijastusten välttäminen on herkissä järjestelmissä nostettava huolellisen tarkastelun kohteeksi. Kun antennielementtejä tuodaan lähemmäksi toisiaan, kasvavat keskinäiskytken aiheuttamat takaisinheijastukset. Sovitusta saattaa auttaa se, että sama tasosuuntakuviota voidaan saada aikaiseksi tiiviissä, alle $0,3\lambda$:n elementtivälin ryhmässä eri syöttökerroinkombinaatioilla, jolloin huonoimmat kertoimet voidaan mahdollisesti välttää. Takaisinheijastusten ongelma koskee ennen kaikkea adaptiivisia ja keilattavia antenniryhmiä, joissa syöttökertoimia muutellaan.

Koska halutaan käyttää edullisia antenneja ja lisäksi pakata ne mahdollisimman pienelle alueelle, tarvitaan keskinäiskytken vaikutusten eliminoimiseksi jo suunnitteluvaiheessa lisää mittaamisen ja mallittamisen apuneuvoja. Tämän työn tuloksista voidaan päätellä, että tarvitaan tarkempia rajapintoja antennisuunnittelun eri osille. Kun suunnittelussa lasketaan antennien suuntakuvioita, pitäisi huomioida myös telineiden, takalevyjen ja syöttöjohtojen vaikutus. Keskinäiskytken arvioimiseksi pitäisi olla käytettävissä yksinkertaisia kaavoja, kuvaajia ja taulukoita. Keskinäiskytken vaikutus antenniryhmissä on nostettava myös osaksi radiojärjestelmien suunnittelua.

7. Lähdeviitteet

- [1] Steyskal, H., Herd, J., "Mutual coupling compensation in small array antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 38, No. 12, Dec 1990, ss. 1971-75.
- [2] Gupta, I., Ksienski, A., "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-31, Sep. 1983, 785-791.
- [3] Voipio, Veli, "*Wideband patch antenna array techniques for mobile communications*", Lisensiaatintyö, TKK, Radiolaboratorio, 1988.
- [4] Mailloux, R., J., "Reduction of mutual coupling using perfectly conducting fences", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-19, No. 2, Mar 1971, ss. 166-172.
- [5] Räisänen, A., Lehto, A., *Radiotekniikka*, 4. korjattu painos, TKK offset, Espoo 1995, 280 sivua.
- [6] Balanis, C., *Antenna theory. Analysis and design*, Harper & Row Publishers Inc., 1982, New York, 785 sivua.
- [7] Lindell, I., Nikoskinen, K., *Antenniteoria*, Otatieto, Espoo, 1995, 280 sivua.
- [8] *Matlab reference guide*, The MathWorks, Inc, 1992, 548 sivua.
- [9] Golub, G., H., Van Loan, C., F., "*Matrix Computations*", North Oxford Academic Publishing Co. Ltd., Oxford, 1983, 476 sivua.
- [10] Strang, G., "*Introduction to linear algebra*", Wellesley-Cambridge Press, Wellesley 1993, 472 sivua.
- [11] Mäkelä, M., Nevanlinna, O., Virkkunen, J., "*Numeerinen matematiikka*", Gaudeamus, Mänttä 1986, 331 sivua.
- [12] Darwood, P., Fletcher, P., Hilton, G., "Mutual coupling compensation in small planar array antennas", *IEE Proceedings; Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 1, Feb 1998, ss. 1-6.
- [13] Kang, Y-W., Pozar, D., "Correction of error in reduced sidelobes synthesis due to mutual coupling", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.

- AP-33, No. 9, Sep 1985, ss. 1025-1028.
- [14] Derneryd, Anders, "Compensation of mutual coupling effects in array antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, ss. 1122-1125.
- [15] Lehto, A., Räsänen, A., *RF- ja mikroaaltotekniikka*, 4. painos, Otatiето, Espoo, 1994, 250 sivua.
- [16] Lindell, I., *Aaltojohtoteoria*, Otatiето, Helsinki 1977, 345 sivua.
- [17] Pozar, D. M., "Input impedance and mutual coupling of rectangular microstrip antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-30, No. 6, Nov 1982, ss. 1191-1196.
- [18] Pozar, M., Schaubert, D., "Scan blindness in infinite phased arrays of printed dipoles", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No. 6, June 1984, ss. 602-610.
- [19] Haddad, P., Pozar, D., "Anomalous mutual coupling between microstrip antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 42, No 11, Nov. 1994, ss. 1545-1549.
- [20] Mailloux, Robert J., *Phased array antenna handbook*, Artec House, Boston, 1993, 532 sivua.
- [21] Kalliola, Kimmo, "*Testbed for adaptive array antennas*", diplomityö, TKK 1997, 87 sivua.
- [22] Bahl, I. J., Bhartia, P., *Microstrip antennas*, Dedham, MA, 1980, Artec House, 348 sivua.
- [23] Noghianian, S., Shafai, L., "Control of microstrip antennas radiation characteristics by ground plane size and shape", *IEE Proceedings; Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 145, No. 3, Jun 1998, ss.207-212.
- [24] Balanis, C., A., "Analysis of an array of line sources above a finite ground plane", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-19, No. 2, March 1971, ss. 181-185.
- [25] Borgiotti, G., V., "Edge effects in finite arrays of uniform slits on a ground plane", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-19, No. 5,

- Sep. 1971, ss. 593-599.
- [26] Kelley, D. F., Stutzman, W. L., "Array antenna pattern modeling methods that include mutual coupling effects", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 41, No. 12, Dec 1993, ss. 1625-1631.
- [27] Ishide, A., Compton, R., T., Jr., "On grating nulls in adaptive arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-28, No. 4, Jul 1980, ss. 467-475.
- [28] Benalla, A., Gupta, K., C., "Multiport network approach for modeling the mutual coupling effects in microstrip patch antennas and arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 37, No. 2, Feb 1989, ss. 148-152.
- [29] Jedlicka, R., P., Poe, M., T., Carver, K., R., "Measured mutual coupling between microstrip antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-29, No. 1, Jan 1981, ss. 147-149.
- [30] Humphrey, D. E., J., Fusco, V., F., "A mutual coupling model for microstrip patch antenna pairs with arbitrary orientation", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 18, No. 3, Jun 1998, ss. 230-233.
- [31] Austin, B. A., Murray, K. P., "The application of characteristic-mode techniques to vehicle-mounted NVIS antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 40, No. 1, Feb 1998, ss. 7-21.
- [32] Steyskal, H., Mailloux, R., J., "Generalisation of an array-failure-correction method", *IEE Proceedings; Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 145, No. 4, Aug 1998, ss. 332-336.
- [33] Compton, R., T., Jr., *Adaptive antennas, Concepts and performance*, Prentice Hall, New Jersey 1988, 448 sivua.

LIITE I Esimerkki sirontaparametreista

RH4:n ($d=0,93\lambda$) sirontamatriisi vektoripiirianalysaattorimittauksesta

taajuus=5.295e+009

sirontamatriisin amplitudit (dB)

-8.2267 -23.5222 -28.2456 -32.8007 -36.5894 -36.4217
 -24.5154 -8.7342 -23.4973 -28.7096 -33.1520 -36.2644
 -29.1015 -24.3640 -9.2646 -24.4610 -29.1201 -31.7590
 -33.5195 -29.6054 -25.3093 -10.2691 -23.5424 -27.1851
 -37.8726 -34.4409 -30.4134 -24.4635 -6.4156 -22.8840
 -38.1337 -37.0359 -32.5059 -28.0353 -23.8953 -9.4973

sirontamatriisin vaiheet (asteita)

31.9056 111.7613 130.8550 -26.7854 -25.5320 14.8287
 110.9176 33.4739 110.5713 -60.9296 -43.3957 -8.5212
 131.2010 110.7866 35.1514 -80.3626 -75.6417 -34.8026
 -26.7607 -61.3036 -81.1360 43.8847 105.9459 137.2011
 -26.2181 -45.4401 -76.7813 104.2992 30.8752 108.8799
 17.3022 -10.5351 -36.8501 136.8232 110.5446 39.6196

RH3:n ($d=0,3\lambda$) sirontamatriisi vektoripiirianalysaattorimittauksesta

taajuus=5.295e+009

sirontamatriisin amplitudit (dB)

-12.3314 -8.7796 -13.8338 -18.1501 -16.6710 -18.7490
 -9.2558 -15.0327 -7.7662 -13.2002 -14.4961 -17.2100
 -14.2969 -7.9944 -13.1133 -8.4958 -13.2795 -18.8893
 -18.6698 -13.4489 -8.6405 -13.1163 -7.8068 -14.3123
 -17.0402 -14.7221 -13.3689 -7.8589 -15.6083 -9.1390
 -19.3860 -17.5573 -19.1259 -14.5618 -9.5284 -10.7942

sirontamatriisin vaiheet (asteita)

10.8179 99.5939 -37.2589 24.6104 -125.3959 78.8897
 103.2842 -29.9447 118.1771 -173.5284 34.3528 -125.4823
 -32.3244 121.0816 -47.6209 -40.7198 -177.3090 21.5702
 28.9223 -169.1906 -36.3532 -49.3083 110.9052 -46.2655
 -120.5672 38.3862 -171.4132 113.4037 -35.4556 92.0009
 80.2096 -124.8937 22.6711 -44.7288 92.7767 17.6417

Mittaukset on kalibroitu antennin syöttöportteihin

LIITE II Parhaan ja huonoimman sovituksen syöttökertoimet

Sirontamatriisille \mathbf{S} voidaan kirjoittaa ominaisarvoyhtälö

$$\mathbf{S} \cdot \bar{\mathbf{a}} = \lambda \cdot \bar{\mathbf{a}}. \quad (\text{II.1})$$

Kun molempiin puoliin lisätään syöttövektori \mathbf{a} kerrottuna yksikkömatriisilla, saadaan

$$(\mathbf{I} + \mathbf{S}) \cdot \bar{\mathbf{a}} = (1 + \lambda) \cdot \bar{\mathbf{a}} = \lambda^K \cdot \bar{\mathbf{a}}. \quad (\text{II.2})$$

Kirjoitetuista yhtälöistä havaitsemme, että kytkentämatriisin $\mathbf{I} + \mathbf{S}$ ominaisvektorit ovat samat kuin sirontamatriisin \mathbf{S} . Samoja ominaisvektoreita vastaavat ominaisarvot poikkeavat ykkösen verran toisistaan. Matriisin \mathbf{S} avulla voidaan kirjoittaa tiettyä syöttövektoria \mathbf{a} vastaavat heijastuneet signaalit muodossa $\mathbf{S}\mathbf{a}$. Tarkastelemme nyt heijastunutta osuutta jolloin kiinnostava ominaisarvoyhtälö on muotoa

$$\mathbf{S} \cdot \bar{\mathbf{a}} = \lambda \cdot \bar{\mathbf{a}} \quad (\text{II.3})$$

Tarkastellaan yksikön mittaisia ominaisvektoreita $\bar{\mathbf{a}}_i^0$. Mielivaltainen syöttövektori voidaan esittää ominaisvektoreiden kannassa.

$$\bar{\mathbf{a}} = \sum_{n=1}^N k_n \bar{\mathbf{a}}_n^0 \quad (\text{II.4})$$

Takaisin sironneelle jännitevektorille pätee

$$\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}} = \sum_{n=1}^N k_n \lambda_n \bar{\mathbf{a}}_n^0 \quad (\text{II.5})$$

Kun huomioidaan vektoreiden $\bar{\mathbf{a}}_i^0$ ortonormaalisuus saadaan lauseke takaisin heijastuneelle teholle

$$\begin{aligned} P_{takas} &= (\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}})^{*T} \cdot \mathbf{S}\bar{\mathbf{a}} = \left(\sum_{n=1}^N k_n \lambda_n \bar{\mathbf{a}}_n^0 \right)^{*T} \left(\sum_{m=1}^N k_m \lambda_m \bar{\mathbf{a}}_m^0 \right) = \\ &= \sum_{n=1}^N (k_n \lambda_n \bar{\mathbf{a}}_n^0)^{*T} (k_n \lambda_n \bar{\mathbf{a}}_n^0) = \sum_{n=1}^N |k_n|^2 |\lambda_n|^2 \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

Takaisin sironneen tehon osuudeksi syötetystä tehosta saadaan

$$\eta_{takas} = \frac{\sum_{n=1}^N |k_n|^2 |\lambda_n|^2}{\sum_{m=1}^N |k_m|^2} \quad (\text{II.7})$$

Energiaperiaatteen johdosta $|\lambda_i| \leq 1$. Kun tarkastellaan yksikkötehon suuruisia syöttöjä joille $\sum_{n=1}^N |k_n|^2 = 1$ nähdään helposti, että huonoin sovitus saavutetaan sirontamatriisin \mathbf{S} ominaisvektorilla, jonka ominaisarvo on itseisarvoltaan lähinnä arvoa 1. Tämä vastaa matriisin $\mathbf{I}+\mathbf{S}$ ominaisarvoa, joka on kauimpana arvosta 1. Vastaavasti nähdään helposti, että paras sovitus saadaan matriisin \mathbf{S} ominaisvektorilla, jonka ominaisarvo on lähinnä arvoa 0, jolloin matriisin $\mathbf{I}+\mathbf{S}$ vastaava ominaisarvo on kompleksitasossa lähinnä reaalilukua 1.

Vastaavat yhtälöt voidaan kirjoittaa myös matriisille $\mathbf{I}+\mathbf{S}$. Koska sirontamatriisin kertoimet voivat olla pienet, saattaa olla, että yhtälö (II.2) on ratkaisun kannalta stabiilimpi kuin (II.1). Oletetaan matriisin $\mathbf{I}+\mathbf{S}$ ominaisvektorit \mathbf{a}_i ja ominaisarvot λ_i^K . Ominaisvektorit olkoon yksikkövektoreita. Mielivaltainen syöttövektori \mathbf{a} voidaan hajottaa ominaisvektorien kantaan

$$\bar{\mathbf{a}} = k_1 \bar{\mathbf{a}}_1 + k_2 \bar{\mathbf{a}}_2 + \dots \quad (\text{II.8})$$

Edelleen voidaan kirjoittaa käyttäen ominaisvektorin ominaisuuksia

$$(\mathbf{I} + \mathbf{S}) \cdot (k_1 \bar{\mathbf{a}}_1 + k_2 \bar{\mathbf{a}}_2 + \dots) = k_1 \lambda_1^K \bar{\mathbf{a}}_1 + k_2 \lambda_2^K \bar{\mathbf{a}}_2 + \dots \quad (\text{II.9})$$

Tästä seuraa ehto takaisin sironneelle signaalille $\mathbf{S}\mathbf{a}$ siirtämällä yksikkömatriisia vastaavat termit yhtälön oikealle puolelle

$$\mathbf{S} \cdot (k_1 \bar{\mathbf{a}}_1 + k_2 \bar{\mathbf{a}}_2 + \dots) = k_1 (\lambda_1^K - 1) \bar{\mathbf{a}}_1 + k_2 (\lambda_2^K - 1) \bar{\mathbf{a}}_2 + \dots \quad (\text{II.10})$$

Kun huomioidaan, että $\mathbf{I}+\mathbf{S}$:n ominaisarvo saadaan lisäämällä ykkösen \mathbf{S} :n ominaisarvoon, ollaan kaavan (II.5) tilanteessa, josta takaisin heijastunut teho saadaan samalla tavalla. Paras sovitus saadaan matriisin $\mathbf{I}+\mathbf{S}$ ominaisvektorilla, jota vastaava ominaisarvo on lähinnä ykköstä ja huonoin sovitus $\mathbf{I}+\mathbf{S}$:n ominaisvektorilla, jota vastaava ominaisarvo on kompleksitasossa kauimpana reaaliarvosta yksi.

LIITE III Korjauskertoimet ja laskemisjärjestys

Kun syöttökertoimet ovat tasasyöttöisiä, lasketaan pseudoinvarianssin avulla korjauskertoimet esikorjauksena kuten edellä kohdassa 2.4 on esitetty. Erisuurten syöttökertoimien suuntakuvioiden esikorjatut tasasyötön suuntakuviot voidaan kertoa alkuperäisillä erisuurilla kertoimilla. Käytettäessä erisuuria syöttökertoimia voidaan käyttää jälkikorjausta, jolloin mitattujen ja tavoitesuuntakuvioiden matriisit \mathbf{F}_0^{mit} ja \mathbf{F}_0^{tav} kerrotaan ennen korjausta syöttökerroinmatriisilla \mathbf{A} . ja Korjausmatriisit \mathbf{K}_{ES} ja \mathbf{K}_j esi- ja jälkikorjaukselle esitetään alla. Epäselvää oli, että korjausjärjestys ei vaikuta mitenkään lopputulokseen. Kun korjaus tuottaa tarkasti tavoitesuuntakuviot on tapaus triviaali ja riippumattomuus järjestyksestä selvä. Kun korjaus on epätäydellinen, on tuloksena yllättäen järjestyksestä riippumatta sama korjausmatriisi, joka on virheen pienimmän neliösumman mukainen ratkaisu.

Oletetaan

\mathbf{F}_0^{mit} - antennielementtien mitattujen suuntakuvioiden matriisi ($M \times N$, $M=339$ ja $N=6$)

\mathbf{F}_0^{tav} - vastaava tavoitesuuntakuvioiden matriisi

$\vec{\mathbf{a}}$ - syöttökerroinvektori, N -dimensioinen pystyvektori

\mathbf{A} - syöttökertoimien diagonaalimatriisi, $\mathbf{A} = \text{diag}(\vec{\mathbf{a}})$

Esikorjaus

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{ES} &= (\text{pinv}(\mathbf{F}_0^{mit})' \cdot \mathbf{F}_0^{tav})' \\ \vec{\mathbf{a}}_{ES}^{korj} &= \mathbf{K}_{ES}^T \cdot \vec{\mathbf{a}} \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

Jälkikorjaus

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_j &= (\text{pinv}((\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}_0^{tav})') \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}_0^{mit})')' \\ \vec{\mathbf{a}}_{aj}^{korj} &= \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{K}_j^T \cdot \vec{\mathbf{a}}^0, \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

missä $\vec{\mathbf{a}}^0 = (111111)^T$ ja T merkitsee matriisin transponointia ja yläpilkku ' on Matlab-ohjelman merkintä adjunktioille *T tai T*. Esitetyt muodot ovat Matlab-laskennan kannalta edullisia. Kaavassa (III.2) termi $\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}$ tarkoittaa haluttujen elementtien suuntakuvioiden matriisia, jossa tasasyötöstä poikkeavat syöttökertoimet on huomioitu. Nähdään, että korjaus on samaa muotoa kuin (III.1):ssä paitsi, että se

suoritetaan vasta sen jälkeen kun suuntakuviomatriisi on muunnettu erisuuria syöttökertoimia vastaavaksi, eli suoritetaan jälkikorjaus. Seuraavaksi todistetaan, että esi- ja jälkikorjaus antaa saman tuloksen eli korjauksen ja syöttökertoimilla kertomisen järjestyksellä ei ole väliä.

Lopullinen ryhmän ryhmäsuuntakuvioiden saadaan aina syöttökertoimien \mathbf{a} , korjattujen tai alkuperäisten, ja mitattujen tai korjattujen suuntakuvioiden matriisin \mathbf{F} avulla kertomalla suuntakuviomatriisi \mathbf{F} syöttövektorin $\bar{\mathbf{a}}$ transpoosilla.

$$\bar{\psi} = \bar{\mathbf{a}}^T \cdot \mathbf{F}. \quad (\text{III.3})$$

Riippumattomuus korjauksen ja syöttökertoimien käytön järjestyksestä nähdään seuraavasta. Jälkikorjauksessa etsitään paras ratkaisu matriisille \mathbf{K}_j likimääräisyhtälössä

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} \approx \mathbf{K}_j \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit} \quad (\text{III.4})$$

Pseudoinvarianssi ratkaisee tästä matriisin \mathbf{K}_j seuraavasti. Yhtälö kerrotaan oikealta matriisilla $(\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit})'$, jolloin yhtälöryhmän yhtälöiden määrä samalla vähenee

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit})' = \mathbf{K}_j \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit})'$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{A}' = \mathbf{K}_j \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{A}'$$

Yhtälön molemmat puolet kerrotaan neliömatriisin $\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{A}'$ käänteismatriisilla

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{A}' \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{A}')^{-1} = \mathbf{K}_j$$

Tämä on matriisin \mathbf{K}_j pienimmän neliösumman mukainen ratkaisu jota voidaan yksinkertaistaa

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{A}' \cdot \mathbf{A}'^{-1} \cdot (\mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{F}^{mit})^{-1} \cdot \mathbf{A}^{-1} = \mathbf{K}_j$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot (\mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{F}^{mit})^{-1} \cdot \mathbf{A}^{-1} = \mathbf{K}_j$$

koska $\mathbf{F}^{tav} \cdot \mathbf{F}^{mit} \cdot (\mathbf{F}^{mit} \cdot \mathbf{F}^{mit})^{-1} = \mathbf{K}_{ESI}$, saadaan

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{K}_{ESI} \cdot \mathbf{A}^{-1} = \mathbf{K}_j \quad (\text{III.5})$$

Kun käytetään syöttömatriisin lisäksi vektoria $\bar{\mathbf{a}}^0 = (111111)^T$, voidaan korjattu suuntakuvioiden kirjoittaa

$$\bar{\mathbf{a}}_0^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{tav} = \bar{\mathbf{a}}_0^T \cdot \mathbf{K}_j \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit}$$

merkitsemällä syöttövektoria \mathbf{a} :lla ja sijoittamalla \mathbf{K}_{ESI} saadaan

$$\vec{\mathbf{a}}^T \cdot \mathbf{F}^{tav} = \vec{\mathbf{a}}_0^T \cdot \mathbf{K}_j \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}^{mit} = \vec{\mathbf{a}}^T \cdot \mathbf{K}_{ESI} \cdot \mathbf{F}^{mit}$$

Eli sama tulos kuin käyttämällä korjausta ennen syötöillä kertomista.

Edellä olevasta voidaan tehdä yhteenveto, että sama korjausmatriisi \mathbf{K} toimii kaikkien syöttökertoimien tapauksessa. Jos antennia käytetään mukautuvassa järjestelmässä ja suuntakuviot halutaan korjata, täytyy korjausmatriisi tallettaa. Se voi olla myös lineaarinen moniportti, jonka sisäänmenot ovat (samoin) sovitettuja ja ulostulot riippuvat sisäänmenoista korjausmatriisin kertoimien mukaisesti. Ilmeisesti ne ovat suoraan sen transpoosin kertoimia.

Korjauksen tuloksen riippumattomuus järjestyksestä voidaan päätellä yllä olevaa hankalaa tapaa yksinkertaisemminkin. Jos kaavassa (III.4) muutetaan vaikkapa oikean puolen jotain syöttökerrointa (yhtä), säilyy yhtälön oikea puoli muuttumattomana, jos kerroinmatriisin \mathbf{K} syöttökertoimen indeksiä vastaavan pystyrivin tekijät muutetaan käänteisesti. Kun vastaava syöttökertoimen muutos tehdään vasemmalle puolelle, täytyy muutetut matriisin \mathbf{K} tekijät palauttaa ja yhtälö vastaa erisuurten syöttöjen tapausta.

Lopuksi on syytä toistaa korjaukseen tarvittavat kaavat lyhyesti. Korjausmatriisi \mathbf{K} saadaan mitattujen \mathbf{F}^{mit} ja tavoitesuuntakuvioiden \mathbf{F}^{tav} matriiseista pseudoinvarianssin avulla

$$\mathbf{K} = \mathbf{F}^{tav} \text{pinv}(\mathbf{F}^{mit}) \quad (\text{III.6})$$

Korjausmatriisi on riippumaton syöttökertoimista ja siitä, ovatko nolasta poikkeavat syöttökertoimet huomioitu suuntakuvioiden matriiseissa, molemmissa samalla tavoin. Korjatut syöttökertoimet saadaan kaavalla

$$\vec{\mathbf{a}}_{\text{korj}} = \mathbf{K}^T \vec{\mathbf{a}} \quad (\text{III.7})$$

ja korjattu suuntakuvio kaavalla

$$\vec{\psi}^{\text{korj}} = \vec{\mathbf{a}}_{\text{korj}}^T \cdot \mathbf{F}^{mit} . \quad (\text{III.8})$$

On huomattava, että suurimmassa osassa ylläolevia yhtälöitä yhtäsuuruusmerkki on voimassa vain virheen pienimmän neliösumman mielessä.

LIITE IV Kyt Kentämatriisi ja energiaperiaate

Antenniryhmän syöttöportteihin tuleva teho P_{sis} ja niistä takaisinheijastuva teho P_{heij} voidaan esittää syöttöjohdoissa etenevien signaalien vektorin \mathbf{a} ja sirontamatriisin \mathbf{S} avulla

$$P_{\text{sis}} = |\bar{\mathbf{a}}|^2 = \bar{\mathbf{a}}^{*T} \bar{\mathbf{a}} \quad (\text{IV.1})$$

$$P_{\text{heij}} = |\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}}|^2 = (\mathbf{S}\bar{\mathbf{a}})^{*T} \mathbf{S}\bar{\mathbf{a}} \quad (\text{IV.2})$$

Avaruuteen edennyt teho voidaan syötöllä \mathbf{a} kirjoittaa vähentämällä syötetystä tehosta takaisin heijastunut teho

$$P_{\text{avar}} = |\mathbf{a}|^2 - |\mathbf{S}\mathbf{a}|^2 = \mathbf{a}'\mathbf{a} - \mathbf{a}'\mathbf{S}'\mathbf{S}\mathbf{a} = \mathbf{a}'(\mathbf{I} - \mathbf{S}'\mathbf{S})\mathbf{a}, \quad (\text{IV.3})$$

, missä \mathbf{I} on yksikkömatriisi.

Avaruuteen etenevää signaalia voidaan kuvata myös ns. kytkentämatriisilla \mathbf{C}

$$\mathbf{C} = \mathbf{I} + \mathbf{S} \quad (\text{IV.4})$$

Yhden siirtojohdon ja rajapinnan tapauksessa kytkentämatriisi vastaa signaalin osuutta rajapinnan takana. Kyt Kentämatriisin mukainen avaruuteen kytketty teho on

$$P_{\text{kytk}} = |(\mathbf{I} + \mathbf{S})\mathbf{a}|^2 = \mathbf{a}'(\mathbf{I} \pm \mathbf{S})'(\mathbf{I} \pm \mathbf{S})\mathbf{a} = \mathbf{a}'(\mathbf{I} \pm \mathbf{S} \pm \mathbf{S}' \pm \mathbf{S}'\mathbf{S})\mathbf{a}. \quad (\text{IV.5})$$

Merkki \pm tarkoittaa tässä sitä, että huomioidaan sirontamatriisille mahdollisesti jokin muu vaihe kytkentämatriisissa kuin kaavassa (IV.3). Tarkastelu voidaan helposti yleistää tapaukseen, missä sirontamatriisin edessä on jokin kompleksinen vakiotermi.

Jos hajoitetaan sirontamatriisi reaali- ja kompleksiosiin seuraavasti

$$\mathbf{S} = \mathbf{T} + i\mathbf{U} \quad (\text{IV.6})$$

voidaan kirjoittaa ylläolevan yhtälön tekijöille

$$\mathbf{S}'\mathbf{S} = (\mathbf{T} - i\mathbf{U})(\mathbf{T} + i\mathbf{U}) = \mathbf{T}^2 + \mathbf{U}^2 + i(\mathbf{T}\mathbf{U} - \mathbf{U}\mathbf{T}) = \mathbf{T}^2 + \mathbf{U}^2 \quad (\text{IV.7})$$

$$\mathbf{S}' + \mathbf{S} = 2\mathbf{T} \quad (\text{IV.8})$$

Termi $\mathbf{T}\mathbf{U} - \mathbf{U}\mathbf{T}$ on nolla, koska matriisit \mathbf{U} ja \mathbf{T} ovat symmetrisiä, mikä seuraa siitä, että sirontamatriisi on symmetrinen, eli resiprookkinen. Resiprookkisuus ja tehon reaaliarvoisuus yhtälössä (IV.3) siis liittyvät toisiinsa. Voimme kirjoittaa lausekkeet uudestaan muodossa

$$P_{\text{avar}} = \mathbf{a}'(\mathbf{I} - \mathbf{T}^2 - \mathbf{U}^2)\mathbf{a} \quad (\text{IV.9})$$

$$P_{kytk} = \mathbf{a}'(\mathbf{I} + (\pm 2\mathbf{T} + \mathbf{T}^2 + \mathbf{U}^2))\mathbf{a} \quad (\text{IV.10})$$

Yllä olevia yhtälöitä ei saada samoiksi millään normiltaan pienillä matriiseilla \mathbf{T} ja \mathbf{U} . Avaruuteen kytkeytyvän signaalin sovittaminen muuhun kuin 50 ohmiin, johtaa ristiriitaan, kun oletetaan, että sirontaa ei ole.

LIITE V Suuntakuviomittauksen täydellinen sirontamatriisi

Säteilykuvio 1. kompleksinen, polarisaatiot sisältävä suuntakuviio mitataan täydellisenä kaikkiin suuntiin kahdella polarisaatiolla. Mittaus tarkentuu rajatta mitattavien suuntien määrän kasvaessa. Kaikkiin mitattaviin suuntiin voidaan asettaa portti, johon säteilykuvion mittauksessa käytetty vertailuantenni on kytketty. Valitsemme mukavuussyistä kuvitellun tilanteen niin, että ryhmäantenni toimii lähetysantennina. Jos antennin läheisyydessä ei ole vaimentavia tekijöitä, voidaan mittaus kalibroida niin, että sitä vastaa häviötön moniportti. Voimme merkitä sitä laajennetulla sirontamatriisilla \mathbf{S}^{laaj} seuraavasti

$$\mathbf{S}^{\text{laaj}} = \begin{pmatrix} (\mathbf{S})_{NxN} & (\mathbf{F})_{NxM} \\ (\mathbf{F}^{*T})_{MxN} & (\mathbf{0})_{MxM} \end{pmatrix}, \quad (\text{V.1})$$

missä \mathbf{F} on antenniryhmän (mahdollisimman) täydellisten suuntakuvioiden matriisi ja \mathbf{S} sen sirontamatriisi. Koska matriisissa \mathbf{S}^{laaj} kaikki pystyrivit ovat keskenään kohtisuorassa, eivät suuntakuviot \mathbf{F} voi olla ortogonaalisia, jos sirontamatriisi \mathbf{S} ei ole ortogonaalinen. Huolestuttavaa mallissa on se, että samasta syystä nolllalla merkitty matriisi ei voi olla nolllamatriisi.¹

Sirontamatriisin \mathbf{S} ominaisvektorit ovat kohtisuorassa keskenään. Ominaisvektoreita vastaavat suuntakuviot ovat tästä syystä häviöttömässä² tilanteessa myös keskenään kohtisuorassa. Koska kaavat ovat hankalia, eikä tiukka todistus ole välttämätön, voidaan perustella asiaa sanallisesti. Koska kahden ominaisvektorin lineaarikombinaation aiheuttama syöttöportista heijastunut energia lasketaan erikseen ominaisvektoreiden itseisarvojen neliöiden summilla, täytyy vastaavan päteä suuntakuviioihin. Päinvastainen johtaisi energiaperiaatteen rikkoutumiseen.

¹ On myös vaikea toteuttaa mittaus lähettämällä vertailuantennilla niin, että mitään ei mene mitattavan ryhmän ohi.

² Häviöllisessä tapauksessa voidaan saada täydellinen laajennettu sirontamatriisi lisäämällä mukaan häviöportti ja ratkaisemalla sen kertoimet ortonormaalisuusehdosta, jolloin saadaan sirontamatriisiin yksi dimensio lisää. Häviöporttia ei voi syöttää (kuin "tuonpuoleisesta") eikä sen sirontakertoimien vaihetekijää ratkaista. Häviöllisessä tapauksessa, esimerkiksi käytettäessä vaimennuslevyjä ei laajennettu sirontamatriisi (ilman häviöporttia) voi olla ortogonaalinen. Tästä syystä ominaissyöttövektoreita vastaavat täydelliset säteilykuvioit eivät voi myöskään olla ortogonaalisia.

LIITE VI Pienen apertuurin malli ja antennien epäsovitus

Oletetaan tilanne, jossa on kaksi antennia, antennit 1 ja 2. Johdetaan lauseke sirontamatriisin \mathbf{S} ja apertuurien jännitteiden välisille kertoimille \mathbf{S}^{ap} , kun apertuuri oletetaan fyysiseksi rajapinnaksi.

Sirontaparametrit S_{ij} määritetään jänniteaalloilla

$$V_1^- = S_{12} V_2^+ \quad (\text{VI.1})$$

Apertuurien jännitteiden V_i välinen suhde, kun heräte on portissa 2 määritellään

$$V_1 = S_{12}^{ap} V_2 \quad (\text{VI.2})$$

voidaan kirjoittaa

$$V_1 = V_{1i}^+ + V_{1i}^- = V_1^+ (1 + S_{11}) = V_1^- (1 - S_{11}) \quad (\text{VI.3})$$

$$V_2 = V_2^+ (1 + S_{11}) \quad (\text{VI.4})$$

Yhdistelemällä saadaan lauseke sirontaparametrien ja apertuurikytkentöjen välille

$$S_{12}^{ap} = \frac{S_{12}(1 + S_{11})}{1 - S_{22}} \approx (1 + S_{22})S_{12}(1 + S_{11}), \quad (\text{VI.5})$$

missä viimeinen likimääräislauseke on resiprookkinen.

Kytkenän tapauksessa olettamalla apertuuri fyysiseksi rajapinnaksi voidaan kirjoittaa vastaanotetulle (+) ja lähetetylle (-) suuntakuviolle likimääräislausekkeet häiritsemättömien suuntakuvioiden $f(\theta)$ avulla

$$\tilde{f}_1^+(\theta) = f_1(\theta)(1 + S_{11}) + f_2(\theta)(1 + S_{22})S_{12}^{ap} \quad (\text{VI.6})$$

$$\tilde{f}_1^-(\theta) = f_1(\theta)(1 - S_{11}) + f_2(\theta)(1 - S_{22})S_{12}^{ap} \quad (\text{VI.7})$$

Resiprookkisuu den perusteella nämä ovat samat., jolloin voidaan valita neutraali yhtälö

$$\tilde{f}_1^-(\theta) = f_1(\theta) + f_2(\theta)S_{12}^{ap} \quad (\text{VI.8})$$

jolloin alkuperäiset suuntakuviot saadaan yhtälöstä

$$\mathbf{F} = (\mathbf{I} + \mathbf{S}^{ap})^{-1} \tilde{\mathbf{F}} \quad (\text{VI.9})$$