

Sami Holopainen

EMC-huoneen kalibrointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

5.5.2015

Tekijä Otsikko	Sami Holopainen EMC-huoneen kalibrointi
Sivumäärä Aika	39 sivua + 6 liitettä 5.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka
Ohjaaja	Laboratorioinsinööri Teemu Mahrberg
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena saada Metropolia Ammattikorkeakoulun Bulevardi 31 toimipisteessä sijaitseva EMC-laboratorio kalibrointia IEC/EN 61000-4-3 standardin mukaisesti. Kalibrointia tarvittiin, jotta EMC-laboratorion markkinointi olisi vakuuttavampi ja oppilaitos saisi tämän kautta enemmän asiakkaita vuokraamaan laboratoriota.</p> <p>Kalibrointi mittaukset tehtiin standardin mukaisesti EMC-huoneessa 4-piste mittauksina. Mittauksissa käytettiin immuniteetti mittauksiin suunniteltua antennia ja kenttäanturia.</p> <p>Tuloksista voitiin päätellä, että mittaukset eivät läpäisseet standardin vaatimuksia, vaikka ne olivat erittäin lähellä sitä. Ongelmat voitaisiin korjata, jos EMC-laboratorioon asennettaisiin vaimennuksia koko seinä- ja kattopinta-alalle.</p> <p>Mittauksien tuloksia ei luultavasti hyödynnetä, sillä Metropolia Ammattikorkeakoulu on muuttamassa Bulevardin toimipisteestä uusiin tiloihin, mutta tästä pitäisi kuitenkin ottaa opiksi uuden toimipisteen EMC-tiloja suunniteltaessa.</p>	
Avainsanat	EMC, immuniteettitestaus, SAC, FAC, kalibrointi, IEC 61000-4-3

Author Title	Sami Holopainen Calibration of EMC room
Number of Pages Date	39 pages + 6 appendices 5 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructor	Teemu Mahrberg, Laboratory Engineer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to calibrate an EMC-laboratory situated at Metropolia University of Applied Sciences Bulevardi 31 building according to IEC/EN 61000-4-3 standard. Calibration was needed so that the marketing of EMC-laboratory would be more convincing and the school would get more clients that would rent the laboratory space.</p> <p>Calibrations were made as a 4-point measurements according to standard. Antenna and field sensor were used in the measurements which are designed for immunity measurements.</p> <p>The results show that the measurements did not pass requirements of the standard, even though they were very close. The problems could be fixed if appropriate absorbers would be fitted to the EMC-laboratory.</p> <p>Results of the measurements are not probably going to be utilized as Metropolia is moving from Bulevardi's office to a new location. It should be noted that the results of this thesis should be kept in mind when designing the EMC-laboratory of the new office.</p>	
Keywords	EMC, immunity test, SAC, FAC, calibration, IEC 61000-4-3

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	EMC-teoriaa	1
2.1	Sähkömagneettinen kenttä ja säteily	1
2.1.1	Maxwellin yhtälöt	3
2.1.2	Lähi- ja kaukokenttä	4
2.2	Antennikäsitteitä	6
2.2.1	Fresnellin vyöhyke	6
2.2.2	Linkkiyhtälö	7
2.2.3	Antennien yleiset häiriöt	7
2.2.4	Antennikerroin	9
2.2.5	Seisovanaallonsuhde	10
2.3	Kaiuton huone ja vaimentimet	11
2.3.1	Kapeakaistaiset vaimentimet	13
2.3.2	Laajakaistaiset vaimentimet	14
2.3.3	Vaimentimien toiminta periaatteet	16
3	Standardi IEC/EN 61000-4-3	17
3.1.1	Testitasot	18
3.1.2	Testilaitteisto	18
3.1.3	Testauspaikan kuvaus	19
3.1.4	Tasainen sähkökenttä	20
3.1.5	Kalibrointi	21
4	Laitteisto	21
4.1	Lähetysantenni	21
4.2	Kenttäanturi ja vastaanotin	22
4.3	Signaaligeneraattori	23
4.4	Radiotaajuusvahvistin	24

4.5	Testauspaikka	24
5	Kalibrointi mittaukset	25
6	Tulokset	28
6.1	Kalibrointi	28
6.2	Parannus ehdotukset	29
6.3	Parannusten käsittely	35
7	Yhteenveto	37
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. BiConiLog antennin sähköiset ja fysikaaliset ominaisuudet	
	Liite 2. Ensimmäisen kalibrointi mittauksen tulokset kuvana	
	Liite 3. Ensimmäisen kalibrointi mittauksen tulokset numeroina	
	Liite 4. Toisen kalibrointi mittauksen tulokset kuvana	
	Liite 5. Toisen kalibrointi mittauksen tulokset numeroina	
	Liite 6. Amplifier Research Model 25W 1000 vahvistimen tekniset määrytykset	

Lyhenteet

ANSI	American National Standards Institute. ANSI on Yhdysvaltojen virallinen edustaja ISO:ssa ja IEC:ssä.
CISPR	International Special Committee on Radio Interference. CISPR 16 määrittelee häiriön tuottamis EMC-testeissä käytettävän laitteiston vaatimukset.
EMC	Electromagnetic compatibility. Elektromagneettinen yhteensopivuus.
EMI	Electromagnetic Interference. Sähkömagneettinen häiriö.
EUT	Equipment under test. Testattava laite.
FAC	Fully anechoic chamber. Huone, joka on täysin suojattu sähkömagneettiselta säteilyltä.
IEC	International Electrotechnical Commission. Sähkötekniikan standardeja hallitseva kansainvälinen elin.
SAC	Semi-Anechoic chamber. Huone, joka on suojattu elektromagneettiselta säteilyltä, seinistä ja katosta.
UFA	Uniform field area. Tasainen sähkömagneettinen kenttä.
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio. Seisovanaallonsuhde.

1 Johdanto

Elektronisia laitteita käytetään nykyään joka puolella, jotta kaikki elektroniset laitteistot toimisivat virheettömästi niiden täytyy kestää sähkömagneettisia häiriöitä tietty määrä, ja olla myös aiheuttamatta niitä liikaa. Tässä auttaa IEC:n (*International Electrotechnical Commission*) standardit, joista tärkein tämän insinööriyön aiheeseen liittyen on IEC/EN 61000-4-3 (*European Norm, EN*), joka kertoo, miten testejä tehdään. Se on suunniteltu säteileviä, radio-taajuisia, sähkömagneettisen kentän immuniteetti testejä varten ja laitteiden häiriöttömän toiminnan toteamiseksi.

Työssä oli tavoitteena saada Metropolia Ammattikorkeakoulun Bulevardi 31 toimipisteessä sijaitseva EMC (*Electromagnetic Compatibility*) -mittauslaboratorio kalibroitu IEC/EN 61000-4-3 standardin mukaisesti.

Testit on tehty EMC-suojatussa huoneessa, kyseisessä huoneessa ei voi tehdä testejä standardin vaatimilla riittävän suurilla kentän voimakkuuksilla, sillä käytettävissä oleva vahvistin ei ole tarpeeksi tehokas. Esitestaus on kuitenkin mahdollista tehdä 9 V/m kentän voimakkuuksilla. Standardin vaatimia antennin korkeuserojen muutoksia ei myöskään pystytä tekemään.

2 EMC-teoriaa

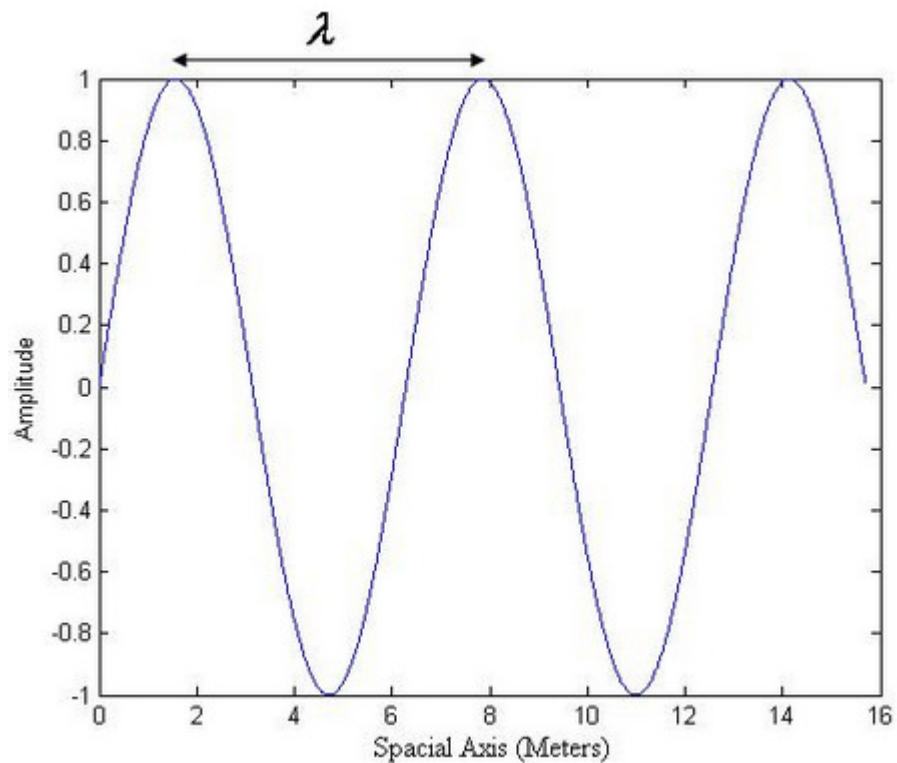
2.1 Sähkömagneettinen kenttä ja säteily

Kaikki sähkömagneettiset aallot (*Electromagnetic Wave, EM wave*) kulkevat tietyllä nopeudella tyhjiössä (ilmassa/avaruudessa). Se nopeus on valonnopeus, joka on suunnilleen $3 * 10^8 \frac{m}{s}$. Sähkömagneettisen aallon kulkiessa muualla kuin tyhjiössä eli dielektrisessä materiaalissa sen nopeus pienenee suhteessa aineen suhteelliseen permittiivisyyteen kaavan 1 mukaisesti:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

jossa v on sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus, c_0 on valon nopeus tyhjiössä ja ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys tai toiselta nimeltään dielektrinen vakio.

Sähkömagneettinen aalto koostuu aina sähkö- ja magneettikentästä, kumpaakaan ei voi olla olemassa erikseen. Nämä aallot etenevät siniaaltomuodossa kuvan 1 mukaisesti:



Kuva 1. Siniaallon amplitudi suhteessa etäisyyteen [Bevelacqua 2014b].

Sähkömagneettisia aaltoja käsiteltäessä käytetään aallonpituus käsitettä, jonka suhde taajuuteen ja valonnopeuteen on seuraavanlainen:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2)$$

jossa λ on aallonpituus, v on sähkömagneettisen säteilyn nopeus väliaineessa ja f taajuus.

Sähkö- ja magneettikentät määritellään tarkemmin Maxwellin yhtälöissä.

2.1.1 Maxwellin yhtälöt

Magneettikentän luovat virta ja muuttuvat sähkökentät ja sähkökentän vastaavasti jännitepotentiaalit ja muuttuvat magneettikentät. Näiden johtuminen esitetään Maxwellin yhtälöissä jotka ovat kaavoissa 3, 4, 5 ja 6:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

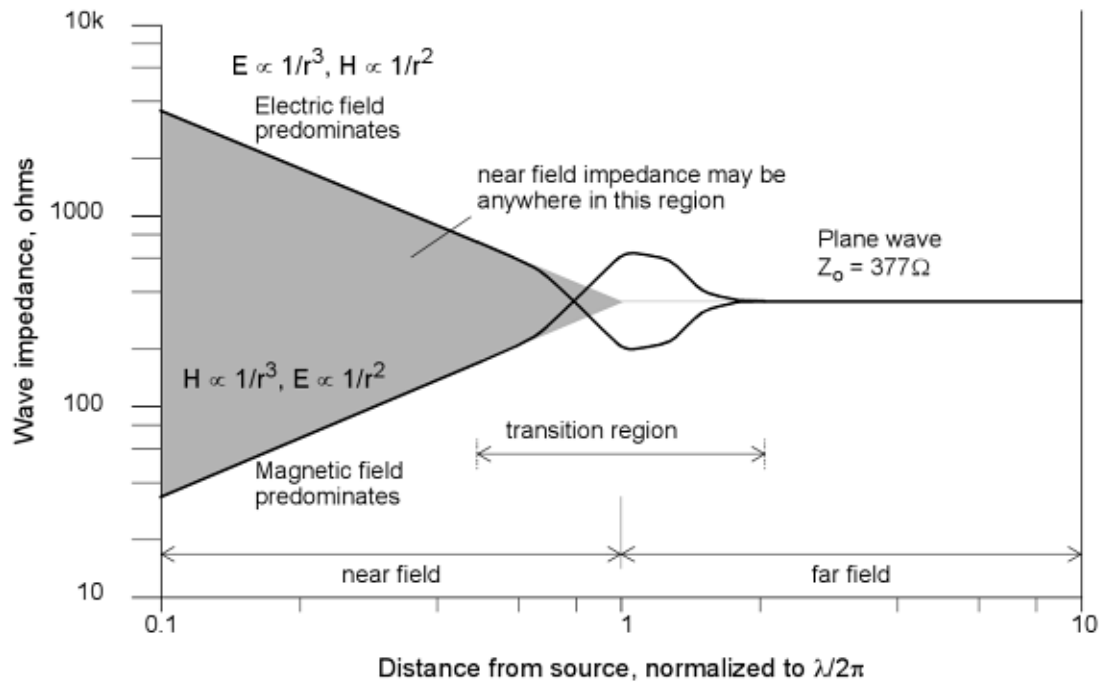
$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (6)$$

jossa $\nabla \cdot$ on divergenssi (*divergence*), $\nabla \times$ on roottori (*curl*) E on sähkökentän voimakkuus, B on magneetti vuon tiheys, t on aika, J on virran tiheys, ρ on varaustiheys, μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, ja ∂ osittaisderivaattaoperaattori.

Kaavassa 3 on Gaussin laki sähkölle, 4 on Gaussin laki magnetismille, 5 on Faradayn laki johtuvuudelle ja 6 on Ampère-Maxwellin laki. Näillä kaavoilla voidaan laskea sähköisten varausten aiheuttamat sähkökentät sekä virtojen aiheuttamat magneettikentät.

Gaussin lait kuvaavat sitä, miten sähkö- ja magneettikentät kulkevat/virtaavat pois päin lähteestä ja se esitetään divergenssioperaattorilla ($\nabla \cdot$). Sähkökenttä alkaa aina sähkövarauksesta ja päättyy johonkin toiseen sähkövaraukseen joten sen divergenssi on suurempi kuin 0, kun taas magneettikenttä palaa aina samaan pisteeseen, mistä se lähtee ja sen takia sen divergenssi on 0. Faradayn ja Amperen laki kuvaavat sähkö- ja magneettikenttien syntyä ja kiertoa lähteen ympärillä, mikä esitetään roottori operaattorilla ($\nabla \times$). Faradayn laki kertoo, että ajassa muuttuva magneettikenttä aiheuttaa ympärilleen sähkökentän ja toisin päin. Amperen laki kertoo, että virrantiheys aiheuttaa ympärilleen magneettikentän ja ajassa muuttuva sähkökenttä aiheuttaa myös ympärilleen magneettikentän.[Gronschorek & Vack 2009: 20];[Bevelacqua 2012.]

2.1.2 Lähi- ja kaukokenttä



Kuva 2. Lähi- ja kaukokentän suhde etäisyyteen säteilyn lähteestä. [Tim Williams 2007: 231].

Lähi- ja kaukokenttä (*near- and far-field*) ovat fyysisiä sähkömagneettisia alueita, joissa säteilyn luonne on erityyppinen. Lähikenttä voidaan jakaa reaktiiviseen ja säteilevään alueeseen, joilla on rajaehto, joka määrittää millä kaavalla ne lasketaan. Jos antennin maksimikoko tai lähettävän haaran pituus on suurempi kuin aallonpituus, silloin reaktiivisen alueen raja on kaavan 7 osoittamassa paikassa, säteilevä lähikenttä sijaitsee kaavan 8 mukaisesti, muuten reaktiivisen alueen raja on kaavan 9 osoittamassa paikassa, ja säteilevä lähikenttä sijaitsee kaavan 10 mukaisesti:

$$0,62 * \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (7)$$

$$0,62 * \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < R < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (8)$$

$$\frac{\lambda}{2\pi} \quad (9)$$

$$\frac{\lambda}{2\pi} < R < 2\lambda \quad (10)$$

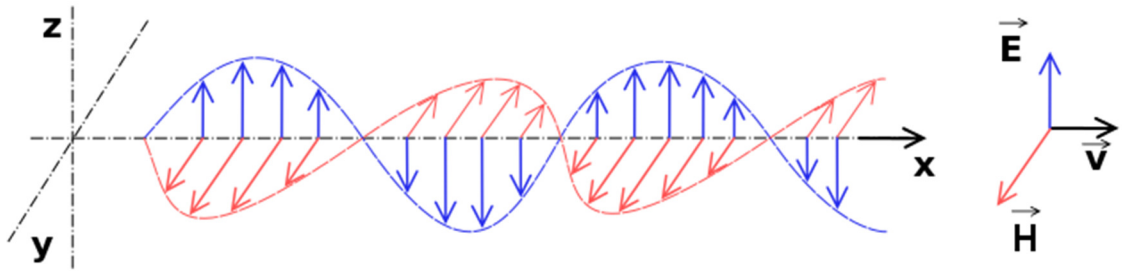
jossa D on antennin/häiriölähteen maksimikoko tai lähettävän haaran pituus, λ on aallonpituus ja R on säteilevä lähikenttä tai fresnellin alue (*radiating near field* tai *fresnel region*).

Lähikentässä säteilyn luonne on enemmän induktiivista tai kapasitiivista ja nämä vaikutukset aiheutuvat virroista ja varauksista antennin pinnalla, näistä johtuen magneettikentän voimakkuus on käänteisesti suhteessa matkan kuutioon ($1/r^3$) ja sähkökentän voimakkuus käänteisesti suhteessa matkan neliöön ($1/r^2$). Kaukokenttään siirryttäessä sähkö- ja magneettikentät muodostuvat sähkömagneettiseksi tasoaloksi, kentät tukevat toinen toisiaan ja pitävät kokonaisenergiansa samassa suhteessa yhtä aikaa, kun niiden energiataso pienenee käänteisesti suhteessa matkaan ($1/r$), tällöin sen vaikutusalue on häviöttömässä väliaineessa huomattavasti suurempi kuin lähikentän induktiivisten ja kapasitiivisten kenttien. Tyhjiössä sähkömagneettinen kenttä kulkee valon nopeudella, joka on suunnilleen $3 * 10^8 \frac{m}{s}$ mutta dielektrisessä materiaalissa kentän nopeus pienenee kaavan 11 mukaisesti:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

jossa v on sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus, c_0 on valon nopeus tyhjiössä ja ϵ_r on väliaineen dielektrinen vakio.

Reaktiivisella alueella, joka on antenna lähimpänä sähkö- ja magneettikentät ovat eri-vaiheessa 90° :een kulmassa [Bevelacqua 2014a]. Joskus myös oletetaan, että on erikseen muutoskenttä, joka on lähi- ja kaukokentän välissä, tosin tämä muutoskenttä luetaan yleensä säteilevään lähikenttään. Säteilevällä alueella, joka on reaktiivisen lähikentän ja kaukokentän välissä, reaktiiviset aallot eivät enää hallitse ja säteilevät aallot alkavat hallitsemaan. Tällä alueella säteilykuviot vaihtelevat paljon, koska reaktiiviset lähikenttäaallot alkavat häviämään ja varsinaiset kaukokentän tasoallot alkavat tulemaan enemmän esiin. Kaukokentässä tasoalto muodossa olevat sähkö- ja magneettikentät ovat 90° kulmassa toisiinsa ja se havainnollistetaan kuvassa 3:



Kuva 3. Kaukokentän sähkömagneettinen tasoalto koostuu sähköisistä E ja magneettisista H komponenteista [Electromagnetic radiation 2014].

Lähikentässä sähkö- ja magneettikentän voimakkuuden suhde vaihtelee aseman mukaisesti kun taas kaukokentässä niiden suhde pysyy samana. Kaukokentän alueella tasoallon aaltoimpedanssi on 377Ω , joka saadaan kaavasta 12:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (12)$$

jossa tyhjiön permeabiliteetti $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$ ja permittiivisyys $\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \text{ H/m}$.

2.2 Antennikäsitteitä

2.2.1 Fresnellin vyöhyke

Fresnellin vyöhyke (*Fresnel zone*) on tila kahden antennin välillä (näköyhteyden ympärillä (*Line of Sight, LoS*)) ja tätä ei tule sekoittaa fresnellin alueeseen (*Fresnel region*) joka on tila lähettävän antennin ympärillä. Fresnellin vyöhykkeitä on useita, joista ensimmäisessä kulkee suurin osa antennien välittämästä tehosta. Tämä alue täytyy pitää suurimmaksi osaksi vapaana, jottei signaaliin tulisi häiriöitä. Kuitenkin yleensä nyrkki-sääntönä pidetään että vähintään 60 % Fresnellin vyöhykkeestä täytyy pitää vapaana tai mieluummin lähemmäs 80 %, jotta signaali olisi tarpeeksi häiriö/vaimennus vapaa.

Fresnellin vyöhyke voidaan laskea kaavalla 13 missä tahansa kohtaa antennien välillä, jos tarvitaan vain ensimmäisen fresnellin vyöhykkeen säde suurimmillaan, eli keskikohdassa se voidaan laskea lyhennetyllä kaavalla 14:

$$F_n = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (13)$$

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (14)$$

jossa F_n on Fresnellin vyöhyke, n on Fresnellin vyöhykkeen numero, λ on aallonpituus, d_1 on matka lähettävästä antennista, d_2 on matka vastaanottavasta antennista, r on fresnellin vyöhykkeen säde, D on antennien välimatka metreissä ja f on taajuus MHz:ssä.

2.2.2 Linkkiyhtälö

Linkkiyhtälön kehitti Harald T. Friis, josta nimi Friis Transmission Formula tulee. Tämä yhtälö on antenniteorian perusyhtälöitä, jolla voidaan kuvata antennien vuorovaikutusta keskenään. Friisin yhtälö kuvaa tehon välityksen antennilta toisella huomioiden myös signaalin heikkenemisen matkan suhteen. Friisin yhtälö esitetään kaavassa 15:

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d^2} \right)^2 \quad (15)$$

jossa P_R on vastaanotettu teho, P_T on lähetetty teho, G_T on lähettävän antennin vahvistus, G_R on vastaanottavan antennin vahvistus, ja d on antennien välinen etäisyys.

Usein todellisissa tilanteissa signaalin esteinä on taloja, puita ym. ja silloin signaalin vaimeneminen on suurempi kuin käänteinen matkan neliö. Näissä tilanteissa käytetään jopa etäisyys potenssiin 4 jakajaa ($1/d^4$). Linkkiyhtälö toimii vain kaukokentässä jossa ilman aaltoimpedanssi on 377Ω , ja vastaanotettu radiosäteily on niin sanottua passiivista säteilyä. EMC-mittausolosuhteissa normaali Friisin yhtälö on normaalisti pätevä, sillä ollaan tilassa, jossa etenemisvaimennuksen lisäksi ei ole muita linjahäviöitä, jotka vaikuttaisivat tähän yhtälöön.

2.2.3 Antennien yleiset häiriöt

Antenna Temperature

Antennin sijainnin taustahäiriö (*Antenna Temperature*) tarkoittaa, miten paljon tietyssä ympäristöstä kehittyä taustahäiriöitä, jotka vaikuttavat antenniin. Antenneilla ei ole tiettyä häiriö arvoa, vaan se riippuu vahvistuksesta ja ympäristöstä. Esimerkiksi yötaivaan häiriölämpö on 4 Kelviniä. Antennin häiriölämpö riippuu siis myös siitä, mihin päin se on suunnattu. Matemaattisesti häiriölämpö määritellään kaavassa 16:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi R(\theta, \phi) T(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (16)$$

jossa T_A on lähettävän antennin häiriö lämpö, $R(\theta, \phi)$ on antennin säteily kuvio, $T(\theta, \phi)$ on maan fyysinen häiriölämpö.

Tämänmukaisesti antennin häiriölämpö, joka on antennin ympärillä, integroidaan koko ympyrän alalta ja painotetaan antennin suuntaavuus kuvion mukaisesti.

Häiriöteho (P_{TA}) saadaan puolestaan antennin häiriölämmöstä kaavalla 17:

$$P_{TA} = KT_A B \quad (17)$$

jossa K on Boltzmanin vakio $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K (Joule/Kelvin), T_A on ympäristön lämpötila, B on taajuuskaista.

Tämä on antennin vakio tehohäiriö, joka ei muutu, kun antenni on tietyssä paikassa, toisin kuin häiriökuvio (*Noise Figure*), joka muuttuu tehon muuttuessa.

Tasoaaltojen polarisaatio

Sähkömagneettinen tasoaalto kulkee tiettyyn suuntaan ja siihen suuntaan 90°:een kulmassa ovat sähkökenttä ja magneettikenttä, jotka ovat myös toisiinsa nähden 90°:een kulmassa. Tasoaallon asento (kulma) määräytyy antennin asennon mukaisesti, jos esim. lähetys antenni on horisontaalissa asennossa ja vastaanottava antenni vertikaalissa niin silloin vastaanottava antenni on 90°:een kulmassa tulevaan tasoaaltoon, eikä näin ollen ota mitään vastaan. Jos kummatkin antennit ovat horisontaalisti, niin vastaanotossa ei ole polarisaatiohäviötä (*Polarization loss factor, PLF*). Polarisaatiohäviöt lasketaan kaavalla 18:

$$\cos^2 \phi \quad (18)$$

jossa ϕ on antennien välinen kulma.

Kun tämän perusteella tarkastellaan uudelleen Friis:n yhtälöä, meidän täytyy lisätä siihen PLF-häviö, jotta saadaan todenmukaisempi tulos kaavan 19 mukaisesti:

$$P_R = \cos^2 \phi \times P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d^2} \right)^2 \quad (19)$$

Tämän lisäyksen ansiosta linkkiyhtälö on paljon tarkempi.

2.2.4 Antennikerroin

Antennikerroin (*Antenna factor*, AF) esitetään yleensä sähkökentän suhteen, ja tällöin se kuvaa tarvittavaa sähkökentänvoimakkuutta, joka tarvitaan siihen, että vastaanottavalle antennille tulee 1V:n jännite ja se nähdään kaavassa 20, antennikerroin voidaan myös esittää kaavan 21 muodossa, jolloin ei tarvita sähkökentänvoimakkuutta vaan käytetään taajuutta sekä antennin vahvistusta.

$$AF = \frac{E}{V} \quad (20)$$

$$AF = \frac{9,73}{\lambda \sqrt{G}} \quad (21)$$

jossa AF on Antennikerroin, E on sähkökentän voimakkuus, V on vastaanotettu jännite, λ on aallonpituus, ja G on antennin vahvistus.

Tämä pitää paikkansa vain, jos sähkökentän ja anturin polarisaatio on sovitettu ja jos tapahtuma on kaukokentässä. Joskus valmistajat antavat eri antennikertoimen lähi- ja kaukokentälle, sillä lähikentän antennikerroin on eri lähikentän reaktiivisten alueen takia.

2.2.5 Seisovanaallonsuhde

Seisovanaallonsuhde (*Standing Wave Ratio*, SWR) on kuvaus siitä, kuinka paljon antennille lähetetystä tehosta saapuu kohteeseensa, ja miten paljon siitä heijastuu takaisin. Heijastumiset johtuvat normaalisti siitä, kun lähde ja kohde eivät ole sovitettu samalle impedanssille. Taajuus vaikuttaa myös sovitukseen ja sitä kautta heijastuksiin.

SWR saadaan heijastussuhteesta (*reflection coefficient*, Γ), joka saadaan mittaamalla Network Analyserilla. Heijastussuhde kuvaa siirtolinjaa pitkin antennille päin syötetyn etenevän aallon amplitudin suhdetta takaisin heijastuneen aallon amplitudiin, joka voidaan laskea myös impedanssisovituksesta. Yleensä heijastussuhteen mittaamisessa käytetään jänniteaaltoa, ja tämän takia seisovanaallonsuhdetta merkitään yleisesti lyhenteellä VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*). Seuraavassa esitetään kaavat 22 ja 23 heijastussuhteelle ja VSWR:lle:

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (22)$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (23)$$

jossa Γ on heijastussuhde, V^- on antennilta palaavan jänniteaallon amplitudi, V^+ on antennille menevän jänniteaallon amplitudi, Z_L on antennin sisäinen vastus, Z_0 on antennille syöttävän piirin sisäinen vastus, ja VSWR on seisovanaallonsuhde.

Jos saatavilla ei ole Network Analyseria ja tarvitsemme heijastussuhteen, voimme invertoida VSWR:n kaavan, josta saamme heijastussuhteen, kaavan 24 mukaisesti ja siitä saadaan tarvittaessa heijastunut teho kaavalla 25 ja sen dB muoto kaavalla 26:

$$|\Gamma| = \frac{1 - VSWR}{1 + VSWR} \quad (24)$$

$$\text{Heijastunut teho (100 \%)} = 100 \times |\Gamma|^2 \quad (25)$$

$$\text{Heijastunut teho (dB)} = 20 \times \log |\Gamma| \quad (26)$$

Taulukossa 1 esitetään vertailu VSWR, Γ , heijastuneen tehon prosentuaalisen muodon ja dB muodon välillä, jotta nähdään ettei niiden välillä ole mitään suhteellista vertailtavuutta.

Taulukko 1. VSWR, Γ , heijastunut tehovertailu. [VSWR vertailu]

Seisovanaallon-suhde VSWR	Heijastussuhde Γ (s11)	Heijastussuhde (dB)	Heijastunut teho
1	0	∞	0
1.1	0.0454	26.848	0.0021
1.2	0.0909	20.827	0.0083
1.4	0.1667	15.563	0.0278
1.6	0.2307	12.736	0.0532
1.8	0.2857	10.881	0.0816
2	0.3333	9.542	0.1111
3	0.5000	6.020	0.2500
4	0.6000	4.436	0.3600
5	0.6667	3.521	0.4445
10	0.8181	1.743	0.6693
20	0.9047	0.8693	0.8185
50	0.9607	0.3474	0.9229
100	0.9801	0.1737	0.9606

Niin kuin taulukosta 1 voitiin havaita, että VSWR on täysin epälineaarissa suhteessa Γ :een ja sen kautta myös heijastuneeseen tehoon.

2.3 Kaiuton huone ja vaimentimet

Kaiuton huone (*Anechoic chamber*) on ns. vuorattu metallilla, jotta ulkoiset häiriöt eivät pääse sisään. Huoneen sisällä antennin muodostamat sähkömagneettiset kentät heijastuvat osuttuaan kiinteisiin metallipintoihin ja tämä ilmiö on erittäin ongelmallinen. Heijastuksien takia EMC-mittaus huoneisiin täytyy asentaa vaimennuksia, jotta siellä saataisiin aikaiseksi tasainen sähkömagneettinen kenttä, ja siihen tarkoitukseen käytetään matalakaistaisia vaimentimia vaimentamaan alle 1 GHz:n taajuuksia ja laajakais-
taisia vaimentimia vaimentamaan korkeampia taajuuksia. Kaiuttomat huoneet voidaan

jakaa kahteen pääasialliseen luokkaan, jotka ovat *Semi-Anechoic chamber* (SAC) ja *Fully-Anechoic chamber* (FAC). SAC on suojattu vaimentimilla seinistä ja katosta, mutta sen lattia on maadoitettu, kun taas FAC on suojattu vaimentimilla seinistä, katosta ja lattiasta. SAC:t ovat yleensä pieniä alle 10 m:n kanttiinsa olevia suojattuja huoneita, joita käytetään yleensä matala taajuuksiin mittauksiin, kun taas FAC:a käytetään kaikenlaisiin mittauksiin mutta pääasiallinen käyttötarkoitus on korkeataajuuksiset mitaukset, koska niitä ei voi luotettavasti tehdä SAC:ssa.

Vaimentimet koostuvat yleensä muotista jonka sisällä on varsinainen aine, joka absorboi sähkö- ja/tai magneettikenttiä. Muotin materiaali valitaan kestävyuden mukaisesti. Vaimentavat aineet lajitellaan niiden magneettisen permeabiliteetin ja sähköisen permittiivisyyden mukaisesti. Permeabiliteetti kuvaa materiaalin vaikutusta sähkömagneettikentän magneettisen komponentin absorptio kykyyn, joka esitetään kaavassa 27 ja siitä saadaan häviö tangentti (*loss tangent*), joka esitetään kaavassa 28:

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' \quad (27)$$

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (28)$$

jossa μ' permeabiliteetin reaali osa, μ'' on permeabiliteetin imaginääri osa ja $\tan \delta_m$ on häviötangentti.

Mitä suurempi häviö tangentti, sitä enemmän sähkömagneettinen aalto vaimentuu, kun se kulkee materiaalissa. Seuraavassa esitetään sähkökentän vaimentavia ominaisuuksia kuvaavat permittiivisyys ja sen häviötangentti kaavoissa 29 ja 30:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - \varepsilon'' \quad (29)$$

$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (30)$$

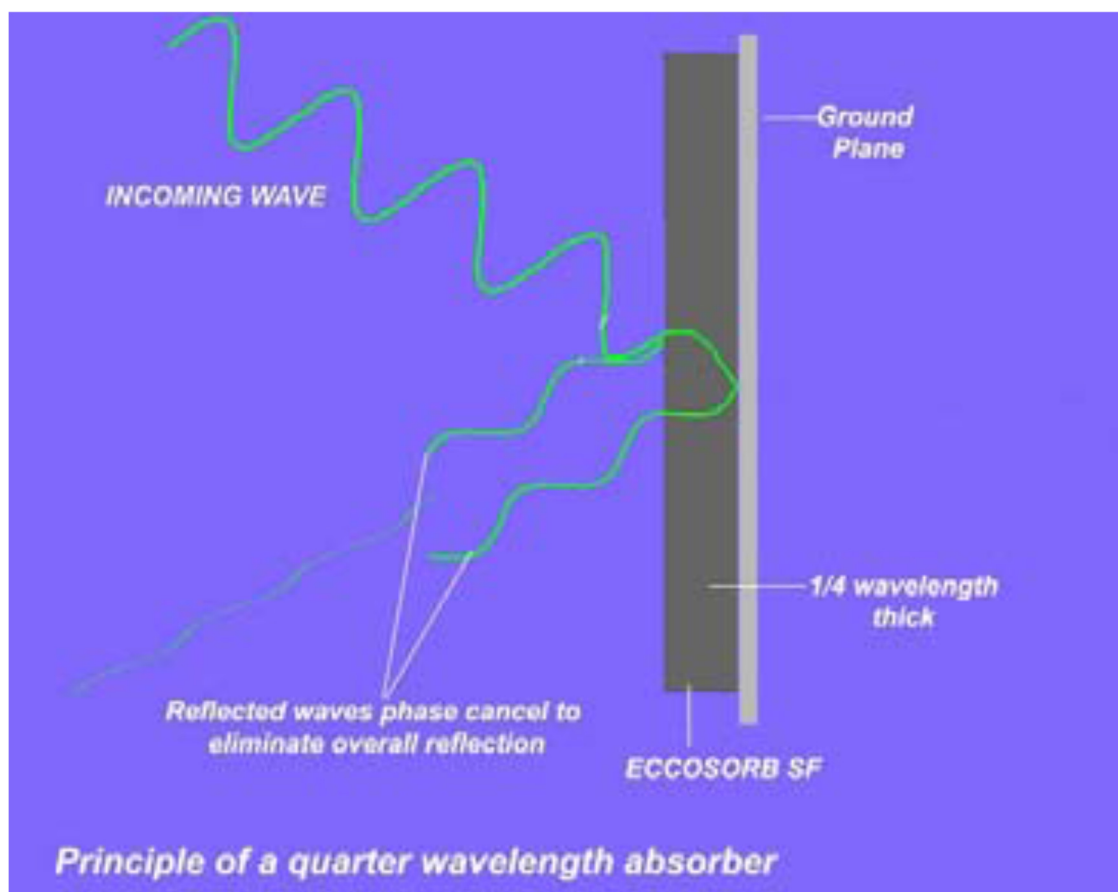
jossa ε' permittiivisyyden reaali osa, ε'' on permittiivisyyden imaginääriosa ja $\tan \delta_e$ on häviö tangentti.

Vaikka permittiivisyys ja permeabiliteetti vaimentavat normaalisti vain magneetti- tai sähkökenttiä niin kaukokentässä, jossa sähkömagneettinen aalto on tasoaalto muo-

dossa toisen ominaisuuden vaimentaminen vaikuttaa toiseen, sillä niin kuin aikaisemmin todettiin kaukokentässä magneettikentän vaihtelut vahvistavat sähkökenttää ja toisin päin. Permittiivisyys ja permeabiliteetti muuttuvat myös taajuuden mukaisesti.

2.3.1 Kapeakaistaiset vaimentimet

Kapeakaistaiset vaimentimet ovat yksi kerroksisia ja ne hyödyntävät $\frac{1}{4}$ aallonpituuden resonaatiota. Kun tasoaalto kohtaa vaimentimen se heijastuu osittain ja osa siitä läpäisee pinnan. Tasoallon osa, joka ei heijastunut vaimentimen pinnasta heijastuu vaimentimen takana olevasta metalli pinnasta. Kun vaimentimen takana olevasta metallipinnasta heijastunut aalto osuu uudestaan vaimentimen ulkopintaan, se on kääntynyt 180° verrattuna vaimentimen pinnasta heijastuneeseen aaltoon, jolloin ne kumoavat toisensa. Kuvassa 4 esitetään kapeakaistaisen vaimentimen toimintaperiaate:



Kuva 4. Kapeakaistaisen vaimentimen toimintaperiaate [Theory and Application of rf/microwave Absorbers].

Tätä efektiä voidaan ajatella myös toiselta kannalta, nimittäin impedanssin sovituksen kannalta. Vaimentimen takana on metallipinta (impedanssi = 0 Ω), ja se täytyy sovittaa ilman aaltoimpedanssiin, joka on 377 Ω. Jos materiaali pinnan näkyvä impedanssi on 377 Ω, niin silloin tasoaalto absorboituu kokonaan. Vaimentimien ulospäin näkyvä impedanssi, heijastuskertoin ja paluuvaimennus lasketaan kaavojen 31, 32 ja 33 osoittamalla tavalla [Ferrite tile absorbers 2012: 1].

$$Z_f = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} * \tan^{-1} \left[\left(\frac{j2\pi d}{\lambda} \right) * (\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}) \right] \quad (31)$$

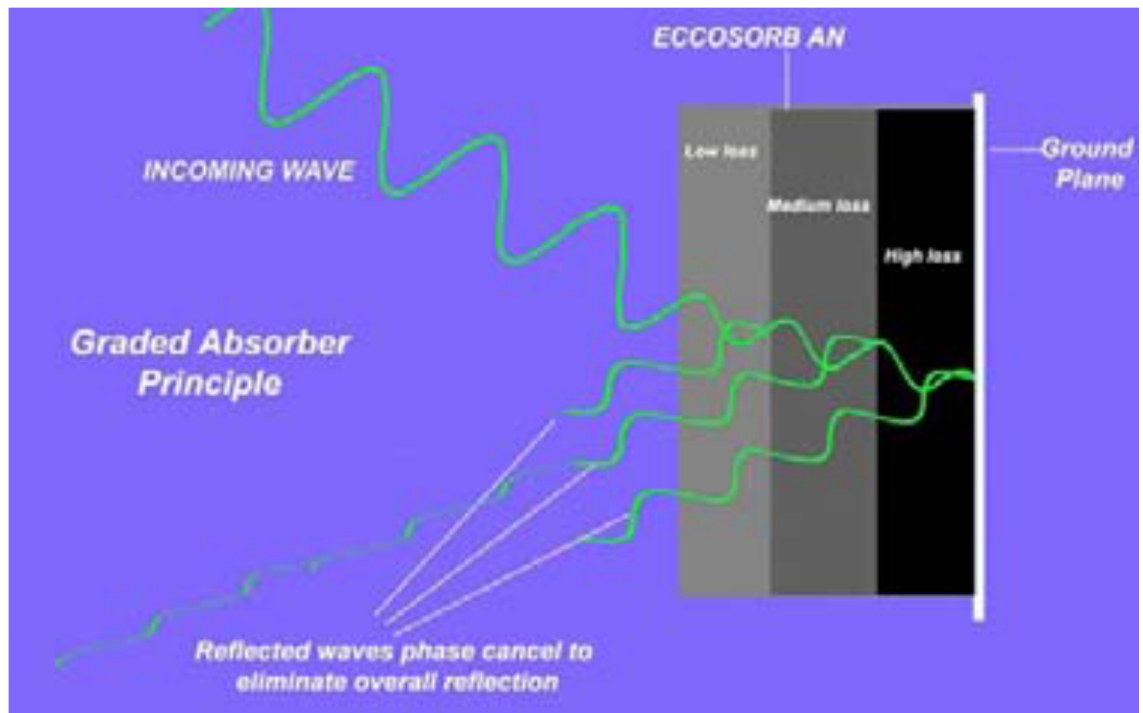
$$\Gamma = \frac{Z_f - Z_0}{Z_f + Z_0} \quad (32)$$

$$RL = 20 \log_{10} \Gamma \quad (33)$$

jossa Z_f on vaimentimen aaltoimpedanssi, Z_0 on ilman aaltoimpedanssi, ε_r ja μ_r ovat suhteellisia permittiivisyyksiä ja permeabiliteetteja, d on vaimentimen paksuus ja λ on aallonpituus, Γ on heijastuskertoin, RL on paluuvaimennus.

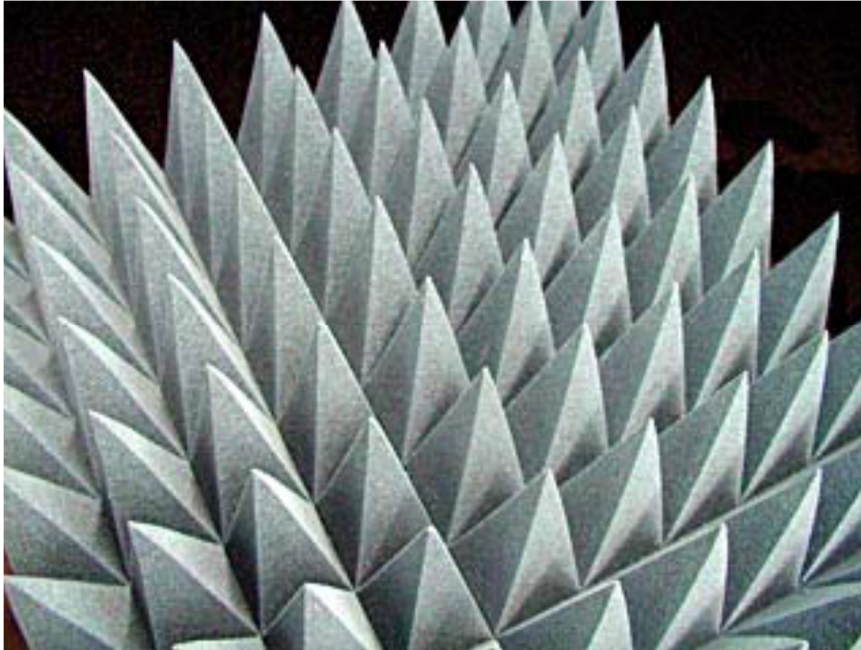
2.3.2 Laajakaistaiset vaimentimet

On olemassa kahdenlaisia laajakaistaisia vaimentimia, aaltoimpedanssilta vaihtuvia kerroksisia ja homogeenisia pyramidin muotoisia vaimentimia. Kuvassa 5 esitetään laajakaistaisen monikerros vaimentimen toiminta periaate:



Kuva 5. Laajakaistaisen monikerros vaimentimen toimintaperiaate [Theory and Application of rf/microwave Absorbers].

Laajakaistaiset monikerros vaimentimet ovat tasapintaisia tasaisesti muuttuva aaltoimpedanssisia ja kasattu useista eri kerroksista, toisin kuin kapeakaistaiset vaimentimet. Niissä on useita kerroksia eri materiaaleja, jotta ne saisivat aikaiseksi 377Ω impedanssin vaimennuksen laajemmalle taajuusalueelle. Koska kerroksissa ei ole suuria impedanssin vaihteluita ne eivät myöskään heijasta takaisinpäin. Näiden heijastus on yli -20 dB ja ne ovat kohtuullisen paksuja. Kuvassa 6 esitetään fyysinen pyramidinen vaimennin.

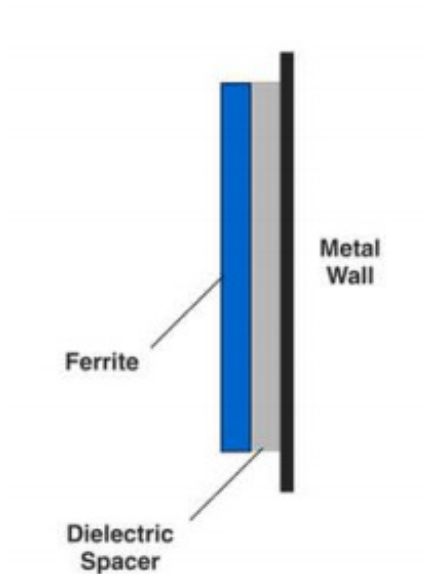


Kuva 6. Pyramidinen vaimennin.

Homogeenisissa pyramidisissa/kiilaisissa vaimentimissa materiaali on homogeenista koko alueelta ja niiden fyysinen koko suurenee koko ajan mitä syvemmälle aalto kulkeutuu. Niiden ulkokuori (*matrix*) on tehty fyysisesti kestävästä materiaalista jonka sisällä on hiilellä rikastettua seosta. Näiden heijastus on yli -50 dB ja ne ovat erittäin isokokoisia (yleensä 30 cm korkeita tai korkeampia). Homogeenisista vaimentimista pyramidiset ovat yleisimpiä. Homogeenisia vaimentimia käytetään yleensä *Fully Anechoic Chamber*issa sillä ne ovat parhaimpia vaimentimia.

2.3.3 Vaimentimien toiminta periaatteet

Magneettiset vaimentimet käyttävät hyväkseen aineita joissa on ferromagneettisia ominaisuuksia. Tämä lyhentää huomattavasti vaimentimen fyysistä paksuutta, joka johtuu siitä, että magneettisuus lyhentää aallonpituutta ja se johtaa siihen, että neljännes aallonpituus saavutetaan pienemmässä fyysisessä tilassa. Magneettiset vaimentimet toimivat yleensä 30 MHz - 1 GHz taajuusalueella mutta ne voidaan saada toimimaan korkeammilla taajuuksilla, lisäämällä ferriitti materiaalin ja huoneen ns. metallikuoren väliin tietyn paksuinen sähköä johtamaton välikappale, joka on yleensä puuta. Havainnointi kuva tästä esitetään kuvassa 7:



Kuva 7. Magneettinen vaimennin lisäkappaleella [Ferrite tile absorbers 2012: 2].

Täten toimimalla voidaan muuttaa magneettisen vaimentimen taajuus vaste jopa 600 MHz:sta - 1,5 GHz:n taajuuteen asti [Ferrite tile absorbers 2012: 1]. Magneettisten vaimentimien heijastus on yli -30 dB [Magnetic vs. Dielectric Absorber Selection 2012: 1].

Dielektriset vaimentimet. Dielektrisissä vaimentimissa eli sähköisistä eristeistä tehdyissä vaimentimissa ei ole magneettisia ominaisuuksia. Huonoja puolia ovat, että ne johtavat erittäin hyvin, joten niitä ei voi käyttää siten, että ne koskettaisivat elektronisia laitteita. Ne ovat kevyitä ja halpoja tehdä koska ne on yleensä tehty halvasta vaihtomaisesta aineesta.

3 Standardi IEC/EN 61000-4-3

IEC/EN 61000-4-3 standardin tavoitteena on määritellä yleinen vertailu kohta ja menetit sähköisten ja elektronisten laitteiden sähkömagneettisten kenttien sietokyvyille (immuni-teetti), kun niihin kohdistetaan radiotaajuisia sähkömagneettisia kenttiä. Sen taajuus-alue on 80 MHz - 6 GHz ja se käsittää kaikki kaiuttomat huoneet (*Anechoic chamber*) alle 3 m korkeasta kompaktista osittain suojatusta huoneesta lähtien. [IEC/EN 61000-4-3 2008]

3.1.1 Testitasot

Testeissä käytettävät sähkökenttien voimakkuudet esitetään taulukossa 1.

Taulukko 2. Testitasot ja niiden kentän voimakkuudet joita käytetään yleisiin testeihin, digitaalisten radiopuhelinten ja muiden radiotaajuuksia lähettävien laitteiden testeihin

Taso	Kentän voimakkuus
1	1 V/m
2	3 V/m
3	10 V/m
4	30 V/m

Tämä ei tarkoita sitä, että yksi testitaso olisi sopiva koko taajuusalueelle, jokaiselle taajuusalueella on määriteltä oma testitasonsa.

Taulukossa 1 esitetyt testikentän voimakkuudet ovat moduloimatonta kantoaaltoa. Laitteiden testausta varten käytettävä kantoaalto on 80 % amplitudimoduloitua 1 kHz sini aaltoa, jotta voidaan simuloida todellisia häiriöitä.

Yleisiin laitteisiin liittyvät testit suoritetaan normaalisti 80 - 1000 MHz:n taajuusalueella, joihin myös Metropolia Ammattikorkeakoulun Bulevardin toimipisteen tila on tarkoitettu. Muut testitaajuuudet jotka liittyvät digitaalisiin radiopuhelimiin sekä muihin radiotaajuuksia lähettäviin laitteisiin ovat yleensä 800 - 960 MHz ja 1,4 - 6,0 GHz.

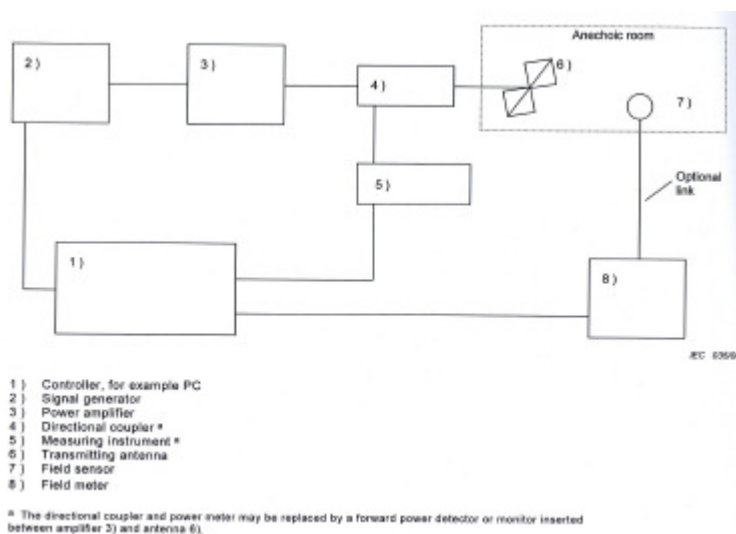
3.1.2 Testilaitteisto

Seuraavanlaiset laitteistot ovat suositeltuja IEC/EN 61000-4-3 standardin mukaisesti:

- Kaiutonhuone (*Anechoic chamber*), joka on tarpeeksi iso, että siellä saadaan aikaiseksi tarpeeksi suuri tasainen sähkömagneettinen kenttä testattavaan laitteeseen nähden ja että se myös on laitteen kohdalla.
- Sähkömagneettisen häiriön suotimet (*EMI filters*), jos tarpeelliset, niiden ei pitäisi lisätä ylimääräisiä resonanssi efektejä testauksen aikana.
- Alipäästö ja kaistanpäästö suotimet, jottei harmonisista yliaalloista olisi haittaa.

- Tehovahvistin, jotta signaalia saadaan vahvistettua tarpeeksi, että antennilta saadaan ulos tarpeeksi iso kentän voimakkuus. Vahvistimen luomat harmoniset taajuudet tasaisen sähkökentän alueella (Uniform field area, UFA) eivät saa olla suurempia kuin 6dB käytettävästä taajuudesta.
- Sähkömagneettikentän luova antenni, joka voi olla joko bi-conical, log periodic, horn tai mikä tahansa muu lineaarisesti polarisoitu antenni.
- Isotrooppinen sähkökenttäanturi, jolla on tarpeeksi immuniteettia mitattavalle kentän voimakkuudelle ja joka käyttää optista yhteyttä yhdyslaitteelle, joka sijaitsee huoneen ulkopuolella.
- Muut laitteet joita tarvitaan tehotasojen mittaamiseen ja luontiin mm. tietokone.

Standardin mukainen testijärjestely on kuvan 8 mukainen:



Kuva 8. Standardin mukainen testijärjestely [IEC 61000-4-3 2008].

3.1.3 Testauspaikan kuvaus

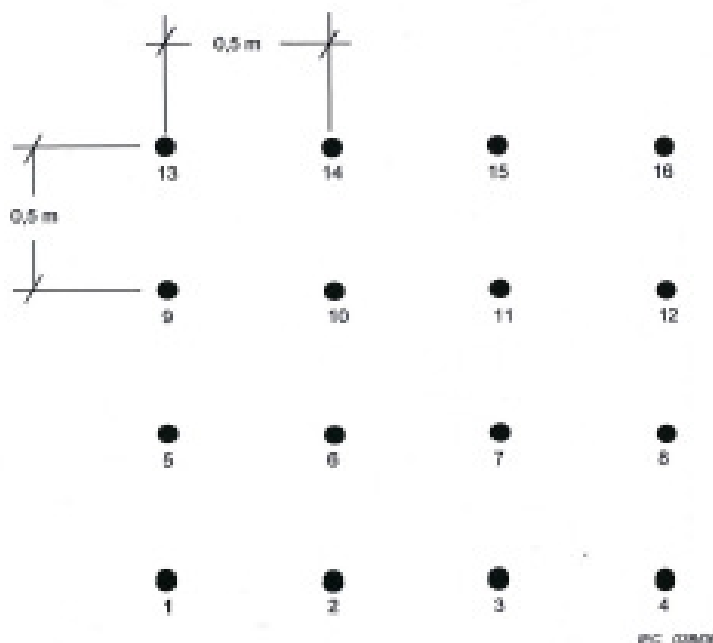
Kentän voimakkuuksien takia testit täytyy suorittaa suljetussa suojatussa huoneessa (*Anechoic chamber*), koska kansalliset ja kansainväliset lait rajoittavat radiotaajusten häiritsevien signaalien kentän voimakkuuksia. Se suojaa myös mittausjärjestelyä, joka on huoneessa ulkopuolisilta häiriöiltä. Useimmat testilaitteet ovat myös erittäin herkkiä

eivätkä nekään saisi joutua liian suurten kentän voimakkuuksien vaikutuksien alaisiksi, joten suojattu huone suojaa myös näitä mittalaitteita jotka ovat huoneen ulkopuolella. Yhteyskaapelit jotka menevät suojattuun huoneeseen ja pois tulee olla tarpeeksi suodatettuja jotteivat johtuvat- ja heijastuvat häiriöt häiritse lähetettyjä signaaleja, tämä koskee myös käyttöjännitettä.

Testauspaikka sisältää yleensä vuoratun vaimentimilla suojatun huoneen, joka on tarpeeksi suuri, jotta siellä voidaan hallita kentän tasoja tarpeeksi ja, että EUT mahtuu sinne hyvin. EMC mittapaikan pitäisi sisältää kentän luovat ja tarkkailevat laitteet.

3.1.4 Tasainen sähkökenttä

Tasainen sähkömagneettinen kenttä (*Uniform Field Area, UFA*), joka vaikuttaa testataviin laitteisiin. Sen mittayksikkönä käytetään yleisesti V/m. UFA-kentässä on 16 pistettä vertikaalisessa suunnassa joiden etäisyys toisiinsa nähden on 0,5 m ja joiden mitattu kentän voimakkuus täytyy olla 75 %:ssa pisteistä 6 dB:n sisällä toisistaan mitattavalla alueella. Mittaustuloksista 3 %:ssa voi olla 10dB:n heitto. Kuvassa 9 esitetään UFA:n mittauspisteet 16 pisteelle:



Kuva 9. Mittauspiste esimerkki 16 mittauspisteelle [IEC 61000-4-3 2008].

UFA voi olla myös pienempi kuin kyseinen 1,5 m x 1,5 m, mutta jos se on tätä pienempi tarkemmin 0,5 m x 0,5 m, silloin pisteitä on vain 4 ja kaikkien näiden neljän mitattavan pisteen kentän voimakkuuksien pitää olla 6 dB sisällä toisistaan.

3.1.5 Kalibrointi

Kalibroinnin tarkoitus on saada selville tilan ja laitteiston kapasiteetti ja samalla luoda tietokanta jonka perusteella voidaan asettaa tarvittava kentän voimakkuus varsinaisia testejä varten. Kalibroitava alue on UFA, joka on kuvitteellinen pystysuuntainen alue jossa kenttä voimakkuuksien erot ovat hyväksyttävän pieniä.

Kalibrointi tehdään ilman testattavaa laitetta (*equipment under test*, EUT), moduloimattomalla kantoaallolla. Tämän menettelyn tarkoituksena on saada selville UFA-kentän voimakkuuden ja antennille lähetetyn tehon suhde. Varsinaisen testin aikana vaadittu lähetetyn tehon arvo lasketaan tästä suhteesta. Kalibrointi on pätevä niin kauan kuin mitään ei muuteta mittaustilassa, tämän takia on erittäin tärkeää, että kalibrointi järjestely (antennien, vaimentimien, kaapeleiden ym. paikat ja tasot) kirjataan ylös mahdollisimman tarkasti. Koska pienimmätkin muutokset voivat vaikuttaa kenttään erittäin paljon.

Kalibrointi voidaan tehdä kahdella tapaa, joko Tasaisen kentän voimakkuuden kalibroinnilla tai Tasaisen tehon kalibroinnilla. Nämä kummatkin tavat antavat saman tuloksen. Ainut varsinainen ero näissä on, että tasaisen tehon tavassa kentän voimakkuus asetetaan vain aloitus pisteessä kun tasaisen kentän voimakkuuden tavassa se asetetaan joka pisteessä.

4 Laitteisto

4.1 Lähetysantenni

Testauksissa signaalin lähettävänä antennina käytetään ETS-Lindgrenin Biconilog Model 3142E ja sen taajuus alue on 30 MHz - 6 GHz, se on suunniteltu immuniteetti ja

emission testejä varten. Se on kalibroitu ANSI C63.5 (American National Standard for Electromagnetic Compatibility - Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control-Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)) standardin mukaisesti 10 m etäisyydellä. Sen keskimääräinen VSWR on 2:1 50 MHz yläpuolella. Seuraavassa esitetään kuva 10 kyseisestä Biconilog antennista ja sen sähköiset ja fyysiset ominaisuudet ovat liitteessä 1.



Kuva 10. BiConiLog yhdistelmä antenni. [BiConiLog Antenna 2012]

4.2 Kenttäanturi ja vastaanotin

Vastaanottimena käytetään ETS-Lindgrenin valmistamaa Isotropic Electric Field Probe HI-6122 kenttäanturia, jonka taajuus alue on 10 kHz - 1 GHz ja se pystyy mittaamaan 2 - 800 V/m sähkökentän voimakkuuksia. Se täyttää EN/IEC 61000-4-3 Radiated Immunity sekä myös armeijan MIL-STD 461E Radiated Susceptibility standardien vaatimukset. Sillä voidaan lukea arvot erikseen, jokaiselta akselilta (x, y, z) sekä myös kentän kokonaisarvo. Siinä on optinen linkki vastaanottimeen josta on USB linkki PC:n, joten johtuvat- ja heijastuvat häiriöt eivät häiritse lähetettyjä signaaleja. Seuraavassa esitetään kuva 11 kenttäanturista sekä kenttäanturin vastaanottimesta:



Kuva 11. Kenttäanturi HI-6122 optisella liitännällä sekä kenttäanturin vastaanotin HI-6113 [Laser Data Interface and Probe Measurement System 2012: 1].

4.3 Signaaligeneraattori

Testauksissa käytettiin Rhode & Schwarz SMT 06 signaaligeneraattoria, jonka taajuusalue on 5 kHz - 6 GHz. Lähetystehoina varsinaisissa standardin mukaisissa mittauksissa käytettiin -3,33 dBm ja -2,83 dBm, joilla saatiin standardin vaatimaksi ensimmäisen mittauspisteen sähkökentän voimakkuudeksi vähintään 5,4 V/m. Käytettyjen lähetys tehojen erot johtuvat EMC-huoneeseen lisätyistä vaimennuksista. Seuraavassa esitetään kuva 12 signaaligeneraattorista:



Kuva 12. Signaaligeneraattori SMT 06.[Signal generator 2015]

4.4 Radiotaajuusvahvistin

Tässä työssä vahvistimena käytettiin Amplifier Research Model 25W 1000 radiotaajuusvahvistinta. Sillä vahvistettiin signaaligeneraattorilta lähtevä signaali. Vahvistimen määrytykset ovat liitteessä 6. Kuvassa 13 esitetään kyseinen vahvistin:



Kuva 13. Radiotaajuusvahvistin Amplifier Research Model 25W 1000.

4.5 Testauspaikka

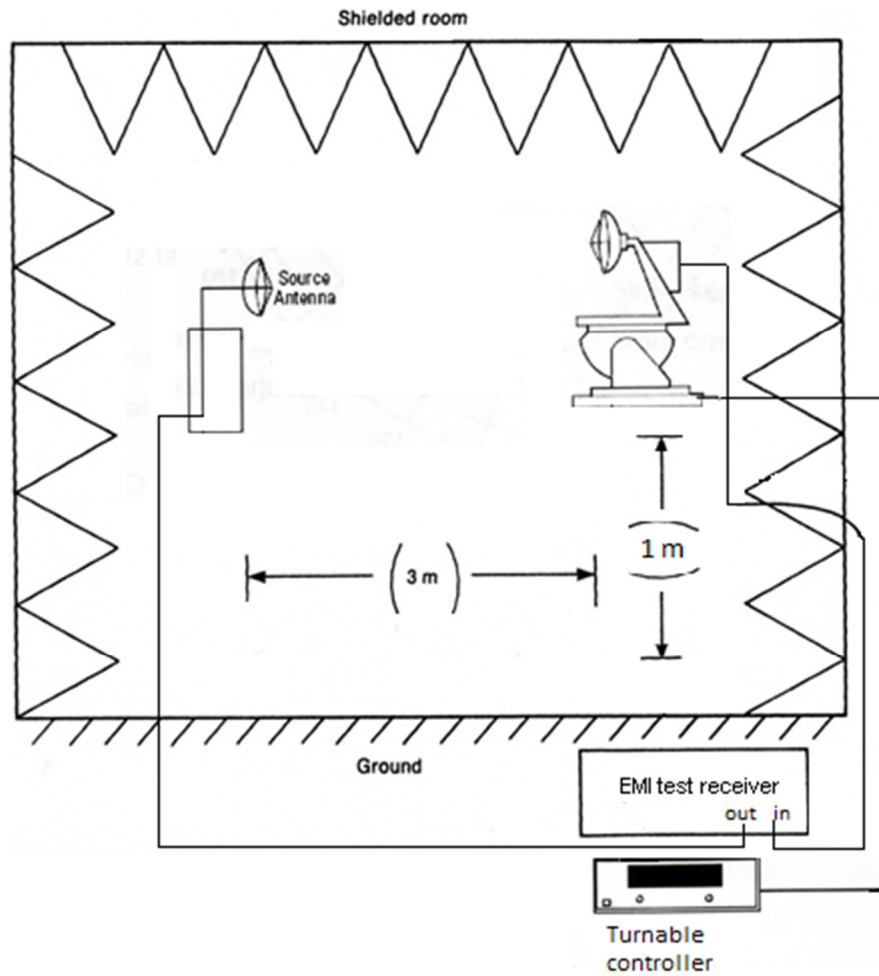
Testauspaikkana toimii huone, joka on suojattu sähkömagneettiselta säteilyltä seinistä ja katosta eli SAC. Siellä käytetään ferriitti vaimentimia katossa ja seinässä vaimentamaan alle 1 GHz taajuuksia ja lisäksi laajakaistaisia pyramidisia vaahto vaimentimia antennin ympärillä lattialla vaimentamaan lähikentän induktiivisia ja kapasitiivisia vaikutuksia ja estämään niiden johtumisen lattian maatasoon.

5 Kalibrointi mittaukset

Kalibroinnille asetettiin tavoitteeksi, että se pääsisi läpi standardin asettamista rajoista 3 V/m kentän voimakkuudella, tasaisen tehon kalibrointi metodia käyttäen. Täten kalibroinnissa kentän voimakkuus asetettiin standardin mukaisesti 1,8 kertaiseksi mittauksen aloituspisteessä verrattuna varsinaisen immuniteetti testin kentän voimakkuuteen nähden. Standardin mukaisesti vahvistin laitteistolle pitää tehdä saturaatio testi, siltä varalta ettei vahvistin mene saturaatioon. Vahvistimessa oli valmiiksi saturaatio tunnistin joten testiä ei tarvinnut tehdä. Koska bulevardin SAC on niin pieni, siellä ei voitu suorittaa 16 pisteen kalibrointi testiä, joten testi tehtiin 4 mittauspisteen testinä joka tarkoitti sitä että kaikkien 4 pisteen mittausten piti olla standardin mukaisesti 6 dB:n sisällä pienimmästä mitatusta arvosta kyseisellä taajuudella.

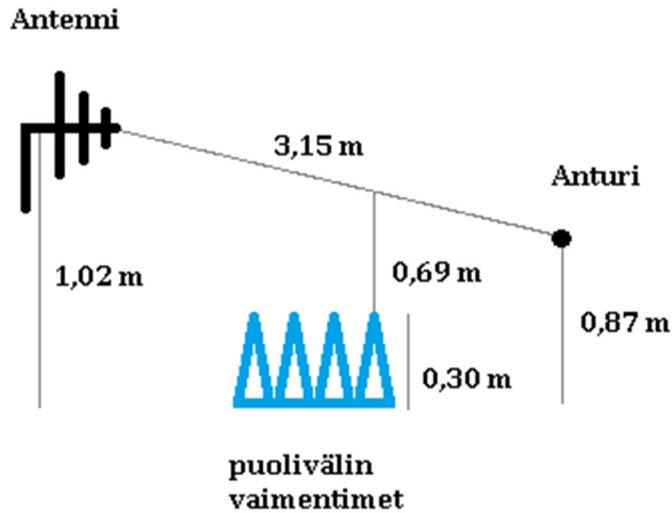
Mittausjärjestely

Mittausjärjestelyssä moduloimaton signaali lähtee signaaligeneraattorilta ja menee vahvistimelle, sieltä se kulkee ns. seinävaimennusten läpi lähettävälle antennille, josta se välittyy ilmassa kulkevana tasoaaltona vastaanottavalle antennille (EMI anturille) ja sieltä optista kaapelia pitkin kentänvoimakkuus mittarille josta tietokoneelle, joka näyttää kentän voimakkuudet. Kuvassa 14 esitetään havainnekuva mittausjärjestelystä.



Kuva 14. Havainnekuva mittausjärjestelystä.

Lähetävä antenni sijaitsee 102 cm:n korkeudessa ja siitä 315 cm:n päässä on vastaanottava anturi, joka sijaitsee 87 cm:n korkeudessa pienen pöydän päällä. Huoneen mittasuhteet olivat 468 x 436 x 210 cm. Seuraavaksi esitetään kuva 15 jossa on huoneen mittasuhteet ja myös mahdollinen huoneen lattian mittauslinjan puolella välissä olevien lisävaimentimien viemä tila, koska ne vähentäisivät huomattavasti lattiaheijastuksia.



Kuva 15. EMC-huoneen mittasuhteet ja myös mahdollinen lattialla olevien lisävaimentimien viemä tila.

Jotta antennin ja anturin välissä olevat pyramidiset vaimentimet eivät häiritse korkeudeltaan lähetys signaalia piti fresnellin vyöhykkeen viemä tila laskea kaavalla 34, josta saatiin taulukko 3.

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (34)$$

Taulukko 3. Ensimmäisen Fresnellin vyöhykkeen säde 80 - 1000 MHz:n taajuusalueella.

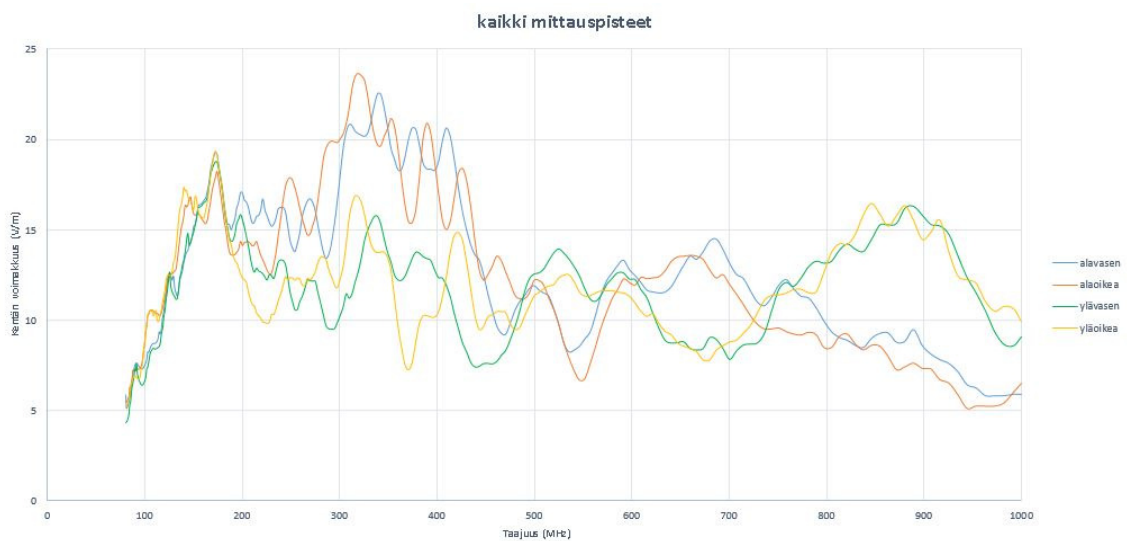
säde (m)	taajuus (MHz)
1,69	80
1,20	160
0,85	320
0,60	640
0,48	1000

Taulukon 3 ja kuvan 14 perusteella havaitaan, ettei antennin ja anturin väliselle alueelle voida sijoittaa pyramidisia lisävaimentimia, koska Fresnellin ensimmäiselle vyöhykkeelle tulisi liian paljon estettä alhaisilla taajuuksilla.

6 Tulokset

6.1 Kalibrointi

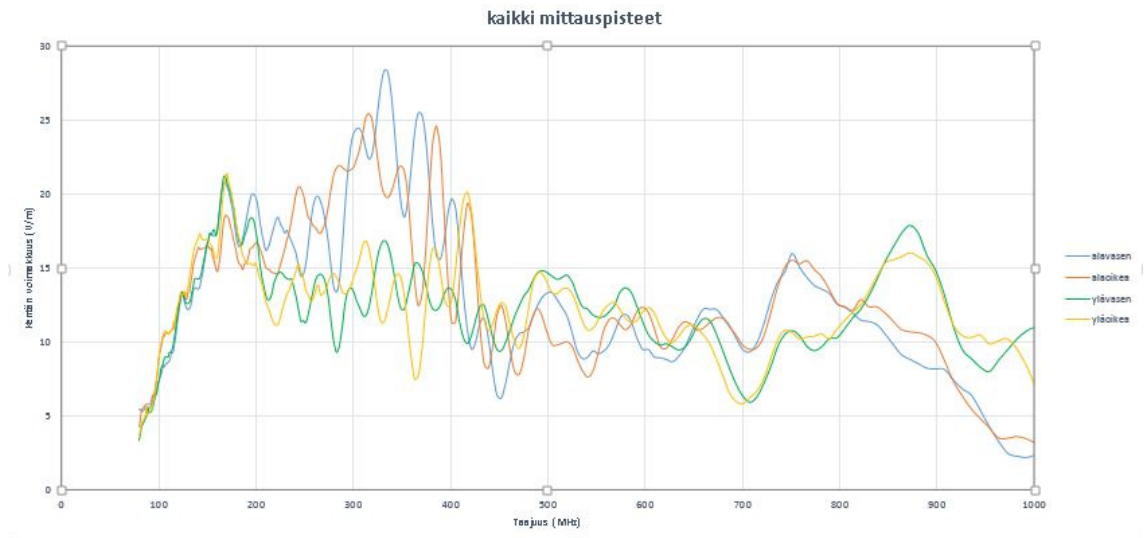
Kalibrointi suoritettiin 5,4 V/m sähkökentän voimakkuudella, 4 mittauspisteellä mitattuna. Tasaisen tehon metodia käyttäen sähkökentän voimakkuus asetettiin ensimmäisessä pisteessä 5,4 V/m:iin, joka oli antennilta katsottuna alhaalla vasemmalla. Sen saavuttaakseen piti antennille vahvistimen kautta syöttää -3,33 dBm signaali. Ensimmäisen kalibrointi mittauksen tulokset esitetään kuvassa 16:



Kuva 16. EMC-huoneen ensimmäisen kalibrointi mittauksen tulokset.

Kuvan 15 ja mittaustulosten perusteella tulokset eivät ole standardin mukaisia ja SAC:ssa on huomattavia heijastuksia 280 - 440 MHz:n ja 860 - 980 MHz:n alueilla. Kalibrointimittauksen tarkat tulokset ovat liitteessä 3 ja kuva 16 on suuremmissa muodoissa liitteessä 2.

Koska ensimmäinen testi ei mennyt standardista läpi SAC:iin täytyi tehdä parannuksia, jotka näkyvät Parannusehdotukset osiossa. Seuraavassa esitetään kalibrointi mittauksen tulokset parannusten (lisävaimennusten lisäämisen) jälkeen kuvassa 17:



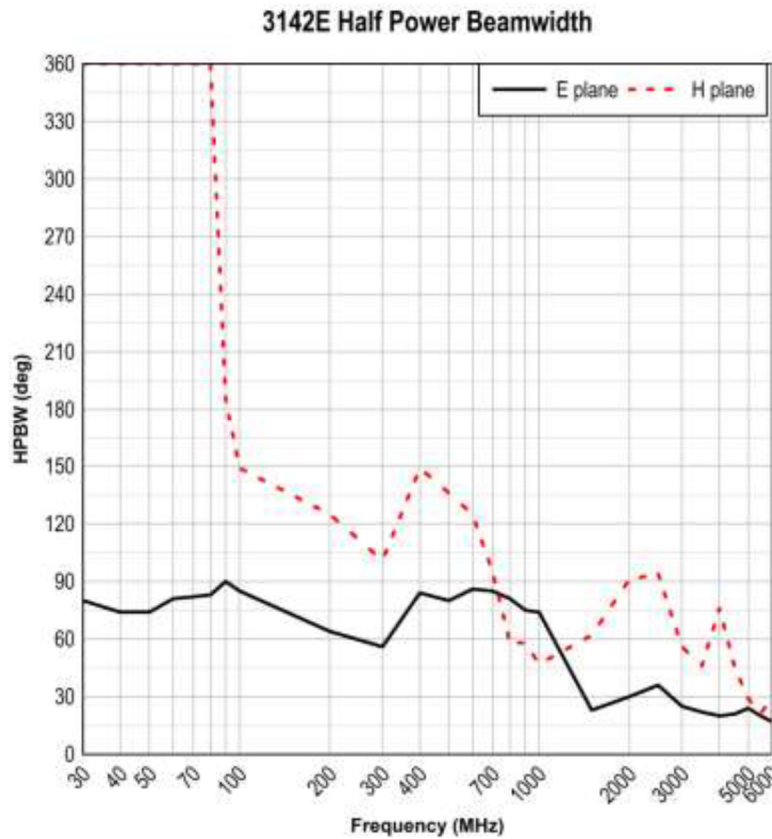
Kuva 17. Vaimennuksien lisäyksen jälkeisen mittauksen tulokset.

Tulokset paranivat kaikilla taajuuksilla mutta varsinkin 440 MHz:n jälkeen niin kuin kuva 16 näyttää, mutta SAC:ssa on edelleen ongelmia samoilla taajuusalueilla kuin aiemmin, joille ei saatu riittävästi vaimennusta aikaiseksi, jotta kalibrointi menisi hyväksyttävästi standardista läpi. Mittauksen tuloksista saatu kuva 17 on isommassa muodossa liitteessä 4 ja mittauksen numerolliset tulokset ovat liitteessä 5.

6.2 Parannus ehdotukset

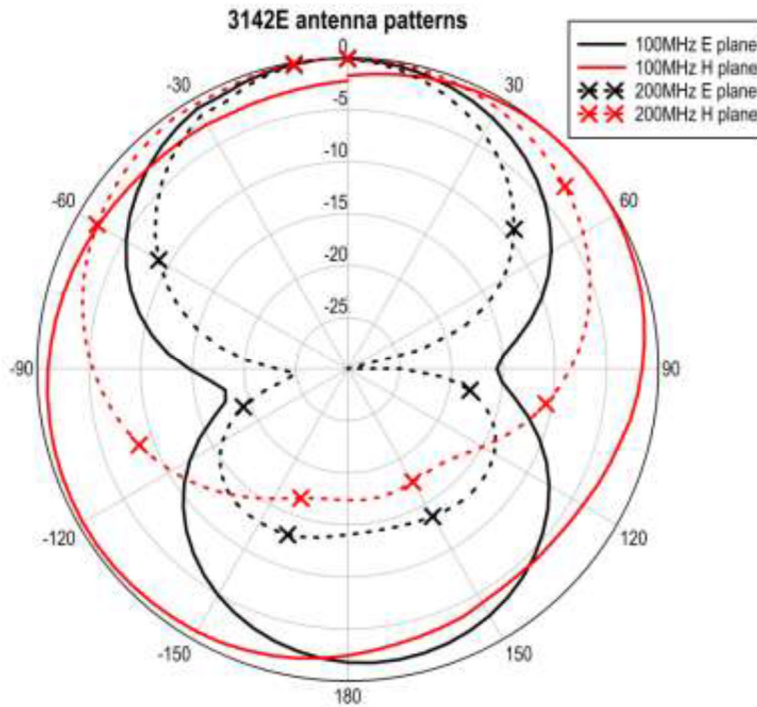
Koska kalibrointimittaukset eivät menneet standardista läpi, *anechoic chamberiä* pitäisi parantaa lisävaimennuksilla. Lisävaimennuksia tarvittaisiin antennin ympärille lattia tasoon vähintään Fresnellin yhtälön kokoiselle alueelle ja myös antennin ja anturin väliselle osuudelle. Seuraavassa esitetään perustelut sille, miksi kalibrointi ei mennyt standardista läpi. Perustelujen apuna käytän ETS-Lindgrenin tekemiä esitestejä heidän tuottamansa antennin suuntaavuuskuvioista.

Seuraavassa esitetään kokonaisuus kuva antennin puolen tehon suuntaavuus kulumista kuvassa 18:



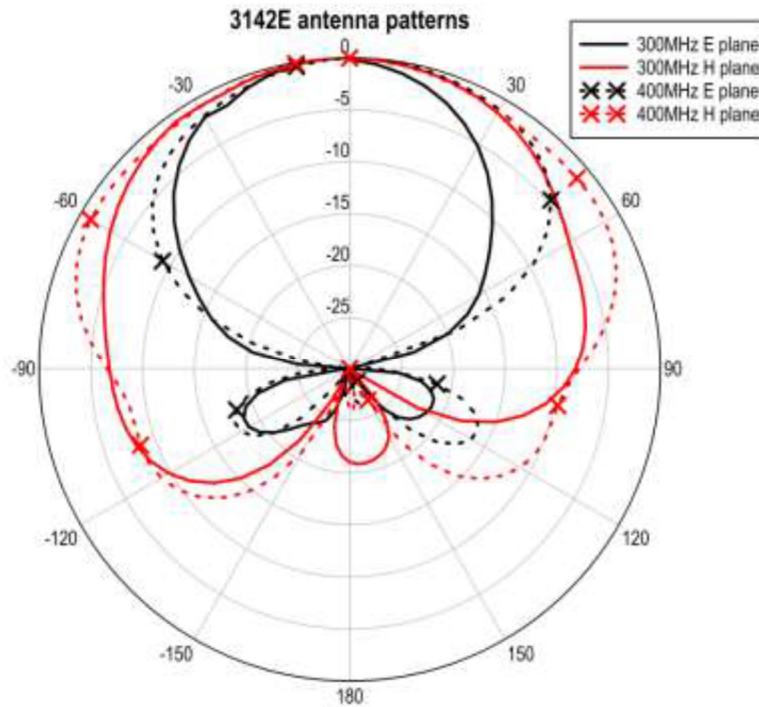
Kuva 18. Antennin suuntaavuus jolla sähkö- ja magneettikenttien teho puolittuu [BiConiLog Antenna, s. 31].

Tämä selittää mittauksissa näkyvät piikit 100 - 200 MHz:n ja 280 - 440 MHz:n kohdilla, sillä magneettikentän puolentehon suuntaavuus on niin suuri, että sen kenttä heijastuu sivuseinissä olevista kohdista joissa ei ole vaimentimia ja varsinkin antennin sivuilla olevista johtokouruista, joista tulee uusia häiriölähteitä. Seuraavilla sivuilla esitetään antennin suuntaavuuskuviot, joista nähdään tarkemmin sähkö- ja magneettikenttien vaikutukset mittauksiin.



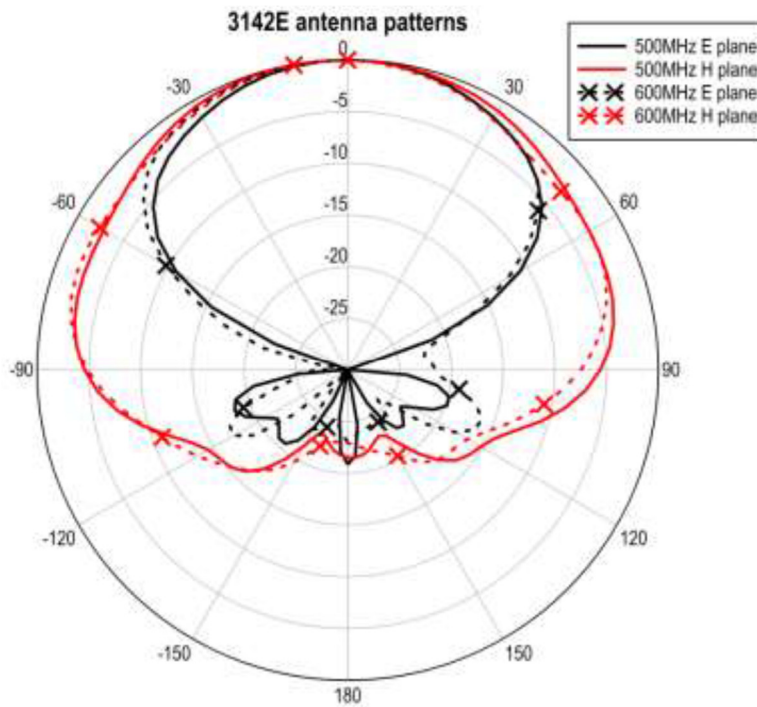
Kuva 19. Antennin heijastuskuviot 100 ja 200 MHz:n taajuuskaistoilla [BiConiLog Antenna, s. 34].

Tämän kuva selittää mittauksissa näkyvän piikin 100 - 200 MHz:n taajuusalueella, sillä antenni on niin lähellä seinää että sen taaksepäin suuntautuvat sähkö- ja magneettikentät aiheuttavat suuria ongelmia, varsinkin magneettikentän puolen tehon suuntaavuuden takia, niin kuin voidaan todeta edellisen sivun kuvasta 18. Pääasiallinen häiriön lähde näillä taajuuksilla on seinillä kulkevat johtokourut jotka ovat metallisia ja sijaitsevat alle metrin päässä lähettävästä antennista.

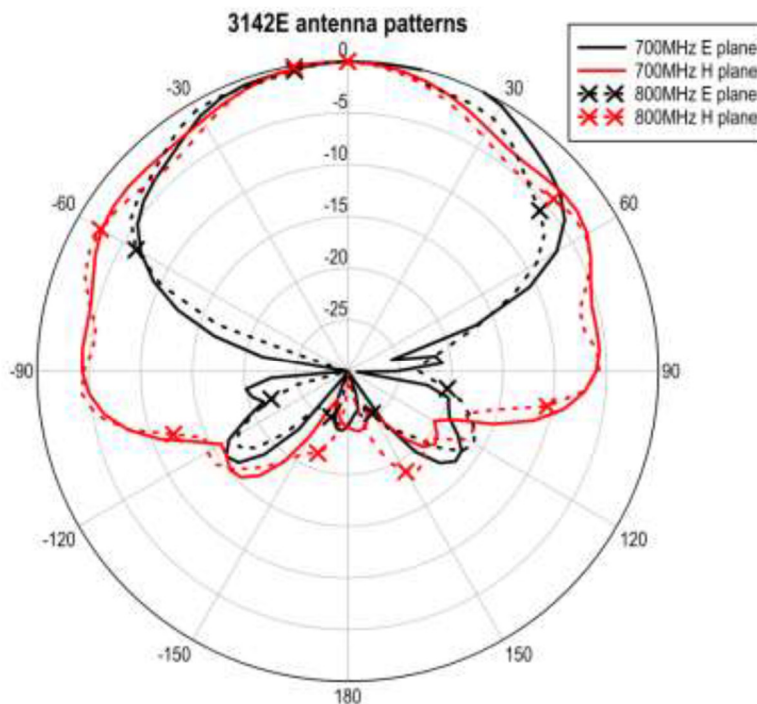


Kuva 20. Antennin heijastuskuviot 300 ja 400 MHz:n taajuuskaistoilla [BiConiLog Antenna, s. 35].

Kun verrataan tuloksia ja kuvan 20 mukaisia 300 ja 400 MHz:n suuntaavuus kuvioita seuraaviin suuntaavuuskuvioihin, jotka ovat 500 ja 600 MHz:n sekä 700 ja 800 MHz:n taajuusalueilla kuvissa 21 ja 22, huomataan, että pääasiassa vain magneettikentän takasuuntaavuus aiheuttaa suurimman osan häiriöistä ja nekin aiheutuvat antennin sijoituskulman sivuseinien vaimentamattomista pinnoista.



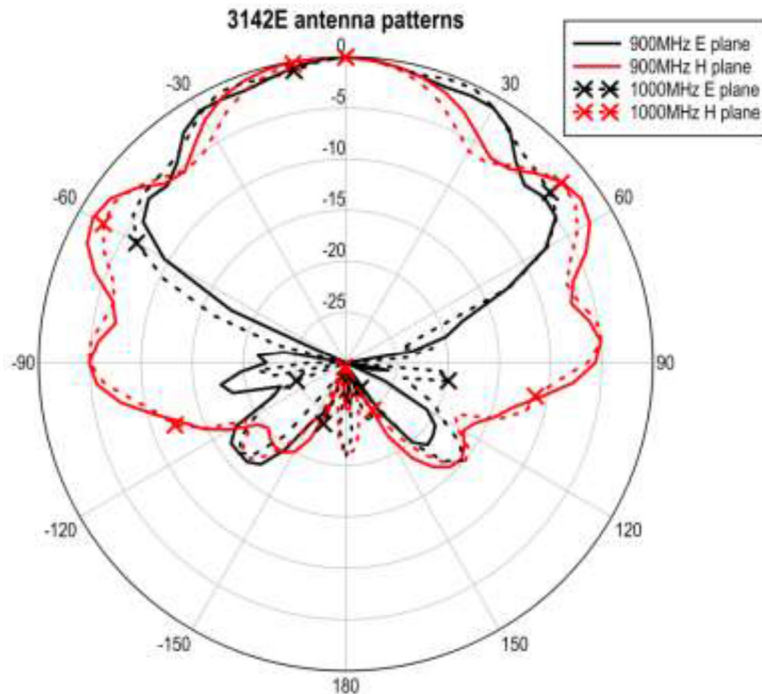
Kuva 21. Antennin heijastuskuviot 500 ja 600 MHz taajuuskaistoilla [BiConiLog Antenna, s. 36].



Kuva 22. Antennin heijastuskuviot 700 ja 800 MHz:n taajuuskaistoilla [BiConiLog Antenna, s. 37].

800 MHz:n jälkeen taajuuden vaikutus ferriittivaimentimiin alkaa näkyä, sillä ferriittien suurin vaimennusalue alkaa loppua. Seuraavassa esitetään 900 ja 1000 MHz:n heijastuskuviot kuvassa 23, jotka verrattuna tuloksiin vahvistavat ferriittien vaimennuksen huononemisen näillä taa-

juuksilla, sillä heijastuskuvioiden muodot eivät huonone aikaisempiin kuvioihin nähden, mutta mittaustulokset huononevat.



Kuva 23. Antennin heijastuskuviot 900 ja 1000 MHz:n taajuuskaistoilla [BiConiLog Antenna, s. 38].

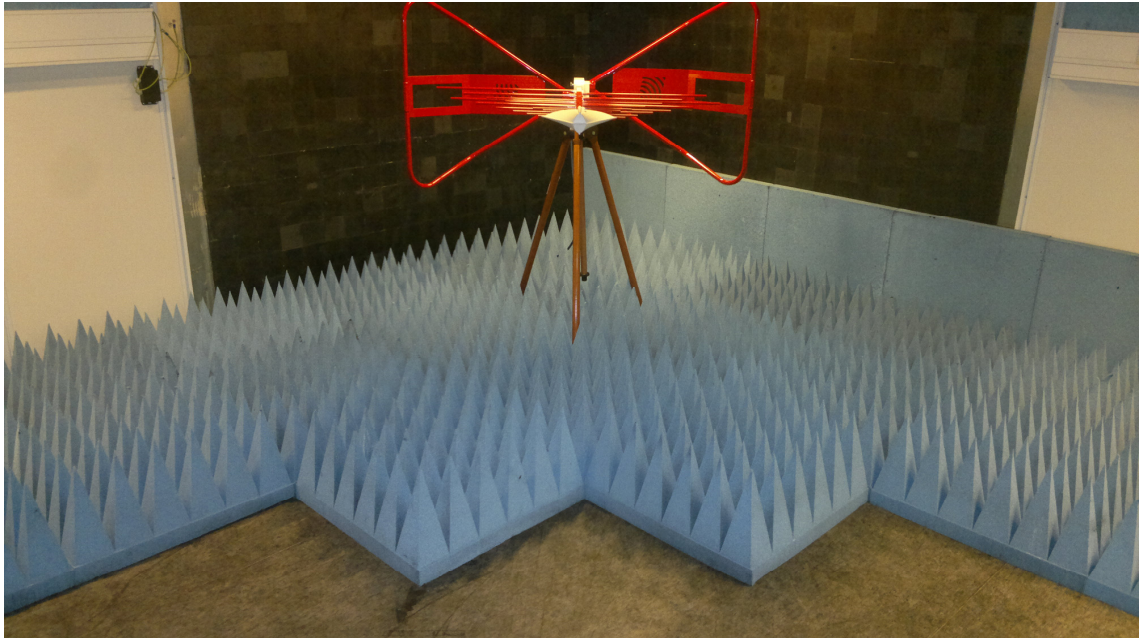
Edellisistä tuloksista päätellen *semi-anechoic chamber* tarvitsisi lisävaimentimia antennin sijaintikulman viereisiin seiniin, sekä antennin ympärille fresnellin kaavan määrittämälle alueelle, joka esitetään kaavassa 26:

$$< \frac{2D^2}{\lambda} \quad (35)$$

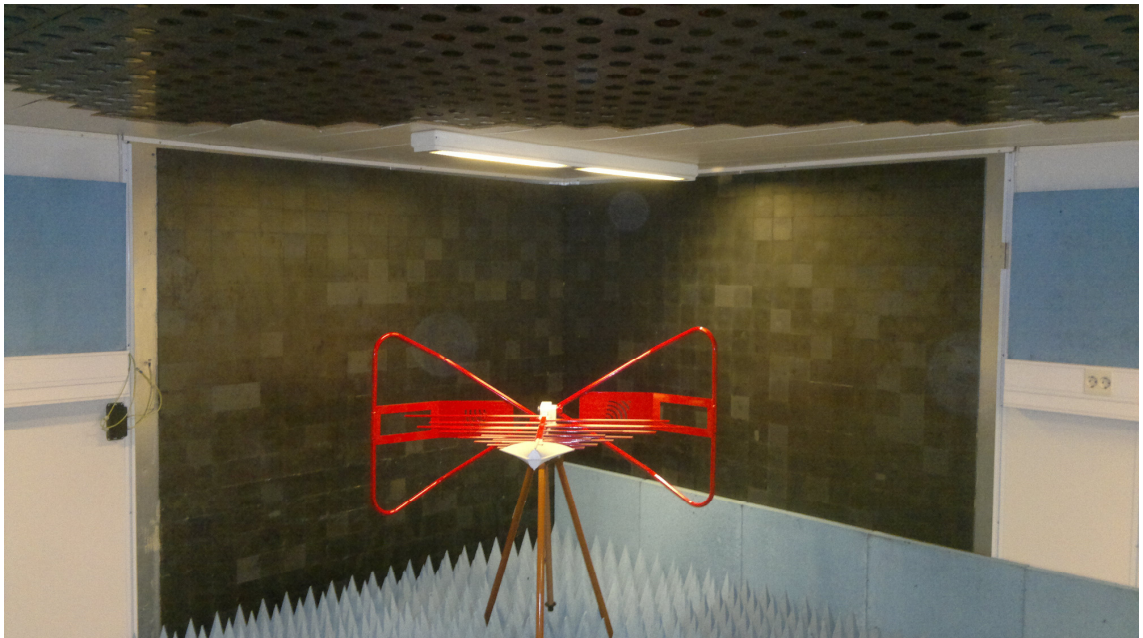
Koska Metropolia Ammattikorkeakoululla ei ollut antaa määrärahoja tällaiseen hankkeeseen, käytettiin saatavissa olevia materiaaleja ja asennettiin mittauspaikalle antennin ympärille pyramidi vaimentimia, 80 Mhz:n fresnellin aluetta hieman suuremmalle alueelle. Pyramidi vaimentimien vaikutus on nähtävissä toisessa standardin mukaisessa mittauksessa, jonka tulokset ovat liitteissä 3 ja 4.

6.3 Parannusten käsittely

Kun EMC-huoneen parannukset oli tehty kuvien 24 ja 25 mukaisesti, suoritettiin uusi mittaus.



Kuva 24. EMC-huoneeseen asennetut lisävaimennukset lattiatasolla.



Kuva 25. EMC-huoneen seinille asetetut lisävaimennukset (kuvan vasemmassa ja oikeassa reunassa olevat siniset alueet).

Mittaus vaiheessa huomattiin, että signaalin vahvistin ei ollut riittävän tehokas, jotta se olisi pystynyt vahvistamaan signaalia tarpeeksi kun seinillä oli lisävaimentimia, joten ne jouduttiin poistamaan ja jättämään vain lattialla sijaitsevat lisävaimentimet kuvan 25 mukaisesti. Pääasiallinen syy tähän oli se että antennin ja seinillä olevien vaimentimien välimatka oli niin lyhyt että vaimentimet jäivät antennin reaktiivisen alueen sisäpuolelle, jolloin suuntaavuuskuvion osuessa näihin vaimentimiin ne vaimensivat koko lähetys signaalia. Seuraavassa esitetään reaktiivisen alueen rajat suhteessa taajuuteen, jotka on laskettu reaktiivisen alueen kaavalla $\frac{\lambda}{2\pi}$.

Taulukko 4. Antennin reaktiivisen alueen rajat suhteessa taajuuteen.

säde (m)	taajuus (MHz)
0.60	80
0.30	160
0.15	320
0.07	640
0.05	1000

Fresnellin alueella lattiatasossa olevat vaimentimet vaimensivat suurimpien häiriöiden kaistan leveyttä mutteivat vaikuttaneet tarpeeksi suurimpien häiriöiden huippuihin, jotta kalibrointitesti olisi mennyt standardista läpi. Vaimentimet pienensivät raja-arvot ylittävien tasojen määrän 2/3 ensimmäisestä kalibrointitestistä.

7 Yhteenveto

Insinööriyössä tavoitteena oli saada Metropolia Ammattikorkeakoulun Bulevardin toimipisteessä sijaitseva EMC-laboratorio kalibroitua IEC/EN 61000-4-3 standardin vaatimusten mukaisesti.

Koska tila oli testejä varten standardin vaatimassa kunnossa jo valmiiksi, testit voitiin aloittaa heti. Kalibrointitestit suoritettiin standardin määritelmien mukaisesti. Ensimmäisen testin jälkeen tilaa paranneltiin saatavissa olevilla materiaaleilla.

Kalibrointitesteistä nähtiin, kuinka lähellä standardin vaatimuksia tila on, ja voitaisiinko sitä parantaa ja miten.

EMC-laboratoriota pitäisi parantaa seinien ja katon lisävaimennuksilla, mutta koska Metropolia Ammattikorkeakoulu on muuttamassa toimitilojaan toiseen paikkaan, tätä ei voida tehdä muutoksien vaatiman rahallisen sijoituksen takia. Tämän työn perusteella uuden EMC-laboratorion rakentamista suositellaan rakennettavaksi paremmin standardia vastaavaksi. Tähän riittäisi se, että kaiuton huone vuorattaisiin seinistä ja katosta ferriittivaimentimilla, mikä ehkäisisi sen etteivät magneettiset aallot aiheuttaisi niin paljon häiriötä mm. *cavity resonance effectin* takia.

Lähteet

Antenna Patterns, Mississippi state University Electrical and Computer Engineering. Verkkodokumentti. Antenna Patterns <<http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece4990notes2.pdf>>. Luettu 02.01.2015.

Bevelacqua, Peter Joseph PhD in antennas. 2014a. Verkkodokumentti. antenna-theory.com<<http://www.antenna-theory.com/basics/fieldRegions.php>>. Luettu 20.12.2014.

Bevelacqua, Peter Joseph PhD in antennas. 2014b. Verkkodokumentti. antenna-theory.com< <http://www.antenna-theory.com/basics/frequency.html>>. Luettu 05.03.2014

Bevelacqua, Peter Joseph PhD in antennas. 2012. Verkkodokumentti. maxwells-equations < <http://www.maxwells-equations.com>>. Luettu 10.02.2015.

BiConiLog Antenna. 2012. Verkkodokumentti. ETS-Lindgren. < <http://www.ets-lindgren.com/specs/3142E>>. Päivitetty joulukuu 2012. Luettu 26.09.2014.

Electromagnetic radiation, Wikipedia. 2014. kuva: ON-e_electromagnetique.svg.<http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation#mediaviewer/File:Onde_electromagnetique.svg>. Luettu 17.11.2014.

Tim Williams. 2007. EMC for Product Designers. MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall.

Theory and Application of rf/microwave Absorbers, Emerson & Cuming Microwave Products, Inc. <http://www.ecnmag.com/sites/ecnmag.com/files/legacyfiles/ECN/Absorbers_White_Paper.pdf>. Luettu 26.10.2014.

Ferrite tile absorbers, Elna Magnetics. 2012. Verkkodokumentti. Elna Magnetics. <http://www.elnamagnetics.com/wp-content/uploads/library/Fair-Rite-Documents/Ferrite_Tile_Absorbers_for_EMCTest_Chamber_Applications.pdf>. Päivitetty 2012. Luettu 01.02.2014.

Gronschorek, Karl-Heinz & Vack, Ralf. 2009. Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration. Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

IEC 61000-4-3. 2008. Publication IEC 61000-4-3 (Edition 3.0 - 2008) I-SH 01.

Laser Data Interface and Probe Measurement System. 2012. Verkkodokumentti. ETS-Lindgren. <<http://www.ets-lindgren.com/manuals/HI-6113.pdf>>. Päivitetty joulukuu 2012. Luettu 25.01.2015.

Magnetic vs. Dielectric Absorber Selection. 2012. Verkkodokumentti. MAST Technologies. <<http://www.masttechnologies.com/magnetic-vs-dielectric-absorber-selection>>. Päivitetty tammikuu 2012. Luettu 20.01.2015.

Signal generator. 2015. Verkkodokumentti. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. <http://www.rohde-schwarz.com/en/product/smt-productstartpage_63493-7568.html>. Luettu 30.04.2015.

VSWR vertailu. Verkkodokumentti. Mobile Mark Inc. <<http://www.mobilemark.com/faq/q1-what-is-meant-by-the-vswr-of-an-antenna-.html>>. Luettu 30.04.2015.

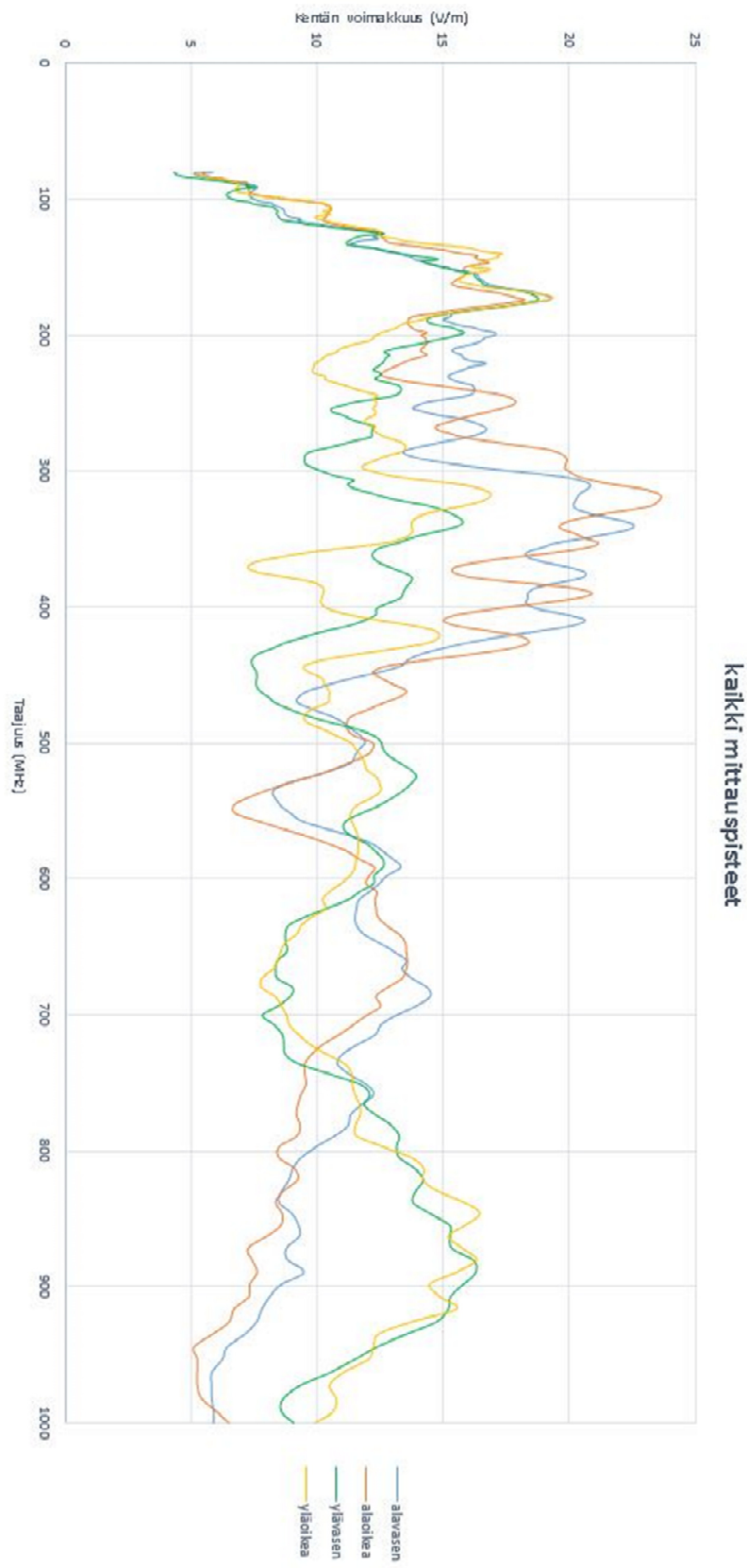
BiConiLog antennin sähköiset ja fysikaaliset ominaisuudet.**Electrical Specifications**

Frequency Minimum	30 MHz
Frequency Maximum	6 GHz
Connectors	Type N (f)
Impedance (Nominal)	50 Ω
Pattern Type	Directional
Polarization	Linear
VSWR Ratio (AVG)	2:1

Physical Specifications

Weight	5.7 kg (12.57 lb)
Width	133.9 cm (52.72 inches)
Depth	139.2 cm (54.80 inches)
Height	76.2 cm (30.00 inches)

Ensimmäisen kalibrointi mittauksen tulokset kuvana



Ensimmäisen kalibrointi mittauksen tulokset numeroina

Ylärivissä esitetään mittauspaikat, ja niiden oikealla puolella taulukko, jossa näkyy ovatko mittaukset sallittujen hajonta rajojen sisällä. Koska tämä on 4-piste kalibrointi-mittaus, kaikkien mittausten pitäisi olla 6dB:n sisällä pienimmästä tuloksesta kullakin taajuudella, jos kyseessä olisi 16 pisteen mittausjärjestely voisivat jotkin pisteet olla 10 dB sisällä pienimmästä mittaus tuloksesta. Tuloksista nähdään, että kaikki mittaukset ovat 10 dB:n rajan sisäpuolella mutta se ei ole riittävä 4:än mittauspisteen koejärjestelylle.

taajuus	alavasen	alaoikea	ylavasen	yläoikea	6 dB	10 dB
80	5,879	5,47	4,349	5,117	ok	ok
80,8	5,129	5,501	4,385	5,185	ok	ok
81,6	5,202	5,577	4,473	5,301	ok	ok
82,4	5,325	5,685	4,621	5,445	ok	ok
83,2	5,488	5,82	4,824	5,632	ok	ok
84	5,7	6,305	5,324	5,92	ok	ok
84,8	6,086	6,242	5,452	6,255	ok	ok
85,6	6,355	6,528	5,903	6,422	ok	ok
86,5	6,709	6,785	6,346	6,615	ok	ok
87,4	7,202	7,243	6,58	6,767	ok	ok
88,3	7,291	7,183	6,836	6,877	ok	ok
89,2	7,489	7,312	7,286	6,91	ok	ok
90,1	7,61	7,371	7,204	6,869	ok	ok
91	7,638	7,365	7,64	6,805	ok	ok
91,9	7,588	7,327	7,064	6,756	ok	ok
92,8	7,507	7,296	6,806	6,728	ok	ok
93,7	7,44	7,291	6,677	6,738	ok	ok
94,6	7,392	7,327	6,564	6,828	ok	ok
95,5	7,344	7,421	6,469	7,206	ok	ok
96,5	7,312	7,593	6,422	7,374	ok	ok
97,5	7,334	7,932	6,44	7,822	ok	ok
98,5	7,408	8,382	6,528	8,406	ok	ok
99,5	7,517	8,732	6,671	8,912	ok	ok
100,5	7,661	9,335	6,871	9,406	ok	ok
101,5	7,846	9,687	7,332	9,893	ok	ok
102,5	8,251	10,268	7,412	10,27	ok	ok
103,5	8,228	10,327	7,692	10,402	ok	ok

104,5	8,388	10,467	8,03	10,529	ok	ok
105,5	8,532	10,543	8,262	10,573	ok	ok
106,6	8,652	10,574	8,345	10,52	ok	ok
107,7	8,719	10,551	8,444	10,381	ok	ok
108,8	8,727	10,47	8,454	10,231	ok	ok
109,9	8,72	10,401	8,427	10,416	ok	ok
111	8,754	10,377	8,423	10,517	ok	ok
112,1	8,848	10,379	8,465	10,02	ok	ok
113,2	9,002	10,335	8,517	9,904	ok	ok
114,3	9,377	10,246	8,572	9,991	ok	ok
115,4	9,253	10,253	8,737	10,366	ok	ok
116,6	9,585	10,408	9,288	10,533	ok	ok
117,8	10,152	10,657	9,542	11,023	ok	ok
119	10,461	10,985	10,182	11,295	ok	ok
120,2	10,996	11,296	10,561	11,72	ok	ok
121,4	11,418	11,642	11,166	12,234	ok	ok
122,6	12,096	12,222	11,605	12,447	ok	ok
123,8	12,411	12,48	12,156	12,533	ok	ok
125	12,599	12,614	12,683	12,472	ok	ok
126,3	12,475	12,556	11,862	12,484	ok	ok
127,6	12,229	12,546	11,593	12,706	ok	ok
128,9	12,461	12,639	11,428	13,199	ok	ok
130,2	11,808	12,725	11,317	13,353	ok	ok
131,5	11,524	12,811	11,177	13,909	ok	ok
132,8	11,368	13,26	11,201	14,655	ok	ok
134,1	11,631	13,862	11,621	15,422	ok	ok
135,4	12,214	14,453	12,319	16,115	ok	ok
136,8	12,508	15,044	12,653	16,368	ok	ok
138,2	12,776	15,351	13,088	16,773	ok	ok
139,6	13,243	15,786	13,36	17,369	ok	ok
141	13,531	16,354	13,806	17,167	ok	ok
142,4	13,786	16,248	14,435	17,21	ok	ok
143,8	13,87	16,351	14,824	16,838	ok	ok
145,2	14,207	16,714	14,17	16,744	ok	ok
146,7	14,328	16,799	14,389	16,58	ok	ok
148,2	14,676	16,208	14,662	16,315	ok	ok
149,7	15,209	15,87	14,891	16,139	ok	ok
151,2	15,309	15,802	15,275	16,899	ok	ok
152,7	15,775	15,851	15,618	16,696	ok	ok
154,2	16,288	15,893	16,221	16,095	ok	ok

155,7	16,414	15,821	16,273	15,833	ok	ok
157,3	16,433	15,659	16,32	15,743	ok	ok
158,9	16,548	15,531	16,433	15,68	ok	ok
160,5	16,675	15,394	16,533	15,693	ok	ok
162,1	16,781	15,323	16,594	16,124	ok	ok
163,7	17,153	15,515	16,797	16,528	ok	ok
165,3	17,566	16,02	17,345	17,316	ok	ok
167	18,304	16,534	18,05	17,99	ok	ok
168,7	18,72	17,162	18,369	18,556	ok	ok
170,4	19,089	17,541	18,63	19,201	ok	ok
172,1	19,31	17,906	18,793	19,384	ok	ok
173,8	19,213	18,215	18,768	19,19	ok	ok
175,5	18,554	17,666	18,375	18,518	ok	ok
177,3	17,965	16,982	17,826	17,899	ok	ok
179,1	17,335	16,301	17,149	17,231	ok	ok
180,9	16,518	15,544	16,359	16,428	ok	ok
182,7	15,817	15,011	15,574	15,743	ok	ok
184,5	15,356	14,34	15,158	15,007	ok	ok
186,3	15,321	13,787	14,59	14,462	ok	ok
188,2	15,017	13,599	14,378	14,194	ok	ok
190,1	15,327	13,601	14,435	13,646	ok	ok
192	15,604	13,624	14,755	13,316	ok	ok
193,9	16,219	13,755	15,367	13,201	ok	ok
195,8	16,546	13,904	15,594	12,912	ok	ok
197,8	17,092	14,353	15,864	12,561	ok	ok
199,8	17,066	14,128	15,586	12,34	ok	ok
201,8	16,669	14,281	15,174	12,233	ok	ok
203,8	16,57	14,323	14,658	12,104	ok	ok
205,8	16,281	14,336	14,154	11,587	ok	ok
207,9	15,766	14,25	13,486	11,166	ok	ok
210	15,384	14,1	12,95	10,853	ok	ok
212,1	15,456	14,164	12,672	10,776	ok	ok
214,2	15,763	14,353	12,901	10,403	ok	ok
216,3	15,805	13,99	12,752	10,253	ok	ok
218,5	16,105	13,588	12,686	10,108	ok	ok
220,7	16,73	13,349	12,595	9,892	ok	ok
222,9	16,122	13,06	12,406	9,864	ok	ok
225,1	15,8	12,761	12,243	9,822	ok	ok
227,4	15,445	12,566	12,534	9,875	ok	ok
229,7	15,22	12,601	12,48	10,326	ok	ok

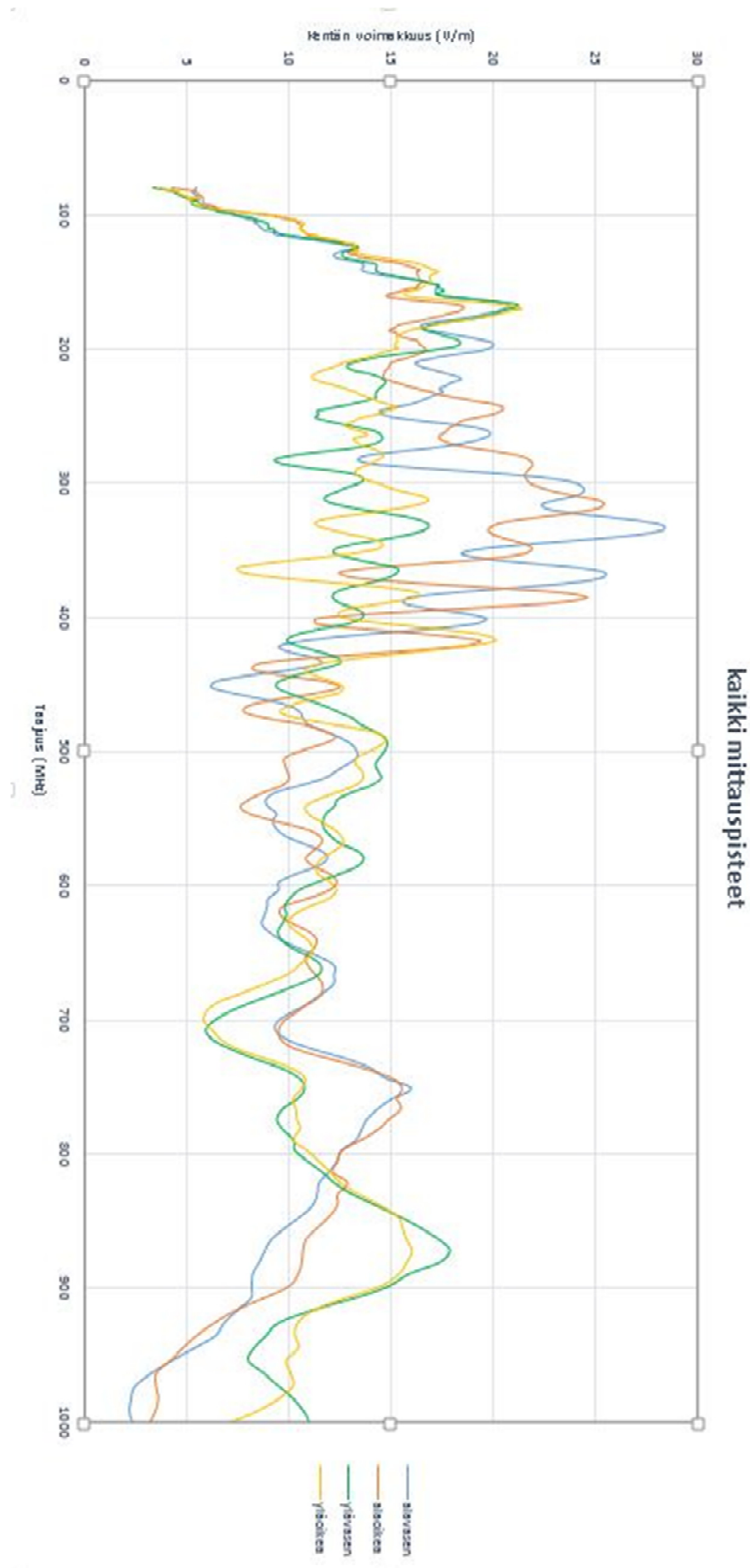
232	15,34	13,094	12,319	10,318	ok	ok
234,3	15,678	13,743	12,757	10,633	ok	ok
236,6	16,186	14,682	13,239	11,079	ok	ok
239	16,256	15,559	13,348	11,439	ok	ok
241,4	16,271	16,557	13,326	11,884	ok	ok
243,8	16,073	17,339	13,144	12,395	ok	ok
246,2	15,281	17,736	12,459	12,256	ok	ok
248,7	14,439	17,876	11,573	12,352	ok	ok
251,2	14,009	17,729	11,052	12,343	ok	ok
253,7	13,818	17,322	10,598	12,216	ok	ok
256,2	14,258	16,805	10,607	12,349	ok	ok
258,8	14,887	16,169	11,06	12,255	ok	ok
261,4	15,799	15,59	11,351	11,936	ok	ok
264	16,282	15,104	11,789	11,938	ok	ok
266,6	16,627	14,703	12,242	12,329	ok	ok
269,3	16,738	14,756	12,205	12,233	ok	ok
272	16,539	15,236	12,178	12,42	ok	ok
274,7	16,058	15,727	12,172	12,691	ok	ok
277,4	15,254	16,664	11,535	13,2	ok	ok
280,2	14,475	17,798	10,935	13,497	ok	ok
283	13,779	18,929	10,291	13,507	ok	ok
285,8	13,435	19,514	9,7	13,345	fail	ok
288,7	13,699	19,797	9,541	12,761	fail	ok
291,6	14,392	19,899	9,519	12,356	fail	ok
294,5	15,428	19,842	9,561	11,946	fail	ok
297,4	16,695	19,816	9,894	11,803	fail	ok
300,4	18,161	20,023	10,317	12,318	ok	ok
303,4	19,581	20,303	10,773	13,012	ok	ok
306,4	20,447	20,853	11,473	14,249	ok	ok
309,5	20,866	21,725	11,234	15,72	ok	ok
312,6	20,767	22,85	11,517	16,501	ok	ok
315,7	20,482	23,476	12,158	16,898	ok	ok
318,9	20,347	23,625	12,739	16,85	ok	ok
322,1	20,258	23,492	13,517	16,52	ok	ok
325,3	20,208	23,239	14,45	15,829	ok	ok
328,6	20,397	22,339	15,019	14,936	ok	ok
331,9	21,032	21,156	15,429	14,221	ok	ok
335,2	21,917	20,228	15,752	13,857	ok	ok
338,6	22,561	19,689	15,763	13,748	ok	ok
342	22,521	19,632	15,316	13,785	ok	ok

345,4	21,776	20,163	14,519	13,77	ok	ok
348,9	20,714	20,571	13,776	13,473	ok	ok
352,4	19,531	21,144	13,227	12,768	ok	ok
355,9	18,945	20,718	12,539	11,259	ok	ok
359,5	18,354	19,497	12,244	9,7	fail	ok
363,1	18,358	17,85	12,224	8,517	fail	ok
366,7	19,033	16,391	12,448	7,533	fail	ok
370,4	20,035	15,437	12,915	7,235	fail	ok
374,1	20,659	15,379	13,427	7,624	fail	ok
377,8	20,597	16,061	13,778	8,761	fail	ok
381,6	19,722	17,884	13,73	9,834	fail	ok
385,4	18,709	20,051	13,536	10,232	ok	ok
389,3	18,396	20,883	13,43	10,247	fail	ok
393,2	18,387	20,31	13,326	10,174	fail	ok
397,1	18,315	18,808	12,82	10,162	ok	ok
401,1	18,771	17,069	12,383	10,444	ok	ok
405,1	19,916	15,562	12,351	11,255	ok	ok
409,2	20,662	15,004	11,947	12,402	ok	ok
413,3	20,183	15,46	11,311	13,785	ok	ok
417,4	18,91	16,763	10,385	14,711	ok	ok
421,6	17,35	18,116	9,557	14,866	ok	ok
425,8	16,035	18,393	8,773	14,457	fail	ok
430,1	15,01	17,705	8,255	13,205	fail	ok
434,4	14,17	16,229	7,673	11,698	fail	ok
438,7	13,628	14,368	7,432	10,232	ok	ok
443,1	13,341	12,768	7,468	9,479	ok	ok
447,5	12,514	12,216	7,616	9,645	ok	ok
452	11,456	12,523	7,628	10,186	ok	ok
456,5	10,541	12,989	7,599	10,29	ok	ok
461,1	9,694	13,537	7,728	10,47	ok	ok
465,7	9,295	13,282	8,073	10,469	ok	ok
470,4	9,249	12,638	8,36	10,398	ok	ok
475,1	9,872	12,012	8,968	9,764	ok	ok
479,9	10,58	11,36	9,67	9,476	ok	ok
484,7	11,056	11,188	10,534	9,603	ok	ok
489,5	11,359	11,178	11,564	10,198	ok	ok
494,4	11,769	11,492	12,298	10,796	ok	ok
499,3	11,927	12,196	12,567	11,322	ok	ok
504,3	11,7	12,2	12,637	11,536	ok	ok
509,3	11,52	11,936	12,851	11,746	ok	ok

514,4	11,351	11,231	13,308	11,897	ok	ok
519,5	10,661	10,597	13,738	11,971	ok	ok
524,7	9,789	9,787	13,961	12,342	ok	ok
529,9	8,758	8,741	13,73	12,495	ok	ok
535,2	8,257	7,926	13,404	12,521	ok	ok
540,6	8,362	7,198	12,973	12,133	ok	ok
546	8,566	6,69	12,462	11,562	ok	ok
551,5	8,978	6,769	11,753	11,329	ok	ok
557	9,369	7,609	11,191	11,359	ok	ok
562,6	10,306	8,559	11,063	11,513	ok	ok
568,2	11,429	9,603	11,401	11,621	ok	ok
573,9	12,193	10,441	11,978	11,62	ok	ok
579,6	12,632	11,197	12,337	11,631	ok	ok
585,4	13,067	11,705	12,649	11,55	ok	ok
591,3	13,338	12,279	12,632	11,5	ok	ok
597,2	12,817	12,092	12,296	11,325	ok	ok
603,2	12,482	11,943	12,263	10,943	ok	ok
609,2	12,101	12,369	11,705	10,486	ok	ok
615,3	11,679	12,293	11,252	10,211	ok	ok
621,5	11,582	12,345	10,38	10,346	ok	ok
627,7	11,527	12,407	9,557	9,796	ok	ok
634	11,577	12,728	8,902	9,372	ok	ok
640,3	11,873	13,249	8,756	9,177	ok	ok
646,7	12,456	13,494	8,777	8,728	ok	ok
653,2	13,066	13,531	8,822	8,545	ok	ok
659,7	13,573	13,585	8,45	8,423	ok	ok
666,3	13,391	13,537	8,37	8,233	ok	ok
673	13,801	13,36	8,45	7,786	ok	ok
679,7	14,391	12,787	9,05	7,79	ok	ok
686,5	14,512	12,331	8,953	8,327	ok	ok
693,4	13,935	12,515	8,451	8,577	ok	ok
700,3	13,151	11,96	7,848	8,794	ok	ok
707,3	12,549	11,439	8,322	8,888	ok	ok
714,4	12,323	10,865	8,644	9,275	ok	ok
721,5	11,654	10,254	8,695	9,696	ok	ok
728,7	11,017	9,777	8,757	10,387	ok	ok
736	10,818	9,52	9,293	11,101	ok	ok
743,4	11,286	9,517	10,531	11,377	ok	ok
750,8	11,954	9,568	11,716	11,404	ok	ok
758,3	12,258	9,373	12,106	11,496	ok	ok

765,9	11,766	9,239	11,889	11,699	ok	ok
773,6	11,34	9,184	12,351	11,717	ok	ok
781,3	11,249	9,326	12,976	11,519	ok	ok
789,1	10,705	9,204	13,284	11,575	ok	ok
797	9,979	8,506	13,172	12,627	ok	ok
805	9,37	8,497	13,285	13,774	ok	ok
813,1	9,056	9,117	13,9	14,243	ok	ok
821,2	8,899	9,232	14,231	14,214	ok	ok
829,4	8,62	8,678	13,945	14,779	ok	ok
837,7	8,499	8,362	13,82	15,856	ok	ok
846,1	9,015	8,619	14,499	16,483	ok	ok
854,6	9,288	8,565	15,287	15,88	ok	ok
863,1	9,304	8	15,289	15,221	ok	ok
871,7	8,792	7,267	15,37	15,794	fail	ok
880,4	8,85	7,43	16,217	16,358	fail	ok
889,2	9,488	7,633	16,317	15,532	fail	ok
898,1	8,608	7,342	15,833	14,485	fail	ok
907,1	8,131	7,303	15,313	14,894	fail	ok
916,2	7,829	6,716	15,233	15,554	fail	ok
925,4	7,62	6,533	14,777	13,803	fail	ok
934,7	7,165	5,884	13,587	12,456	fail	ok
944	6,447	5,133	12,402	12,235	fail	ok
953,4	6,259	5,264	11,53	12,047	fail	ok
962,9	5,833	5,258	10,553	11,044	fail	ok
972,5	5,824	5,256	9,378	10,493	fail	ok
982,2	5,829	5,437	8,675	10,757	ok	ok
992	5,912	6,033	8,604	10,628	ok	ok
1000	5,906	6,518	9,1	9,91	ok	ok

Toisen kalibrointi mittauksen tulokset kuvana



Toisen kalibrointi mittauksen tulokset numeroina

Ylärivissä esitetään mittauspaikat, ja niiden oikealla puolella taulukko, jossa näkyy ovatko mittaukset sallittujen hajonta rajojen sisällä. Koska tämä on 4-piste kalibrointi-mittaus, kaikkien mittausten pitäisi olla 6dB:n sisällä pienimmästä tuloksesta kullakin taajuudella, jos kyseessä olisi 16 pisteen mittausjärjestely voisivat jotkin pisteet olla 10 dB sisällä pienimmästä mittaus tuloksesta. Tuloksista nähdään, että kaikki mittaukset ovat 10 dB:n rajan sisäpuolella mutta se ei ole riittävä 4:än mittauspisteen koejärjestelylle.

taajuus	alavasen	alaoikea	ylavasen	yläoikea	6 dB	10 dB
80	5.425	4.233	3.319	3.559	ok	ok
80.8	5.406	4.508	3.604	3.883	ok	ok
81.6	5.352	4.919	3.877	4.302	ok	ok
82.4	5.288	5.323	4.31	4.46	ok	ok
83.2	5.253	5.444	4.343	4.652	ok	ok
84	5.272	5.472	4.42	4.703	ok	ok
84.8	5.354	5.547	4.54	4.792	ok	ok
85.6	5.454	5.64	4.677	4.888	ok	ok
86.5	5.533	5.714	4.806	5.096	ok	ok
87.4	5.571	5.756	4.928	5.601	ok	ok
88.3	5.554	5.752	5.308	5.137	ok	ok
89.2	5.523	5.737	5.502	5.189	ok	ok
90.1	5.51	5.739	5.149	5.242	ok	ok
91	5.526	5.764	5.177	5.292	ok	ok
91.9	5.598	5.841	5.224	5.375	ok	ok
92.8	5.723	6.086	5.327	5.516	ok	ok
93.7	5.882	6.358	5.488	5.702	ok	ok
94.6	6.395	6.306	5.697	6.058	ok	ok
95.5	6.225	6.51	5.987	6.293	ok	ok
96.5	6.408	6.806	6.31	6.623	ok	ok
97.5	6.613	7.342	6.393	7.178	ok	ok
98.5	6.839	7.765	6.66	7.714	ok	ok
99.5	7.268	8.373	7.11	8.389	ok	ok
100.5	7.367	9.043	7.346	9.059	ok	ok
101.5	7.596	9.303	7.704	9.488	ok	ok
102.5	7.791	9.629	8.19	9.928	ok	ok

154.2	17.269	16.296	17.22	16.535	ok	ok
155.7	17.17	15.712	17.501	16.326	ok	ok
157.3	17.134	15.366	17.568	15.843	ok	ok
158.9	17.194	14.906	17.179	15.661	ok	ok
160.5	17.532	14.742	17.608	15.821	ok	ok
162.1	18.411	15.207	18.653	16.7	ok	ok
163.7	19.421	16.098	19.665	17.988	ok	ok
165.3	20.249	17.183	20.484	19.319	ok	ok
167	20.733	18.2	21.209	20.418	ok	ok
168.7	20.768	18.536	21.193	21.135	ok	ok
170.4	20.443	18.46	20.734	21.422	ok	ok
172.1	20.143	18.286	20.367	20.773	ok	ok
173.8	19.567	17.796	20.099	20.342	ok	ok
175.5	19.078	17.362	19.556	19.743	ok	ok
177.3	18.29	16.782	18.982	19.057	ok	ok
179.1	17.405	16.306	18.103	18.238	ok	ok
180.9	16.655	15.643	17.33	17.469	ok	ok
182.7	16.397	15.248	16.789	17.06	ok	ok
184.5	16.468	15.175	16.527	16.421	ok	ok
186.3	16.945	14.861	16.647	15.893	ok	ok
188.2	17.557	15.241	17.164	15.623	ok	ok
190.1	18.262	15.31	17.485	15.372	ok	ok
192	18.958	15.646	17.981	15.316	ok	ok
193.9	19.564	16.27	18.318	15.345	ok	ok
195.8	19.961	16.313	18.393	15.266	ok	ok
197.8	19.965	16.486	18.21	15.189	ok	ok
199.8	19.743	16.678	17.49	15.363	ok	ok
201.8	19.204	16.636	16.625	14.821	ok	ok
203.8	18.233	16.326	15.44	14.365	ok	ok
205.8	17.409	15.966	14.466	14.042	ok	ok
207.9	16.764	15.475	13.782	13.413	ok	ok
210	16.177	15.021	13.174	12.77	ok	ok
212.1	16.293	14.888	12.817	12.411	ok	ok
214.2	16.666	14.83	12.883	12.089	ok	ok
216.3	17.235	14.661	13.268	11.551	ok	ok
218.5	17.734	14.646	13.936	11.297	ok	ok
220.7	18.232	14.57	14.359	11.14	ok	ok
222.9	18.39	14.696	14.638	11.268	ok	ok
225.1	17.919	15.218	14.703	11.675	ok	ok
227.4	17.665	15.694	14.595	12.333	ok	ok

229.7	17.314	16.317	14.376	12.817	ok	ok
232	17.512	16.942	14.257	13.291	ok	ok
234.3	17.061	17.442	14.214	13.55	ok	ok
236.6	16.746	18.303	14.23	14.007	ok	ok
239	16.344	19.149	13.618	14.391	ok	ok
241.4	15.883	20.072	12.975	14.884	ok	ok
243.8	15.01	20.479	12.128	15.318	ok	ok
246.2	14.407	20.343	11.366	14.788	ok	ok
248.7	14.544	19.92	11.426	14.307	ok	ok
251.2	15.24	19.115	11.277	13.517	ok	ok
253.7	16.513	18.43	11.867	13.23	ok	ok
256.2	18.002	18.179	12.644	12.805	ok	ok
258.8	19.17	17.821	13.477	12.93	ok	ok
261.4	19.728	17.687	14.22	13.521	ok	ok
264	19.815	17.374	14.493	13.873	ok	ok
266.6	19.411	17.334	14.571	13.176	ok	ok
269.3	18.796	17.693	14.38	13.352	ok	ok
272	17.797	18.279	13.816	13.578	ok	ok
274.7	16.504	19.312	12.793	14.184	ok	ok
277.4	14.875	20.44	11.217	14.562	ok	ok
280.2	13.581	21.338	9.911	14.647	fail	ok
283	13.345	21.763	9.264	14.348	fail	ok
285.8	14.122	21.923	9.763	13.968	fail	ok
288.7	16.431	21.782	11.036	13.424	ok	ok
291.6	19.173	21.606	12.605	13.265	ok	ok
294.5	21.552	21.517	13.431	13.434	ok	ok
297.4	23.209	21.628	13.635	13.786	ok	ok
300.4	24.093	21.804	13.374	14.439	ok	ok
303.4	24.386	22.347	12.753	14.954	ok	ok
306.4	24.393	23.003	12.328	15.634	ok	ok
309.5	23.988	24.028	11.826	16.518	fail	ok
312.6	23.07	25.089	11.739	16.877	fail	ok
315.7	22.344	25.421	12.243	16.445	fail	ok
318.9	22.551	25.077	13.309	15.347	ok	ok
322.1	23.814	23.845	14.647	13.795	ok	ok
325.3	25.705	22.187	15.881	12.291	fail	ok
328.6	27.385	20.685	16.599	11.36	fail	ok
331.9	28.344	19.959	16.856	11.427	fail	ok
335.2	28.25	19.727	16.598	12.188	fail	ok
338.6	26.915	20.06	15.739	13.21	fail	ok

342	24.568	20.758	14.526	14.251	ok	ok
345.4	21.688	21.555	13.146	14.634	ok	ok
348.9	19.369	21.888	12.25	14.398	ok	ok
352.4	18.408	21.518	12.208	13.098	ok	ok
355.9	19.465	19.95	13.096	11.046	ok	ok
359.5	21.73	16.912	14.175	8.92	fail	ok
363.1	24.172	14.041	15.275	7.512	fail	ok
366.7	25.443	12.43	15.304	7.728	fail	ok
370.4	25.349	13.103	14.863	9.422	fail	ok
374.1	23.893	15.911	13.952	12.174	ok	ok
377.8	21.009	19.979	12.872	14.9	ok	ok
381.6	17.806	23.47	12.21	16.361	ok	ok
385.4	15.821	24.561	12.126	16.21	fail	ok
389.3	15.56	22.953	12.438	14.781	ok	ok
393.2	16.712	18.752	13.219	13.039	ok	ok
397.1	18.629	14.178	13.633	12.413	ok	ok
401.1	19.649	11.277	13.518	12.863	ok	ok
405.1	18.978	11.354	12.784	15.047	ok	ok
409.2	16.368	14.149	11.311	17.759	ok	ok
413.3	13.072	17.373	10.23	19.707	ok	ok
417.4	10.666	19.347	9.881	20.146	fail	ok
421.6	9.479	18.439	10.484	18.766	ok	ok
425.8	9.99	15.068	11.511	16.102	ok	ok
430.1	11.256	10.974	12.4	13.482	ok	ok
434.4	11.55	8.485	12.451	11.507	ok	ok
438.7	10.225	8.178	11.488	10.804	ok	ok
443.1	8.028	9.635	10.305	11.255	ok	ok
447.5	6.382	11.729	9.48	12.157	ok	ok
452	6.155	12.448	9.375	12.685	fail	ok
456.5	7.177	11.342	9.947	12.433	ok	ok
461.1	8.727	9.384	10.812	11.165	ok	ok
465.7	9.987	7.969	11.704	10.048	ok	ok
470.4	10.505	7.755	12.421	9.581	ok	ok
475.1	10.647	8.848	13.089	10.422	ok	ok
479.9	10.903	10.695	13.49	12.256	ok	ok
484.7	11.677	11.776	14.181	14.05	ok	ok
489.5	12.479	12.23	14.656	14.778	ok	ok
494.4	13.005	11.606	14.81	14.601	ok	ok
499.3	13.284	10.553	14.667	14.015	ok	ok
504.3	13.28	9.776	14.427	13.32	ok	ok

Amplifier Research Model 25W 1000 vahvistimen tekniset määrittymykset.

Power Output, CW	Typical:	40W
	Minimum:	25W
	Linear:	20W minimum
Flatness	Maximum:	± 1.5 dB
	Typical:	± 1.0 dB
Frequency Response (instantaneous)	1 MHz - 1 GHz	
Input for Rated Output	1.0 mW maximum	
Power Gain	44 dB minimum	
Gain Control	10 dB minimum	
Input Impedance	50 ohms; VSWR 2.0:1 max.	
Output Impedance	50 ohms nominal	
Class of Operation	A	
RF Connectors	Type N female	
Weight	35 lbs (16.0 kg)	