

Niklas Karpatskij

Epävarmuustekijät normalisoidussa yhteysväli- vaimennusmittauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikka

Insinöörityö

28.5.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Niklas Karpatskij Epävarmuustekijät normalisoidussa yhteysvälivaimennusmittauksessa 38 sivua + 1 liite 28.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Matti Fischer Product Line Manager Ari Honkala
<p>Tässä insinööriyössä selvitettiin, miten testaushenkilökunnan mahdolliset huolimattomuusvirheet mittauksen asettelussa vaikuttavat puoli-vaimennetussa huoneessa suoritettavan normalisoidun yhteysvälivaimennusmittauksen tuloksiin. Työssä suoritettiin standardinmukainen NSA-mittaus ja standardista poikkeavia mittauksia. Standardista poikkeavissa mittauksissa pyrittiin tarkoituksella tekemään huolimattomuudesta johtuvia virheitä, jotta nähtäisiin niiden vaikutus mittauksen tuloksiin.</p> <p>Tarkoituksena oli verrata standardista poikkeavien mittausten ja mittausepävarmuuden vaikutusta mittaustulokseen. Tuloksista näkyi selvästi, että vaakapolarisaation mittauksissa mittausepävarmuutta suuremman poikkeaman tuloksiin aiheutti vain dipoliantennin virittäminen väärälle taajuudelle. Pystypolarisaatiolla vaikutukset olivat hieman suurempia. Hajonta tuloksissa oli pahimmillaan noin neljän desibelin suuruista.</p> <p>Tuloksista voidaan päätellä, että suurin osa mahdollisista mittauksen asettelussa tehtävistä virheistä ei vaikuta suuresti mittauksen lopputulokseen.</p>	
Avainsanat	NSA-mittaus, yhteysvälivaimennus, puoli-vaimennettu huone

Author(s) Title Number of Pages Date	Niklas Karpatskij Sources for uncertainty in the normalized site attenuation measurement 38 pages + 1 appendix 28 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Specialisation option	
Instructor(s)	Matti Fischer, Principal Lecturer Ari Honkala, Product Line Manager
<p>This thesis was done to find out how the possible errors in the setup of the normalized site attenuation measurement would affect the results of a NSA measurement done in a semi anechoic chamber. For the thesis a standard NSA measurement was performed with additional measurements that deviated from the standard. In the non-standard measurements, certain mistakes were intentionally made to correspond to errors in the setup of the measurement caused by careless mistakes. This was done to see the effects the mistakes would have on the measurements.</p> <p>The aim was to compare how the non-standard measurements and the measurement uncertainty effect the measurement results. The results showed clearly that for horizontal polarization the only mistake causing a more substantial difference than the measurement uncertainty was to tune the dipole antenna to a wrong frequency. For vertical polarization, the deviations were a bit more substantial than for horizontal polarization. The spread of the results were within four decibels from the standard measurement.</p> <p>It can be concluded from the results that the most errors made in the setup of the measurement do not significantly affect the results of the measurement.</p>	
Keywords	NSA measurement, site attenuation, semi-anechoic chamber

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömagneettinen säteily	2
2.1	Lähi- ja kaukokenttä	2
3	EMC-testit	4
3.1	Yleistä EMC-testeistä	4
3.2	Säteilevä emissio	4
4	Mittapaikat	5
4.1	OATS (Open Area Test Site)	5
4.2	Häiriösuojattu huone	6
4.2.1	SAC (Semi-Anechoic Chamber)	6
4.2.2	FAR (Full-Anechoic Room)	7
5	Laitteisto	8
5.1	Antennit	8
5.1.1	Dipoliantenni	8
5.1.2	Logperiodinen antenni	9
5.1.3	Kaksoiskartioantenni	10
5.1.4	BiLog-antenni	10
5.2	EMI testivastaanotin	11
5.3	Signaaligeneraattori	12
5.4	RF-kaapeli	12
5.5	RF-vaimennin	12
6	Normalisoitu yhteysvälivaimennus (NSA)	13
6.1	Ideaalinen NSA	13
6.1.1	Friisin yhtälö	14

6.1.2	Avoimen tilan ideaalisen NSA:n laskeminen	15
6.1.3	Maatasolla varustettujen mittapaikkojen ideaalinen NSA	15
6.2	Antennien asettelu NSA-mittauksessa	18
6.2.1	Mittauspisteet	18
6.2.2	Ehdot mittapisteiden vähentämiseen	19
6.3	NSA-mittaustekniikat	20
6.3.1	Yksittäisen taajuuden menetelmä	20
6.3.2	Taajuuspyyhkäisy	21
7	Emissiotestin mittausepävarmuus	22
7.1	Epävarmuustekijöiden vaikutus mittauksen kokonaisepävarmuuteen	22
7.2	Epävarmuustekijöiden lähteet	24
7.2.1	Epävarmuuden lähteiden luokittelu	25
7.2.2	Standardista aiheutuvien epävarmuustekijöiden jaottelu	25
7.3	Epävarmuustekijöiden määrittäminen	26
7.3.1	Vaikutussuureet	27
7.4	Epävarmuuslaskelman tekeminen NSA-mittaukselle	28
7.4.1	Normaalijakauma	29
7.4.2	Suorakulmainen jakauma	30
7.4.3	U:n muotoinen jakauma	30
7.4.4	Kolmiomainen jakauma	30
7.5	Yhdistetty vakioepävarmuus	30
8	NSA-mittauksen tulokset	32
8.1	Standardinmukaisen NSA-mittauksen tulokset	32
8.2	Standardista poikkeavat mittaukset	33
9	Yhteenveto	37
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. NSA-taulukko	

Lyhenteet

ANSI	American National Standards Institute, standardisointielin Yhdysvalloissa
BiLog	Antennityyppi, jossa yhdistetty kaksoiskartio- ja logperiodisen antennin ominaisuudet
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques. Kansainvälinen radiohäiriöihin keskittynyt komitea.
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
EMI	Sähkömagneettinen interferenssi. Sähkölaitteen ympäristöönsä aiheuttamat radiotaajuiset häiriöt.
EMS	Sähkömagneettinen vastaanottavuus. Kuvaa sähkölaitteen kykyä sietää ympäristössään esiintyviä sähkömagneettisia häiriöitä.
FAR	Fully-Anechoic Room. Mittapaikka, jonka metalliset seinät, lattia ja katto on päällystetty vaimennusmateriaaleilla
FINAS	Finnish Accreditation Service. Suomen kansallinen akkreditointielin.
NSA	Normalized site attenuation. Normalisoitu yhteysvälivaimennus. Kuvaa signaalin vaimenemista ilmapälillä.
MIU	Measurement instrument uncertainty. Mittalaitteiston aiheuttama epävarmuus mittaustuloksissa.
OATS	Open Area Test Site. Avoimen tilan mittapaikka.
SAC	Semi anechoic chamber. Puolivaimennettu mittapaikka, jonka seinät ja katto päällystetty vaimennusmateriaaleilla.
SCU	Standards compliance uncertainty. Vaatimustenmukaisuusmittauksen mittausepävarmuus.

1 Johdanto

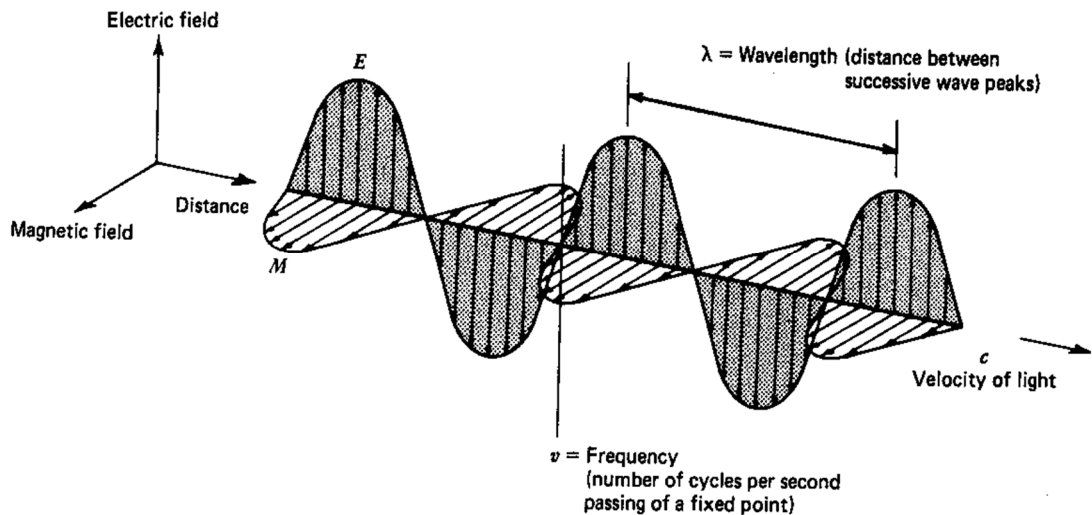
Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia testaushenkilökunnan mahdollisten virheiden vaikutusta NSA-mittauksen (Normalized Site Attenuation) tuloksiin. Standardinmukainen NSA-mittaus suoritettiin SGS Fimkon Karaportissa sijaitsevassa 10 metrin mittapaikassa. Jotta virheellisiä tuloksia voitaisiin verrata standardinmukaisiin tuloksiin, osa mittauksista suoritettiin myös tarkoituksella standardista poiketen. Päätös keskittyä virheellisten mittausten osalta standardin antamaa taajuusaluetta pienempään taajuusalueeseen tehtiin kalliin mittausajan vähentämiseksi.

Tavoitteena oli päästä vertaamaan standardinmukaisten ja standardista poikkeavien mittausten tulosten eroa ja tutkia NSA-mittaukseen liittyvien mittausepävarmuuksien vaikutuksista mittausten tuloksiin. SGS Fimkon FINAS-akkreditointi vaatii, että NSA-mittaukset suoritetaan kaikissa mittapaikoissa täydellisenä enintään kolmen vuoden välein ja että yhden pisteen verifiointit suoritetaan vuosittain.

NSA-mittaus on kuvattu tarkasti kansainvälisessä CISPR 16-1-4 -standardissa ja Pohjois-Amerikkalaisessa ANSI C63.4 -standardissa. Työ aloitettiin tutustumalla näihin standardeihin ja mittaukseen liittyvään teoriaan. Työssä tutustutaan ensin lyhyesti mittauksiin liittyvään sähkömagneettiseen teoriaan, säteilevän emission mittaukseen ja erilaisiin mittapaikkoihin. Tämän jälkeen käsitellään mittalaitteistoa ja mittausepävarmuutta. Lopuksi keskitytään NSA-mittauksen mittausjärjestelyyn ja tuloksiin.

2 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettinen säteily koostuu sähkökentästä ja magneettikentästä. Kaukokentässä molemmat kentät ovat poikittain säteilyn etenemissuuntaan nähden ja kohtisuorassa toisiaan kuvan 1 mukaisesti. [5, s. 9]



Kuva 1. Sähkö- ja magneettikenttä

Sähkökenttä syntyy, kun säteilylähde on suuri-impedanssinen eli sen virta on pieni, esimerkiksi avoin johdin. Tällöin energia varastoituu sähkökenttään, ja virran ollessa hyvin pieni, syntynyt magneettikenttä on vähäinen. Magneettikentän synnyttää pieni-impedanssinen säteilylähde, jossa jännite on alhainen. Hyvänä esimerkkinä tästä voidaan käyttää johdinsilmukkaa. [1, s. 230]

2.1 Lähi- ja kaukokenttä

Säteilijän aiheuttama sähkömagneettinen kenttä voidaan jakaa lähi- ja kaukokenttään kahden eri määritelmän mukaan. Lähikentäksi kutsutaan nimensä mukaisesti säteilijän lähellä olevaa kenttää. Etäisyys, jolla kenttä muuttuu kaukokentäksi, voidaan laskea kahdella eri tavalla määritelmästä riippuen. Sähkömagneettisen kentän sähkö- ja magneettikenttäkomponenttien suhteesta käytetään nimitystä aaltoimpedanssi. Jos oletetaan, että säteilyn lähde on pistemäinen, voidaan käyttää Maxwellin kriteeriä. Maxwellin kriteerin mukaan lähi- ja kaukokentän raja on $\frac{\lambda}{2\pi}$, missä λ on aallonpituus. [1, s. 230; 5, s. 25]

Rayleighin kriteerin mukaan lähi- ja kaukokentän raja on $\frac{2D^2}{\lambda}$, missä D on säteilylähteen suurin dimensio. Rayleighin kriteeriä käytetään, kun säteilylähde on liian suuri pistemäiseksi lähteeksi.

Lähikentässä aaltoimpedanssi määritetään säteilylähteen ominaisuuksien mukaan. Yleensä lähikentässä toinen kenttätyypeistä on vallitseva ja säteilylähteen tyyppi määrittää syntyvän kentän tyyppin. Etäisyyden kasvaessa vallitseva kenttäkomponentti vaimenee nopeammin. Säteilylähteen energia on varastoitunut lähikenttään, jolloin kenttä häviää, kun säteilylähde sammutetaan. [1, s. 230]

Kaukokentässä aalto etenee tasoaaltona, jolloin sähkö- ja magneettikenttäkomponentit vaimenevat samassa tahdissa ja aaltoimpedanssi on vakio. Tyhjiössä ja ilmassa aaltoimpedanssi lasketaan kaavalla 1.

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377 \Omega \quad (1)$$

Kaukokentän energia ei häviä, vaan aalto jatkaa etenemistä valonnopeudella. Kaukokentässä vastaanotin ei vaikuta säteilylähteeseen.

3 EMC-testit

Euroopan komissio hyväksyi ensimmäisen EMC -direktiivin vuonna 1992. Tarkoituksena oli, että kaikissa Euroopan yhteisön maissa olisi yhtenevät vaatimukset tuotteiden sähkömagneettisten häiriöiden osalta, jolloin maiden välillä ei näiltä osin olisi vientiesiteitä.

3.1 Yleistä EMC-testeistä

EMC (Sähkömagneettinen yhteensopivuus) tarkoittaa laitteen kykyä toimia hyväksyttävästi omassa sähkömagneettisessa ympäristössään, aiheuttamatta muille samassa ympäristössä käytetyille laitteille sietämätöntä sähkömagneettista häiriötä. EMC voidaan jakaa kahteen eri osa-alueeseen, joista EMI (sähkömagneettinen interferenssi) tarkoittaa sähkölaitteen ympäristöönsä tuottamaa sähkömagneettista häiriötä eli häiritsevyyttä ja EMS (sähkömagneettinen vastaanottavuus) tarkoittaa sähkölaitteen kykyä sietää ympäristön tuottamia sähkömagneettisia häiriöitä. Toisin sanoen laitteen häiriintyvyyttä.

EMC –testit jaotellaan emissio- ja immuuteettitesteiksi sen mukaan testataanko laitteen tuottamia häiriöitä, vai tuotteen kykyä sietää häiriöitä. Testit suoritetaan eri tavoilla häiriön taajuudesta riippuen.

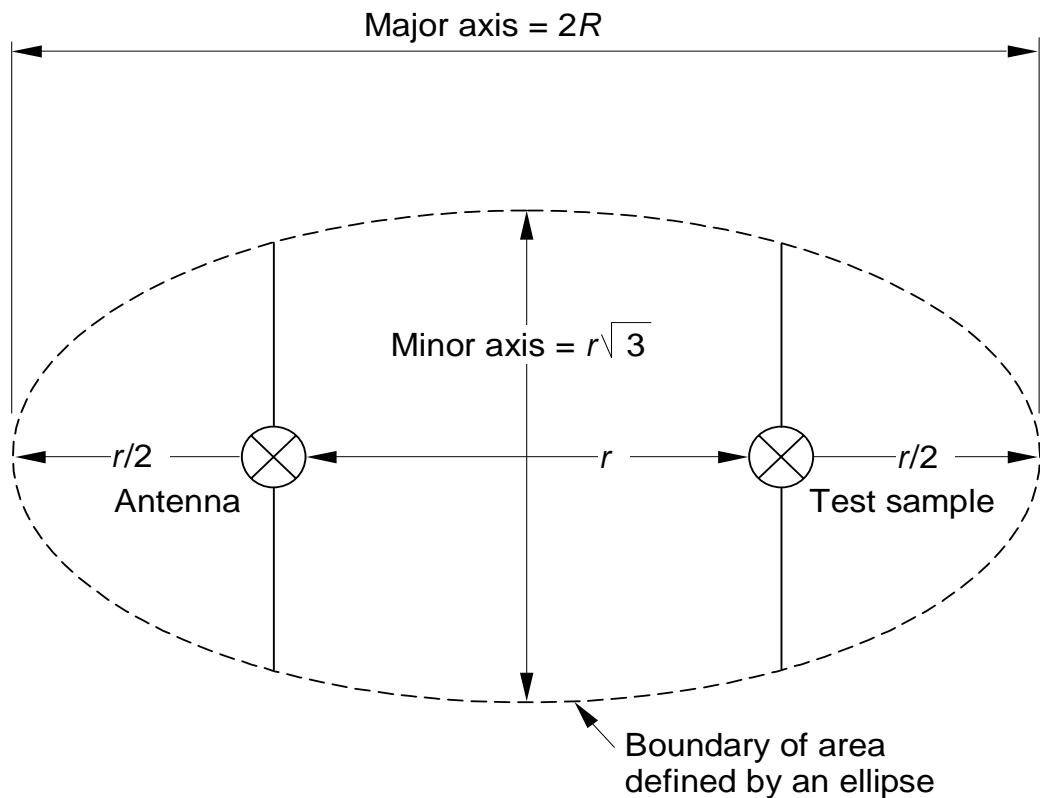
3.2 Säteilevä emissio

Säteilevällä emissiolla tarkoitetaan sähkölaitteen aiheuttamia, yleensä yli 30 MHz:n häiriöitä, jotka säteilevät laitteesta ympäristöön. Jotta säteilevää emissiota voitaisi mitata tarkasti, tarvitaan mittapaikka, jossa ympäristön säteily tunnetaan tai voidaan eliminoida kokonaan.

4 Mittapaikat

4.1 OATS (Open Area Test Site)

Open Area Test Site tarkoittaa avoimen tilan mittapaikkaa, jonka ominaisuudet on määritetty EN 55022- ja CISPR16-1-4 -standardeissa. Täyttääkseen standardin vaatimukset mittapaikan ympäristön tulee olla täysin esteetön ja tasainen alue, jossa ei ole muita radioaaltoja sirottavia materiaaleja. Esteettömän alueen tulee myös olla tarpeeksi suuri, jotta alueen ulkopuolisten radioaaltoja sirottavien objektien vaikutus olisi mahdollisimman pieni. Koska maaheijastuksilta ei voida välttyä, mittapaikalla tulee olla radioaaltoja heijastava maataso. Maatason tulisi olla rakennettu yhteen hitsatuista metallilevyistä tai metalliverkosta, eikä siinä saa olla suurimman testipaikalla mitattavan taajuuden aallonpituuden kymmenesosaa suurempia pitkittäisiä rakoja. Esimerkiksi 1000 MHz:n taajuudella suurimman sallitun raon pituus on noin 3 cm. Standardeissa määritetään myös antennin ja mitattavan laitteen etäisyys, joka on yleisimmin 10 metriä, mutta myös 3 ja 30 metrin mittausetäisyydet ovat mahdollisia. Piirros OATS:n mittasuhteista esitettynä kuvassa 2. [1, s. 142; 2, s. 20; 3, s. 20; 4, s. 5]



Kuva 2. OATS:n esteetön ala kun mittapaikalla on pyörityspöytä [2, s. 21]

Kaksi suurinta ongelmaa OATS:n käytössä mittapaikkana ovat vaikeat sääolosuhteet ja ympäristön aiheuttama taustasäteily, joka voi peittää mitattavan laitteen aiheuttaman säteilyn joillakin taajuuksilla, ollessaan standardien määrittämiä emissioraja-arvoja voimakkaampaa. Euroopan alueella ei juurikaan ole paikkoja, joissa radiolähetykset ja matkapuhelinliikenne eivät häiritsisi mittauksia. [1, s. 141–143]

4.2 Häiriösuojattu huone

Sääolosuhteiden ja ympäristön aiheuttaman säteilyn vaikutuksista päästään eroon suorittamalla testit häiriösuojatussa huoneessa. Häiriösuojatun huoneen seinät, lattia ja katto ovat metallia, joka estää kaiken ulkopuolisen säteilyn pääsyn huoneeseen. Metalliset rakenteet aiheuttavat kuitenkin heijastuksia, jotka estävät tarkkojen emissiomittausten tekemisen. Pahimmillaan nämä heijastukset voivat aiheuttaa jopa yli 30 dB:n amplitudin muutoksia hyvinkin pienin taajuusvälein. Lisäksi pienetkin muutokset huoneen sisällä tai mitattavan laitteen asettelussa voivat suuresti muuttaa saatuja tuloksia, joten heijastusten aiheuttamia virheitä ei ole mahdollista poistaa normalisoimalla. Tämän vuoksi suojatussa huoneessa tehdyillä säteilevän emission mittauksilla voidaan saada selville vain taajuudet, joilla emissioita on. Emissioiden voimakkuudesta ei voida tehdä minkäänlaisia johtopäätöksiä. [1, s. 144–145]

Suojatun huoneen aiheuttamia heijastuksia voidaan estää lisäämällä metallipinnoille radioaaltoja absorboivia vaimennusmateriaaleja. Vaimennusmateriaalit ovat joko ferriitilevyjä tai hiiliseosteisesta massasta valmistettuja pyramidin muotoisia kappaleita. Molemmilla materiaaleilla on omat hyvät ja huonot puolensa, ja parhaimman tuloksen saakin yhdistämällä molempia materiaaleja.

4.2.1 SAC (Semi-Anechoic Chamber)

Radiokaiutonta huonetta, jonka lattia on heijastavaa materiaalia, seinät ja katto on päällystetty radioaaltoja vaimentavilla materiaaleilla, kutsutaan nimellä puoli-kaiuton huone. Tällaisessa huoneessa voidaan mitata säteilevän emission mittauksia, koska maatason aiheuttamat häiriösignaalia vaimentavat heijastukset voidaan minimoida liikkuttamalla vastaanottoantennia 1 – 4 metrin korkeudella.

Säteilevää emissiota mitattaessa antennin ja testattavan laitteen välinen etäisyys voi puoli-kaiuttomassa huoneessa olla 3 m, 5 m tai 10 m. Vaadittava etäisyys riippuu tes-

tattavan laitteen pyörityspöydän pyöriessä muodostaman sylinterinmuotoisen tilavuuden halkaisijasta ja korkeudesta taulukon 1 mukaisesti. [1, s. 145; 2, s. 34]

Taulukko 1. Testitilavuuden suurin sallittu koko verrattuna antennin etäisyyteen [2, s. 34]

Testitilavuuden suurin mahdollinen halkaisija ja korkeus [m]	Antennin ja laitteen välinen etäisyys [m]
1,5	3,0
2,5	5,0
5,0	10,0

Puoli-kaiuton huone on suora vastike avoimen tilan mittapaikalle, joten molemmissa testipaikoissa voidaan tehdä samojen standardien mukaiset mittaukset täysin samalla tavalla. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että tämä mittaustapa olisi paras mahdollinen.

4.2.2 FAR (Full-Anechoic Room)

Vaimennusmateriaalien kehitys viimeisen kymmenen vuoden aikana on tehnyt täysin vaimennettujen kaiuttomien huoneiden rakentamisen mahdolliseksi ja taloudellisesti kannattavaksi. Täysvaimennetussa huoneessa myös lattia on peitetty vaimentimilla, jolloin heijastavasta maatasosta päästään eroon. Maatason poistaminen nopeuttaa huomattavasti säteilevän emission mittauksia, kun vastaanottoantennin korkeutta ei tarvitse muuttaa mittauksen aikana heijastusten eliminoimiseksi. [1, s. 146]

5 Laitteisto

5.1 Antennit

EMC-testeissä käytetään erilaisia antennoja mittauksen tyypistä riippuen.

5.1.1 Dipoliantenni

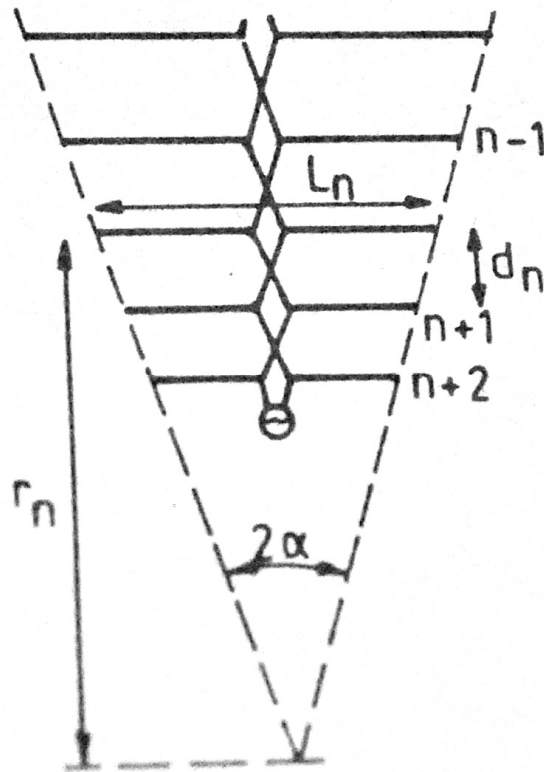
Yleisin alle 1 GHz:n taajuuksilla käytetty antennityyppi on dipoliantenni. Dipoliantenni tarkoittaa keskeltä katkaistua suoraa johdinta, jota voidaan syöttää aaltojohdosta. Sähköisesti dipoliantenni koostuu peräkkäisistä sarjaan kytketyistä virtaelementeistä. Dipoliantenneja ei yleensä käytetä EMC-mittauksissa, koska dipoliantenni pitää virittää jokaiselle taajuudelle erikseen. Niitä voidaan kuitenkin järkevästi käyttää NSA-mittauksessa yli 200 MHz:n taajuuksilla, koska mitattavia taajuuksia on kyseisellä taajuusalueella yhteensä vain yhdeksän. Kuvassa 3 on kuvattuna yhdet mittauksissa käytetyt dipoliantennit. Nämä antennit voidaan virittää taajuuksille, jotka ovat 180 MHz:n ja 300 MHz:n välillä.



Kuva 3. 250 - 300 MHz:n taajuuksilla käytetyt dipoliantennit

5.1.2 Logperiodinen antenni

Logperiodinen antenni koostuu useasta dipoliantennista. Näitä dipoliantenneja syötetään siirtojohdolla, jonka vaihe käännetään mekaanisesti dipolista toiseen. Tällä tavalla saadaan aikaiseksi parempi taajuusriippuvuus periodivälillä kuin suoraa syöttöä käyttämällä. Logperiodisissa antenneissa vain osa dipoleista ovat aktiivisia samanaikaisesti. Kuvan 4 mukaisessa logperiodiantennissa vain 3 dipolia lähettää suurimman osan säteilystä, se jonka pituus on lähimpänä lähetettävän taajuuden puolta aallonpituutta ja tämän viereiset dipolit. Tätä antennityyppiä voidaan käyttää säteilevän emission mitauksissa taajuusalueella 300 - 1000 MHz. Logperiodinen antenni on suuntaavampi kuin dipoliantenni, jolloin sen vahvistus on myös korkeampi. [7, s. 211]



Kuva 4. Piirros logperiodisesta antennista [7, s. 211]

5.1.3 Kaksoiskartioantenni

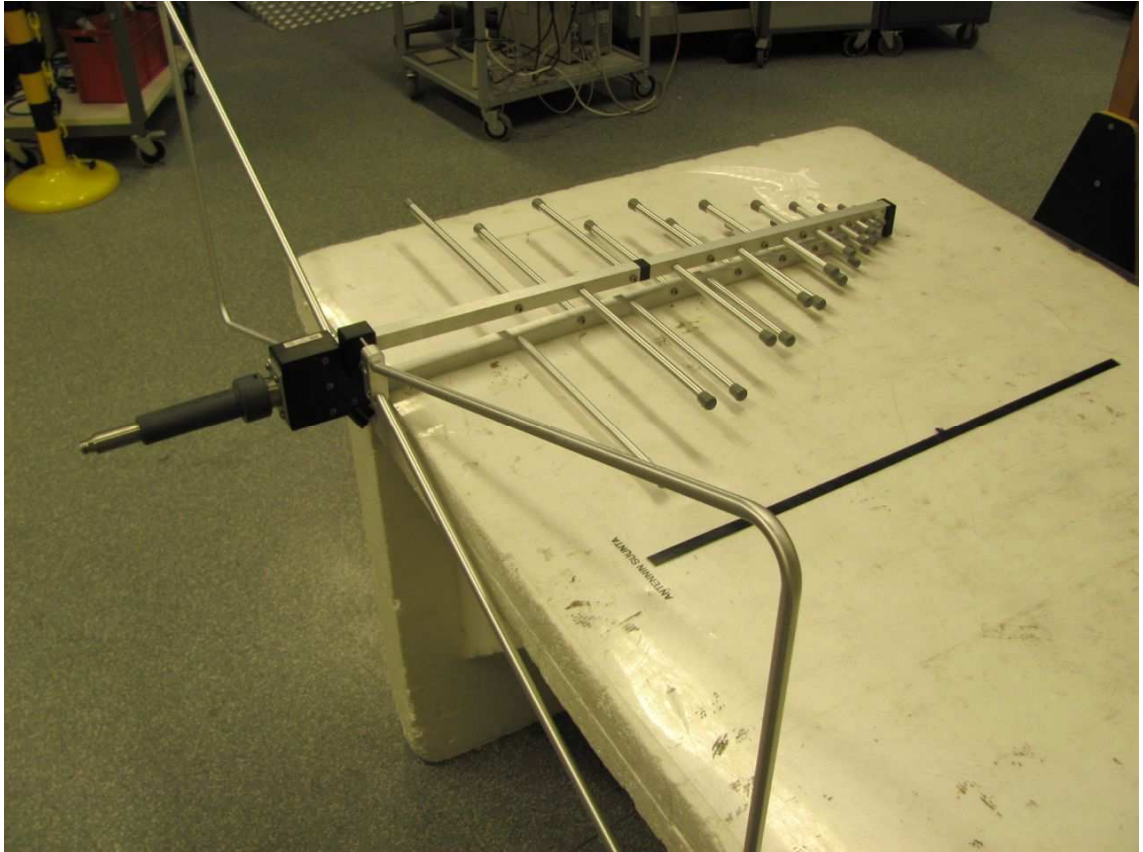
Kuvassa 5 on kuvattu tässä insinööriyössä käytetty kaksoiskartioantenni, joka toimii taajuusalueella 30-200 MHz:ä. Käytetään emissiotesteissä usein kolmen metrin mittatäisyydellä, koska antennin mittaussakselin suuntainen fyysinen pituus on yleensä pieni. Koostuu kahdesta samanlaisesta kartiosta.



Kuva 5. Mittauksissa käytetty kaksoiskartioantenni

5.1.4 BiLog-antenni

BiLog-antenni on hybridiantenni, jossa on yhdistetty kaksoiskartioantennin (Biconical Antenna) ja log-periodisen antennin toiminnot. Antennin kaistanleveys saadaan kattamaan koko 30 - 1000 MHz:n emissiomittauksen taajuusalue, kun antenni toteutetaan tällä tavalla. BiLog-antenni kehitettiin 1990-luvun loppupuolella Yorkin yliopistossa, mutta nykyään kaikki EMC-antennien valmistajat ovat tuoneet markkinoille omat versionsa antennityypistä. Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 6 on kuvattuna yksi säteilevän emission mittauksissa käytettävä BiLog-antenni. [1, s. 127]



Kuva 6. Säteilevän emission mittauksessa käytettävä BiLog-antenni

BiLog-antennin edut EMC-laboratorioille ovat mittausten nopeutuminen ja luotettavuuden parantuminen, kun kesken mittauksen ei tarvitse enää vaihtaa antennia.

5.2 EMI testivastaanotin

EMI testivastaanotin on erityisesti EMC-testeihin suunniteltu laite, jonka suurimmat edut spektrianalysointiin verrattuna ovat:

Testivastaanottimessa on parempi erottelukyky, eli signaali erottuu pohjakohinasta paremmin. Testivastaanottimissa on mukana esivalitsin, joka rajoittaa sekoittimelle tulevaa taajuuskaistaa. Tämä vähentää muilla taajuuksilla olevien häiriöiden vaikutuksen mitattavaan taajuuteen. Testivastaanotin kestää suurempaa tehoa joutumatta ylikuormitustilaan. Mitattavan signaalin taajuus ja amplitudi saadaan mitattua paremmalla tarkkuudella. Testivastaanottimet ovat kuitenkin jopa kymmenen kertaa kalliimpia kuin spektrianalysointorit. [1, s. 119]

5.3 Signaaligeneraattori

Signaaligeneraattoria käytetään emissiomittausten yhteydessä vain kalibroinneissa, kuten esimerkiksi NSA-mittauksessa, tuottamaan halutun tyyppinen signaali. Vertaamalla tätä alkuperäistä signaalia testivastaanottimeen tulleeseen signaaliin voidaan laskea signaalin vaimeneminen testausjärjestelmässä.

5.4 RF-kaapeli

Tämän insinööriyön yhteydessä käytetyt RF-kaapelit ovat erittäin laadukkaita 50 ohmin koaksiaalikaapeleita, joissa signaalin vaimeneminen on erittäin vähäistä, parhaimmillaan vain 0,2 dB/m yhden GHz:n taajuudella. RF-kaapeleita käytetään kuljettamaan signaalia antennien ja vastaanottimen välissä.

5.5 RF-vaimennin

RF-vaimentimia käytetään kalibrointimittauksissa parantamaan impedanssisovitusta antennin ja RF-kaapelin liitoskohtaan. Impedanssisovitus pienentää liitoskohdassa syntyvää heijastusta, joka aiheuttaisi signaalin vääristymistä ja tehohäviöitä.

6 Normalisoitu yhteysvälivaimennus (NSA)

Normalisoidun yhteysvälivaimennusmittauksen tarkoituksena on varmistua siitä, että puoli-kaiuttoman huoneen (SAC) sähkömagneettiset ominaisuudet ovat standardinmukaiset. Standardi CISPR 16-1-4 määrittää mittaustavan, ideaalisen yhteysvälivaimennuksen ja rajat, joiden sisään tulosten on osuttava.

Mittauksessa pyritään selvittämään testipaikan yhteysvälivaimennus eli lähetettävän signaalin vaimeneminen kahden antennin välillä. Vaimennuksen mittaamiseen tarvitaan kaksi eri mittausta vastaanotetusta jännitteestä, V_R . Ensimmäiseksi mitataan vastaanotettu jännite V_{DIRECT} siten, että antennikaapelit irrotetaan antenneista ja kytketään toisiinsa adapterin avulla. Toinen lukema V_{SITE} saadaan kun kytketään antennikaapelit takaisin antenneihin ja mitataan signaalin maksimiarvo, kun vastaanottoantennia liikutetaan metrin korkeudesta neljän metrin korkeuteen kymmenen senttimetrin välein. Mitattu NSA saadaan laskettua, kun lukemat sijoitetaan desibeleinä kaavaan 2. [2, s. 24–25; 8, s. 16–17]

$$A_{N\,meas} = V_{DIRECT} - V_{site} - F_{aT} - F_{aR} - \Delta F_{a\,TOT} \quad (2)$$

missä,

F_{aT} on lähetettävän antennin antennikerroin, F_{aR} on vastaanottavan antennin antennikerroin ja $\Delta F_{a\,TOT}$ on dipoliantennien keskinäisimpedanssin korjauskerroin.

Poikkeama ideaalisesta NSA:sta lasketaan kaavalla 3.

$$\Delta A_N = A_{N\,MEAS} - A_{N\,IDEAL} \quad (3)$$

Läpäistäkseen standardin CISPR 16-1-4 vaatimukset, tuloksen tulee olla ± 4 desibelin sisällä ideaalisesta NSA:sta.

6.1 Ideaalinen NSA

Laskettaessa ideaalista NSA:ta mittapaikka oletetaan ideaaliseksi. Ideaalisessa mittapaikasta oletetaan seuraavaa:

- Mittapaikassa ei tapahdu ei-toivottuja heijastuksia

- Lähetys- ja vastaanottoantenni eivät vaikuta toisiinsa sähköisesti
- Antennien ja vaimennusmateriaalien välillä ei tapahdu kytketymistä
- Antenneina käytetään ideaalisia viritettäviä dipoliantenneja, jotka ovat siis ideaalisesti suunnattuja, häviöttömiä ja sovitettuja.

6.1.1 Friisin yhtälö

Friisin yhtälöllä voidaan laskea ideaalisen antennin vastaanottama teho, kun lähettävän antennin lähettämä teho ja etäisyys vastaanottoantennista tiedetään.

$$P_{rec} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 1,643^2 \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}\right)^2 \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}\right)^2 P_t \quad (4)$$

missä,

P_t on lähetetty teho

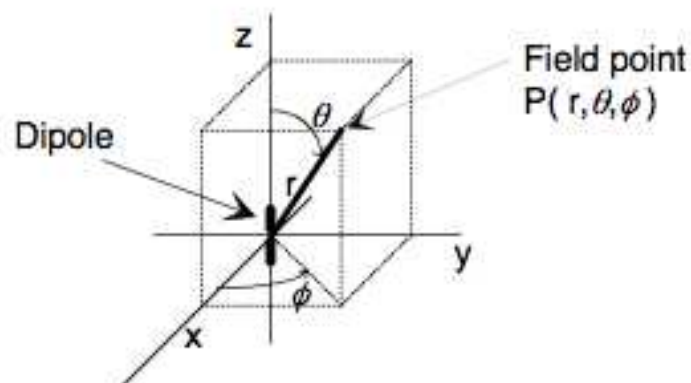
P_{Rec} on vastaanotettu teho

λ on aallonpituus

d on antennien välinen etäisyys

θ on elevaatiokulma (kts. Kuva 7).

Kuvassa 7 on kuvattuna mistä kaavoissa 4, 5 ja 6 esiintyvä elevaatiokulma θ saadaan. Kuvassa näkyvä kuutio kuvastaa mittapaikkaa, ja origo antennin sijaintia huoneen sisällä.



Kuva 7. Elevaatiokulma [3, s. 31]

6.1.2 Avoimen tilan ideaalisen NSA:n laskeminen

Avoimen tilan ideaalisella NSA:lla tarkoitetaan kahden antennin välissä tapahtuvaa signaalin vaimentumista avoimessa tilassa. Avoimella tilalla tarkoitetaan tilaa, jossa signaali ei pääse heijastumaan mistään. Esimerkkinä kyseisestä tilasta voidaan käyttää täysin vaimennettua mittapaikkaa (FAR). Signaalin vaimentumisen funktio on tässä tapauksessa Friisin yhtälön käänteisfunktio, joten se voidaan laskea vaihtamalla kaavan 4 osoittajien ja nimittäjien paikkaa kaavan 5 mukaisesti: [4, s. 30]

$$\frac{P_t}{P_{rec}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1}{1.643^2}\right) \left(\frac{\sin\theta}{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}\right)^2 \left(\frac{\sin\theta}{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}\right)^2 \quad (5)$$

Kaava 5 voidaan esittää myös logaritmisessa (dB) muodossa:

$$SA = 17,67 + 20 \log\left(\frac{d}{\lambda}\right) + 20 \log\left(\frac{\sin\theta}{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}\right) + 20 \log\left(\frac{\sin\theta}{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}\right) \text{ dB} \quad (6)$$

Voidaan olettaa, että molemmat antennit ovat samalla korkeudella, jolloin pallokoordinaatti $\theta = \pi/2$. Kaava yksinkertaistuu huomattavasti:

$$SA = 17,67 + 20 \log\frac{d}{\lambda} \text{ dB} \quad (7)$$

6.1.3 Maatasolla varustettujen mittapaikkojen ideaalinen NSA

Avoimen tilan mittapaikan (OATS) ja puoli-kaiuttoman huoneen ideaalisen NSA:n laskenta eroaa huomattavasti avoimen tilan NSA:n laskennasta. OATS:ssa ja SAC:ssa on otettava huomioon myös maataso heijastukset. Laskettaessa ideaalista NSA:ta tulee myös ottaa huomioon, että signaalin heijastuminen maatasosta riippuu antennien polarisaatiosta ja mittaustäisyydestä. Tämän takia OATS:n ja SAC:n ideaaliselle NSA:lle on eri arvot pysty- ja vaakapolarisaatioilla. Heijastavalla maatasolla varustettujen mittapaikkojen ideaalinen NSA, A, voidaan laskea kaavan 8 avulla. [4 s. 31–32]

$$A = \frac{279,1AF_TAF_R}{f_m E_{D(H \text{ or } V)}^{max}} \quad (8)$$

missä

AF_T on lähetysantennin antennikerroin [m^{-1}]

AF_R on vastaanottoantennin antennikerroin [m^{-1}]

f_m on taajuus megahertzeinä

$E_{D(H tai V)}^{max}$ on puolen aallon dipoliantennin yhden pW:n teholla aiheuttama

kentänvoimakkuuden maksimiarvo vastaanottoantennin korkeuspyyhkäisyllä mitattuna. Vaakapolarisaatiolla käytetään muodossa E_{DH}^{max} , pystypolarisaatioissa käytetään muodossa E_{DV}^{max} .

Vaakapolarisaatiolla E_{DH}^{max} lasketaan kaavan 9 avulla:

$$E_{DH}^{max} = \frac{7,01}{d_s d_h} \sqrt{d_h^2 + |\rho_H|^2 d_s^2 + 2d_s d_h |\rho_H| \cos(\phi_H - \beta(d_h - d_s))} \quad (9)$$

missä,

$$\rho_H = \frac{\sin \gamma - (\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}}{\sin \gamma + (\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}} = |\rho_H| e^{j\phi_H}$$

$d_s = \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + d^2}$ on suoran signaalin kulkema etäisyys [m],

$d_h = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}$ on heijastuneen signaalin kulkema etäisyys [m],

ϵ_r on suhteellinen dielektrisyysvakio,

β on $2\pi/\lambda$ [rad/m],

σ on johtavuus [Siemens/m],

ϕ_H on heijastuskertoimen vaihekulma,

γ on tulokulma,

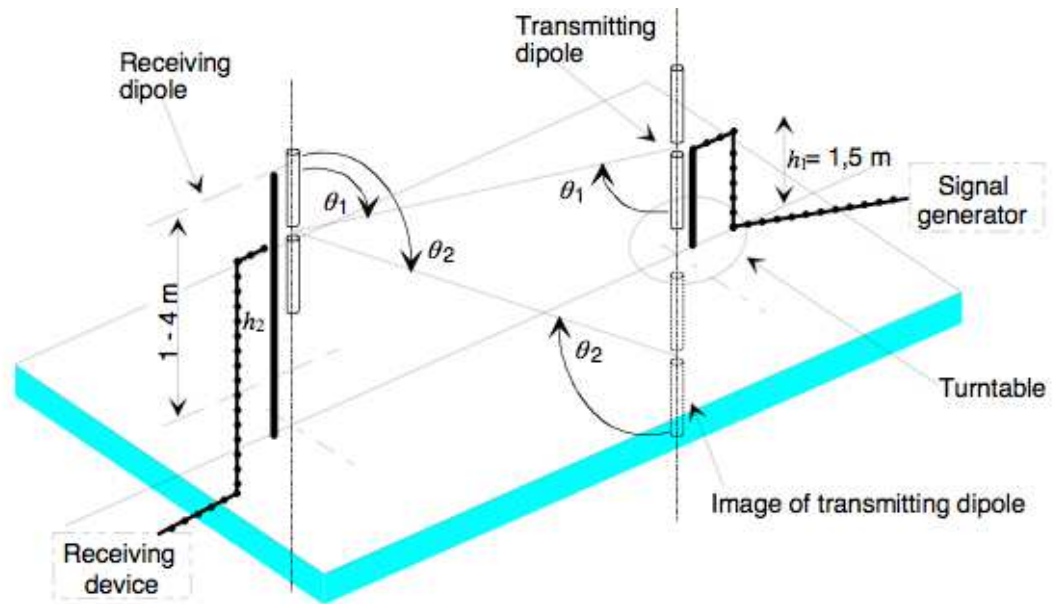
h_1 on lähetysantennin korkeus,

h_2 on vastaanottoantennin korkeus

Idealisesti heijastavan metallisen maatasen tapauksessa $|\rho_H| = 1,0$ ja $|\phi_H| = 180^\circ$. Tästä johtuen kaava 9 voidaan sieventää muotoon:

$$E_{DH}^{max} = \frac{7,01 \sqrt{d_h^2 + d_s^2 - 2d_s d_h \cos \beta (d_h - d_s)}}{d_s d_h} \quad (10)$$

Pystypolarisaatiolla käytetään samantyyppistä kaavaa, mutta siinä joudutaan ottamaan huomioon myös dipoliantennien keskiakselien suuntakulman poikkeaman tuomat vaikutukset. Suuntakulman poikkeamat θ_1 ja θ_2 on kuvattu kuvassa 8.



Kuva 8. Suuntakulmien poikkeamat pystypolarisaatiolla [9, s. 34]

Suuntakulman poikkeamat voidaan laskea geometrisesti kuvan 8 avulla siten, että $\sin \theta_1 = \frac{d}{d_s}$ ja $\sin \theta_2 = \frac{d}{d_h}$. Nämä termit muuttavat E_{DV}^{max} :n kaavaan muotoon:

$$E_{DV}^{max} = \frac{7,01 d^2}{d_s^3 d_h^3} \sqrt{d_h^6 + d_s^6 |\rho_V|^2 + 2d_s^3 d_h^3 |\rho_V| \cos(\phi_V - \beta (d_h - d_s))} \quad (11)$$

missä,

$$\rho_V = \frac{(\epsilon_r - j60\sigma) \sin \gamma - (\epsilon_r - j60\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}}{(\epsilon_r - j60\sigma) \sin \gamma + (\epsilon_r - j60\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}} = |\rho_V| e^{j\phi_V}$$

Idealisesti heijastavan metallisen maataason tapauksessa $|\rho_V| = 1,0$ ja $\phi_V = 0$. Tästä johtuen kaava 11 voidaan sieventää muotoon:

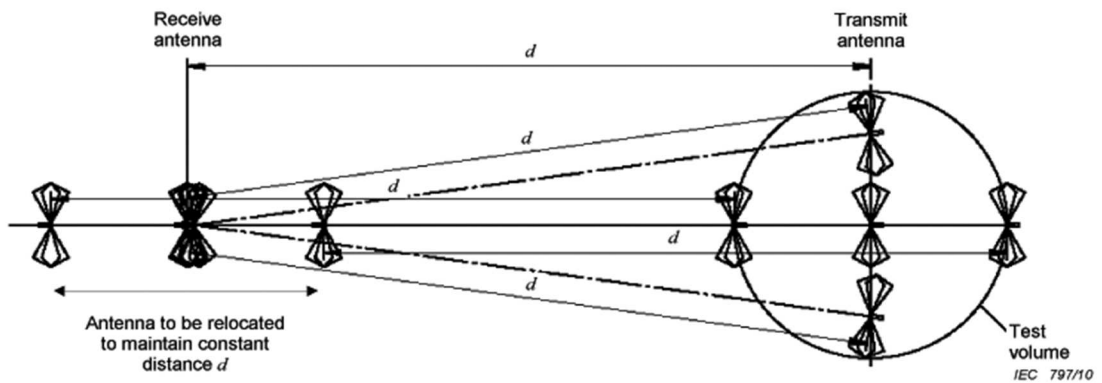
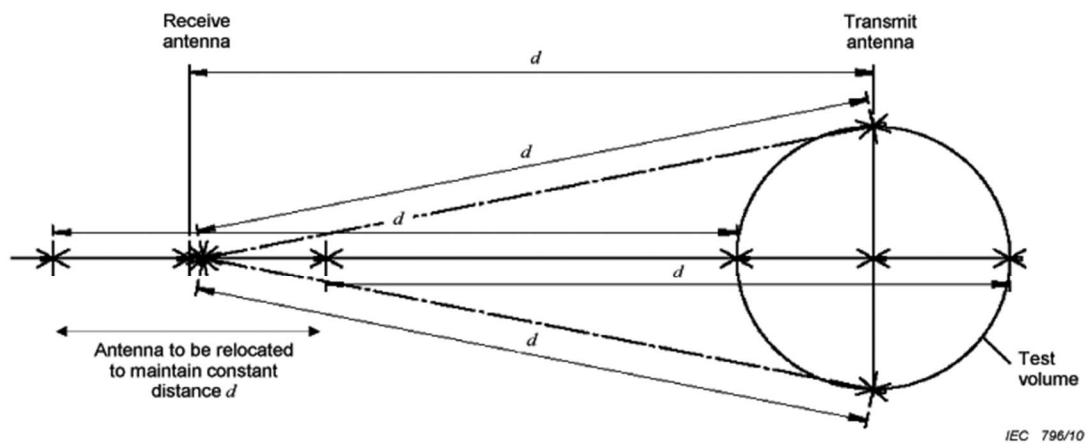
$$E_{DV}^{\max} = \frac{7,01d^2}{d_s^3 d_h^3} \sqrt{d_h^6 + d_s^6 + 2d_s^3 d_h^3 \cos \beta (d_h - d_s)} \quad (12)$$

6.2 Antennien asettelu NSA-mittauksessa

Antennit sijoitetaan testipaikalle siten, että niiden etäisyys toisistaan on sama kuin säteilevän emission mittauksissa käytetty testietäisyys, yleisimmin 3 metriä, 5 metriä tai 10 metriä. Log-periodisia antennia tai log-periodisia hybridiantenneja käytettäessä antennien etäisyys mitataan antennien referenssipisteistä, joka on antennin pituusakselin puolella välissä. Dipoli- ja kaksoiskartioantenneilla referenssipiste on piste, josta antennin elementtejä syötetään, eli antennin keskiakselin keskipiste.

6.2.1 Mittauspisteet

Yksi NSA-mittaus ei kuitenkaan ole riittävä kaikkien huoneen aiheuttamien heijastusten löytämiseen. NSA-mittaukset suoritetaan viidessä maataason pisteessä, jotka ovat vastaanottoantennin ja testitilavuuden keskikohdan kanssa samalla linjalla (keski-, etu- ja takapisteet) ja vastaanottoantennin ja keskipisteen muodostamaa linjaa kohtisuorassa olevalla linjalla (vasen ja oikea). Lisäksi mittaukset suoritetaan jokaisessa pisteessä kahdella polarisaatiolla (vaaka ja pysty) ja kahdella eri korkeudella (1 m ja 2 m vaakapolarisaatiolla, 1 m ja 1,5 m pystypolarisaatiolla), kuvan 9 mukaisesti. Antennien etäisyys toisistaan pysyy samana kaikissa mittapisteissä ja sivupisteissä antennien pituusakselit suunnataan toisiaan kohti. [2, s. 26–27; 8, s. 28; 1, s. 145]



Kuva 9. Testipisteiden sijainti pysty- ja vaakapolarisaatiomittauksissa [8, s. 29; 2, s. 28]

Jos testitulavuuden sivupisteistä on yli metrin matka lähimpään seinään tai seinävaimentimeen, antennin keskikohdan sijainti maatasoon nähden muuttuu eri polarisaatioilla. Pystypolarisaatiolla testitulavuuden rajalle asetetaan antennin keskikohta, kun taas vaakapolarisaatiolla antennia siirretään lähemmäs keskivistettä siten, että antennin ulkoreuna on testitulavuuden rajalla kuvan 9 mukaisesti.

6.2.2 Ehdot mittapisteiden vähentämiseen

Tarvittavien mittausten määrää voidaan kuitenkin vähentää testipaikan rakenteista riippuen seuraavasti:

- 1) Takapisteen kaikki mittaukset voidaan jättää tekemättä, jos pisteestä on vähintään metrin etäisyys lähimpään seinään tai seinävaimentimeen
- 2) Vaakapolarisaation mittauksia voidaan vähentää jättämällä keskipiste mittaamatta, jos lähetysantennin fyysinen leveys kattaa vähintään 90 % testitilavuuden halkaisijasta kun mittaus suoritetaan vasemmassa ja oikeassa pisteessä. Ehto toteutuu esimerkiksi, kun testitilavuus on halkaisijaltaan 2 metriä ja antennin leveys on 0,9 metriä.
- 3) Mittaukset pystypolarisaatiolla 1,5 metrin korkeudessa voidaan jättää tekemättä, jos testitilavuuden korkeus ei ylitä 1,5 metriä.
- 4) Jos testitilavuus on alle metrin pituinen, 1,5 metrin levyinen ja 1,5 metrin korkuinen, vaakapolarisaatiolla ei tarvitse mitata kuin etu-, taka- ja keskipisteissä molemmilla korkeuksilla. Lisäksi jos kohta 1 pätee, voidaan myös takapiste jättää mittaamatta.

Parhaimmillaan jäljelle jää vain kahdeksan mittausta, neljä pystypolarisaatiolla (vasen, oikea, etu- ja keskipisteet) ja neljä vaakapolarisaatiolla (keski- ja etupisteet molemmilla korkeuksilla). [2, s. 27; 8, s. 28]

6.3 NSA-mittaustekniikat

NSA-mittauksessa käytetään kahta eri menetelmää taajuudesta riippuen. Taajuusalueella 30 - 200 MHz on käytössä koko kyseisen taajuusalueen kattavat kaksoiskartioantennit, joten mittausmenetelmänä voidaan käyttää taajuuspyyhkäisyä. Ylemmällä taajuusalueella 200 - 1000 MHz käytetään jokaiselle taajuudelle erikseen viritettävää dipoliantennia, minkä takia voidaan käyttää vain yksittäisen taajuuden menetelmää.

6.3.1 Yksittäisen taajuuden menetelmä

Yksittäisen taajuuden menetelmässä taulukon 2 taajuudet mitataan yksi kerrallaan. Vastaanotetun signaalin maksimiarvo mitataan jokaisella taajuudella liikuttamalla vastaanottoantennia annetulla korkeusvälillä. Saadut arvot sijoitetaan kaavaan 2 (s. 12), jolloin saadaan laskettua mitattu NSA. Tätä menetelmää käytetään dipoliantennien kanssa, koska antennit pitää viritää jokaiselle taajuudelle erikseen. [2, s. 25]

Taulukko 2. Taajuusalueet ja askelvälit diskreetissä taajuusmenetelmässä [8, s. 12–18]

Taajuusalue [MHz]	Suurin sallittu askelväli [MHz]
30 - 50	5
50 - 100	10
100 - 200	20
200 - 300	50
300 - 1 000	100

6.3.2 Taajuuspyyhkäisy

Taajuuspyyhkäisyssä mittaukset voidaan osittain automatisoida käyttämällä laajakais-
taisia antenneja ja maksimiarvon tallentavaa mittalaitetta. Tällöin koko antenneille sopi-
va taajuusalue pyyhkäistään jokaisella vastaanottoantennin korkeudella vuorotellen.

Taajuuspyyhkäisy on huomattavasti yksittäisen taajuuden menetelmää nopeampi tapa
suorittaa NSA-mittaus, koska antennien virittäminen jokaiselle taajuudelle erikseen vie
paljon aikaa. Esimerkiksi tämän insinööriyön yhteydessä suoritettussa NSA-
mittauksessa yhden mittapisteen mittaaminen taajuuspyyhkäisyllä taajuusalueella 30 -
200 MHz:iä eli 91:llä eri taajuudella, vei noin 60 minuuttia, kun taas taajuusalueella 250
- 1000 MHz olevien yhdeksän eri taajuuden mittaamiseen diskreetillä taajuusmenetel-
mällä meni n. 75 minuuttia.

7 Emissiotestin mittausepävarmuus

Toisin kuin perinteisessä mittaustekniikassa, jossa pyritään varmistamaan jäljiteltävyys määritettyyn mittaan tai SI-järjestelmän suureeseen, EMC-mittauksissa on aina pyritty suorittamaan mittaukset standardisoidulla menetelmällä. Tämä on johtanut standardisoidujen mittausten menetelmien, kuten esimerkiksi CISPR:n standardeissa määritellyt menetelmät, käyttöön lainmukaisten ja kaupallisten vaatimusten mukaisuuden osoittamisessa. Tästä johtuen EMC-mittausten tulokset ovat erittäin riippuvaisia käytetyistä mittausten menetelmistä. Mittaussuure on myös määritelty mittausten menetelmästä riippuen.

EMC-testeissä ei yleensä ole tavoitteena saada tulokseksi tarkkaa suuretta, kuten esimerkiksi jännitettä, virtaa tai muita selviä suureita. Sen sijaan arvioidaan tietyn laitteen sähkömagneettista yhteensopivuutta niissä ympäristöissä, joissa laite on tarkoitettu toimimaan.

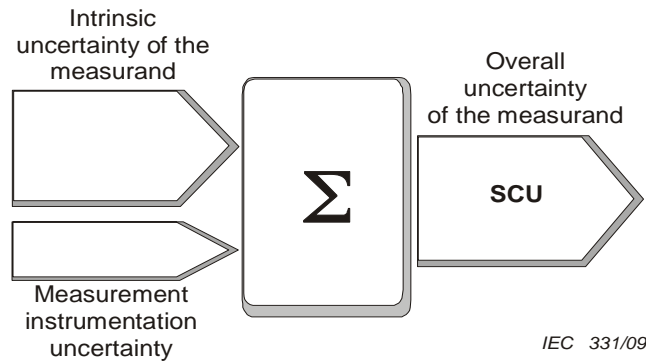
Kun standardin mukaisissa emissiomittauksissa sähköisen laitteen emissiotasot on mitattu, saatuja tuloksia verrataan standardin määrittämiin rajoihin. Mitattu emissiotaso on oikeastaan vain arvio todellisesta emissiotasosta johtuen mittauksiin liittyvistä epävarmuustekijöistä. Perinteisesti mittaustekniikassa tulokseen vaikuttavat epävarmuustekijät ovat tunnettuja ja mitattavan suureen ominaisepävarmuus on pieni. Tämän vuoksi on yleensä riittävää ottaa huomioon vain mittauslaitteiston epävarmuustekijät. [10, s. 15–26]

7.1 Epävarmuustekijöiden vaikutus mittauksen kokonaisepävarmuuteen

Emissiotesteissä testattavaan laitteeseen liittyviä suurimpia epävarmuustekijöitä ei voida yksilöidä, eikä niiden arvosta ole yleensä minkäänlaista määrällistä tietoa, koska vain yksittäinen näyte testataan. Tämän vuoksi mitattavan suureen ominaisepävarmuustekijät voivat olla huomattavasti suuremmat kuin mittauslaitteiden epävarmuustekijät. Tämän vuoksi termi SCU (standards compliance uncertainty) on otettu käyttöön. SCU sisältää kaikki emissiotesteissä kohdatut epävarmuustekijät, myös mittauslaitteiston epävarmuuden MIU:n (measurement instrumentation uncertainty).

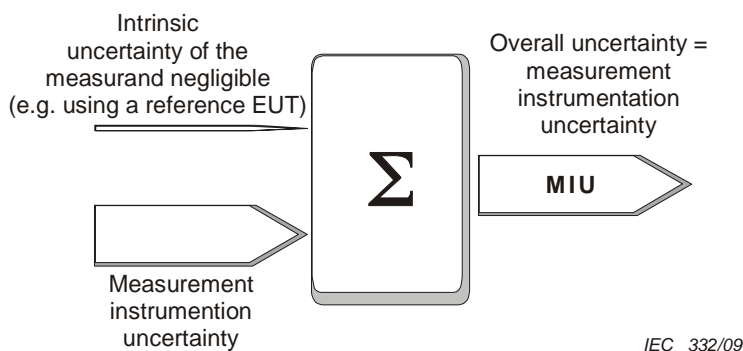
Muita SCU:hun sisältyviä epävarmuustekijöitä voivat olla esimerkiksi mitattavan laitteen käyttökuntoon laittamisesta johtuvat epävarmuustekijät, mittausjärjestelyn epävarmuustekijät yms. Kuvissa 10 - 12 on kuvattu, mistä SCU muodostuu kolmessa eri esimerkitapauksessa. Kuvassa 10 kuvataan, kuinka tyypillisessä emissiomittauksessa mittaus-

suureeseen liittyvät epävarmuustekijät ja mittalaitteiston epävarmuustekijät ovat molemmat merkittäviä. Summaamalla molemmat epävarmuustekijät yhteen saadaan SCU eli standardinmukaisen mittauksen epävarmuustekijät. [10, s. 15-16]



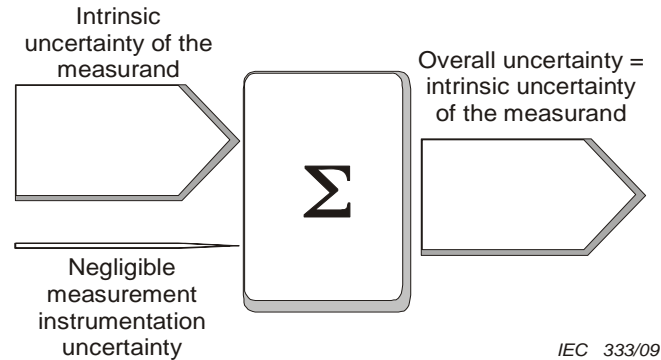
Kuva 10. Epävarmuustekijät tyypillisessä emissiomittauksessa [10, s. 17]

Kuvassa 11 on kuvattuna epävarmuustekijät, kun mitattavana laitteena on referenssisäteilijä. Koska referenssisäteilijän aiheuttamat häiriöt tunnetaan, mittaussuureen epävarmuustekijät voidaan laskea merkityksettömiksi. Tämän vuoksi mittauksen kokonaisepävarmuustekijöiksi voidaan laskea pelkästään mittauslaitteiston epävarmuustekijät. Referenssisäteilijöitä käytetään verifioimaan emissiomittauksessa saadut tulokset suorittamalla referenssimittaus ennen aiottua emissiomittausta. Referenssisäteilijää voidaan käyttää myös eri mittapaikkojen vertailuun keskenään. Jos saadut tulokset eroavat eri mittapaikkojen mittalaitteiston epävarmuusarvoa enemmän, voidaan päätellä, että mittausta ei ole tehty samalla tavalla molemmissa mittapaikoissa.



Kuva 11. Epävarmuustekijät emissiomittauksessa, kun laitteen ominaisepävarmuustekijät ovat merkityksettömät [10, s. 17]

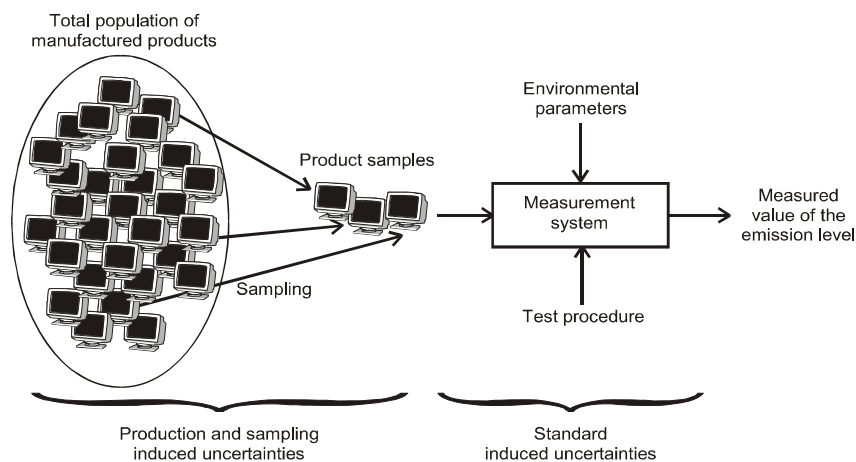
Kuvassa 12 kuvataan harvinaista tapausta, jossa mittauslaitteiston epävarmuustekijät ovat mitättömät. Tällöin mittauksen epävarmuustekijöiksi lasketaan vain mittaussuureen ominaisepävarmuustekijät.



Kuva 12. Epävarmuustekijät emissiomittauksessa kun mittauslaitteiston epävarmuustekijät ovat merkityksettömät [10, s. 17]

7.2 Epävarmuustekijöiden lähteet

Kuvassa 13 on kuvattuna tyypillisen vaatimustenmukaisuusmittauksen prosessissa esiin tulevat epävarmuustekijät. Laitteelleen hyväksyntää hakeva valmistaja toimittaa yhden tai useamman näytteen mittauksiin.



Kuva 13. Vaatimustenmukaisuusmittausprosessissa esiin tulevat epävarmuustekijät [10, s. 20]

Jo laitteen valmistusprosessissa tulee esiin epävarmuustekijöitä, ja kahden samanlaisen laitteen aiheuttamat emissiot voivat erota toisistaan laitteen valmistusprosessin ja

valmistuksessa käytettävien komponenttien toleransseista johtuen. Standardi määrittää mittasuureen, mittausmetodin ja mittausolosuhteet. Standardinmukaisessa mittauksessa voi kuitenkin aiheutua mittausepävarmuutta eri lähteistä johtuen.

7.2.1 Epävarmuuden lähteiden luokittelu

Taulukossa 3 on lueteltu mittausepävarmuuden lähteitä luokiteltuna niiden aiheuttajan mukaan. Mittaustulosten epävarmuuden arviointiin voi olla eri syitä mittauksen tarkoituseristä riippuen.

Taulukko 3. Epävarmuuslähteet luokiteltuna [10, s. 20]

Laboratoriosta aiheutuvat	Standardista aiheutuvat	Valmistusprosessista ja näytteenotosta aiheutuvat
<ul style="list-style-type: none"> • Testaushenkilöstön osaaminen • Analyysit ja laskelmat • Raportointi • Standardin toimeenpano mittausmenetelmässä ja mittausohjelmistossa • Laatujärjestelmä 	<ul style="list-style-type: none"> • Suureen määrittely • Mittauslaitteiston kalibrointi ja verifiointi • Mittausmenetelmän kuvaus • Ympäristöolosuhteet • Mitattavan laitteen käyttöön-otto • Mitattavan laitteen toiminta • Mitattavan laitteen tyyppi 	<ul style="list-style-type: none"> • Valmistusprosessin toleranssit • Näytteenotto • Näytteenoton edustuksettomuus

Jos mittauksen tarkoituksena on verrata eri laboratorioiden suorituskykyä mittaamalla saman fyysisen laitteen emissiot useammassa laboratoriossa samalla mittaustavalla, epävarmuustekijöiksi lasketaan vain taulukon 3 ensimmäisessä sarakkeessa mainitut laboratorion aiheuttamat epävarmuustekijät. Satunnaisen laitteen standardinmukaisessa vaatimustenmukaisuusmittauksessa kaikki taulukossa 3 mainitut epävarmuuskategoriat tulee ottaa huomioon.

7.2.2 Standardista aiheutuvien epävarmuustekijöiden jaottelu

Käytännössä laboratoriosta aiheutuvien epävarmuustekijöiden pitäisi olla pieniä ja niitä kontrolloidaan laboratorion laatujärjestelmän avulla. Laatujärjestelmä takaa sen, että mittausprosessin suorittaminen tapahtuu aina samalla tavalla, ja että arviointi prosessin epävarmuustekijöistä on suoritettu jollain tavalla. Laatujärjestelmä ei kuitenkaan ota huomioon mahdollisia standardin tulkintaan liittyviä epävarmuustekijöitä. Näihin voidaan laskea virheet, jotka johtuvat epäselvästä tai puutteellisesta standardista. Standardin puutteellisuus johtuu yleensä siitä, että siihen on tarkoituksella jätetty avoimia

kohtia, koska kaikkia standardin mukaan testattavia laitteita ei voida ennakoida standardia kirjoitettaessa.

Standardista aiheutuvat epävarmuustekijät voidaan jakaa ala-kategorioihin taulukon 4 mukaisesti. Taulukossa 4 on listattu laadulliset epävarmuustekijät, jotka voivat myötävaikuttaa säteilevän emission mittauksen kokonaisepävarmuuteen. [10, s. 20–21]

Taulukko 4. Standardista aiheutuvien epävarmuustekijöiden alakategoriat [10, s. 21]

Mittalaitteisto	<ul style="list-style-type: none"> • Mittapaikan ominaisuudet • Vastaanottoantennin ominaisuudet • Vastaanottimen ominaisuudet • Kaapeleiden ominaisuudet
Mittausprosessi	<ul style="list-style-type: none"> • Vastaanottoantennin korkeussäätö • Pyörityspöydän pyörittäminen • Vastaanottimen asetukset
Ympäristöolosuhteet	<ul style="list-style-type: none"> • Säteilevä taustasäteily • Lämpötila, ilmankosteus
Mitattavan laitteen käyttöönotto ja toiminta	<ul style="list-style-type: none"> • Mittausetäisyyden ja -korkeuden toleranssit • Kaapelien asettelu • Kaapeleiden päättäminen • EUT:n eri toimintatilat
Mitattavan laitteen tyyppi	<ul style="list-style-type: none"> • Pöytälaite tai lattialla seisova • EUT:n fyysiset mitat

7.3 Epävarmuustekijöiden määrittäminen

Uuden mittaustavan epävarmuustekijöiden määrittäminen aloitetaan listaamalla kaikki mahdolliset epävarmuuksien lähteet. Näitä lähteitä kutsutaan nimellä ”tunnetut epävarmuuslähteet”. Seuraava vaihe on epävarmuustekijöiden kokonaisvaikutusten verifiointi mittausten avulla. Mittausten avulla saadut tulokset voivat poiketa laskennallisesta tuloksesta. Yhtenä syynä voi olla se, että yksi tai useampi epävarmuuden lähde on jäänyt huomioimatta. Tällaista epävarmuuden lähdeä kutsutaan tuntemattomaksi epävarmuuden lähteeksi. [10, s. 21]

Hyvänä esimerkkinä tuntemattomasta epävarmuuden lähteestä on mitattavan laitteen alla olevan pöydän materiaali. Tällä hetkellä standardeissa mainitaan vain, että pöydän pitää olla valmistettu ei-johtavasta ja heijastamattomasta materiaalista, kuten esimerkiksi puusta. Eri puulajeilla on kuitenkin erilaiset ominaisuudet ja osa puulajeista saattaa vaikuttaa radioaallon etenemiseen/heijastumiseen jossain määrin. [10, s. 21]

7.3.1 Vaikutussuureet

Standardeissa, joissa määritetään jokin mittaustapa, jokainen mittausepävarmuuden lähde pitäisi olla määritelty määrällisesti käyttäen yhtä tai useampaa vaikutussuuretta. Epävarmuustekijöiden lähteiden vaikutussuureet voidaan määritellä eri tavoilla, esimerkiksi sähkömagneettisen taustasäteilyn vaikutussuure voidaan määritellä esittämällä taustasignaalien absoluuttiset arvot sähkömagneettisena kentänvoimakkuutena taa-juuden funktiona. Mittalaitteisto antaa taustasäteilyn arvon juuri tässä muodossa. Sama vaikutussuure voidaan myös määritellä epäsuorasti mittapaikan vaimennusominaisuuksien avulla. [10, s. 22]

Kaikkien laadullisten epävarmuustekijöiden lähteiden esittäminen määrällisinä vaikutussuureina voi olla vaikeaa. Merkityksellisiä lähteitä, joita ei välttämättä voida esittää määrällisinä, kutsutaan määrittämättömiksi vaikutussuureiksi. Esimerkiksi, vastaanottoantennin korkeussäätö voidaan jakaa kahteen eri vaikutussuureeseen, pyyhkäisyikkunaan ja suurimpaan pyyhkäisyn askelväliin. Standardissa CISPR16-2-3:2006 vain pyyhkäisyikkuna on määritelty tarkasti, suurinta sallittua pyyhkäisyn askelväliä ei ole määritelty. Tästä johtuen jälkimmäinen vaikutussuure lasketaan määrittämättömiin vaikutussuureisiin. Tämä pätee tietysti vain mittauksiin, jotka tehdään kyseisen standardin mittaustavan mukaisesti. [10, s. 22]

Seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 5 esitellään muita esimerkkejä epävarmuuden lähteiden vaikutussuureiden määritelmistä. Näistä esimerkeistä nähdään tarkemmin joidenkin vaikutussuureiden tarkan määrittämisen vaikeus ja se, että osaa vaikutussuureista ei ole määritelty riittävän tarkasti tai ollenkaan. [10, s. 23]

Taulukko 5. Epävarmuuden lähteitä määriteltynä vaikutussuureiksi [7, s.23]

Epävarmuuden lähde	Vaikutussuure	Määritelty standardissa CISPR 16?	Toleranssi annettu standardissa?
• Mittapaikan ominaisuudet	• Normalisoitu yhteysvälivaimennus	• Kyllä	• Kyllä
• Säteilevä taustasäteily	• Ympäristön taustasäteilyn taso	• Ei	• Kyllä
• Vastaanottoantennin ominaisuudet	• Antennikerroin • Epäsovitus • Ristipolarisaatio	• Kyllä • Kyllä • Kyllä	• Kyllä • Kyllä • Kyllä
• Mitattavien laitteiden ja kaapeleiden asettelu	• Mitattavan laitteen sijainti ja suuntaus • Kaapeleiden geometrinen sijainti	• Osittain • Osittain	• Ei • Ei
• Mitattavan laitteen kaapeleiden päättäminen	• Yhteismuotoinen impedanssi	• Ei	• Ei
• Mitattavan laitteen toimintatilat	• Mitattavan laitteen toimintatilat	• Osittain (määrällisesti)	• Ei

Vaikutussuureet eivät myöskään aina vastaa oikeaa tilannetta. Normalisoidussa yhteysvälivaimennusmittauksessa (NSA) käytetään yleensä laajakaistaista lähetysantennia ja tyypillistä vastaanottoantennia, joka on yleensä samanlainen kuin lähetysantenni. Tätä antennia ei kuitenkaan välttämättä käytetä varsinaisessa emissiomittauksessa vastaanottoantennina. Tässä tapauksessa saatu NSA ei välttämättä olekaan kaiken kattava kuvaus mittapaikan ominaisuuksista kaikilla vastaanottoantenneilla tai eri kokoisilla mitattavilla laitteilla. [10, s. 23]

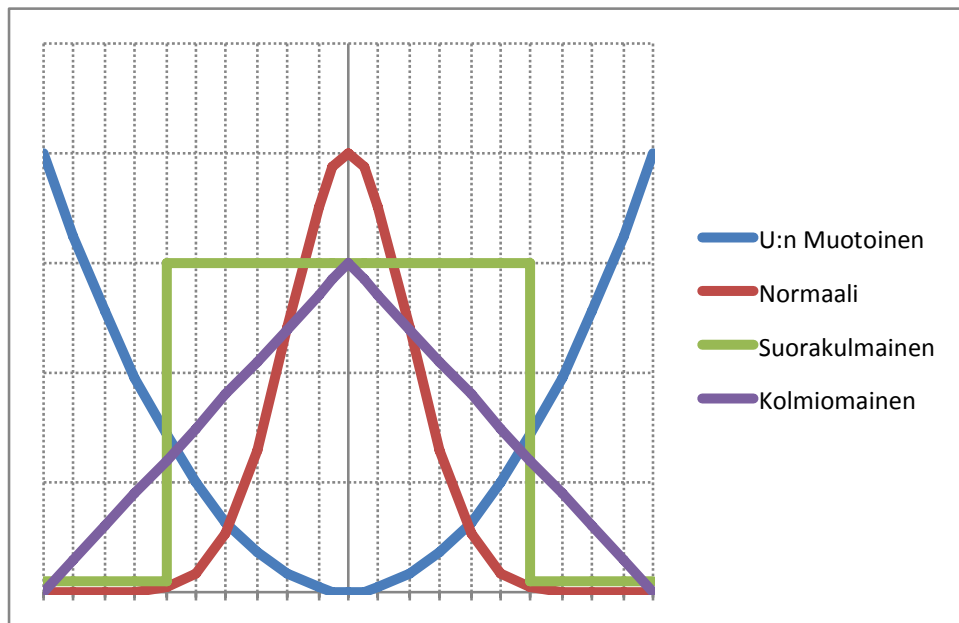
Tämä pätee myös osaan insinööriyössä suoritettuihin mittauksiin. Taajuusalueella 30 - 200 MHz mittaukset suoritettiin kahdella kaksoiskartioantennilla, ylemmillä taajuuksilla käytettiin taajuuden perusteella viritettäviä dipoliantenneja. Kuitenkin varsinaisissa säteilevän emission mittauksissa vastaanottoantennina käytetään bilog-antennia, koska kyseistä antennia voidaan käyttää mittauksen koko taajuusalueella (30 - 1000 MHz). NSA-mittauksessa käytetyt antennit eivät soveltuisi varsinaiseen emissiomittaukseen, koska kaksoiskartioantennien taajuusalue ulottuu vain 30 - 200 MHz:n välille, ja dipoliantennit täytyy viritellä jokaiselle taajuudelle erikseen.

7.4 Epävarmuuslaskelman tekeminen NSA-mittaukselle

NSA-mittauksen epävarmuuslaskelman tekeminen aloitetaan listaamalla kaikki epävarmuustekijät, jotka voivat vaikuttaa mittauksen tulokseen. Kaikille epävarmuustekijöil-

le määritetään yksilöllinen arvo riippuen jokaisen vaikutuksesta mittaustulokseen. Tämän laajennetun epävarmuuden avulla jokaiselle epävarmuustekijälle lasketaan vakioepävarmuus, $u(x_i)$.

Vakioepävarmuuden laskentatapa riippuu epävarmuustekijän todennäköisyysjakaumasta. Mitatun arvon todennäköisyysjakauma kuvastaa muutosta todennäköisyydessä, jolla todellinen arvo on tietyn erotuksen päässä mitatusta arvosta. Todennäköisyysjakaumat jaetaan neljään eri tyyppiin, ja ne on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Neljä todennäköisyysjakauman perusmuotoa [11, s. 5]

Koska todennäköisyysjakauman muodosta ei yleensä ole varmuutta, joudutaan muotoa arvioimaan aikaisempien tietojen tai teorian perusteella. Neljä perusmuotoa ovat: normaali, suorakulmainen, kolmiomainen ja U:n muotoinen.

7.4.1 Normaalijakauma

Normaalin todennäköisyysjakauman vakioepävarmuuden laskeminen tapahtuu jakamalla laajennettu epävarmuus mittaustavalle asetetulla luottamuskertoimella. Insinööriyön yhteydessä suoritettussa NSA-mittauksessa luottamuskerroin on 2. Tämä tarkoittaa sitä, että todellinen arvo osuu 95 % varmuudella mitatun arvon ja mittauksen kokonaisepävarmuuden määrittämään ikkunaan.

7.4.2 Suorakulmainen jakauma

Suorakulmaisella jakaumalla tarkoitetaan tilannetta, jossa todellisen arvon sijainnin todennäköisyys on kaikkialla raja-arvojen välillä yhtä suuri. Tätä jakaumaa voidaan käyttää, jos epävarmuuden suuruutta arvioidaan valmistajan spesifioimien rajojen avulla ilman, että tiedetään rajojen luottamustasoa. Tässä tapauksessa vakioepävarmuus lasketaan kaavan 13 avulla.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

missä a on puolet yksittäiselle epävarmuustekijälle määritetystä arvosta.

7.4.3 U:n muotoinen jakauma

U:n muotoisella jakaumalla kuvataan epäsovituksen epävarmuutta. Vakioepävarmuus lasketaan kaavan 14 avulla.

$$u(x_i) = \frac{M}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

missä M on epäsovituksen epävarmuuden laajennettu epävarmuus.

7.4.4 Kolmiomainen jakauma

Kolmiomainen jakauma on käytössä, kun todennäköisyys todellisen arvon sijainnille kahden annetun raja-arvon välissä nousee ääripisteiden arvosta nolla tasaisesti kohti keskikohdassa olevaa maksimia. Vakioepävarmuus lasketaan kaavan 15 avulla.

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}} \quad (15)$$

7.5 Yhdistetty vakioepävarmuus

Jos joku vakioepävarmuuksista on eri yksikössä kuin mitattava suure, tulee se muuntaa oikeaan yksikköön kertomalla vakioepävarmuus sopivalla herkkyyskertoimella, c_i jolloin $u_i(y) = c_i u(x_i)$. Kun kaikille epävarmuustekijöille on laskettu vakioepävarmuudet, saadaan yhdistetty vakioepävarmuus, $u_c(y)$ laskemalla vakioepävarmuudet yhteen kaavan 16 avulla.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (16)$$

Mittauksen laajennettu kokonaisepävarmuus saadaan selville, kun vakioepävarmuus kerrotaan vielä luottamuskertoimella. Tämän insinööriyön yhteydessä suoritetun NSA-mittauksen epävarmuustekijät on lueteltuna taulukossa 6.

Taulukko 6. NSA-mittauksen epävarmuuslaskelma

Direct attenuation measurement		30-200 MHz	30-200 MHz	200-1000 MHz	200-1000 MHz				
Description of uncertainty contributions dB	Distribution	Exp. uncert / dB	u(xi) / dB	Exp. uncert / dB	u(xi) / dB				
mismatch: direct attenuation measurement	U-shaped	0,16	0,11	0,16	0,11	TG 1.5, ESMI 1.2			
insertion loss: adapter	rectangular	0,1	0,06	0,1	0,06	insertion loss that is not taken into account			
Combined Standard Uncertainty, uc(y)			0,13		0,13				

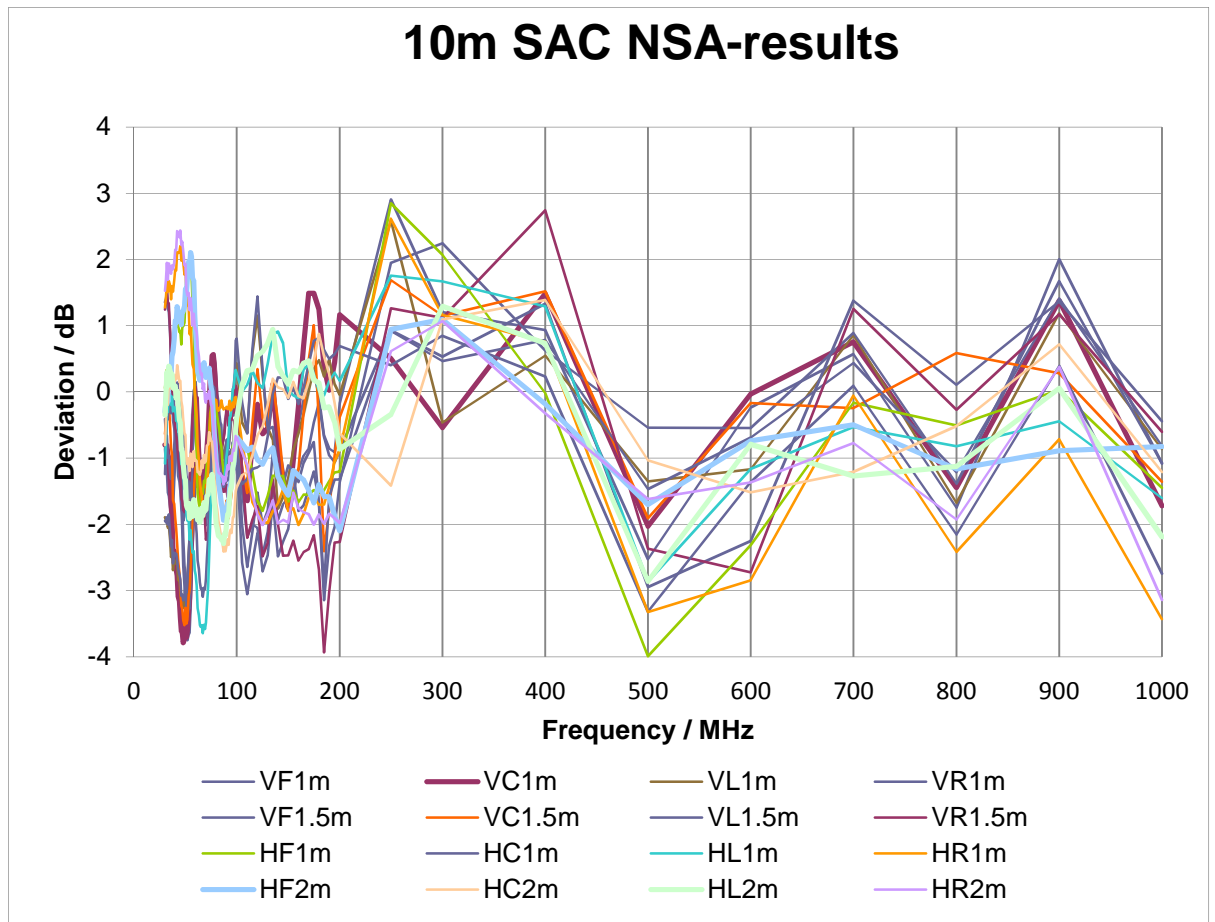
Radiated attenuation measurement		vertical	vertical	vertical	vertical	horizontal	horizontal	horizontal	horizontal
		30-200 MHz	30-200 MHz	200-1000 MHz	200-1000 MHz	30-200 MHz	30-200 MHz	200-1000 MHz	200-1000 MHz
Description of uncertainty contributions dB	Distribution	Exp. uncert / dB	u(xi) / dB	Exp. uncert / dB	u(xi) / dB	Exp. uncert / dB	u(xi) / dB	Exp. uncert / dB	u(xi) / dB
mismatch: transmitting part	U-shaped	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06
mismatch: receiving part	U-shaped	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03
ESMI tracking generator output level stability	rectangular	0,25	0,14	0,25	0,14	0,25	0,14	0,25	0,14
cable influence: transmitting antenna	rectangular	0,2	0,12	0,2	0,12	0,2	0,12	0,2	0,12
antenna: antenna factor of the transmitting antenna	normal	0,5	0,25	1	0,5	0,5	0,25	1	0,5
position of the phase centre: transmitting antenna	rectangular	0	0	0	0,00	0	0	0	0,00
transmit antenna AF deviation on ground plane	rectangular	0	0,00	0,5	0,29	0	0,00	0,5	0,29
receiving antenna AF deviation on ground plane	rectangular	1	0,58	0,5	0,29	1	0,58	0,5	0,29
antenna: antenna factor of the receiving antenna	normal	0,5	0,25	1	0,5	0,5	0,25	1	0,5
position of the phase centre: receiving antenna	rectangular	0	0	0	0,00	0	0	0	0,00
cable influence: receiving antenna	rectangular	0,2	0,12	0,2	0,12	0,2	0,12	0,2	0,12
test distance tolerance, nominal 5 m	normal	0,1	0,05	0,1	0,05	0,1	0,05	0,1	0,05
ESMI receiver linearity	rectangular	0,5	0,29	0,5	0,29	0,5	0,29	0,5	0,29
random uncertainty	normal	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5
Combined Standard Uncertainty, uc(y)			0,920		1,03		0,92		1,03
Combined direct and radiated attenuation measurement									
Combined Standard Uncertainty, uc(y)			0,928		1,03		0,92		1,03
Expanded Uncertainty, U (k = 2)			1,86		2,07		1,84		2,05

Taulukosta nähdään, että suoritetun NSA-mittauksen mittausepävarmuus on suurimmillaan 2,07 desibeliä.

8 NSA-mittauksen tulokset

8.1 Standardinmukaisen NSA-mittauksen tulokset

Karaportin 10 metrin mittapaikalla suoritetussa NSA-mittauksessa saatiin kuvan 15 mukaiset tulokset. Kuvassa jokainen kuvaajan erivärinen viiva vastaa yhtä mittausta yhdessä mittapisteessä, yhdellä polarisaatiolla ja mittauskorkeudella. Jokainen kuvaaja on yksilöity koodilla, jossa ensimmäinen kirjain vastaa polarisaatiota, toinen kirjain on mittapisteen ensimmäinen kirjain (front, center, left tai right), viimeisenä vielä lähetyssantennin korkeus metreissä.



Kuva 15. Mitattu NSA taajuusalueella 30 – 1000 MHz

Tuloksista nähdään, että mittapaikka läpäisee standardin CISPR 16-1-4 määrittämän ± 4 dB rajan. Siitä, että tulokset ovat tietyillä taajuuksilla enimmäkseen kuvaajan negatiivisella puolella voidaan päätellä, että mittapaikan epäideaalisuudet tai mittauksessa esiintyvät epävarmuustekijät aiheuttavat sen, että kyseisellä mittapaikalla todellinen

yhteysvälivaimennus on sen teoreettista arvoa pienempää erityisesti 50 - 200 MHz:n taajuusalueella ja 1000 MHz:n taajuudella.

8.2 Standardista poikkeavat mittaukset

Ensimmäinen vaihe standardista poikkeavien mittausten suorittamisessa oli miettiä, millä eri tavoilla standardista voidaan poiketa. Tarkastelun kohteena oli poikkeamat standardista, jotka ovat mittauksen aikana todennäköisimpiä toteutumaan testaushenkilökunnan huolimattomuudesta johtuen. Mahdolliset virheet mittaussäätelyssä luetteluna:

- Virhe antennien etäisyydessä toisistaan
- antennikaapelien asettelussa virheitä
- virheet dipoliantennin virittämisessä oikealle taajuudelle
- antennien suuntauksen virheet

Antennien etäisyyden muutoksen teoreettinen vaikutus vastaanotetun signaalin voimakkuuteen voidaan laskea kaavalla 17,

$$A = 20 \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (17)$$

missä,

A on vastaanotetun signaalin vaimeneminen,

d_1 on antennien todellinen etäisyys,

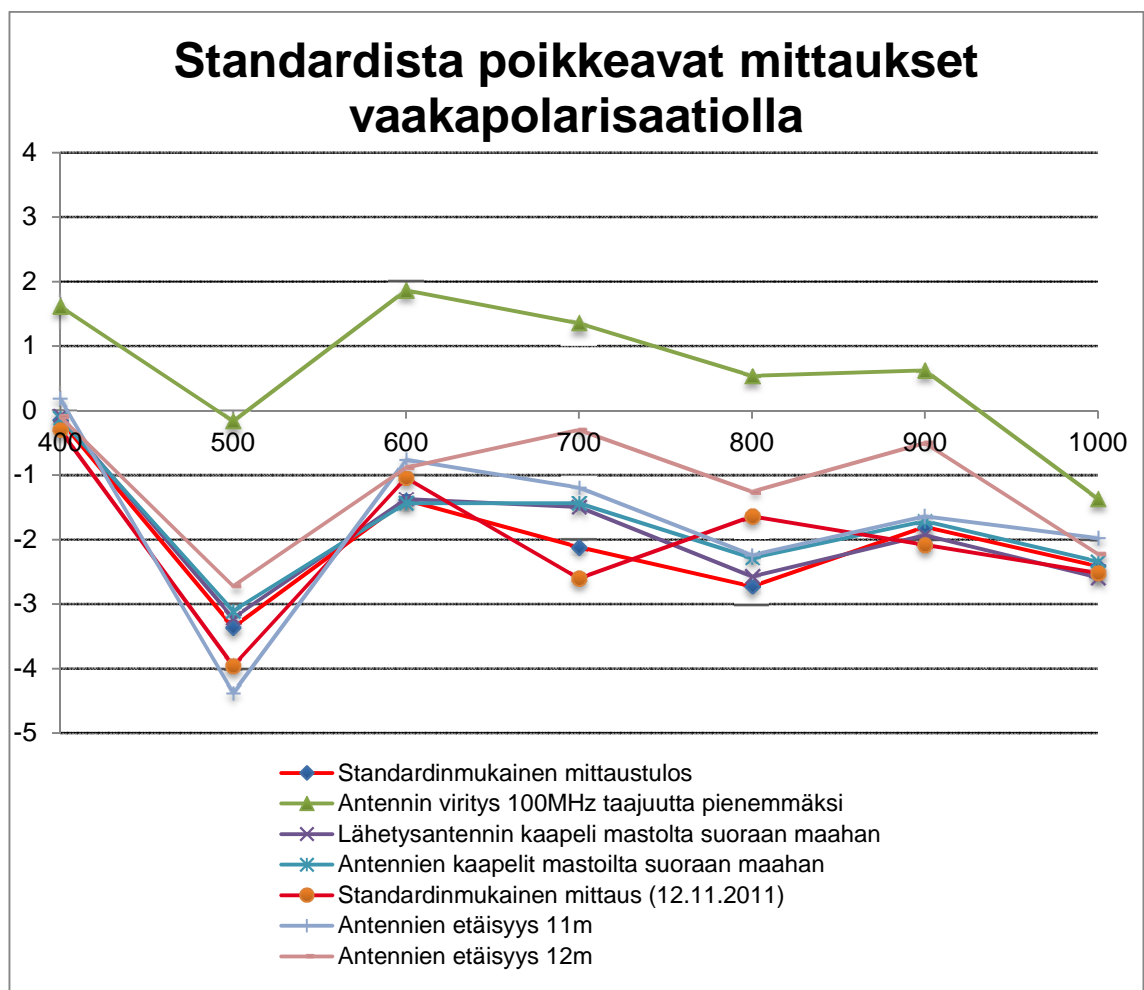
d_2 on antennien standardinmukainen etäisyys.

Antennien etäisyyden epävarmuus on mukana NSA-mittauksen epävarmuuslaskelmassa. Laskelmassa on arvioitu, että antennien etäisyys toisistaan saadaan asetettua kymmeneksi metriksi 5 senttimetrin tarkkuudella. Kun kaavaan 13 sijoitetaan d_1 :n tilalle 10,05 metriä ja d_2 :n tilalle 10 metriä, tarkoittaen siis, että antennien etäisyys olisi todellisuudessa 10,05 metriä, saadaan vaimennukseksi:

$$A = 20 \log \left(\frac{10,05 \text{ m}}{10 \text{ m}} \right) = 0,0433212 \text{ dB} \quad (18)$$

Antennin suuntauksessa tapahtuvat virheet eivät juurikaan vaikuta mittaustulokseen, koska dipoli- ja kaksoiskartioantennit ovat ympärisäteileviä. Tämän takia antennien virheellinen suuntaaminen mittausten aikana jätettiin kokeilematta. Standardista poikkeavat mittaukset suoritettiin eri päivinä kuin alkuperäinen NSA-mittaus. Standardista poikkeavat mittaukset jouduttiin nekin tekemään eri päivinä, koska mittapaikka oli vapaana vain viikonloppuisin. Tästä johtuen mittauksen asettelussa on voinut olla suurempia eroja verrattuna tilanteeseen, jossa mittaukset olisi saatu tehtyä yhdellä kerralla.

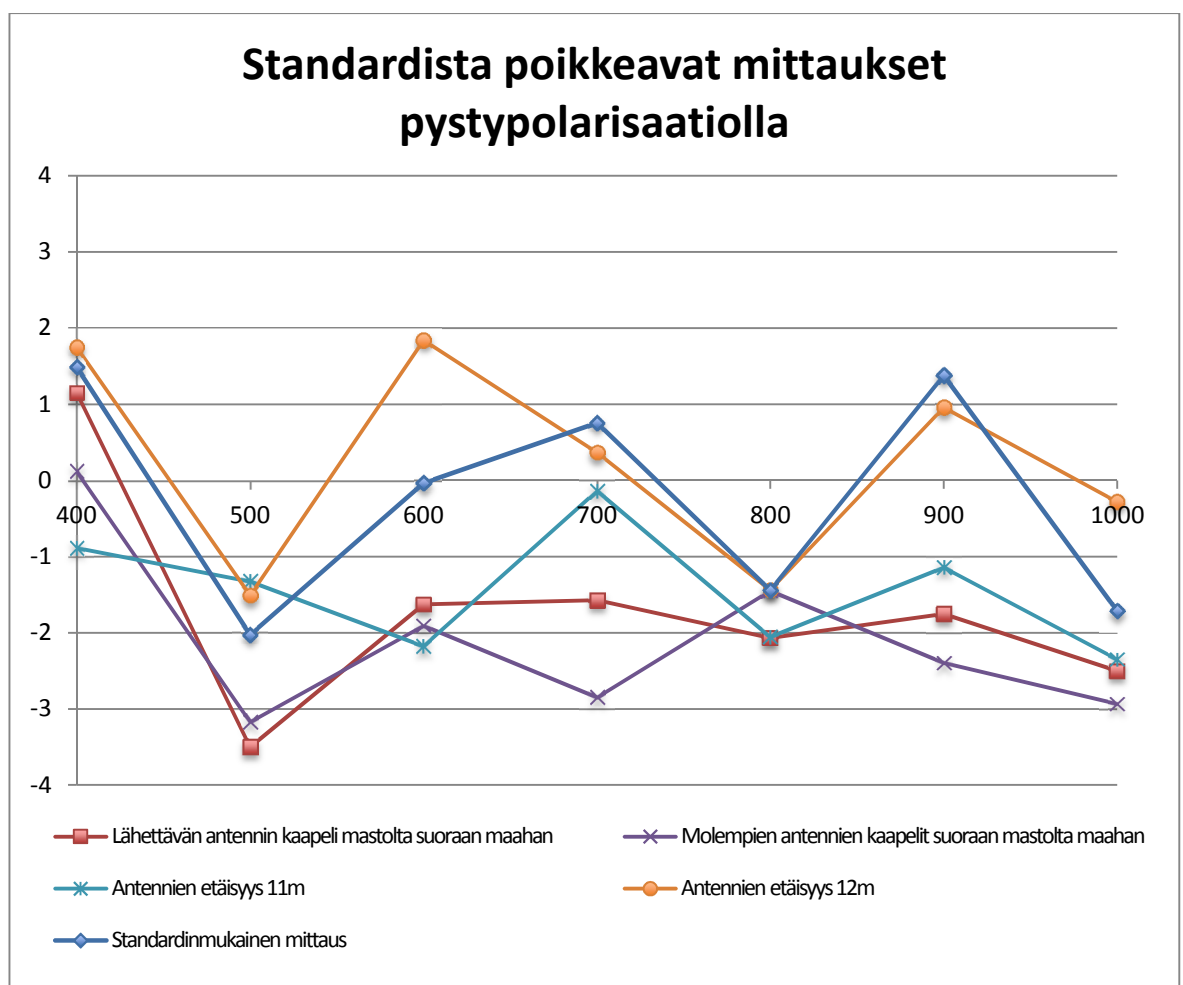
Kuvassa 16 on kuvattu vaakapolarisaatiolla tehtyjen standardista poikkeavien mittausten tulokset. Näitä tuloksia tutkittaessa huomataan, että mainituista virheellisistä mittausten menetelmistä vain dipoliantennin väärällä virittämisellä voidaan ratkaisevasti vaikuttaa vaakapolarisaatiolla saatuihin mittaustuloksiin.



Kuva 16. Standardista poikkeavat mittaukset vaakapolarisaatiolla

Muissa standardista poikkeavissa mittauksissa kaikki tulokset pysyivät standardinmukaisen mittauksen mittausepävarmuuden (2,05 dB) sisäpuolella. Sama pätee myös verrattaessa 12.11.2011 suoritetun standardinmukaisen mittauksen tuloksiin yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Antennien etäisyyden ollessa 12 m, tulos poikkeaa 700 MHz:n taajuudella noin 2,3 desibeliä.

Kuvasta 17 nähdään, että pystypolarisaatiolla standardista poikkeavien mittausten tuloksilla on hieman suuremmat poikkeamat kuin vaakapolarisaatiolla. Tämä vahvistaa käsitystä siitä, että pystypolarisaatiolla olisi vaikeampi läpäistä standardin määrittämä raja-arvo kuin vaakapolarisaatiolla.



Kuva 17. Standardista poikkeavat mittaukset pystypolarisaatiolla

Erotus standardinmukaisen ja siitä poikkeavien mittausten tuloksissa on pystypolarisaatiollakin vain maksimissaan 4 desibeliä, eli noin kaksinkertainen ero verrattuna mittausepävarmuuden laskettuun arvoon.

Voidaan siis päätellä, että suurin osa niistä huolimattomuusvirheistä, mitä mittaushenkilökunnan on mahdollista tehdä NSA-mittauksen aikana, ei vaikuta merkittävästi lopputulokseen. On todennäköisempää, että mittausepävarmuus vaikuttaa tulokseen enemmän kuin pieni huolimattomuus mittauksen asettelun aikana. Tämä ei luonnollisestikaan tarkoita sitä, ettei mittaushenkilökunnan tulisi pyrkiä toimimaan mahdollisimman huolellisesti koko mittauksen ajan. Esimerkiksi hyvin pienetkin virheet automaattisen mittausohjelmiston asetuksissa voivat johtaa väärin tuloksiin.

9 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli päästä vertaamaan standardinmukaisten ja standardista poikkeavien mittausten tulosten eroa, tutkia NSA-mittaukseen liittyvien mittausepävarmuuksien vaikutuksista mittausten tuloksiin.

Työ aloitettiin tutustumalla CISPR 16-1-4 –standardin NSA-mittaukseen liittyviin vaatimuksiin ja mittauksessa käytettäviin mittalaitteisiin. Tämän jälkeen suoritettiin standardinmukainen NSA-mittaus Karaportin 10 metrin mittapaikalla.

Seuraavaksi pohdittiin minkälaisia huolimattomuusvirheitä testaushenkilökunta voisi mittausten asettelussa tehdä. Näistä virheistä todennäköisimmät otettiin tarkasteluun. Tarkastelun perusteella standardista poikkeavien mittausten virheiksi valittiin dipoli-antennien virittäminen väärin, antennikaapeli-asettelu väärin ja väärä antennien etäisyys. Standardista poikkeavat mittaukset suoritettiin samalla laitteistolla ja samassa mittapaikassa kuin standardinmukainen mittaus.

Mittausten jälkeen perehdyttiin vielä yleisesti emissiomittauste mittausepävarmuuteen ja NSA-mittauksen epävarmuuden lähteisiin.

Standardinmukaisten ja –vastaisten mittausten tuloksia verrattaessa huomattiin, että vaakapolarisaatiolla mittausten asettelussa tarkoituksella tehdyt virheet eivät vaikuttaneet suuresti lopputulokseen. Poikkeuksena dipoli-antennien virittäminen väärälle taajuudelle, jolloin tulokset poikkesivat pahimmillaan 4 desibeliä. Pystypolarisaatiolla virheet mittausten asettelussa aiheuttivat hieman suurempia poikkeamia tuloksiin kuin vaakapolarisaatiolla.

Mittausten asettelu jouduttiin purkamaan mittausten välillä useampaan kertaan. Vaikka mittauksia asetellessa pyrittiin toistamaan aiempi asettelu, tuloksissa saattaa olla suurempia eroja kuin jos mittaukset olisi saatu suoritettua kerralla.

Lähteet

- 1 Williams Tim. 2007. EMC for Product Designers. Amsterdam: Elsevier.
- 2 CISPR 16-1-4 (ed3.0):2010. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements.
- 3 ANSI C63.4:2009. American National Standard for methods of measurement of radio-noise emissions from low-voltage electrical and electronic equipment in the range of 9 kHz to 40 GHz.
- 4 EN 50147-2:2002 Anechoic chambers – Part 2: Alternative test site suitability with respect to site attenuation.
- 5 Räisänen A. & Lehto A. 2007. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.
- 6 Verkkodokumentti.<<http://foto.hut.fi/opetus/350/k03/luento6/image1.gif>>. Luettu 8.7.2012.
- 7 Lindell Ismo V. 1986. Antenniteoria. Helsinki: Otakustantamo
- 8 CISPR 16-1-4 Amendment 1:2012. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements.
- 9 ETSI TR 102 273-4 V1.2.1 (2001-12) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Improvement on Radiated Methods of Measurement (using test site) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties; Part 4: Open area test site
- 10 CISPR/TR 16-4-1 (ed2.0):2009. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainties in standardized EMC tests.
- 11 UKAS LAB34 Ed.1:2002. The expression of uncertainty in EMC testing.

Frequency MHz	VF1m dB	VC1m dB	VL1m dB	VR1m dB	VF1.5m dB	VC1.5m dB	VL1.5m dB	VR1.5m dB	HF1m dB	HC1m dB	HL1m dB	HR1m dB	HF2m dB	HC2m dB	HL2m dB	HR2m dB
91	-0,881	-1,437	-0,717	-0,311	-1,013	-1,708	-0,709	-0,291	-1,221	-1,331	-0,840	-0,259	-1,672	-2,225	-1,847	-1,109
92	-1,011	-1,572	-0,819	-0,468	-1,192	-1,908	-0,853	-0,515	-1,127	-1,276	-0,631	-0,220	-1,695	-2,310	-1,844	-1,168
93	-0,937	-1,480	-0,691	-0,412	-1,035	-1,746	-0,637	-0,410	-0,980	-1,181	-0,388	-0,133	-1,442	-2,129	-1,583	-0,976
94	-0,888	-1,340	-0,535	-0,373	-0,979	-1,652	-0,491	-0,407	-1,057	-1,300	-0,359	-0,280	-1,364	-2,081	-1,469	-0,963
95	-0,862	-1,168	-0,348	-0,339	-0,956	-1,540	-0,339	-0,425	-0,970	-1,266	-0,184	-0,257	-1,370	-2,127	-1,427	-1,041
96	-0,892	-1,020	-0,188	-0,323	-0,758	-1,208	0,020	-0,232	-0,804	-1,168	0,047	-0,156	-1,131	-1,908	-1,137	-0,865
97	-0,989	-0,923	-0,085	-0,356	-0,855	-1,142	0,095	-0,311	-0,821	-1,246	0,059	-0,229	-1,084	-1,875	-1,041	-0,885
98	-0,983	-0,733	0,116	-0,281	-0,842	-0,972	0,273	-0,279	-0,630	-1,105	0,257	-0,090	-0,916	-1,709	-0,818	-0,791
99	-0,832	-0,434	0,426	-0,082	-0,483	-0,471	0,768	0,095	-0,564	-1,087	0,332	-0,077	-0,725	-1,502	-0,545	-0,666
100	-0,992	-0,429	0,431	-0,183	-0,542	-0,378	0,807	0,044	-0,609	-1,164	0,279	-0,172	-0,680	-1,436	-0,404	-0,682
105	-2,580	-1,370	-0,462	-1,508	-2,006	-1,158	-0,153	-1,185	-0,885	-1,389	0,004	-0,777	-0,777	-1,253	0,106	-0,904
110	-3,051	-1,642	-0,618	-2,180	-2,641	-1,523	-0,626	-2,202	-0,848	-1,313	0,109	-1,196	-0,887	-1,205	0,320	-1,109
115	-2,579	-0,762	0,573	-2,000	-2,114	-0,483	0,646	-1,932	-1,200	-1,161	0,320	-1,661	-0,835	-0,955	0,343	-1,543
120	-2,133	-0,185	1,151	-2,052	-1,520	0,344	1,444	-1,719	-1,640	-1,136	0,135	-1,808	-1,027	-0,661	0,546	-1,853
125	-2,459	-0,630	0,254	-2,710	-2,001	-0,384	0,335	-2,481	-1,797	-1,087	0,060	-1,956	-1,088	-0,525	0,611	-2,007
130	-2,116	-0,551	-0,543	-2,463	-1,788	-0,543	-0,564	-2,277	-1,568	-0,670	0,428	-1,977	-0,934	-0,196	0,734	-1,846
135	-1,428	0,113	-0,718	-1,671	-0,911	0,149	-0,528	-1,320	-1,265	-0,022	0,875	-1,797	-0,841	0,203	0,944	-1,634
140	-1,928	-0,825	-1,759	-2,480	-1,113	-0,436	-1,198	-1,997	-1,268	0,222	0,912	-1,679	-1,279	0,070	0,386	-1,983
145	-1,694	-1,281	-1,581	-2,258	-1,464	-1,232	-1,408	-2,471	-1,269	0,214	0,736	-1,471	-1,434	0,039	0,238	-1,931
150	-1,594	-1,747	-1,302	-2,070	-1,549	-1,720	-1,108	-2,465	-1,657	-0,103	0,019	-1,794	-1,561	-0,088	0,118	-1,973
155	-0,978	-1,029	-0,874	-1,509	-1,241	-1,325	-1,200	-2,244	-1,492	0,080	-0,051	-1,758	-1,184	0,151	0,327	-1,518
160	-0,489	-0,219	-0,625	-1,171	-1,362	-1,163	-1,794	-2,545	-1,665	-0,181	-0,090	-2,007	-1,265	-0,061	0,297	-1,755
165	-0,122	0,694	-0,333	-0,967	-1,071	-0,322	-1,713	-2,420	-1,547	0,057	0,340	-1,844	-1,325	-0,095	0,436	-1,816
170	0,137	1,489	0,012	-0,855	-0,916	0,483	-1,462	-2,376	-1,548	0,419	0,415	-1,595	-1,486	0,155	0,473	-1,844
175	0,316	1,490	0,355	-0,461	-0,755	1,008	-1,201	-2,164	-1,481	0,770	0,262	-1,585	-1,677	0,470	0,179	-2,006
180	-0,075	1,249	0,481	-0,166	-1,699	-0,460	-1,656	-2,679	-1,522	0,812	0,016	-1,705	-1,397	0,875	0,138	-1,847
185	-0,661	0,381	0,232	-0,677	-3,141	-2,403	-2,936	-3,929	-1,487	0,631	-0,050	-1,697	-1,579	0,538	-0,237	-1,988
190	-0,852	0,028	0,489	-0,959	-2,322	-1,781	-1,589	-3,023	-1,353	0,502	0,164	-1,431	-1,584	0,272	-0,225	-1,841
195	-0,909	0,448	0,120	-1,062	-2,037	-0,960	-1,324	-2,272	-1,216	0,574	0,292	-1,050	-1,869	-0,165	-0,450	-1,906
200	-0,174	1,165	-0,042	-0,880	-1,366	-0,380	-1,323	-2,263	-1,203	0,692	0,166	-0,877	-2,097	-0,624	-0,863	-1,979
250	2,908	0,505	2,586	0,930	1,949	1,688	0,919	1,261	2,849	0,404	1,756	2,617	0,946	-1,413	-0,340	0,615
300	1,204	-0,540	-0,462	0,534	2,244	1,152	0,464	1,120	2,070	0,847	1,669	1,160	1,096	1,094	1,291	1,071
400	0,937	1,487	0,548	1,329	0,627	1,517	0,785	2,740	-0,017	0,235	1,291	0,755	-0,183	1,387	0,730	-0,324
500	-2,527	-2,028	-1,350	-2,945	-0,539	-1,905	-1,466	-2,364	-3,987	-3,316	-2,865	-3,324	-1,697	-1,034	-2,860	-1,617
600	-0,235	-0,033	-1,168	-2,249	-0,545	-0,166	-0,691	-2,723	-2,312	-1,362	-1,162	-2,842	-0,737	-1,516	-0,792	-1,367
700	0,573	0,755	0,857	1,380	0,889	-0,242	0,435	1,252	-0,160	0,096	-0,530	-0,054	-0,495	-1,206	-1,267	-0,773
800	-1,748	-1,443	-1,674	0,107	-1,386	0,586	-1,209	-0,268	-0,503	-2,152	-0,820	-2,412	-1,162	-0,513	-1,125	-1,925
900	2,002	1,377	1,187	1,367	1,675	0,282	1,411	1,172	0,032	0,395	-0,443	-0,713	-0,888	0,717	0,053	0,379
1000	-1,080	-1,718	-0,864	-0,444	-1,073	-1,354	-0,815	-0,602	-1,446	-2,742	-1,603	-3,431	-0,824	-1,212	-2,189	-3,140