

Ville Rantapelkonen

**TURVASUOJAUS LIIKETUNNISTUKSEN AVULLA JA KAIUTTOMAN KAMMION  
ANTENNIEN OMINAISVAHVISTUKSEN KALIBROINTI**

**TURVASUOJAUS LIIKETUNNISTUKSEN AVULLA JA KAIUTTOMAN KAMMION  
ANTENNIEN OMINAISVAHVISTUKSEN KALIBROINTI**

Ville Rantapelkonen  
Opinnäytetyö  
Syksy 2017  
Tieto- ja viestintäteknikan koulutusoh-  
jelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Tietotekniikan koulutusohjelma, laite- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Ville Rantapelkonen

Opinnäytetyön nimi: Turvasuojaus liiketunnistuksen avulla ja kaiuttoman kammion antennien ominaisvahvistuksen kalibrointi

Työn ohjaaja: Kari Jyrkkä, Riitta Rontu

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Syksy 2017

Sivumäärä: 60

---

Tämä opinnäytetyö on kooste kahdessa osassa suoritetusta opinnäytteestä. Kooste jakautui siten, että ensimmäinen osa on viisi opintopistettä ja toinen on kymmenen. Töiden aiheilla ei ole mitään tekemistä keskenään.

Opinnäytteen ensimmäinen osa käsittelee turvasuojausta liiketunnistuksen avulla. Työn tavoitteina oli selvittää, pystyttäisiinkö nykyistä liiketunnistuksen tasoa parantamaan Internet of Things -implementoinnilla ja kuinka liiketunnistusta optimoidaan kuhunkin käyttöympäristöön. Työn tuloksena syntyi tiivis teoria yleisimmistä liiketunnistintekniikoista ja -laitteista, IoT-pohdinta liiketunnistuksen suhteen ja ohjeistus liiketunnistusta suunnittelevalle henkilölle.

Opinnäytteen toinen osa suoritettiin yrityksessä, joka erikoistui radiolaitteiden mittaukseen. Työn aihe oli kaiuttoman kammion antennien ominaisvahvistuksen kalibrointi ja sen päätavoite oli suorittaa onnistunut kalibrointi kammion jokaiselle radioreitille CTIA:n ohjeiden mukaisesti. CTIA on kaikenlaisen langattoman toiminnan kanssa toimiva sertifikaatteja myöntävä organisaatio, joka on laatinut tässä työssä noudatettavat kalibrointimenetelmät. Työn lopullinen tulos oli kalibrointidata, jota verrattiin aiemmin tehtyihin ja muissa kammioissa toteutettuihin kalibrointeihin. Vertailun myötä todettiin, että kalibrointi oli onnistunut CTIA:n määrittelemien rajojen puitteissa.

---

Asiasanat: koosteopinnäyte, turvasuojaus, liiketunnistus, kalibrointi

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 OPINNÄYTETYÖN ENSIMMÄISEN OSAN ESITTELY .....	6
3 OPINNÄYTETYÖN TOISEN OSAN ESITTELY .....	7
4 YHTEENVETO.....	8

## LIITTEET

Liite 1. Turvasuojaus liiketunnistuksen avulla

Liite 2. Calibration of anechoic chamber antenna gain

# 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on kooste kahdessa osassa suoritetusta opinnäytteestä. Kokonaisuudessaan 15 opintopistettä kattava kooste on jaettu siten, että ensimmäinen osa kattaa 5 opintopistettä ja toinen 10 opintopistettä. Ensimmäisen osan aihe oli jokin omaa mielenkiintoa herättänyt asia, joka opintojen aikana oli kohdalle sattunut. Toisen osan aihe tuli yritykseltä ja se oli ensimmäistä huomattavasti käytännönläheisempi.

Työn ensimmäinen osa käsittelee liiketunnistusta ja sen tuomia etuja turvasuojauksessa. Työn tarkoituksena oli selvittää, pystyttäisiinkö nykyistä liiketunnistuksen tasoa parantamaan Internet of Things -implementoinnilla ja kuinka liiketunnistusta optimoidaan kuhunkin käyttöympäristöön. Työ oli tutkimustyön pohjalta rakennettu teoriapainotteinen teksti.

Työn toinen osa suoritettiin yrityksessä, joka erikoistui radiosignaalien mittaukseen. Heillä oli kaksi radioliikenteen kannalta kaiutonta kammiota, joille oli määrä suorittaa vuotuinen kalibrointi. Tämän asian toi ilmi yrityksen työntekijä ja hän ehdotti opinnäytteen tekoa kyseisestä aiheesta. Tavoitteita tälle työlle oli varsinaisten kalibroititulosten saanti kaikille kammion radioreiteille määritetyillä taajuuksilla. Lisäksi saatua dataa haluttiin verrata aiempiin tuloksiin sekä vastaavanlaisiin kalibrointeihin muissa kammioissa, jotta tulosten oikeellisuus voitaisiin todeta.

## 2 OPINNÄYTETYÖN ENSIMMÄISEN OSAN ESITTELY

Opinnäytetyön ensimmäisen osan (liite 1) aihe tuli miettiä itse. Tämä tapahtui keväällä 2016, kun opinnäytteen ensimmäistä viittä opintopistettä lähdettiin suorittamaan. Aikaisempien opintojen pohjalta ja mielenkiinnosta aiheeksi muodostui turvasuojaus liiketunnistuksen avulla, joka yhdisti aieman opiskelun turvallisuuspuolen ja nykyisen laitetekniikan teemat yhdeksi.

Yksi tavoite työllä oli selvittää, kuinka hyvin liiketunnistus soveltuu Internet of Things -maailmaan. Työn toinen tavoite oli tehdä ohjeistus, kuinka liiketunnistus tehdään käyttöympäristöön sopivaksi. Työ oli täysin teoriapainotteinen, mikä toisaalta olikin ensimmäisen viiden opintopisteen tavoite, koska lopun kymmenen opintopisteen työssä oli painopiste käytännöllä ja soveltamisella. Työssä käytettiin ainoastaan tietokonetta tiedonhaussa ja opinnäytteen kirjoituksessa.

Opinnäytteen ensimmäisen osan suoritus opetti syventävää teoriaa liiketunnistuksen fysiikasta ja tekniikoista. Myös opinnäytteen formaatti tuli tutuksi, mikä auttoi myöhemmin suoritettua toisen osan kirjoituksessa.

### 3 OPINNÄYTETYÖN TOISEN OSAN ESITTELY

Opinnäytetyön toisen osan (liite 2) aiheena oli suorittaa radiolaitteita mittaavalle yritykselle kaiuttomien kammioiden antennien ominaisvahvistuksen kalibrointi CTIA:n ohjeiden mukaan. CTIA on kaikenlaisen langattoman toiminnan kanssa toimiva sertifikaatteja myöntävä organisaatio, joka on laatinut tässä työssä noudatettavat kalibrointimenetelmät.

Työn teoriassa kerrotaan kalibroinnista yleisesti ja kammion kannalta tärkeimmät asiat. Teoriaosuus kertoo lisäksi kalibrointiin osallistuvista laitteista ja komponenteista. Varsinainen työn suoritus ja kohdatut haasteet on selvennetty yksityiskohtaisesti. Työn kirjallinen osuus kirjoitettiin englanniksi.

Työhön kuului perehtyminen CTIA:n testisuunnitelman ohjeistukseen kalibrointimääritelmien hahmottamiseksi. Tämä opas sisälsi paljon yksityiskohtaista tietoa monista radioliikenteeseen liittyvistä konsepteista, joista tärkeimmät olivat yrityksen kammioiden kalibroinnista vastaavan henkilön hallussa. Hänen johdollaan työ kulki systemaattisesti. Kalibroinnin edetessä tarvittavat toiminnot ja menetelmät tulivat tutuiksi ja kalibrointia saattoi suorittaa itsenäisesti.

Työn lopullinen tulos oli kalibrointidata, jota verrattiin aiemmin tehtyihin ja muissa kammioissa toteutettuihin kalibrointeihin. Vertailun myötä todettiin, että kalibrointi oli onnistunut CTIA:n määrittelmien rajojen puitteissa. Oikeat tulokset eli kalibrointidata jätettiin yrityksen haltuun.

Tämä opinnäytteen osasuoritus opetti erittäin syvällistä radioliikenteen teoriaa ja oppia antenneista. Työ harjaannutti matematiikan, fysiikan, taulukkolaskennan ja ohjelmoinnin taitoja entisestään. Työn lopullinen tulos oli onnistunut kalibrointi, jonka tuloksia voidaan soveltaa oikeissa kammiossa suoritettavissa laitemittauksissa.

## 4 YHTEENVETO

Opinnäytteen suorittaminen kahdessa osassa onnistui varsin hyvin, mutta perinteinen suoritustapa tuntuu nyt jälkeinpäin viisaammalta ratkaisulta. Tähän päätökseen tulin arvioidessani työn määrää ja ajan käyttöä. Monessa osassa tehty opinnäyte edellyttää perehtymistä useaan asiaan ja samat vaiheet on toistettava yhä uudelleen. Lisäksi uskoisin perinteisen opinnäytteen suorituksen jäävän pysyvämmiin tekijän mieleen työpanoksen ja vaivannäön myötä.

Koosteopinnäytteen osat ovat aiheiltaan täysin erilaiset, mutta molemmista saattoi oppia uutta. Opinnäytteen toisessa osassa ilmeni poikkeuksellinen piirre, mistä johtuen kävi usein niin, että työn suorituksen perusedellytykset täytyi luovuttaa tilapäisesti pois ja täten kalibrointi keskeytyi. Syynä oli yleensä toisen työntekijän hetkellinen tarve käyttää jotain mittajärjestelmän komponenttia tai itse kammiota muuhun mittaukseen. Ensimmäisen opinnäytteen osan aikana tällaista ongelmaa ei ilmennyt, koska suoritukseen riitti mikä tahansa tiedonhakuun ja kirjoitukseen soveltuva työkalu. Riippuen siis opinnäytteen luonteesta on mahdollista, että aikataulutus ja resurssit eivät ole täysin opinnäytteen tekijästä kiinni.

E erityisen tyytyväinen olen toisen osan tuomasta kokemuksesta. Radiolaitteiden testausympäristö ja kammiot olivat kiintoisia työkohteita. Syvälinen ymmärrys signaalin kulkemiseen vaikuttavista tekijöistä on takuulla hyödyllistä oppia tulevaisuuden kannalta.



Ville Rantapelkonen

**TURVASUOJAUS LIIKETUNNISTUKSEN AVULLA**

## **TURVASUOJAUS LIIKETUNNISTUKSEN AVULLA**

Ville Rantapelkonen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2016  
Tieto- ja viestintätekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

**SISÄLLYS**

SISÄLLYS .....	3
LYHENTEET .....	4
1 JOHDANTO .....	5
2 TEKNIIKAT LIIKKEEN HAVAITSEMISEKSI .....	6
2.1 Infrapuna .....	6
2.2 Optiikka .....	6
2.3 Radiotaajuudet .....	7
2.4 Ääni .....	7
2.5 Värinä (seismisyys) .....	7
2.6 Magnetismi .....	7
3 SOVELLETUT LIIKETUNNISTIMET .....	9
3.1 PIR .....	9
3.2 Mikroaalto .....	10
3.3 Ultraääni .....	11
3.4 Tomografiset sensorit .....	11
3.5 Videotunnistus .....	11
4 LIIKETUNNISTUS JA IOT .....	13
5 LIIKETUNNISTUKSEN OPTIMOINTI .....	15
6 POHDINTA .....	16
LÄHTEET .....	17

**LYHENTEET**

IR	Infra Red, yleinen lyhennys infrapunalle englannin kielessä.
PIR	Passive Infra Red, passiiviseen havainnointiin perustuva infrapuna- sensori.
LED	Light Emiting Diode, valoa emittoiva diodi.
IoT	Internet of Things, ”esineiden Internet”, jolla tarkoitetaan laitteiden ja koneiden ohjausta ja sensorointia Internetin välityksellä.
RF	Radio Frequency, radiotaajuus.
DIY	Do It Yourself, Tee-se-itse.

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on kolmannes koko opinnäytetyön opintopisteistä ja sen sisältö pyrkii käsittelemään pääasiallisesti valitun aiheen teoreettista puolta. Täten tekstin lopullinen mitta ei yllä tavanomaisiin täyden 15 op:n mittoihin eikä siihen kuulu joitain asiakokonaisuuksia, kuten käytännön suorittamista.

Työn aiheen valitsin pohdittuani monenlaisia asiayhteyksiä ja lopulta päädyin miettimään turvasuojauksen elektroniikkaa. Rajasin aiheeni välittömästi turvasuojaukseen ja siitä liiketunnistimiin. Konsepti ei ole millään tavalla uusi, mutta ehkä siinä juuri ongelma piilee. Tavoitteeksi muodostuikin selvittää, onko nykyistä liiketunnistusta mahdollista parantaa esimerkiksi tuomalla se Internet of Things -maailmaan. Toinen tavoite oli laatia selvitys siitä, miten optimoidaan liiketunnistus kulkun käyttöympäristöön toimivuuden, hinnan ja virrankulutuksen suhteen.

Löytääkseni vastauksia näihin kysymyksiin oli minun aloitettava laajamittainen tutkimustyö. Ensin tutustuin kaupallisiin liiketunnistimiin ja niiden ominaisuuksiin. Tunnistimia osoittautui olevan monenlaisia ja niistä on kerrottu tässä dokumentissa myöhemmin. Muita tunnistukseen vaikuttavia osatekijöitä ovat mm. sääolosuhteet, vuodenajan vaihtelut, geometria, kohteen tai tilan normaali käyttö ja tunnistimen ohjaus.

Pidän opinnäytteeni aiheita relevanttina tulevaisuuden kannalta, sillä pikkuhiljaa kaikenlaiset elektroniikkasovellukset alkavat olemaan älykkäitä ja enemmän elämässä mukana olevia. Mikäli nykyiset merkit pitävät paikkansa, myös turvalaitteiden kohdalla tämä väite tulee olemaan totta.

## 2 TEKNIIKAT LIIKKEEN HAVAITSEMISEKSI

Turvasuojauksessa käytetään erilaisiin tekniikkoihin perustuvia laitteita liikkeen havaitsemiseksi. Kaikki tekniikat voidaan jakaa yksinkertaisesti kahteen lohkoon: mekaaniset ja elektroniset tunnistustekniikat. Tässä luvussa on keskitytty erityisesti elektronisiin tekniikkoihin, koska juuri nämä ovat tulevaisuutta ja vain elektronisilla tekniikoilla saadaan aikaan kehittyneempää liikkeen tunnistusta.

### 2.1 Infrapuna

Infrapunan aallonpituus on 0,75  $\mu\text{m}$ :n ja 1000  $\mu\text{m}$ :n välissä ja elektromagneettisella spektrillä se sijoittuu näkyvän valon ja mikroaaltojen väliin. Osa ilmakehän molekyyleistä absorboi infrapunaa, kuten vesihöyry, hiilidioksidi, metaani ja otsoni. Suuri osa Auringon infrapunasäteiden pääsystä onkin tehokkaasti estetty näiden tekijöiden ansiosta, mutta Maahan saapuva osa säteilystä aiheuttaa planeetan lämpenemisen. (2, properties.)

Kaikki lämpimät esineet ja eliöt säteilevät infrapunasäteilyä. Tämä voidaan havaita termisenä energiana eli lämpötilan nousuna. Tätä lämpötilan ja infrapunan välistä suhdetta voidaan soveltaa mm. sähkölämpöpattereissa, kasvihuoneessa ja pimeänäkökiikareissa. (2, creation and detection.) Myös infrapunaan perustuvia liikkeentunnistimia on keksitty ja tästä sovelluksesta on kerrottu lisää luvussa 2.

### 2.2 Optiikka

Optinen tekniikka voidaan jakaa kahteen alakategoriaan: transmissiiviseksi eli läpäiseväksi ja reflektiiviseksi eli heijastavaksi. Molemmat tekniikat ovat toimivia liikkeentunnistuksessa.

Läpäisevä tekniikka edellyttää valoa emittoivan infrapunadiodin ja valoa aistivan valotransistorin. Liikkeentunnistus perustuu siihen, että jokin valon kulkuun vaikuttava objekti tulee emittorin ja valosensorin väliin, jolloin aistittu valoenergian määrä muuttuu. Muuttunut energialukema voidaan siis tulkita implikoivan liikettä emittorin ja sensorin välillä. (1.)

Samoin kuin läpäisevässä, myös heijastavassa tekniikassa käytetään infrapunadiodia ja valotransistoria, mutta ero on valon suuntauksessa ja komponenttien sijoittelussa. Diodi ja transistori ovat rinnakkain osoittaen samaan suuntaan määrättyssä kulmassa. Emittoitu valo kimpoaa osuessaan

kohteeseen ja kun kohde on aistittavassa asemassa, valo kulkeutuu transistorille, jolloin valoenergian määrä kasvaa. Periaate on siis käytännössä päinvastainen kuin transmissiivisessä metodissa, jossa liikkeentunnistus perustuu valoenergian pienentymiseen. (1.)

### **2.3 Radiotaajuudet**

Radiotaajuuksia voidaan käyttää liikkeentunnistukseen siten, että aistittavalla alueella oleva henkilö aiheuttaa radioaaltojen propagoitumisen heikkenemistä. Kuitenkin radiotaajuuksista saadaan suurempi hyöty luomalla kokonainen liikkeentunnistussysteemi, jossa langattomasti radioteitse kulkeva viestintä tapahtuu sensorilaitteilta keskusyksikölle. Radiotaajuuksien käytössä on etuna signaalin läpäisevyys, jolloin seinien ja muiden esteiden läpi voidaan tunnistaa kulkija ja viestitkin kulkevat langattomasti. Kuitenkin kohteesta riippuen radiotaajuuksia saatetaan jo käyttää paljon muuhun toimintaan, joten päällekkäisten taajuuskaistojen käyttö voi aiheuttaa häiriöitä. Tämä onkin ehkä systeemin suurin turvallisuusriski ja siksi sen toteutumisen välttämiseksi on syytä ottaa käytettävä radiokaista ja protokolla huomioon. (3.)

### **2.4 Ääni**

Ääni voi toimia hyödyllisenä lisänä liikkeentunnistuksessa. Erilaisia sovelluksia ovat mm. automaattinen tervehdyksen, musiikin tai ääniefektin toisto kun liikettä on havaittu. Kuultava ääni ei siis itsessään sovellu liikkeentunnistukseen, mutta esim. hälytys- tai varoitusääni on omiaan ehkäisemään murtoyriyksen. On myös olemassa sovelluksia äänille, joita ihminen ei pysty kuulemaan. Esimerkiksi ultraääni, johon alimmillaan 20 kHz:n taajuudella kulkeutuvat ääniaallot luetaan, on ihmiskorvan kuulemattomissa. (4.) Ultraäänisensoreista on kerrottu lisää luvussa 2.3.

### **2.5 Värinä (seismisyys)**

Turvallisuudessa värinää mittaavat sensorit on yleensä asetettu seiniin tai ikkunoihin, jolloin oikeasti aistittava asia onkin rakennuksen seinämään tai ikkunaan kohdistuva isku tai värinä, ei niinkään liikkeen aiheuttaja. Tästä syystä seismisillä tunnistimilla on hyvin vaikea luoda kuvaa liikkeen aiheuttajasta ja täten älykkäiden tunnistustoteutusten laatiminen on haastavaa.

### **2.6 Magnetismi**

Ihminen ei ole magneettinen eikä ihmisen liikettä voida magneettisuutta mittaavilla sensoreilla todeta. (5.) Kuitenkin magnetismia voidaan soveltaa esimerkiksi asettamalla oven karmiin magneetikosketin, jonka status kertoo onko ovi auki vai kiinni. Tieto oven luvattomasta avauksesta antaa

hälytysviestin, joka kulkeutuu määrättyyn osoitteeseen. Eli tälläkään tekniikalla ei saada tehokasta liikkeentunnistusta aikaiseksi, mutta voidaan kertoa, mistä paikasta on joku tai jokin oletettavasti kulkenut.



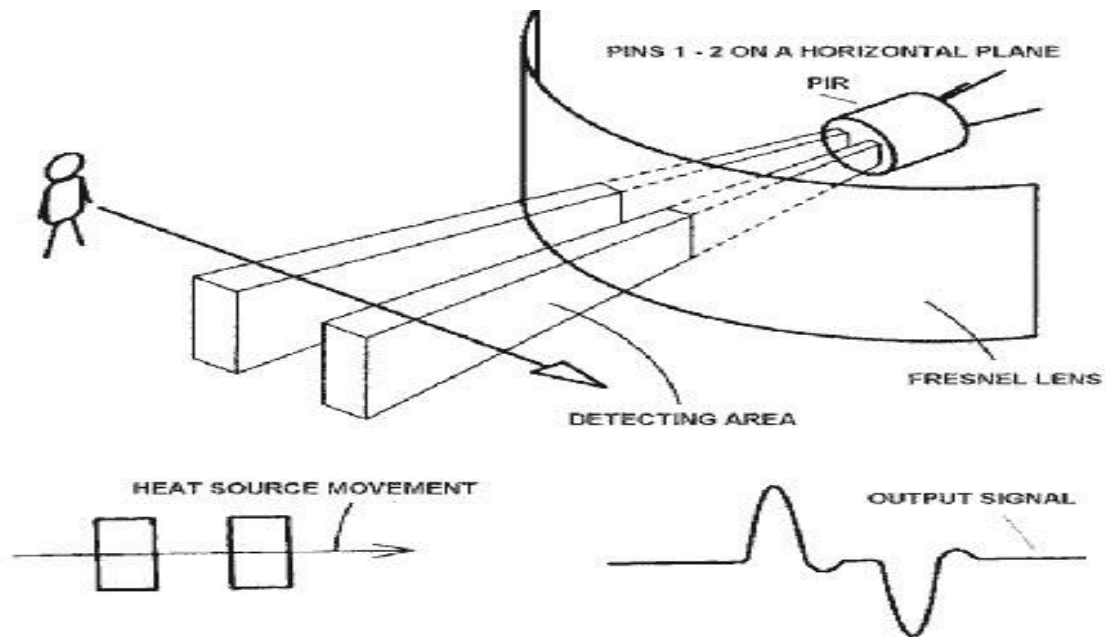
### 3 SOVELLETUT LIIKETUNNISTIMET

Edellisessä luvussa mainittuja tekniikoita on sovellettu erilaisissa laitteissa. Joissain laitteissa on myös integroitu useita tekniikoita, joiden tarkoitus on eliminoida muiden sensorien heikkouksia. Usealla sensorilla on myös mahdollista luoda monipuolisempia tunnistusalgoritmeja ja -metodeja, mutta useamman sensorin käyttö näkyy laitteen hinnassa eikä siten ole aina optimaalisin vaihtoehto.

#### 3.1 PIR

PIR eli Passive Infrared Sensor on ehkäpä yleisin liiketunnistintyyppi, kun puhutaan ihmisen havaitsemisesta. Kuten jo nimikin kertoo, laitteen havainnointitekniikka perustuu infrapunaa käyttäen. Passiivisuus tässä asiayhteydessä tarkoittaa, että laite ei itse emittoi minkäänlaista energiaa, vaan ainoastaan hyväksyy siihen säteilevää infrapunasäteilyä (6.) Täten esimerkiksi oven avautuminen laitteen havaintoalueella ei aiheuta reagoitua laitteelta, koska infrapunasäteilyä ei synny. Mutta jos ihminen tai muu elävä olento kulkee ovesta havaintoalueelle aiheuttaa elion luoma infrapunasäteily reaktion laitteessa.

Sensori koostuu kahdesta infrapunaa aistivasta ”väylästä”, jotka ovat vierekkäin sensorin keskellä. PIR-laitteen linssiä muuttamalla saadaan aikaan säteilyn ohjausta, jolloin liikkeen aistimista voidaan suorittaa muualtakin kuin suoraan sensorin edestä. IR-väylistä toinen antaa reagoidessaan positiivisen pulssin ja toinen negatiivisen. Nämä pulssit havaitaan muutoksina laitteelle kulkeutuvassa signaalissa ja tästä voidaan aiheuttaa jokin tapahtuma, kuten valon syttyminen. (7.) Kuvassa 1 on havainnollistava skenaario signaalin muutoksesta.



KUVA 1. Signaalin muutos ihmisen kulkiessa sensorialueen ohi (7)

### 3.2 Mikroaalto

Infrapunan tapaan mikroaalloillakin on oma taajuuskaista, joka on myös ihmisen havaitsemien taajuuksien ulkopuolella. Tästä syystä mikroaalloja voidaan soveltaa ihmisen havaitsemiseen. Mikroaalloja käyttävät liiketunnistimet emittoivat mikroaalloja säädetylle alueelle ja analysoivat takaisinheijastuvan taajuuden. (8.)

Tämä tekniikka perustuu Dopplerin ilmiöön. Laitteen lähetin lähettää tietyn taajuista signaalia ja osuessaan jollain nopeudella liikkuvaan objektiin signaalin taajuus ja vaihe muuttuvat. Nämä muutuneet signaalit heijastuvat takaisin laitteen vastaanottimeen, jonka jälkeen laite suorittaa signaalianalyysin. Jos palautuneen signaalin vaihe on olennaisesti muuttunut, laite aiheuttaa hälytyksen. (8.)

Mikroaaltolaitteiden huonoin puoli on suuri määrä vääriä hälytyksiä, esimerkiksi verhojen heiluminen tai muut pienet värähtelyt aiheuttavat hälytyksen herkässä laitteessa. Lisäksi laite vaatii jatkuvan virransyötön, joten jos laite ei ole verkkovirrassa, se vaatii vähintäänkin jyvän ja kalliin pariston toimiakseen pitkään. Väärien hälytyksien määrää on mahdollista merkittävästi harventaa yhdistämällä mikroaallojen ja PIR-laitteen toimivuudet. (8.)

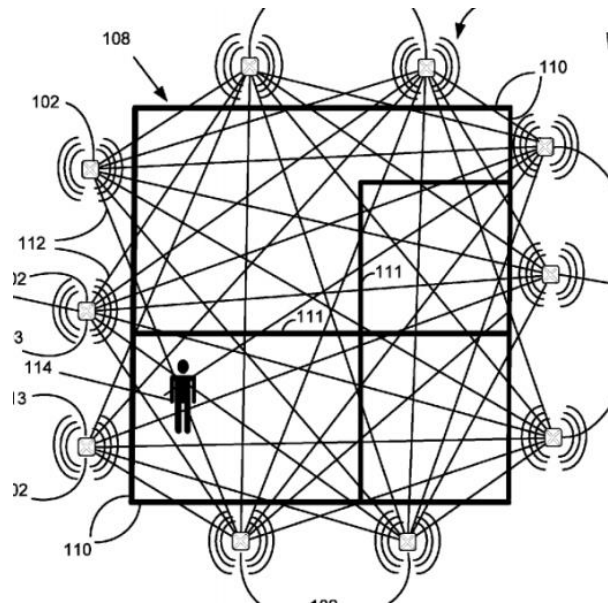
### 3.3 Ultraääni

Ultraäänien käyttö liiketunnistuksessa muistuttaa mikroaaltojen toimintaa monin tavoin. Oikeastaan ainoana erona vaikuttaisi olevan taajuus, joka ultraäänellä on selkeästi mikroaaltoja pienempi. Tästä johtuen ultraäänit eivät läpäise monia objekteja kun taas mikroaallot kulkevat helpommin lävitse.

Jotkin kiinteistön laitteet tai toiminnot saattavat luoda ääntä ultraäänien taajuuskaistalla aiheuttaen virheellisiä hälytyksiä passiivisissa sensoreissa. Ultraääneltä on myös mahdollista välttyä olemalla suuren esineen takana, koska ääni heijastuu takaisin laitteelle jo osuessaan esineeseen. Tämä on haitta aktiivisessa sensorissa, mutta myös passiivisessa, jolloin suuret esineet aiheuttavat äänen vääristymistä. (9.)

### 3.4 Tomografiset sensorit

Liiketunnistus radiotaajuuksia hyväksikäyttäen on eritelty aiemassa luvussa ja sen sovellettua liiketunnistinta sanotaan tomografiseksi sensoriksi. Itse tunnistus tapahtuu usealla RF-laitteella, jotka ovat radiotaajuuksilla kaikki yhteydessä toisiinsa. Kuvassa 2 on esitetty hahmottava piirros laitteiden yhteyksistä.



KUVA 2. Tomografinen sensoriverkko tyypillisessä ympäristössä (10)

### 3.5 Videotunnistus

Videotunnistuksesta ensimmäisenä mieleen tulee kameravalvonta, jolloin kameralta tulevaa videokuvaa analysoi ihminen, esim. paikallisvartija elintarvikemyymälässä. Kuitenkin jos halutaan luoda

ihmisestä riippumaton tunnistusmetodi, on videon kautta tapahtuvaan liikkeen aistimiseen suunniteltava jonkinlainen algoritmi.

Yksinkertainen keino tunnistaa liikettä on ottaa liikkumattomalla kameralla kuva kameran näkyvästä perustilassa, jolloin kuvattavalla alueella ei ole mitään tarpeetonta. Nyt kun jokin valo heijastava objekti saapuu kuvatulle alueelle, voi kameran algoritmi verrata perustilan otosta uuteen tilaan. Jos poikkeavuus on liian suuri, antaa kamera hälytyksen. Tietysti tällä menetelmällä virheellisten hälytysten määrä voi paikasta riippuen olla huomattavan suuri, koska esimerkiksi väärin aseteltu kamera voi reagoida esimerkiksi taustalla kulkevan auton vilahdukseen tai pilvien muodostumiseen. (11.) Systeemin toimivuus riippuu siis paljolti kameran asettelusta ja algoritmin tunnistuksen tarkkuudesta.

Videotunnistuksesta on mahdollista tehdä paljonkin älykkäämpi. Otettu kuva eli kehys voidaan jakaa soluihin ja näitä soluja voidaan asettaa aktiivisiksi eli hälytyksen antaviksi tai pois päältä. Tämä tarkoittaa, että jos kehyksessä on alueita joita halutaan tarkkailla, voidaan näiden alueiden solut ainoastaan asettaa aktiivisiksi. Esimerkkinä tällaisesta kehys, jossa on rakennus ulko-ovineen ja ikkunoineen. Ulko-ovi ja muut odotetut kulkuväylät voidaan asettaa pois päältä ja ainoastaan ikkunat pitää aktiivisinä. On myös mahdollista asettaa systeemi aktivoimaan loputkin alueet vaikkapa yön ajaksi. Muita keinoja virheellisten hälytysten torjumiseen on mm. vierekkäisten solujen laskeminen mukaan, kirkkauden kontrastin ja kameran värinän huomiointi, solujen herkkyyden säätö ja kehysten prosessointinopeus. (11.)

## 4 LIIKETUNNISTUS JA IOT

Yhdistämällä IoT ja liiketunnistus saadaan aikaan järjestelmä, jonka toiminta perustuu Internetin käyttöön. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi liiketunnistimen tuottama hälytys välittyisi joko Ethernetin kautta tai langattomasti reitittimeen ja lopulta Internet-verkkoon. Tyypillinen ja varsin helppo tapa saada tieto hälytyksestä verkossa on ohjelmoida liiketunnistin lähettämään hälytykset sähköpostiin, josta tiedon voi tarkistaa tietokoneella tai mobiililaitteella. IoT-liiketunnistimia onkin jo valmistettu ainakin elektroniikkaharrastajien toimesta, jolloin toteutuksessa on käytetty jotain liiketunnistussovellusta, keinoa luoda tiedonsiirto Internetiin, prosessoria tiedon käsittelyyn ja virtalähdettä. Näillä elementeillä on mahdollista luoda täysin toimiva IoT-liiketunnistin. (12.)

Oikeastaan IoT:n tuominen liiketunnistimien järjestelmiin ei ole monimutkaista ollenkaan, kaikki tarvittava teknologia on jo olemassa. Vielä toistaiseksi ainakin yleinen tapa saada etätieto havaitusta liikkeestä on tekstiviesti robottipuhelimelta, joka on usein integroituna turvajärjestelmän keskusyksikköön. Joissain vanhemmissa järjestelmissä ei ole mahdollisuutta edes saada etätietoa hälytyksestä. Tällöin hälytys on paikallinen, eli järjestelmän päätelaite on rekisteröinyt liikkeen jollain asennetulla liiketunnistimella ja tehnyt jonkin toimenpiteen, esim. sytyttänyt valot, avannut oven tai soittanut äänimerkin. Nykyaikainen järjestelmä, ainakin turvallisuutta varten suunniteltu, sisältää viestittämisen etäkohteeseen.

Jos GSM-viestit yksinkertaisesti korvataan verkkoyhteydellä, syntyy jo olemassa olevista liiketunnistinjärjestelmistäkin IoT-järjestelmiä. IoT:n määritelmän mukaan kaikki laitteet, jotka ovat yhteydessä nettiin ja joita voidaan netin kautta ohjailta, luetaan IoT-laitteiksi. Jos siis olemassa olevaa robottipuhelimen kautta viestivää järjestelmää muutetaan siten, että robottipuhelin korvataan verkkoyhteydellä, niin tällöin hälytysviestit menisivät ensin verkon tietokantaan ja sieltä tieto luettaisiin jonkin käyttöliittymän kautta (e-mail, puhelin). Tämä edellyttää hieman lisää ohjelmointia laitteen valmistajalta, mutta se kannattaa, koska toimivaan IoT-järjestelmään voidaan liittää useita muitakin IoT-laitteita. Mikäli nykyiset merkit pitävät paikkansa, olen itse sitä mieltä, että tulevaisuudessa kaikki asuntoon laitteet ovat verkottuneet ja pystyn hallitsemaan niitä pelkällä älypuhelimella, mukaan lukien liiketunnistimia.

Eräs vaihtoehto IoT-järjestelmän luomiselle on suunnitella se täysin itsenäiseksi. Periaate on siis tehdä itse tunnistimista älykkäitä ja antaa niille omat "aistit". Esimerkiksi toteutus voisi koostua

useista erilaisista sensorilaitteista, jotka aistivat eri asioita kuten lämpöä, kosteutta, painetta, varausta eli oikeastaan mitä vain aistittavissa onkaan. Näiden sensorien tieto kulkee langattomasti reitittimeen ja sieltä taas Internetiin ja tietokantaan. Seuraavassa vaiheessa oletetaan, että käytössä on liiketunnistimia sensorien läheisyydessä. Liiketunnistimet lukevat ja analysoivat sensorien dataa ja sen perusteella tekevät toimintoja, esim. kohdistavat tunnistimen eri tavalla tai asettuvat virransäästötilaan. Kun liike havaitaan, voi tunnistin verrata hetkeä sensorien dataan ja karsia vääriä hälytyksiä. (13.)

## 5 LIIKETUNNISTUKSEN OPTIMOINTI

Jotta liiketunnistus sujuisi mahdollisimman sujuvasti ja edullisesti, on tässä luvussa ohjeita optimaalisen järjestelmän suunnitteluun. Kukin kohta ohjeissa on syytä miettiä juuri kyseessä olevan ympäristön ja sen päätoimisen käytön perspektiivistä. Ohjeet eivät välttämättä noudata kronologista järjestystä, ja kaikki osat eivät ehkä kosketa kaikkia järjestelmiä.

- Liiketunnistuksen mietintä alkaa kysymyksellä miksi, eli mitä haluan liiketunnistuksella saavuttaa. Päävaihtoehtoina ovat turvallisuus, käytettävyys ja energiansäästö.
  - Turvallisuus kattaa mm. kulunvalvonnan ja hälytykset. Näiden kahden avulla ei-toivotuista kulkijoista saadaan tieto joko vartiointifirmalle, liiketunnistimen omistajalle tai molemmille.
  - Käytettävyys tarkoittaa tunnistuksen tapahtuessa esim. oven aukeamista, valojen syttymistä tai äänen toistoa.
  - Energiansäästö liittyy paljolti käytettävyyteen, koska liiketunnistimien avulla voidaan energiaa kuluttavia laitteita aktivoida vasta tunnistuksen tapahduttua, jolloin laitteet eivät ole koko ajan päällä.
- Mieti mihin haluat liiketunnistusta: Ulos, sisälle, kulkuväylille, objektille, seinämälle, ”sokeaan kulmaan”, jne.
- Suunniteltaessa liiketunnistusta ulkotiloihin on tärkeä huomioida sääolosuhteet ja niiden vaihtelut, suuret etäisyydet ja monenlaiset kulkijat (autot, eläimet, lentokoneet).
- Oikeanlaisen tunnistustekniikan valinta voi kohteesta riippuen olla tärkeää. Jos tunnistusalueella on entuudestaan radioliikennettä, on mahdollista, että radiotaajuuksia käyttävä liiketunnistus häiriintyy.
- Mitoita tunnistusalue ja mieti sopiva sijainti tunnistimelle.
- Arvioi tunnistusalueen tyypillinen käyttö, eli kuinka paljon ja minkälaista liikennettä kulloinkin on odotettavissa tässä sijainnissa. Tämän kohdan avulla on mahdollista suunnitella tunnistimen käyttämä tunnistusalgoritmi väärin hälytysten välttämiseksi.
- Liiketunnistuksen ongelmaksi saattaa muodostua esimerkiksi ovien aukeaminen tai lemmikkieläimet, jotka antavat väärää hälytyksiä. Tunnistimien paremmalla kohdistuksella ja tunnistustekniikan vaihdolla nämä ongelmat voidaan välttää.

## 6 POHDINTA

Liiketunnistukseen perehdyttyäni ja asiaa paljon tutkittuani olen tehnyt joitain huomioita laitteiden suunnittelusta ja halvemmista toteutuksista. En ole vielä löytänyt pätevää syytä joidenkin kaupallisten liiketunnistimien korkealle hinnalle. Yritän tässä luvussa tehdä selkoa miksi asia kiinnostaa.

Kuten jo aiemmin mainittiin, yksi liiketunnistin vaatii vain virtalähteen, prosessorin ja tunnistinyksikön, jotta liikettä voidaan tunnistaa. Kaikki muu, kuten valaisin, summeri, tiedonsiirtokanava tai muut sensorit, ovat sovelluksesta riippuen myös oleellisia tai ylimääräisiä ominaisuuksia. Elektrooniikkaa tuntevana olen varma, että täysin toimiva tunnistin ei tule maksamaan paljoa. Markkinoilta löytyy paljon erilaisia kaupallisia tunnistimia, mutta osa näistä on erittäin kalliita, jopa satoja euroja. Nämä laitteet sisältävät tyypillisesti em. lisäominaisuuksia. Jotkin laitevalmistajat jopa käyttävät tuotteen nopeaa asennusta hintaa lisäävänä tekijänä ja tiedonsiirtokin voi maksaa, koska laitevalmistaja isännöi palvelinta, joka hoitaa hälytysviestien välityksen. Jos raha ei ole ongelma, niin helppoa pääsee liiketunnistuksessakin, mutta silti järjestelmä ei todennäköisesti ole paras mahdollinen. Eri asia on tietenkin, jos ammattilainen on varta vasten suunnitellut järjestelmän juuri tiettyyn kohteeseen.

Useimmat eivät halua maksaa ylimääräistä niinkin yksinkertaisesta asiasta kuin liiketunnistus. Pie-nellä vaivannäöllä säästää paljon ja on mahdollista tehdä kaupallisia järjestelmiä parempia toteutuksia ja lisäksi saa juuri sellaiset toiminnot kuin haluaa. Tämä voi tosin viedä aikaa ja suunnittelu vaatii ammattitaitoa, mutta työ on sen arvoinen. Internet on täynnä erilaisia DIY-projekteja, joiden avulla pääsee alkuun. Liiketunnistus todella voi tuoda lisäarvoa kiinteistölle ja viihtyvyyttä käyttäjälle, kunhan huomioi liiketunnistuksen suunnittelussa optimoinnin ohjeet.



## LÄHTEET

1. Toal, Jim 2013. Optical sensors. Vishay Semiconductors. Saatavissa: <http://www.vishay.com/docs/81452/transmissive.pdf>. hakupäivä: 11.2.2016.
2. Kurtus, Ron 2010. Infrared radiation. Ron Kurtus' school for champions. Saatavissa: <http://www.school-for-champions.com/science/infrared.htm#.VsCX2fKLSbc>. Hakupäivä: 11.2.2016.
3. European Editors. 2013. Building a Wireless Motion Detection System. Saatavissa: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jun/building-a-wireless-motion-detection-system>. Hakupäivä: 14.2.2016.
4. Rouse, Margaret 2005. Definition: Ultrasound. Saatavissa: <http://searchsecurity.tech-target.com/definition/ultrasound>. Hakupäivä: 14.2.2016.
5. Tieteen kuvalehti. 2013. Voiko ihminen olla magneettinen? Saatavissa: <http://tieku.fi/ihminen/elimisto/voiko-ihminen-olla-magneettinen>. Hakupäivä: 14.2.2016.
6. Elkaynews. Passive Infrared Sensors, how do they work? Saatavissa: <http://www.elkay.co.uk/newsdetail.asp?id=334>. Hakupäivä: 3.3.2016.
7. Lady Ada. 2015. Adafruit. How PIR's work? Saatavissa: <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/how-pirs-work>. Hakupäivä: 3.3.2016.
8. Homesecuritysystems. What is Microwave Motion Detector. Saatavissa: <http://www.homesecuritysystems.tips/types-of-systems/what-is-microwave-motion-detector-benefits-and-brands>. Hakupäivä: 3.3.2016.
9. Inman, Kurt 2016. Wisegeek. What is an Ultrasonic Motion Detector? Saatavissa: <http://www.wisegeek.com/what-is-an-ultrasonic-motion-detector.htm>. Hakupäivä: 3.3.2016.
10. Machinegeek. 2013. DangerousPrototypes. What is tomographic motion detection. Saatavissa: <http://dangerousprototypes.com/2013/06/23/what-is-tomographic-motion-detection/>. Hakupäivä: 16.3.2016.
11. CCTV. 2010. Video Motion Detection. Saatavissa: [http://www.cctv-information.co.uk/i/Video\\_Motion\\_Detection](http://www.cctv-information.co.uk/i/Video_Motion_Detection). Hakupäivä: 17.3.2016.
12. Sibuntu. 2015. IoT WiFi DIY motion detector with PIR and e-mail notification. Saatavissa: <http://www.instructables.com/id/loT-WiFi-DIY-motion-detector-with-e-mail-notification/>. Hakupäivä: 31.3.2016.

13. Wireless Sensor Tags. 2016. 2<sup>nd</sup> Generation Wireless Sensor Tags. Saatavissa: <http://wirelesstag.net/>. Hakupäivä: 31.3.2016.

Ville Rantapelkonen

## **CALIBRATION OF ANECHOIC CHAMBER ANTENNA GAIN**

## **CALIBRATION OF ANECHOIC CHAMBER ANTENNA GAIN**

Ville Rantapelkonen  
Bachelor's Thesis  
Autumn 2017  
Information Technology  
Oulu University of Applied Sciences

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Information Technology, Equipment and Product Design

---

Author: Ville Rantapelkonen

Title of Bachelor's thesis: Calibration of Anechoic Chamber Antenna Gain

Supervisors: Kari Jyrkkä, Pertti Mäkikyrö, Sami Laukkanen

Term and year of completion: August 2017

Number of pages: 34

---

The aim of this Bachelor's thesis was to complete calibrations of anechoic chamber antenna gain for two chambers and document how this was done. Other features of this thesis include information about the required theories, components and methods used to achieve results. This thesis was commissioned by a company specializing in radio device measurements.

A complete setup for gain calibrations consisted of the chamber itself, network analyzer, reference antennas, chamber mounted antennas, RF cables, automation features and chamber control features. The core properties of this equipment and how they affected calibrations were also included in this text. The entire calibration process was based on the CTIA test plan for OTA measurements. In the test plan this calibration process is called a range reference test.

Calibrations of anechoic chamber antenna gain are required to be done annually. The final comparison between previously done calibrations and the ones done now proved to be mostly the same. Some inconsistencies were observed with certain reference antenna results but they were all still within a tolerable margin. The new calibration results can be used to obtain gain values for chamber antennas and to apply them in actual device RF measurements. Therefore, these calibrations can be considered a success. Most of the actual results are not included here as they are too numerous to be added. Sample data is presented to illustrate how calibration values are to be used for obtaining a total path loss.

---

Keywords:

Anechoic chamber, antenna, gain, calibration, OTA, RF path, range reference

## PREFACE

During my previous project in the company, I inquired whether I could do my Bachelor's thesis for the company. Not only did I get approval, but a suggestion as well. The suggestion was the topic calibration of an anechoic chamber, which I accepted. The idea for this thesis came from the technical sales expert.

I would like to thank the technical sales expert for guidance on RF physics and CEO for granting this opportunity. For help with the thesis in general, I thank my tutoring teacher Kari Jyrkkä. For assisting me with English grammar, I thank my English teacher Kaija Posio. With the calibration work itself, I thank my fellow student Antti Tuovinen for helping me to complete the calibrations. Finally, I would like to give special thanks to the company's CTO, who provided invaluable guidance on RF physics, calibration process and a number of other topics.

Oulu, 27.11.2017

Ville Rantapelkonen

## CONTENTS

ABSTRACT.....	3
PREFACE.....	4
CONTENTS.....	5
GLOSSARY.....	6
1 INTRODUCTION.....	7
2 CALIBRATION.....	8
2.1 What is calibration?.....	8
2.2 Reasons for calibration.....	9
3 TEST SYSTEM COMPONENTS.....	11
3.1 Anechoic chamber.....	11
3.2 Antennas.....	14
3.2.1 Horn antennas.....	15
3.2.2 Dipole antennas.....	17
3.3 Test equipment.....	19
3.3.1 (Vector) Network Analyzer.....	19
3.3.2 Orientation equipment.....	21
3.3.3 RF cables.....	22
3.3.4 Computer.....	23
3.4 Automation.....	24
4 MEASUREMENTS.....	25
4.1 Laboratories one and two.....	25
4.1.1 Setup and process.....	25
4.1.2 Results.....	29
4.2 Measurement uncertainty.....	30
5 CONCLUSIONS.....	32
REFERENCES.....	34

**GLOSSARY**

RF	Radio Frequency
EUT	Equipment Under Test
AUT	Antenna Under Test
DUT	Device Under Test
VNA	Vector Network Analyzer
RAM	Radiation-Absorbent Material
dB	Decibel
dBm	Decibel to milliwatt
Hz	Hertz (unit of frequency)
OTA	Over-The-Air
TRP	Total Radiated Power
FSPL	Free-Space Path Loss
ESD	Electrostatic Discharge
Rx	Receive
Tx	Transmit
PC	Personal Computer



## 1 INTRODUCTION

This thesis aims to provide usable information on what calibration is, why it is important and how calibrations for antennas in anechoic chambers are done. Although various kinds of calibrations for antennas exist, the topic at hand focuses on gain calibration. A basic knowledge of physics and radio signals is required to fully understand the following context.

All calibrations were done in the premises of the company. Two similar anechoic chambers had a need for antenna calibration and thus, this thesis was commissioned by the company. The primary objectives of this thesis were to provide information on how calibrations could be completed and how the results would reflect on measurement uncertainties. Unambiguous documentation was also considered to be important for future reference. All calibration methods and specifications used were based on the CTIA certification program (1).

The structure of this text consists of four sections. The first part focuses on explaining the key features of calibration in general, calibration in this case and why calibrations are done. The second part handles all required components and factors that were used to achieve successful calibration. The third part handles the actual measurements. The final section describes the results of the work and contemplates on what went well and what could have been done better. Most facts presented here reference to the CTIA test plan and that in turn references to several scientific sources (1, p. 44-46).

## 2 CALIBRATION

This chapter describes what calibration is, why it is done and how it is. From a general point of view, this chapter directs the context towards calibrating antennas. Although the topic of this thesis emphasizes antenna calibration, the entire radio signal path must be taken into account when implementing calibration to an anechoic chamber.

### 2.1 What is calibration?

Calibration is the practice of obtaining a connection between a measurement instrument and a standard reference instrument in specified conditions. All measuring apparatuses must be referenced to something, otherwise the measured results can be anything, even beyond what is realistic. If a working scale shows negative mass when a person is being weighed, then there is a high chance that the scale will show even smaller values when no mass is present. This is an example case for a badly calibrated or not calibrated measuring device. The beginning value could be subtracted from the person's indicated mass value and the weight of the person could be received in units shown by the scale. But for convenience, it would be better if the beginning value of the scale was zero to begin with because then the value shown by the scale becomes axiomatically the mass of the object being weighed.

In case of the anechoic chamber, calibration would be placing the standard (reference) antenna in the chamber center to study how much a known input signal radiated from a standard antenna has attenuated when it was received by the measuring equipment at the end of the RF path. Measured results are compared to previous calibrations and the calibrations done in other chambers. A more definitive comparison campaign is made between other test laboratories elsewhere and it will provide more proof of calibration quality. The more calibration values converge, the less measurement uncertainties antennas have. A maximum difference of  $\pm 0.5$  dB at any frequency shows that our calibration has been like the previous calibration.

Once calibrations have been completed, it is possible to use the calibrated RF paths for actual device measurements by applying calculated calibration coefficients. In this way it is possible to state that during measurements, the Equipment Under Test (EUT) is the only factor in results.

Figure 1 features the key components of the calibration setup used and it illustrates the overall concept.

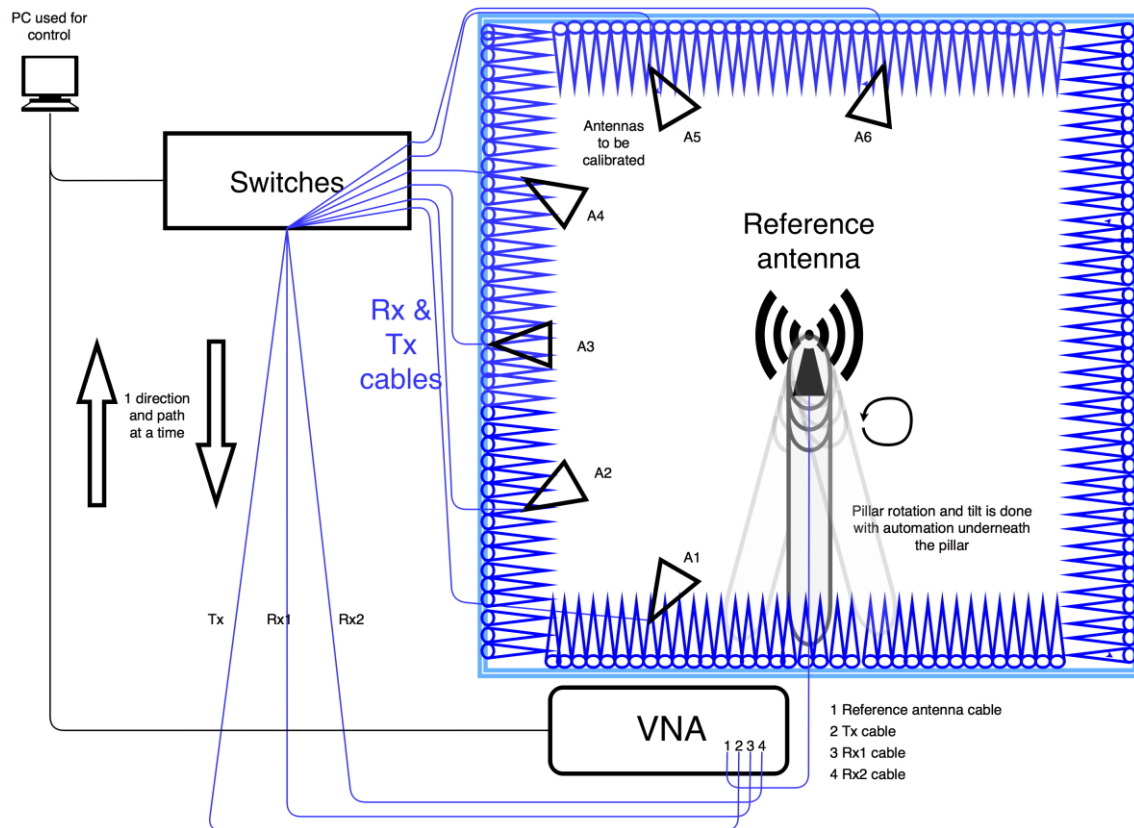


FIGURE 1. Calibration Setup for laboratory 1. Detailed analysis can be found in chapter 4.

During RF measurements in an anechoic chamber (e.g. TRP), it is desirable to know how much power the EUT outputs when transmitting. If FSPL, measurement and reference antenna gains and cable losses have not been accounted for, then it is easy to think that the measured low power value was the full extent of RF power of the device. All these gains and losses are considered during the calibration process. If it is known how much a constant signal loses power from source to the measuring device in the system, then it is possible to mitigate signal attenuations from actual results. In other words, one gets to know how much power the EUT is radiating because all other factors have been “removed” from the system.

## 2.2 Reasons for calibration

The biggest reason for calibration is the fact that it gives proof of quality. High quality may well be the determining factor for a customer to purchase from a company that offers better quality service

or products. In this way accurate calibration can lead to more profitable business and a larger market share.

As to when should calibration take place, three general things need to be considered. The first one is to follow the recommendation of the manufacturer of the equipment in question. The second one is if there happens a mechanical or an electrical shock to the equipment. In the event of shock, it may be that, e.g. the calibration scale has shifted or the equipment memory has reset. The third reason to calibrate is time. The measurement accuracy tends to deteriorate during the time, thus periodical calibration is important. These three aspects should be considered with regards to the equipment in question because some equipment may require calibration more frequently due to the environment of use or measurement accuracy needed. Also, for such systems that have many components and connectors, it is important to note that if one or more physical connections within the system are severed and then reapplied, the previously calibrated conditions may no longer be there. This is especially true for sensitive measuring, such as RF measurements. Basically, every time a change occurs in the measuring setup, recalibrating should be considered, at least for sensitive systems.

### 3 TEST SYSTEM COMPONENTS

The test setup for antenna calibration contains a number of hardware components and a way to run the test itself. The objective is to create an environment in which measurement uncertainties and interferences are reduced to as close to zero as possible. This chapter is dedicated to explaining what each test system component is for and how the test system components are used in general.

#### 3.1 Anechoic chamber

An anechoic chamber is a space in which many types of RF testing takes place. The chamber is a specially constructed room that can block all RF signals from either entering or leaving, utilizing the principles of the Faraday cage. This is very useful because the outside RF interference is no longer a factor in measurements within the chamber. Anechoic chambers also have important acoustic implementations but herein only the RF aspect is considered.

Understanding electromagnetic fields is important because they have a lot to do with chamber dimensions and specifically with measurement distances. The distance between a transmitter and a receiver in the chamber is measured so that near-field effects diminish to almost zero and measuring takes place in far-field. If the distance is too small, near-field diffractions will cause fluctuations in measurement results. In our case, the distance is about 3.4m and this allows to measure frequencies from 400MHz to 20GHz depending on the device size. However, measurements above 3GHz would require other measurement methods which are not included in the CTIA certification program.

CTIA specifications have provided three (informative) formulas, all of which must be considered to determine the minimum measurement distance.

$$\text{Phase uncertainty formula: } R > \frac{2 * D^2}{\lambda} (1)$$

$$\text{Amplitude uncertainty formula: } R > 3 * D (1)$$

$$\text{Reactive near-field formula: } R > 3 * \lambda (1)$$

In these formulas,  $R$  is the measurement distance in meters,  $D$  is a radiator dimension (the largest proportion) and  $\lambda$  (lambda) is a signal wavelength (with radio waves, lightspeed divided by frequency). Once the wavelength and dimension have been input, the formula providing the largest value (the greatest distance) is the minimum distance where uncertainties from near-field diminish to a point that no mathematical correction is required. It is worth noting that the size of a radiator (a device to be measured) becomes a great factor in smaller wavelengths. Basically, if one wanted to measure a large device without uncertainties, the measurement distance would increase, especially with higher frequencies. With a fixed measurement distance and by applying the three formulas, it is possible to determine the frequency range of the chamber for far-field testing.

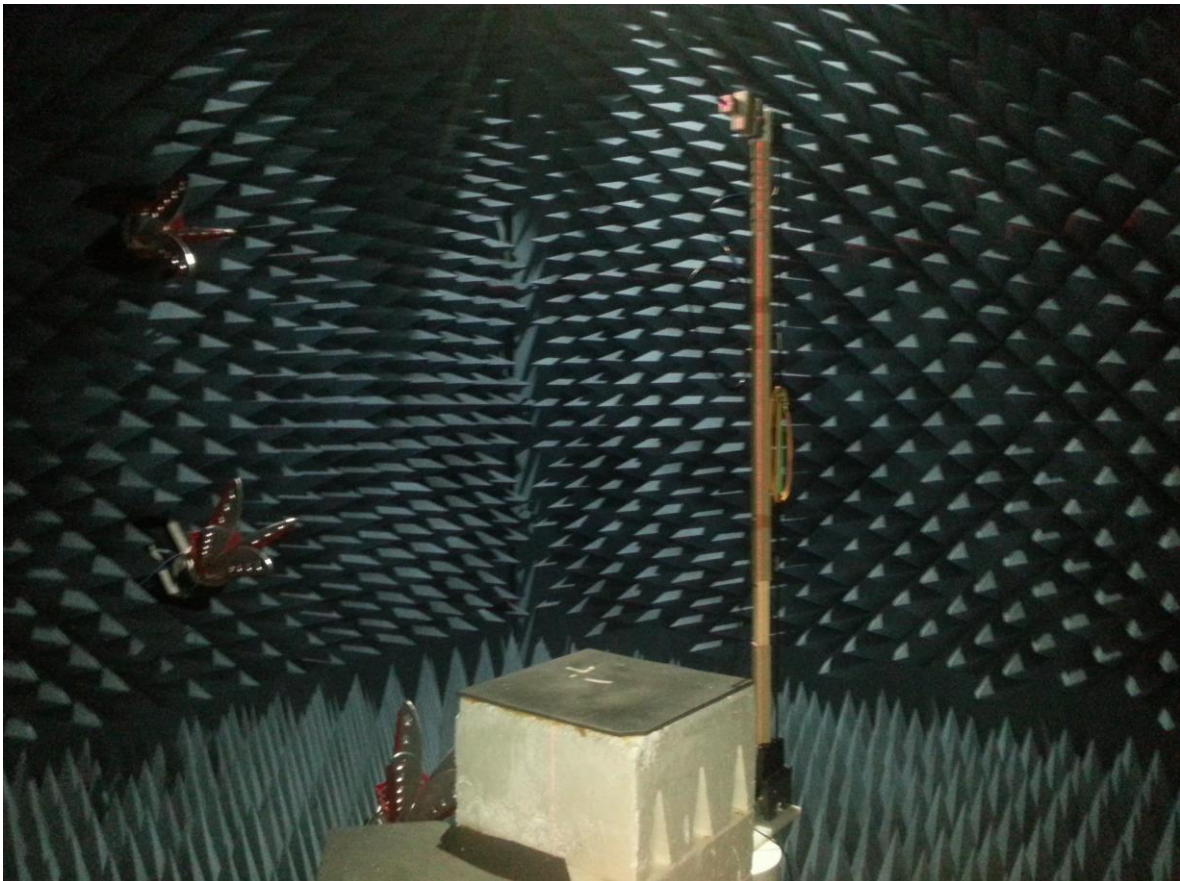
What makes the chamber anechoic (in terms of RF), is a substance applied on the inner walls, floor and ceiling, preferably most surfaces that are not involved in measurements. The substance is called Radiation-Absorbent Material (RAM) and it can very effectively absorb RF signals at a given frequency range. Using these absorbers is essential to reduce RF reflections within the chamber. The type, shape and size of RAM can also be a limiting factor in what frequency range the chamber can reliably measure (3, 4). The 60-cm tall pyramid-shaped absorbers used here are sufficient for 400 MHz and higher frequencies (see figure 2 below).

RAMs are typically made of rubberized foam material impregnated with mixtures of carbon and iron. A pyramidal RAM uses two ways to attenuate RF signals: scattering and absorption. Scattering happens when a signal hits the RAM and then gets reflected either coherently or incoherently. Incoherent scattering also happens inside the material, where carbon particles cause destructive interference (absorption). Internal scattering alone causes attenuation up to 10 dB and other factors will add to this. The pyramidal shape provides angles that maximize the wave bounces in the material, each bounce causing more signal loss. Eventually, the signal either leaves the absorber with greatly reduced strength or it has attenuated to a level close to the noise floor. (3, 4)

This paragraph will explain how a room is used to measure RF signals. First, it is necessary to have something that can transmit and/or receive RF signals. In other words, antennas must be placed within the chamber (more about antennas in chapter 3.2). Typically, anechoic chambers have many antennas of same kind mounted on their surfaces to cover many angles facing directly at the center of chamber. If mounted antennas are used to receive, then obviously a transmitter is needed. The

transmitting antenna (or a device with an antenna) is placed in the chamber center. When considering a three-dimensional center, a support structure for the EUT needs to be placed in the chamber. A typical structure would be made from a sturdy but RF-wise unreflective (low dielectric) material such as polystyrene or other similar substance. The support structure should be made so that it can be oriented with ease, preferably via remotely controlled automation from outside the chamber. It is important to ensure that the EUT stays in place and the support structure moves so that the EUT may face the measurement antenna. With automation, the EUT orientation becomes a lot less time consuming and this enables to shorten the overall measurement time.

With RAMs, mounted antennas and EUT support structures in place, the anechoic chamber for the RF measurement is mostly set. Next, the frequency range for which the chamber is to be calibrated must be determined. Also, calibration antennas must be chosen accordingly. In figure 2, a typical view of the chamber can be observed.



*FIGURE 2. Anechoic Chamber with a Sleeve Dipole Calibration Antenna in Place. Three antennas to be calibrated can be seen in the picture. This setup uses a rotation system that turns the dipole vertically.*

### 3.2 Antennas

Antennas are the core components of any anechoic chamber. As shown in figure 2, anechoic chamber antennas are often horn antennas. Depending on what kinds of measurements are planned to be conducted in the chamber, other types are also used. The reason to use horn antennas is that they have a large frequency range that they can measure. If a chamber mounted antenna could only measure a fraction of the frequencies needed, then it would have to be changed mid-measurement. Obviously, this would cause all kinds of problems and inconveniences. In general, the antennas mounted in the chamber are there indefinitely.

The mounted chamber antennas should have several things in common. The first one is the measurement distance. In a square-shaped space maintaining the same distance for all antennas requires more than simply attaching antennas on the wall. The true measurement zone is better to be considered a circle, where the antenna edge is placed on the edge of a circle, facing the circle. Setting antennas up this way means that the circle radius becomes the measurement distance. Also, with antennas placed along the edge, they will automatically face the center, which is the second common feature with chamber antennas. The third has to do with spacing of the antennas or the angle at which they are towards the center. In one of the chambers (figure 1), antennas 1 to 5 have 30 degrees between them and antenna 6 is 45 degrees from antenna 5. Assuming that the chamber antennas are all in place at proper angles and that they are perfectly directed at the center of the chamber with equal measurement distances, there is still the fourth common aspect to be considered, namely polarization.

The horn antenna has two elements from which it can radiate: horizontal and vertical. In the chamber, the horn elements are aligned so that the vertical element is in a vertical plane and the horizontal element is in a horizontal plane when facing the chamber center. This is very important to consider when applying a signal path for calibration. For example, in the figure 2 there is a sleeve dipole antenna placed horizontally (having horizontal polarization). In theory, if the dipole antenna radiates at a constant level and the horn antenna is receiving with the vertical element, the received signal level should be non-existent. This is because of polarization mismatch. If the horizontal element is receiving in this case, a maximum amount of signal will be received under the circumstances. Anything other than a perfect polarization alignment is undesirable. For calibration purposes, all that is needed to know about polarization is that when measuring a single polarization



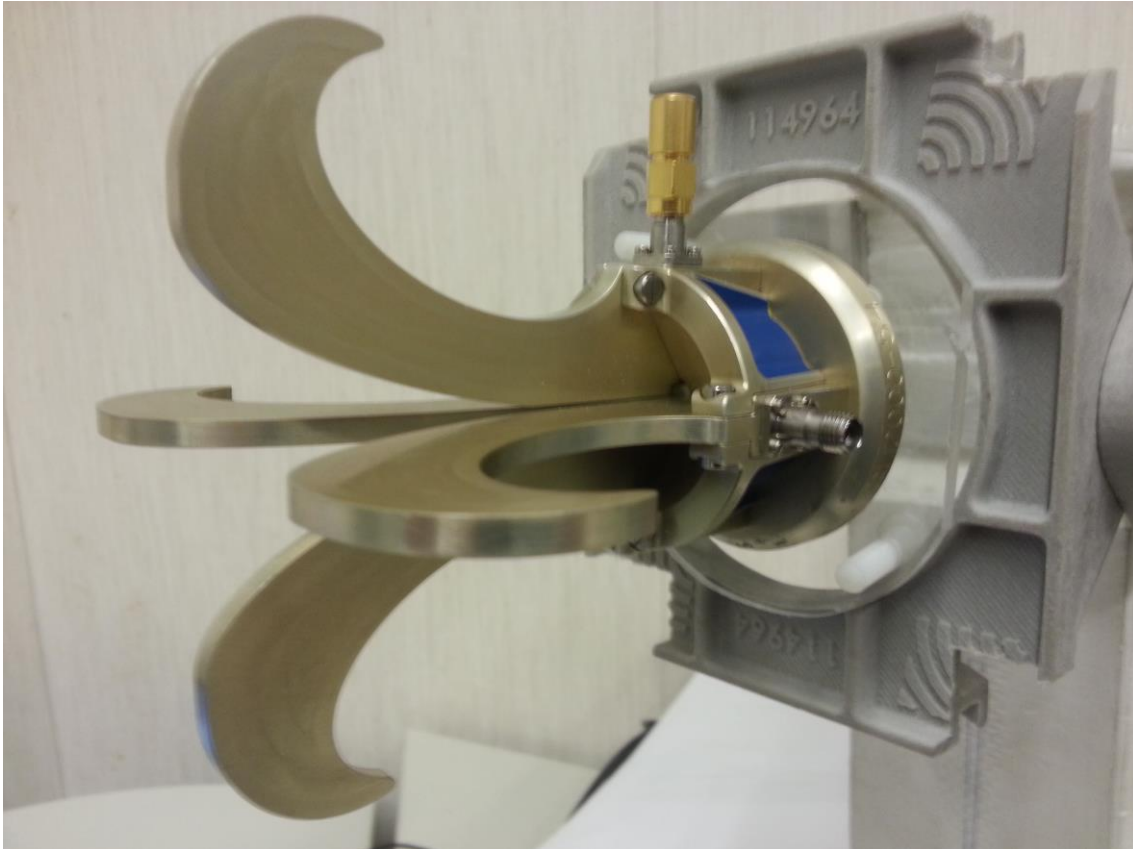
path, both the transmitter and the receiver must have same polarization for the measurement to be effective.

There are two types of antennas that are generally used for anechoic chamber calibrations: horn antennas and dipole antennas. Dipoles are recommended for frequencies up to 2.5 GHz and horn antennas for frequencies over 2.5 GHz (1). The following two chapters are introduction to the reference antennas used for the calibration within the company. An important notion to be made at this point is that the reference dipole antennas were used to get absolute calibration values and horn antennas were used to get the difference between each RF path. With absolute calibration, the core concept of antenna gain becomes important to understand. More about these topics are found in chapter 4.1.2.

### **3.2.1 Horn antennas**

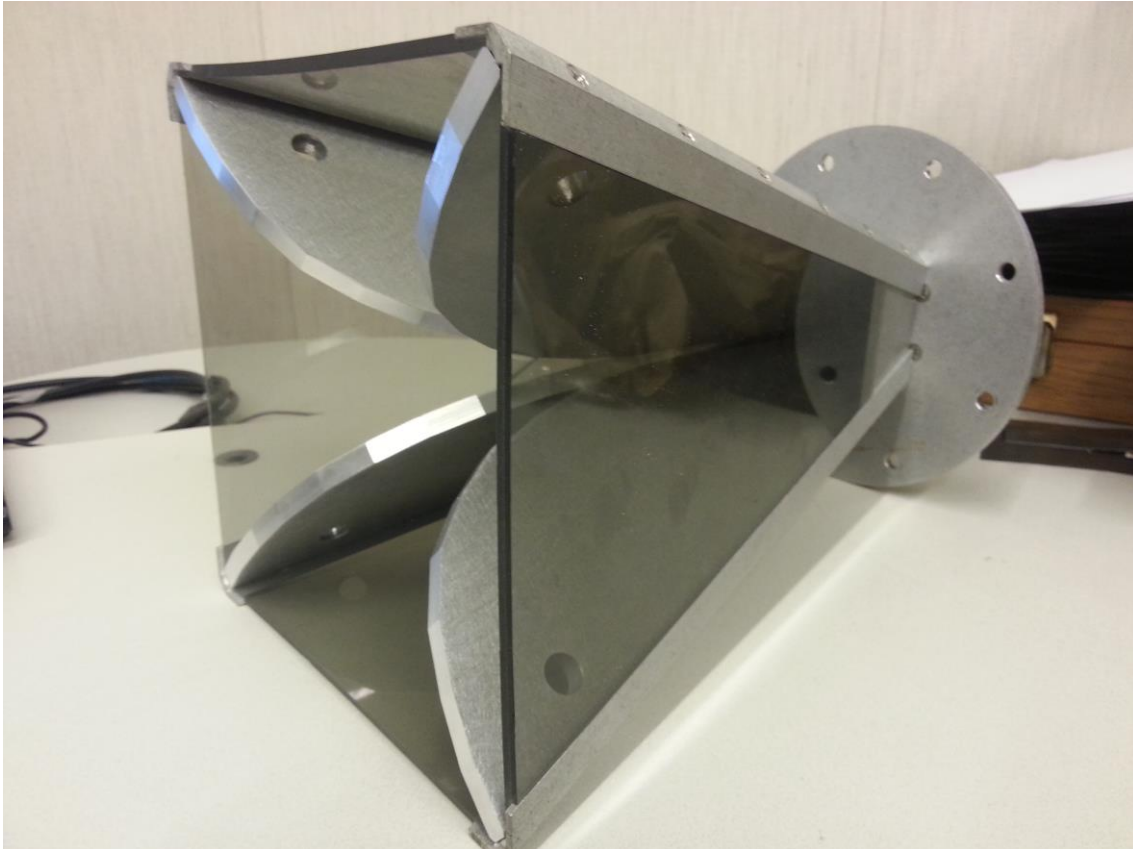
Two horn antennas were used to cover the desired frequency range. The first one was QH2000 represented in figure 3. With QH2000, the measurable frequency range is from 2 GHz to 32 GHz, but only 8.5 GHz could be achieved due to network analyzer limitation. This was not an issue because the sufficient frequency range for both chambers only rises to 6 GHz. What became an issue was the fact that the mount used for rotation did not have enough space to connect an RF cable when aligning the polarized elements. The solution for this was found in physics. Basically, the reference horn antenna had to be placed in a way that the polarized element used for measuring was in a 45-degree angle offset from a perfect polarization alignment. From the reference antenna output, when using a single element, only half of the power would be received by the chamber antenna element. When this measurement was done, it was necessary to turn the reference antenna 90 degrees vertically so that the 45-degree offset would now be on the other side of the chamber antenna element. What should not be done is switch the port (element) on the reference antenna because there is no guarantee that both elements are the same.

After measuring with both 45-degree offsets, these two results must now be added together to get the true results for each polarization. This is because in theory, if the element was turned exactly 90 degrees, the result, too, would be the same. Now by simply converting decibels to watts, adding and converting watts back to decibels, the true measurement value should be 3 dB better (twice the power). By applying these principles, it is possible to get results for all RF paths.



*FIGURE 3. QH2000 Horn Antenna on a Plastic Mount. Here the antenna is aligned so that the two elements are perpendicular with chamber antenna elements. On the side there is the connector port for a horizontal element and the vertical port has a load of  $50 \Omega$ . The load is placed on the port not being used during the measurement.*

Because QH2000 could not cover frequencies below 2 GHz, another antenna had to be introduced. The second horn antenna used was called ETS3164. The measurement with this antenna would be very similar to QH2000. But due to the shape and size of ETS3164 (figure 4), it was necessary to use support structure tilting and different mounts to align the antenna.



*FIGURE 4. ETS3164 Horn Antenna. Calibration-wise the same principles apply to this antenna, tool. The polarized elements here are in a 45-degree offset from aligning perfectly with chamber antenna elements.*

### **3.2.2 Dipole antennas**

Two basic aspects differ when using dipoles instead of horn antennas. The first is the fact that a dipole antenna has a short frequency range and a single polarization. This means that several antennas must be used to cover the desired frequency range and to receive results for both horizontal and vertical polarizations. On the other hand, because dipole antennas have a donut-shaped radiation pattern, it is possible to measure all chamber antennas horizontally with a single measurement. This is only possible for horizontally polarized elements because in the chamber the antennas are basically stacked on one another. This is entirely dependent on the chamber configuration. However, because not all chambers are used for the same measurement and, therefore the measurement antennas may have different positioning within the chamber.

Dipole antennas come in several types, two of which are called sleeve and loop. The only important differences between the two are shapes and polarizations. In figures 5 and 6, these differences are better observed.



*FIGURE 5. A Sleeve Dipole Antenna. Radiation will be vertically polarized if the antenna radiates from this position.*



*FIGURE 6. A Loop Dipole Antenna. Opposite to a sleeve antenna, radiation polarization will become horizontal if the antenna radiates from this position.*

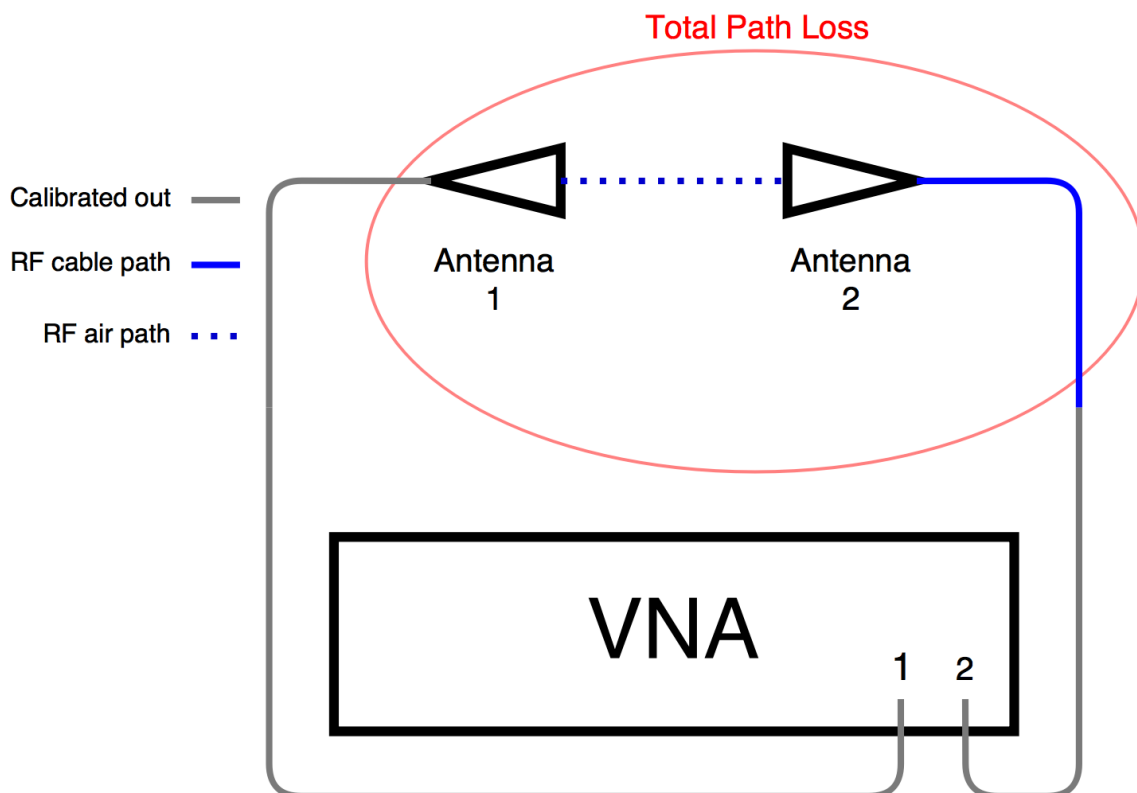
### **3.3 Test equipment**

The used testing equipment consists of a network analyzer, orientation equipment and RF cables. There exist some switches and connectors as well, but they are there to allow easier connections and to help automation. All switches and connectors, which are part of the RF path, will become part of the calibration result.

#### **3.3.1 (Vector) Network Analyzer**

The Network Analyzer (VNA) is a very useful piece of equipment when undergoing RF measurements. Amongst its numerable features the most important ones for gain calibration are the automated calibration feature, frequency span adjustment, sweep settings, saving and loading states and determining input and output ports for easy Rx and Tx swap. Also, the VNA can be easily controlled with a PC, which is of utmost importance when automating any measurement.

Assuming that all required connections have been made, settings are in place and the necessary devices are powered on, data should be received from the VNA once the sweep feature gets activated. Basically, the VNA monitor starts to draw a graph of the signal that was received by the port set for receiving. If nothing is connected to the receive port at this point, then all that will be received is noise at low levels of the signal strength. A successful measurement on the other hand would provide a much cleaner line way above the noise level, provided that the signal has not attenuated to near nothing. Before actual measurements take place, some of the RF cables are “removed” from the system in a way described in the chapter about RF cables. Figure 7 has a simplified setup for RF measurement with the VNA at its core.



*FIGURE 7. Simplified RF Measurement Setup with the VNA. Gray cables are calibrated out by the VNA using a calibration kit. The Antenna 1 represents reference antenna, the dotted line is free space, the Antenna 2 is a chamber antenna and the blue cable is part of the path being measured. Therefore, the reference antenna power, FSPL, chamber antenna power and receiver cable loss (port 2 in this case) are the only factors in calibration (Total Path Loss). Reference antenna gain is not part of total path loss.*

After a successful sweep, the results can be stored in the VNA memory, but that does not do much good there. This is where a PC is used to get the results from the VNA. The raw form of data

provided by the VNA is in volts expressed with real and imaginary values. These are very cumbersome values to work with, therefore proper conversion formulas are applied and decibel values will emerge (more about math and formulas in chapter 4). Also, after confirming a functioning sweep one should consider saving the settings for a later use, implementing the save state feature. A PC can then be used to load a state from the VNA memory to apply the settings for each measurement. This again has improved the system automation.

To make the most use of the VNA, a few things must be considered. One is sampling. For applicable results the sampling step must be 0.5 MHz or less (1). Although this provides a more reliable and frequent sampling, thus averaging out possible false results, it also increases the time it takes to complete a sweep. This, in addition to a large frequency range, can make measurements last for tens of minutes, even hours. If automation is not used to turn the reference antenna accordingly, then manual adjustment will only add to this time. In the long run it becomes pragmatic to take note of sampling step and frequency range for time management.

The second thing to remember with the VNA is that it too is a measurement device. Thus, it requires calibrating from time to time. A recently calibrated device can be assumed to measure reliably as it was in this case. Should it have been more than a year since the the last calibration, the device would have been sent to the manufacturer to be calibrated. Useful as it is, the VNA is not an absolute requirement for this kind of calibration. Another device or a combination of devices can be used if they themselves are calibrated. An alternative selection of equipment could e.g. consist of a signal generator and a calibration receiver.

### **3.3.2 Orientation equipment**

To make the reference antenna point at the desired chamber antenna and to keep the vertical and horizontal focal points same, a means of rotation, tilting and mounting must be applied. With the combination of the three, it is possible to cover all necessary angles.

Rotation is used to get calibration values from the radiation pattern. In case of dipole antennas, the pattern is donut-shape. If the shape is not perfect, then there is a risk that by simply measuring a single side of the antenna, the imperfection will affect actual results. Therefore, it is desirable to obtain an average value from a symmetric radiation shape around the dipole. This is achieved by

rotating the antenna and doing a frequency sweep for several angles. Obviously, measuring all 360 degrees becomes very time consuming, therefore 30-degree steps were used instead.

Tilting is necessary to get the reference antenna to face each of the chamber antennas. Of course, it becomes extremely impractical to tilt more than 15 degrees because it takes more space in the chamber, reduces absorber surface causing reflections and when using a heavier antenna, it causes a lot of strain to the support structure. To compensate for the lack of maneuverability, mounts that further orient the antenna were applied.

### 3.3.3 RF cables

RF cables are a crucial part of a measuring system as they are used to transfer radio signals from one place to another. The cable itself must not cause much signal attenuation but unfortunately some losses in power will be observed even in the best of cables. Therefore, cable integrity is very important.

To ensure that the cables are intact, a vector network analyzer (VNA) or similar equipment, which can measure RF signals, is needed. Next, two cables, preferably short ones, are needed. One end from both is connected to VNA ports and the other to some kind of calibration kit. Now, the desired frequency range is input and one of the VNA's features, calibration, is used. The calibration kit will effectively zero out the cables and it is as if the cable end attached to the calibration kit becomes the VNA input/output port for the range intended (see figure 7, gray cables). When calibration is complete, the integrity of the cables can be tested by simply attaching them together and twisting them a little. The VNA should be put to continuous measurement at this point and it should show near-zero results at the calibrated frequency range. At higher frequencies, there are expected to be more losses. If the result stays under fractions of decibel throughout the range when twisting cables, then the cables can be considered usable (1).

Other aspect of the cables to be considered is the length. Longer cables cause more losses in the signal strength. With all RF calibration paths, this fact should persist as the only difference between the paths are the amount of used RF cables (and possibly connectors). Therefore, it is possible to reason that from the longer path a slightly worse signal will be received.



### 3.3.4 Computer

The computer is the nexus of operations and functions as a control unit. The PC is not essential for gathering data but it simplifies and accelerates more complicated measurements immensely. If the hardware side of the system is checked, then controlling most hardware components with a computer script is possible. The basic construct of the program for calibration could be as follows:

- Loading a VNA state, which includes
  - Signal path (e.g. port 1 to 2, 2 to 3, 4 to 2)
  - Frequency range
  - Sweep point count  $[(\text{stop frequency} - \text{start frequency}) / \text{sampling step}]$
  - Calibrated cables
  - Power level for output signal
  - Inconsequential settings
- Setting a switch state (for polarization and path)
- Engaging a measurement sweep
- Receiving data from the VNA
- After completing a sweep
  - Reorientating the reference antenna
  - Loading a new VNA state
  - Changing the switch state
  - Measureing
  - Obtaining data
- Repeating until the set frequency range has been measured for all chamber antennas.

The simplified program description above can complete the entire sequence for calibration. But as previously mentioned, the reference antenna reorientation might prove a problem, as it becomes impractical to cover all angles with a support structure tilt and the antenna mounting cannot be automatically changed. This is the case with any antenna that has a clear directivity to it. Dipoles, for example, can cover all chamber antennas at any angle when placed correctly because of their radiation pattern. Thus, dipole orientation automation is not a big issue and a turning mechanism can be deployed with little effort. Due to the small frequency range of dipole antennas, however, many dipoles at different frequency ranges must be measured to cover the overall frequency range

intended for actual measurements. Every time a dipole is swapped or a directional antenna is directed manually, the calibration process is paused.

### **3.4 Automation**

Automation is important to ensure that calibration does not take too much time and effort. In the best-case scenario, everything that can be automated will be automated. The point of an anechoic chamber is to use it for measuring clients' products, thus returning to actual measuring is important. Every extra second used for calibration is potentially wasted revenue if there are clients waiting.

Most of the system has already been automated but there are simply no other ways but to manually complete some of the things needed for calibration. One such thing is reference antenna mounting. It is difficult to construct a sturdy and nearly reflection-free mount that could automatically change antenna position to face the correct chamber antennas. It might be possible to make a mount that could tilt the reference antenna with a small motor or hydraulics but this in turn requires some elaborate crafting and investment. There are also many shapes and sizes for reference antennas and it is unlikely that a single mount would fit all. In fact, throughout the calibration process, several mounts were tried for calibration and some new ones had to be made. A good antenna mount proved to be very important because a bad one would set a reference antenna at a bad angle or cause it to shift in position during the rotation or tilt.

One other thing that would save some time and especially nerves is to have a remote control for the turn and tilt functions of the support structures. When a single person performs calibrations, they must come and go between the chamber and the measurement equipment frequently. The equipment is obviously outside the chamber, therefore this makes turning and tilting unnecessarily arduous and time consuming. It would be a lot simpler if the person aligning the antenna, standing near the support structure, could control the turning and tilting from there. In this way they could immediately see how much the position changes and it would not be necessary to return to the measuring equipment until the chamber is prepared. A solution could be a remote control to be placed in the chamber. The remote controller could also be hidden by the absorbers during measurements.

## 4 MEASUREMENTS

As mentioned in the introduction, two anechoic chambers were calibrated. The only real difference between the two were the facts that they have a slightly different use. Chamber 1 has six antennas whereas chamber 2 has five and chamber 2 is simpler in terms of RF paths. In the following chapters the chamber and measuring space together are referenced as laboratories.

### 4.1 Laboratories one and two

With a very similar size, shape and configuration of antennas, both laboratories 1 and 2 had the same calibration steps implemented. Due to more RF paths, calibration measurements for laboratory 1 took more time and because it was done first, there were some difficulties with the process itself.

#### 4.1.1 Setup and process

The initial setup-stage took some time and understanding. First, it was necessary to ensure that all required components were available. Then they had to be connected (see figure 1). Many pieces were already in place and the rest came together swiftly with the company employee's professional help. Next followed the cable calibration as described in the chapter about RF cables. All four VNA ports had to be used to calibrate all required RF paths. The first port was for the reference antenna, therefore the entire cable was calibrated out (figure 7). The second port was a Tx path, which was calibrated out all the way to the switches. The third port was for Rx1 and the fourth for Rx2. These last two paths differ only in cable length, therefore the longer Rx2 path would have worse results. The real reason why Rx paths in laboratory 1 had been divided into Rx1 and Rx2 is inconsequential for the scope of this thesis. For laboratory 2, only one Rx path existed therefore only three VNA ports were used.

The hardware set needed to be tested. First, it had to be checked that the cables were intact as was described in the chapter about RF cables. After confirming satisfactory results, a test measurement was conducted. This meant that the starting reference antenna, QH2000, was placed in the chamber. At this point, a perfect placement was not very important because a small error in

expected results would still mean that the system itself is functioning correctly. If the RF path was erroneously loaded or not loaded at all when running a test, then the results were likely to be noise. With laboratory 2, using QH2000 was unnecessary, because ETS3164 was sufficient to cover all necessary frequencies.

A successful test meant that the calibration measurements could begin. Now the perfect orientation was needed to be included in the setup, which for all instances had to be done manually. To get the orientation right, a spirit level equipped with a laser-light was used. Once the chamber was left and the door was closed behind, measuring could begin. Because the antenna was in a 45-degree offset from the perfect polarization alignment, it was necessary to turn the reference antenna as described in chapter 3.2.1. Only after that it was possible to continue to adjust the reference antenna to face another chamber antenna. This process was done to all chamber antennas.

After calibration measurements with QT2000 were completed for all antennas, another reference antenna was chosen. Once again, the same steps described above had to be taken. Due to the size and mass of the new antenna, some added precautions had to be implemented. One such precaution was adding support for the supporting pillar. A tall pillar made of polystyrene will suffer a lot of strain when tilted sideways with a heavy object mounted on top of it. It was even possible to see the pillar bending. The chosen solution for laboratory 1 was to push the pillar in a more upright position with a sturdy stick. In laboratory 2 a strong rope was hanged from the chamber roof and placed tight around the antenna to alleviate the strain. With these changes in place, the support was able to withstand all tilted positions and measurements without an incident.

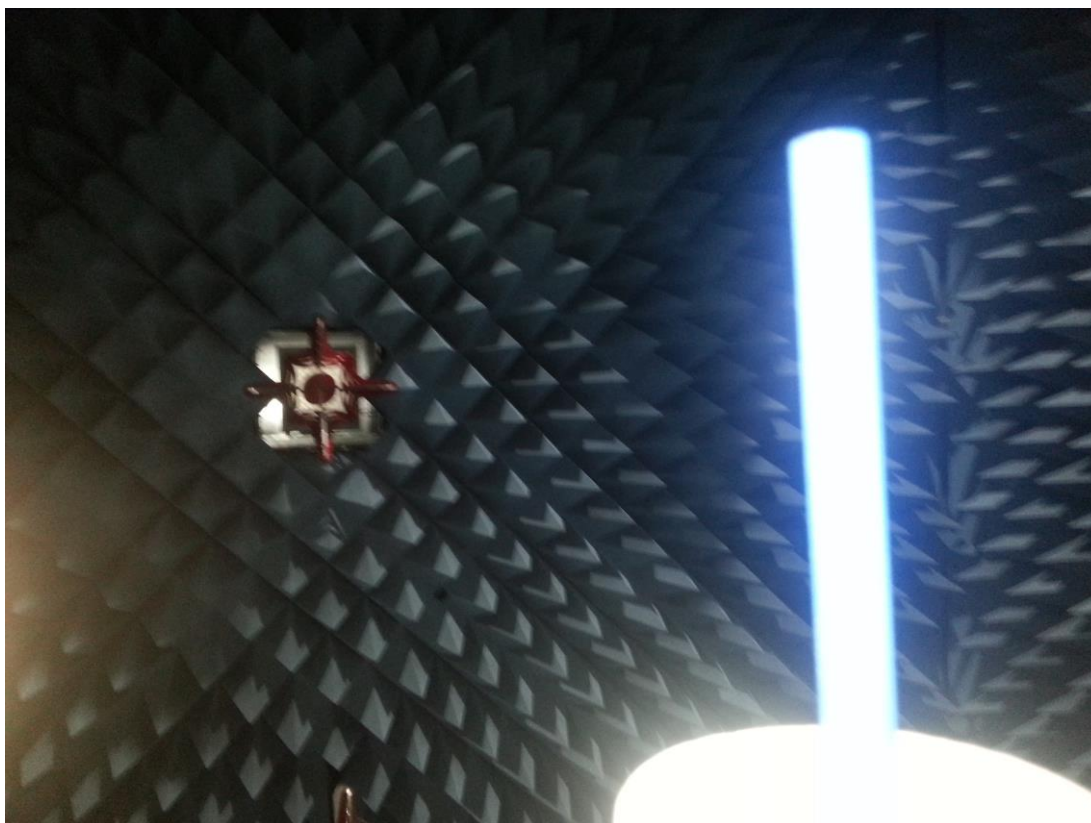
Now, it was time to change the measurement method slightly. The first one would be a horizontal sleeve dipole calibration. To measure all chamber antennas at once, the pillar structure was replaced with a rotating system (figure 2). Using this system was a test to see if it was possible to obtain reliable results more quickly on all chamber antennas. In the end, this system was only deployed in laboratory 1.

Eighteen sleeve dipoles in total were needed to be used to cover all the desired frequencies. The straight shape of the dipole antennas allowed the same mount to be used for many measurements. Adjusting the antenna each time before the measurement proved to be the most laborious task. A slight imperfection in the mount meant that the antenna would not become automatically straight and some compensation was required, such as a tape or small pieces of polystyrene to be put in

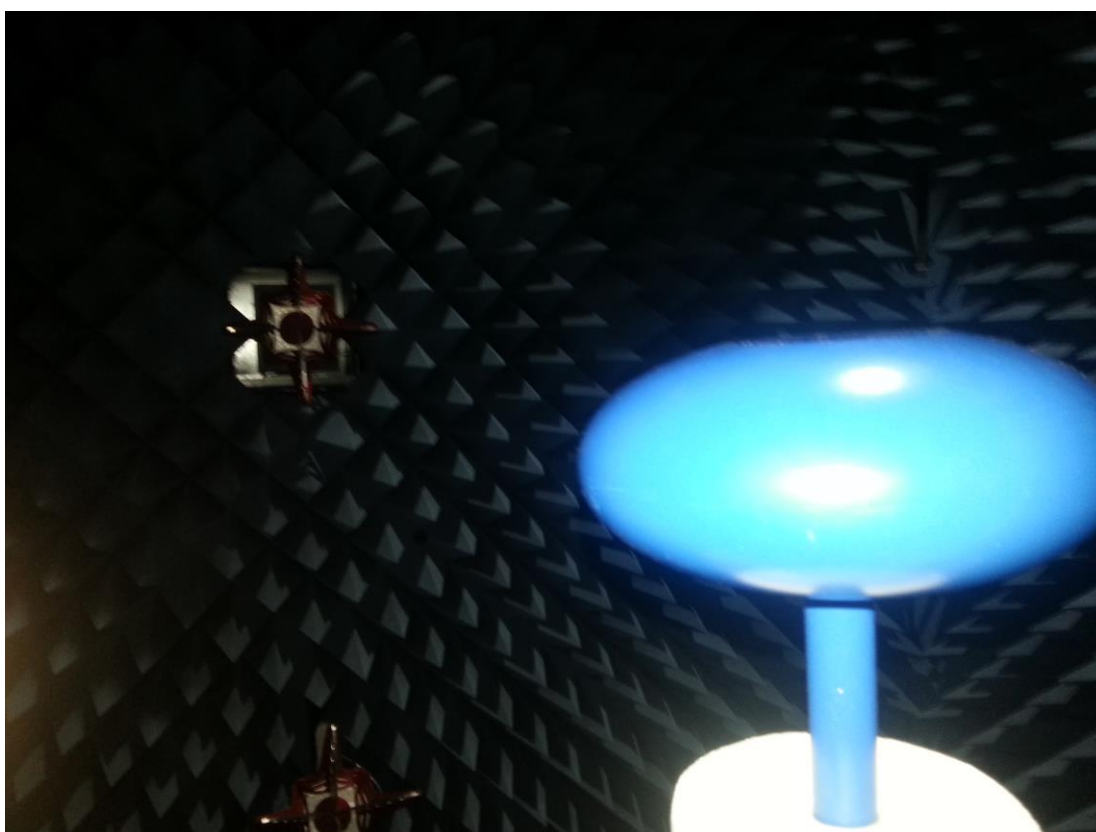
the gaps. To help with this, laser light was deployed on the chamber wall. This provided a cross-hair pointer that helped to orient in two of the three dimensions at a time. For the third dimension, the turn table had to be rotated 90 degrees and then the antenna had to be adjusted in this position, hopefully not disturbing the alignment set in the previous position. If all went well, after rotating the support back to the starting position, the antenna should still be aligned. With a visually confirmed perfect positioning, a single measurement could be completed. By repeating the phases mentioned above for all sleeve dipoles, results for all chamber antennas with horizontal polarization could be collected.

The rotating system raised concerns about reflections caused by the added wooden and plastic materials and reflections were observed. To obtain cleaner results, several ferrites were applied along the RF cable going in the chamber and near the reference antenna connector. Ferrites are made of ferromagnetic iron, which should allow RF signals to be better conveyed within an RF cable. But even with ferrites in place, the rotation system did not give satisfactory results for all reference antennas or chamber antennas at some frequencies. At this point, it was decided that the dipoles would only be used to measure the chamber antenna 3 for absolute values and horn antenna results would provide the differences between chamber antennas. Antenna 3 was known to have the shortest RF paths and it was on the same height as the EUT position, allowing easier reference antenna alignment compared to other chamber antennas.

The reason for using a special rotating system in the first place was to obtain horizontal results for frequencies for which there were only sleeve dipoles available (18 sleeve and 13 loop dipoles). The objective was to get as much of the intended frequencies measured for both polarizations. Obviously, using loop dipoles for horizontal measurements and sleeve dipoles for vertical measurements enables the simplest setups. In figures 8 and 9, these two setups are illustrated. At this point, the rotation system was replaced with the original polystyrene support structure in laboratory 1. After switching the structure, the sleeve dipole antennas were mounted vertically on the structure and results were received in this way. When vertical sleeve dipole data was received, the same was done for loop dipoles to obtain horizontal results.



*FIGURE 8. A Sleeve Dipole Setup for Vertical Polarization.*



*FIGURE 9. A Loop Dipole Setup for Horizontal Polarization.*

### 4.1.2 Results

Upon completion of all measurements, a great amount of raw data was acquired. The data was initially placed in a .txt file that contained the frequency range of the reference antenna and complex values for each frequency. By pasting the .txt file contents in an Excel sheet, each of the cells affected would then have a single value. This made it far easier to apply conversions and more advanced techniques to the data. A simple example from laboratory 2 is presented in figure 10.

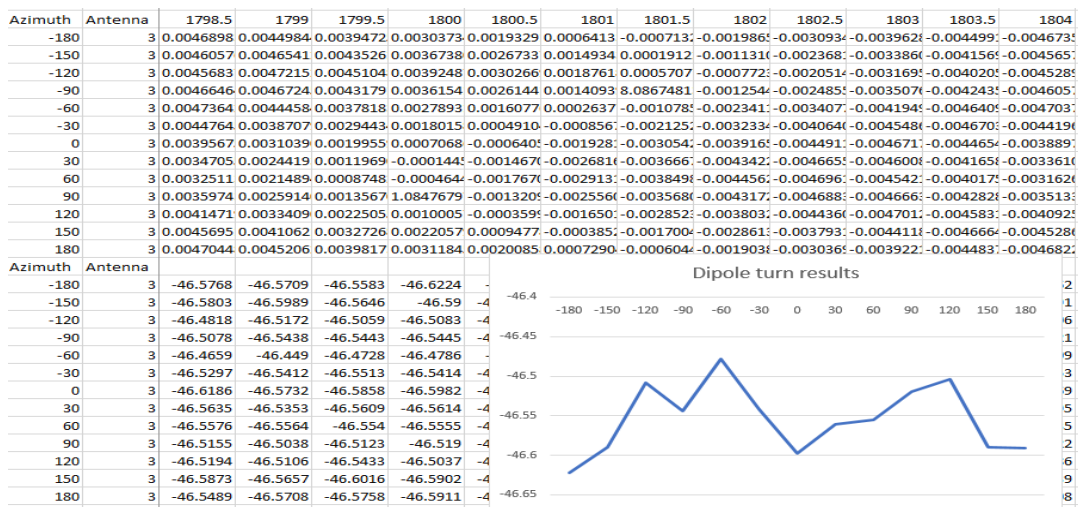


FIGURE 10. Example Data for 1600-2000 MHz Vertical Sleeve Dipole Calibration for Chamber Antenna 3. The upper section contains raw data with 30-degree turns and the lower values have conversions applied to the data, showing decibel values. The graph is an illustration of the change in signal strength of the center frequency as the dipole is turned. The rises and falls mean that the dipole was not perfectly straight throughout the measurement, but in this case, the straightness was sufficient with the difference of less than 0.2 dB.

With the turn values (Azimuth in figure 10), an average value can be calculated for all frequencies. The averages are for the polarized plane where antenna radiation is the strongest. With averages and frequencies obtained, the key aspect of antenna gain must be addressed.

All antennas have gain, which can be a minor increase or decrease in the signal strength or a large, crucial factor when determining the true signal level. Gain values change with frequency and different antenna types generally have varying amounts of gain. During these calibrations, the gain values of reference dipole antennas were small for most frequency ranges but more elevated near the center frequencies. All dipoles came with a file listing accurate antenna gain values at intervals

of 5 MHz. For the used reference horn antennas, why only approximate gain values were found in the antenna data sheet and this is part of the reason why horn antennas were not used to obtain absolute values for any of the chamber antennas.

When gain values are known, they must be added or subtracted from the real data depending on whether gain or loss is concerned. The difference between the two is that one is inversion of the other. In figure 11, the gain data from figure 10 has been converted to loss and therefore, all minus signs have disappeared. When dealing with loss, the reference antenna gain has been added to the data because the signal would have been too good otherwise. The included reference antenna gain is also known as total path loss. Figure 11 features the new calibration results compared to old calibration results. The third line represents the new results without the added reference antenna gain.

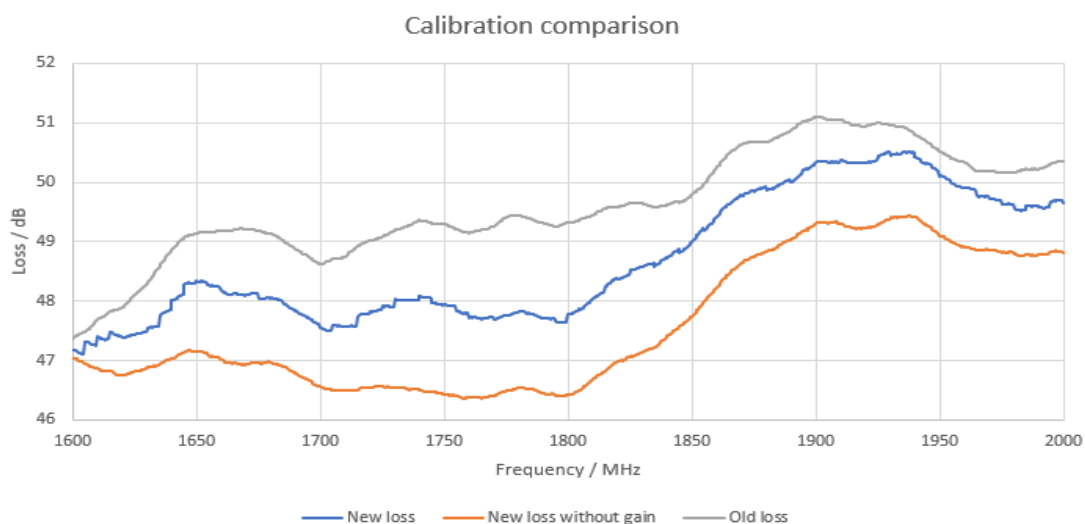


FIGURE 11. Old Calibration compared to New Calibration shown for 1600-2000 MHz. From this graph it can be observed that the shape of all lines is mostly the same but old loss is approximately 1.5 dB worse at the center frequency when compared to new loss.

## 4.2 Measurement uncertainty

The results of figure 11 are suggesting that something in the calibration setup is causing a better signal. This is not a desirable result because it does not coincide well with the previous calibrations. Some difference was expected, but a difference of 1.5 dB in an anechoic chamber is significant. This difference was observed in some other frequencies as well (with different dipole antennas),



which means that this was not a single error in one measurement. This effect was only present in laboratory 2.

It was also observed that the issue with constant better signal levels was only present in sleeve dipoles. Loop dipole results were almost exactly as they were supposed to be. This led to a conclusion that sleeve antenna radiation patterns must have had imperfections that caused the unexpectedly good radiation values. This theory was put to test by deploying a sleeve and loop dipole of the same frequency in the chamber and measuring the radiation patterns. The loop dipole had an almost perfect pattern but the sleeve dipole was more flawed. It was decided that the more perfect loop dipole would be used to correct some of the results.

The fully processed calibration data was compared with the same calibrations done by other laboratories. Despite the differences between old and new calibrations, a comparison with other laboratories proved to be within acceptable parameters. A difference of 2 dB is the maximum uncertainty allowed for free space (1, p. 288). The comparison proved that there was a difference of 0.6-0.7 dB with calibrations, therefore it can be said that calibrations were sufficient this time. The actual comparison data cannot be shown here for legal reasons.

## 5 CONCLUSIONS

The overall calibration of laboratories 1 and 2 was a success. The process had potential to be completed swiftly and with a little effort but in many occasions after analyzing the data from a measurement, something unexpected was observed. For example, in laboratory 1, when using the rotation system with two of the higher frequency sleeve dipoles, some significant reflections started showing for just one of the chamber antennas. The reflections could not be explained by any means and these measurement values could not be used. This meant that several days work had gone to waste. Another issue appeared in laboratory 2 where some of the calibration frequencies had a continuous difference of approximately 1 dB present. The problem was with sleeve dipoles and the solution was found by correcting calibration values with loop dipoles.

The complete process of calibration took much longer than it was initially estimated. There were several factors that affected this, the biggest one being the constant problem solving. For many of the problems, some basic solutions were tried, such as deploying the reference antenna better, trying a different mount, recalibrating RF cables, changing RF cables and using more ferrites. Some more drastic solutions included crafting new mounts for reference antennas and changing the support structure. At one point it was noted that the structure had bent and a new one had to be made. This would have taken several days if the materials had not been present on location to begin with. Surprisingly, with this kind of work, a great deal of crafting experience was earned throughout the calibrations.

Another factor affecting the time schedule was that other people needed to use the laboratories and equipment for other measurements. Sometimes calibrations had to be paused so that another employee could have the chamber for other use and other times the only accredited VNA was needed in other, more pressing test case. With a single crucial component missing from the system, no calibration could be undergone. During these times, the only contributing work that could be done was either analyzing and organizing data or writing this thesis.

Many RF concepts became crystal clear through trial and error. One time, during a reference antenna mounting in the chamber, a pair of metallic scissors was forgotten near the antenna for the measurements. A sudden drop in signal level for these measurements was a mystery until the

scissors were found and removed. This was a careless mistake that proved the effect of metal causing a lot of fluctuations in measurements.

The entire calibration experience provided a very specific insight into various aspects of radio waves, signal processing, mathematics, physics, spreadsheet computation and programming. The sheer exposure to the environment of RF measuring proved to be a learning experience and with a shared knowledge of the skilled senior employees from the company, it became evident that this experience would become a great merit in the future.

## REFERENCES

1. CTIA. 2016. Test Plan for Wireless Device Over-The-Air Performance.  
Date of retrieval: 6.9.2017.  
<https://ctia.org/docs/default-source/certification/ctia-test-plan-for-wireless-device-over-the-air-performance-ver-3-6-1.pdf?sfvrsn=4>
2. Wikipedia. 2017. Anechoic chamber.  
Date of retrieval: 5.9.2017.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Anechoic\\_chamber](https://en.wikipedia.org/wiki/Anechoic_chamber).
3. Wikipedia. 2017. Radiation-absorbent material.  
Date of retrieval: 21.9.2017.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation-absorbent\\_material](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation-absorbent_material)
4. Saville, Paul 2005. Review of Radar Absorbing Materials.  
Date of retrieval: 29.11.2017.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/2201/e83d358b33732f385909ed3d4b79c1535650.pdf>