

Antti Tuovinen

**MATKAPUHELINVERKKOIHIN PERUSTUVAT PAIKANNUSME-  
NETELMÄT JA REICOVAIR-TESTIJÄRJESTELMÄN INTEG-  
ROINTI**

**MATKAPUHELINVERKKOIHIN PERUSTUVAT PAIKANNUSME-  
NETELMÄT JA REICOVAIR-TESTIJÄRJESTELMÄN INTEG-  
ROINTI**

Antti Tuovinen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2018  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Tietotekniikan koulutusohjelma, laite- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Antti Tuovinen

Opinnäytetyön nimi: Matkapuhelinverkkoihin perustuvat paikannusmenetelmät ja RelCOvAir-testijärjestelmän integrointi

Työn ohjaaja(t): Kari Jyrkkä, Riitta Rontu

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018

Sivumäärä: 73

---

Tämä opinnäytetyö on kooste kahdesta eri osassa suoritetusta opinnäytetyöstä. Ensimmäinen osa on viiden opintopisteen ja toinen on kymmenen opintopisteen laajuinen. Opinnäytetyön ensimmäinen osa on suoritettu koululla keväällä 2016 ja toinen osa toimeksiantona Verkotan Oy:lle keväällä 2018.

Opinnäytetyön ensimmäinen osa on teoriaosa, jossa tutkittiin matkapuhelinverkkoihin perustuvia paikannusmenetelmiä. Työn tavoitteina oli perehtyä eri paikannusmenetelmiin GSM-, UMTS- sekä LTE-verkoissa. Työstä tuli tiivis teoria eri paikannusmenetelmistä sekä näiden toimintaperiaatteista.

Opinnäytetyön toinen osa suoritettiin toimeksiantona Verkotan Oy:lle. Työn aiheena oli RelCOvAir-testijärjestelmän integrointi. Työn päätavoite oli integroida RelCOvAir-testijärjestelmä kaiuttomaan kammioon. Tähän sisältyi laitteiston kytkentä, testiohjelmiston, häiriön sekä kanavamallin implementointi testijärjestelmään. Työn tuloksena testijärjestelmä saatiin integroitua kaiuttomaan kammioon ja testisovellus luotua.

---

Asiasanat: Koosteopinnäytetyö, matkaviestinverkot, paikannus, testijärjestelmät

# SISÄLLYS

|   |   |
|---|---|
| 1 JOHDANTO  | 5 |
| 2 OPINNÄYTETYÖN ENSIMMÄISEN OSAN ESITTELY                     | 6 |
| 3 OPINNÄYTETYÖN TOISEN OSAN ESITTELY                          | 7 |
| 4 YHTEENVETO  | 8 |
| Liite 1 Matkapuhelinverkkoihin perustuvat paikannusmenetelmät |   |
| Liite 2 ReICOVair test system integration                     |   |

# 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on koosteopinnäytetyö kahdesta erikseen tehdystä opinnäytetyöstä, joiden aiheet eivät liity toisiinsa. Ensimmäinen osa on viiden opintopisteen laajuinen ja valmistui keväällä 2016. Toinen osa on kymmenen opintopisteen laajuinen ja valmistui keväällä 2018.

Ensimmäinen osa käsittelee matkapuhelinverkkoihin perustuvia paikannusmenetelmiä. Työssä käytiin läpi mihin paikannusta käytetään, miten eri paikannustekniikat toimivat ja kuinka paikannustekniikat eroavat eri matkapuhelinverkkojen välillä.

Opinnäytetyön toinen osa on tehty Verkotan Oy:lle. Työn aihe oli RelCOvAir-testijärjestelmän integrointi. RelCOvAir on EU-projekti, jonka tavoitteena on luoda testijärjestelmä ja standardi langattomille tiedonsiirtotekniikoille teollisuuden käyttöön. Tähän työhön sisältyi testilaitteiston kytkentä sekä tarvittavien sovellusten, häiriön sekä kanavamallin implementointi testijärjestelmään. Lisäksi testijärjestelmän toimivuus testattiin ja testijärjestelmä kalibroitiin.

## **2 OPINNÄYTETYÖN ENSIMMÄISEN OSAN ESITTELY**

Opinnäytetyön ensimmäinen osa (liite 1) on tehty keväällä 2016 ja on laajuudeltaan viisi opintopistettä. Työn ohjaajana toimi Riitta Rontu. Tämän ensimmäisen työn aiheen sai jokainen itse päättää ja itse päädyin tutkimaan matkapuhelinverkkoihin perustuvia paikannusmenetelmiä. Työssä käydään läpi eri paikannusmenetelmien toimintaperiaatteita ja perehdytään paikannukseen GSM-, UMTS- ja LTE-verkoissa.

Työ oli teoriapainotteinen ja sisälsi paljon tiedonhakua, joka tämän myötä tulikin tutuksi. Työn aikana opin paljon matkapuhelinverkoista sekä näissä käytetyistä paikannusmenetelmistä. Samalla opinnäytetyön prosessi tuli tutummaksi ja tämä auttoi opinnäytetyön toisen osan kirjoittamisessa.

### 3 OPINNÄYTETYÖN TOISEN OSAN ESITTELY

Opinnäytteen toinen osa (liite 2) on tehty keväällä 2018 Verkotan Oy:lle ja on laajuudeltaan 10 opintopistettä. Suoritettuani yritysprojektit sekä harjoittelun yritykseen kysyin mahdollisuutta tehdä opinnäytetyöni yritykselle ja aiheeksi valikoitui ReICOvAir-testijärjestelmän integrointi. Työn ohjaajina toimivat Kari Jyrkkä sekä yrityksen puolelta Jani Kallankari.

Työssä käydään aluksi läpi, minkä vuoksi ReICOvAir on aloitettu ja mitkä ovat projektin tavoitteet. Tämän jälkeen käydään läpi testijärjestelmän eri laitteet ja integrointi kaiuttolammioon. Lopuksi käydään läpi, kuinka testijärjestelmä kalibroitiin, ja käydään läpi tuloksia kalibroinnista sekä testisovelluksella ajetuista testeistä.

Työn lopputuloksena saatiin toimiva testijärjestelmä, josta yrityksen on helppo jatkaa testijärjestelmän kalibrointia sekä validointia. Työ vaati paljon uuden oppimista aina OTA-testauksesta testilaitteiston käyttöön ja uskon, että oppimistani asioista on hyötyä tulevaisuudessa.

## 4 YHTEENVETO

Tämän koosteopinnäytteen työt vastaavat normaalia 15:n opintopisteen opinnäytetyötä. Näin jälkeen päin ajateltuna kahdessa osassa tehdessä oli hyviä sekä huonoja puolia. Hyvänä puolena voi ajatella, että toista osaa tehdessä opinnäytteen teko oli jo tutumpaa ja tämä varmasti nopeutti toisen osan valmistumista. Toisaalta kahden opinnäytetyön teossa varmastikin meni enemmän aikaa kuin yhden 15:n opintopisteen opinnäytteen tekemisessä.

Molemmat opinnäytetyöt toivat paljon uutta oppia, vaikka prosessina olivatkin hyvin eroavat toisistaan. Ensimmäisessä osassa oli enemmän teoriaa ja tiedonhakua eri paikoista sekä asioiden opiskelua ja yhdistelyä. Toisessa työssä taas pääsi näkemään, kuinka yrityksissä toimitaan, sekä pääsi tekemään oikeaa insinöörin työtä ja hyödyntämään oppia käytännössä. Lisäksi eroa töihin toi myös se, että ensimmäinen osa on kirjoitettu suomeksi ja toinen osa englanniksi. Omalla kohdalla ehkä englanniksi kirjoittaminen oli luontevampaa, osaksi siitä johtuen, että suurin osa materiaaleistakin on kirjoitettu englanniksi.



Antti Tuovinen

**Matkapuhelinverkkoihin perustuvat paikannusmenetelmät**

## **Matkapuhelinverkkoihin perustuvat paikannusmenetelmät**

Antti Tuovinen  
Opinnäytetyö, osa 1  
Kevät 2016  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## SISÄLLYS

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1 JOHDANTO                       | 4  |
| 2 PAIKANNUSMENETELMÄT            | 5  |
| 2.1 Solupaikannus                | 6  |
| 2.2 Kulkuaikaeropaikannus        | 7  |
| 2.3 Saapumisaikapaikannus        | 7  |
| 2.4 Saapumisaikaeropaikannus     | 7  |
| 2.5 Korrelaatiopaikannus         | 8  |
| 2.6 Signaalin saapumissuunta     | 9  |
| 3 MATKAPUHELINVERKKOPAIKANNUS    | 11 |
| 3.1 GSM-paikannus                | 11 |
| 3.1.1 Ajastusennakko             | 12 |
| 3.1.2 AGPS                       | 13 |
| 3.2 UMTS                         | 13 |
| 3.2.1 Solupaikannus              | 14 |
| 3.2.2 OTDOA-IPDL                 | 14 |
| 3.2.3 U-TDOA                     | 16 |
| 3.3 LTE-paikannus                | 16 |
| 3.3.1 Verkkopohjaiset menetelmät | 16 |
| 3.3.2 A-GNSS                     | 16 |
| 4 NYKYTILA                       | 18 |
| 5 YHTEENVETO                     | 20 |

## 1 JOHDANTO

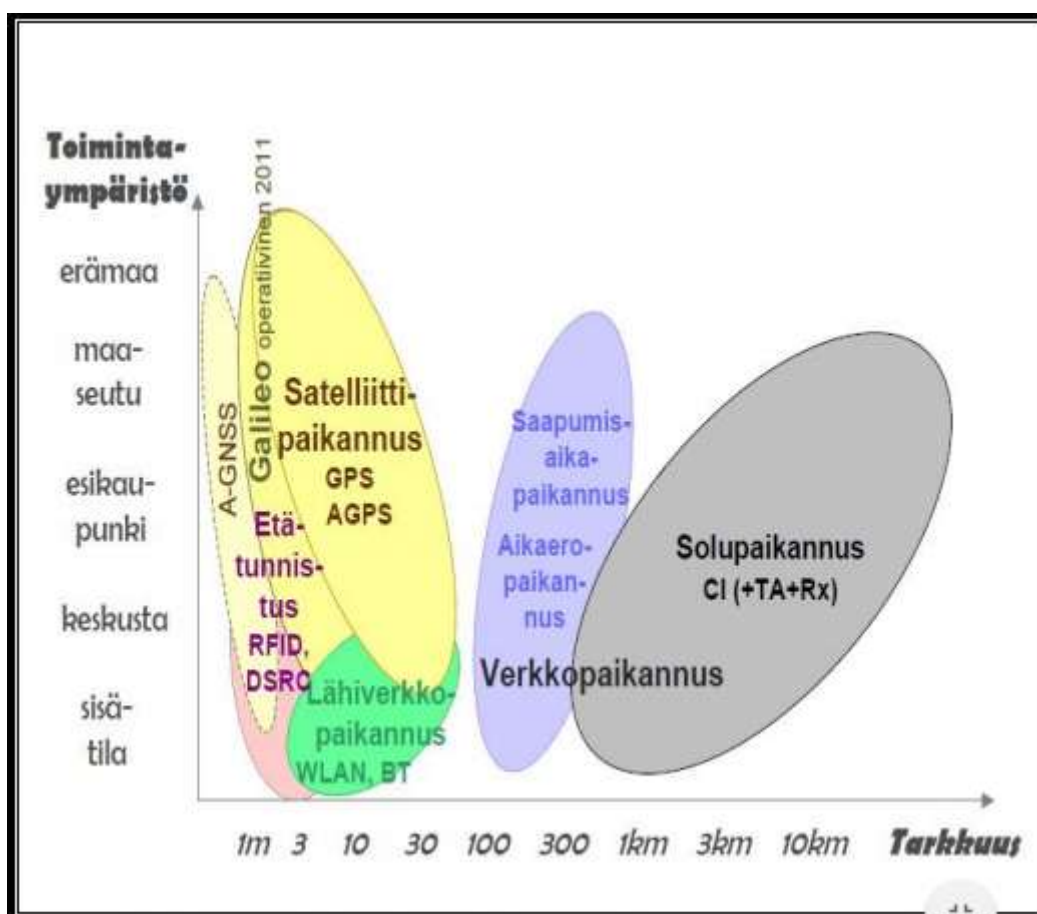
Tämä työ on ensimmäinen osa kolmiosaisesta opinnäytetyöstä, johon kuuluu teoriaosa, soveltava työ ja yrityslähtöinen työ. Opinnäyte on 15 opintopisteen kokoinen ja jokainen osa on 5 opintopistettä. Tavoitteena tässä ensimmäisessä 5 opintopisteen teoriaosassa on tutkia matkapuhelinverkkoihin perustuvia paikannumenetelmiä.

Työssä tutkitaan näiden paikannusmenetelmien toimintaperiaatteita ja perehdytään matkapuhelinverkkopaikannukseen GSM:ssä, UMTS:ssä ja LTE-verkoissa. Lisäksi käydään 3GPP:n paikannusstandardoinnin nykytila. Lopuksi on yhteenveto dokumentista ja siinä käydyistä asioista.

Nykyään matkapuhelimissa paikannus on erittäin yleistä ja sitä hyödynnetään monissa sovelluksissa. Erittäin monissa sovelluksissa paikkatietoa hyödynnetään esimerkiksi sään kertomisen sovelluksissa ja navigoinnissa. Erilaisia paikannuspalveluja ovat esimerkiksi paikkamukautuva palvelu, navigointipalvelut, opastus, sijaintihaku, karttapalvelu, reittipalvelu ja paikallinen tietopalvelu (1, s.23–24). Tärkeimpien palvelujen joukossa on karttapalvelut, jota käytetään sijainnin kertomiseen, reittihakuun, paikallisten yritysten hakuun. Navigointi on myös tärkeä paikannuspalvelu. Monissa sovelluksissa käytetään myös sijaintihakua, esimerkiksi sosiaalisessa mediassa jaettuun kuvaan liitetään paikkatieto.

## 2 PAIKANNUSMENETELMÄT

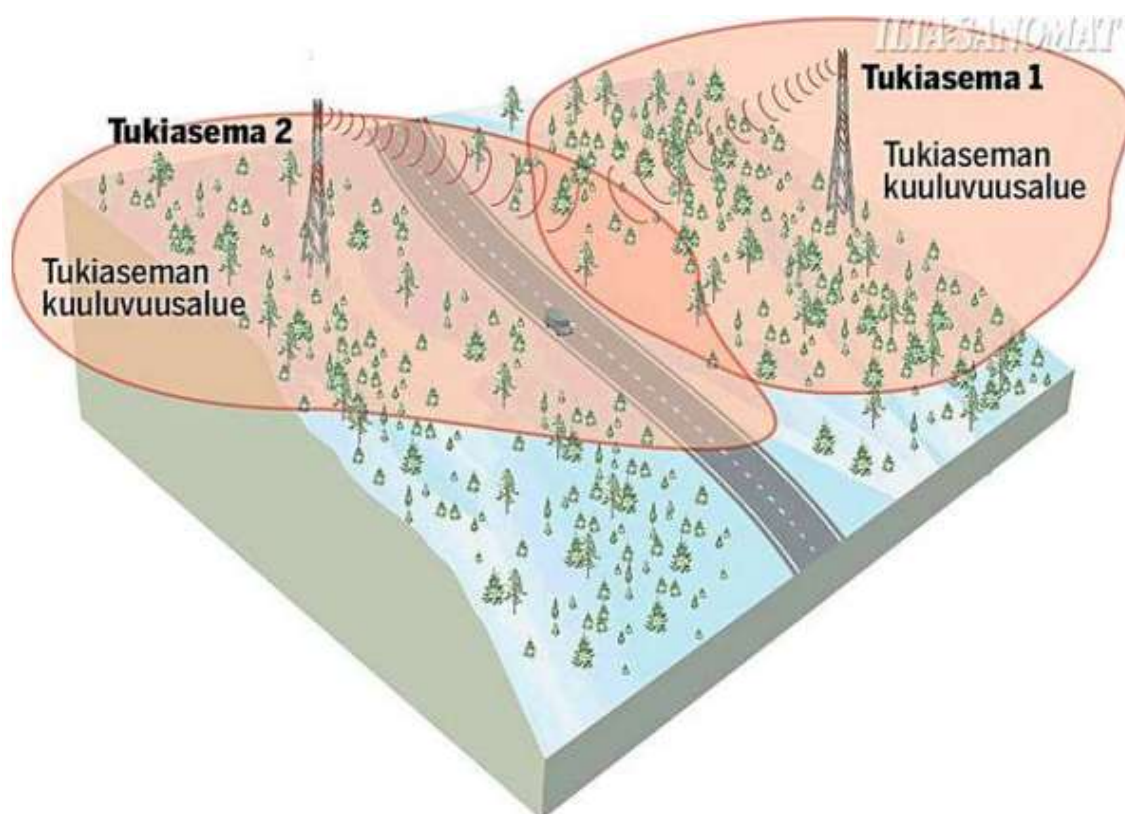
Paikannus tarkoittaa henkilön, kulkuneuvon tai muun määrätyn kohteen paikan selvittämistä. Lähtökohtaisesti matkapuhelinverkko ylläpitää paikannustietoa jatkuvasti tukiasemaryhmän tarkkuudella puhelimen ollessa auki ja verkossa, sekä solun tarkkuudella puhelun aikana (2, s.5). GSM-paikannus perustuu radiosignaalin mittaamiseen. Signaalin kuluaikaa mitataan ja sillä lasketaan sijaintia (1, s.2). Kuvasta 1 näkyy eri paikannusmenetelmien tarkkuus. Esimerkiksi solupaikannus on erittäin epätarkkaa, mutta samalla myös helpoin tapa paikantaa. kun taas satelliittipaikannus on tarkempaa, mutta samalla se vaatii taas enemmän paikannukselta. Kappaleessa käydään läpi useimpien tekniikoiden perusperiaate. Tekniikoiden tarkempaa toimintaa käsitellään kappaleessa 3.



KUVA 1. Paikannusmenetelmien tarkkuus (2,5)

## 2.1 Solupaikannus

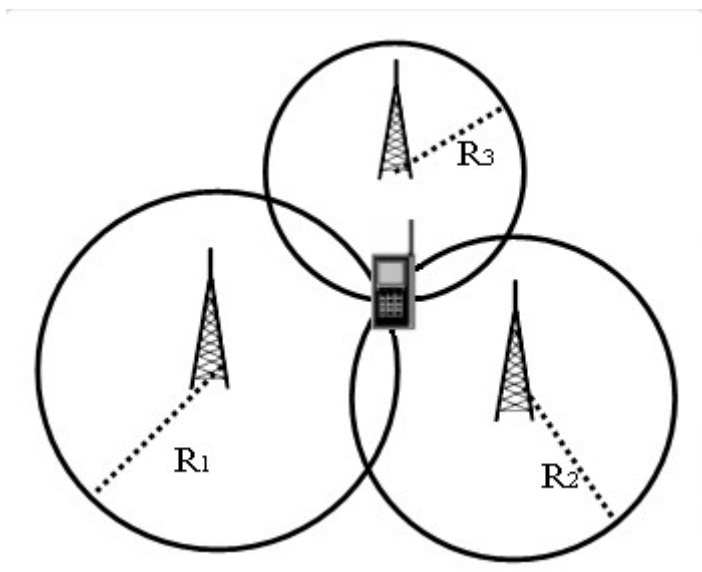
Solupaikannus (CI, Dell identification) perustuu matkapuhelinverkon soluihin. GSM-verkko on niin sanottu soluverkko (3, s.12). Tämä tarkoittaa sitä, että tukiaseman peittoalue peittää tietyn alueen ja tätä aluetta sanotaan soluksi (kuva 2). Solujen peittoalueet menevät limittäin, jotta ei tulisi katvealueita. Paikannus tapahtuu niin, että paikannetaan missä solussa matkapuhelin milläkin hetkellä sijaitsee. Tämä on kaikista yksinkertaisin, mutta samalla myös epätarkin tapa paikantaa matkapuhelin. Tarkkuus perustuu siihen, minkä kokoinen solu on, eli paikannus on paljon tarkempaa kaupungeissa ja kaupungin keskustoissa kuin maalla ja maaseudulla. Tarkkuus taajama-alueilla on yleensä noin 200–500 metriä.



KUVA 2. Kahden tukiaseman peittoalueet (6)

## 2.2 Kulkuaikaeropaikannus

Kulkuaikaeropaikannus (Enhanced Observed Time Difference, EOTD) perustuu 3 tukiaseman signaalien kulkuaikojen mittaamiseen (kuva 3). Menetelmän tarkkuus on noin 50–125 metriä ja viive noin 5 sekuntia. Tämä tekniikka on aika raskas eli vaatii paljon laskentatehoa ja ohjelmistopäivityksen matkapuhelimeen sekä verkkoon.



*KUVA 3. Kulkuaikaeropaikannuksen periaate, jossa lasketaan 3 tukiaseman saaman signaalien kulkuaika.*

## 2.3 Saapumisaikapaikannus

Saapumisaikapaikannus (Time Of Arrival, TOA) perustuu matkapuhelimen signaalien saapumiseen, joka mitataan kahdesta tukiasemasta. Paikannus voidaan määrittää signaalien saapumisajasta. Laskeminen vaatii tukiasemien välille yhteisen kellon ja koordinaation. Tarkkuus on noin 50–100 metriä.

## 2.4 Saapumisaikaeropaikannus

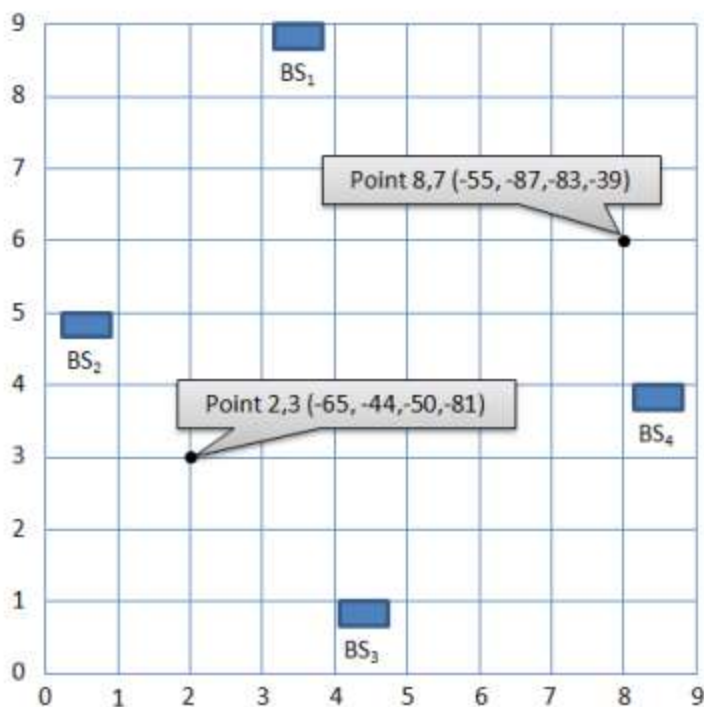
Saapumisaikaeropaikannus (Time Difference Of Arrival, TDOA) käyttää samaa tekniikkaa kuin kulkuaikaeropaikannus. Tämän ero kulkuaikaeropaikannukseen

on siinä, kun kulku-aikaeropaikannuksessa mitataan tukiaseman lähettämiä signaaleja puhelimeen (kuten saapumisaikapaikannuksessa). Saapumisaikaeropaikannuksessa puolestaan mitataan puhelimen lähettämiä signaaleja tukiasemaan. Tämä tekniikka on Yhdysvalloissa noussut merkittäväksi paikannusmenetelmäksi hätäpuhelupaikannuksessa (2, s.7).

## **2.5 Korrelaatiopaikannus**

Korrelaatiopaikannus (Location Fingerprint, LF) perustuu siihen, että tietyistä alueista on tehty signaalivoimakkuuskartoitus. Puhelimesta saapuvaa signaalia verrataan signaalikarttaan. Kuten kuvassa 4 nähdään, kahdelle pisteelle on mitattu signaalivoimakkuudet neljään tukiasemaan nähden. Tällä tekniikalla sisätilanpaikannus on erittäin haastavaa, ellei jopa mahdotonta. Näin on siksi, että kaikki muutokset rakennuksissa vaatisivat uuden mittauksen tekemistä. Lisäksi sääolosuhteet vaikuttaisivat paljon signaalivoimakkuuteen ja ulkopaikannuskin olisi jossain määrin ongelmallista. Tämän tekniikan tarkkuus on noin 30–50 metriä kaupungeissa. Tähän tekniikkaan perustuvilla menetelmillä on saatu tarkimmat käytännön mittaustulokset (2, s.7). Tämän vuoksi menetelmä olisi hyvä matkapuhelimen paikannukseen kaupungin keskustoissa, mutta käytännössä mahdoton toteuttaa. Se sopii paremmin pienen mittakaavan paikannukseen.

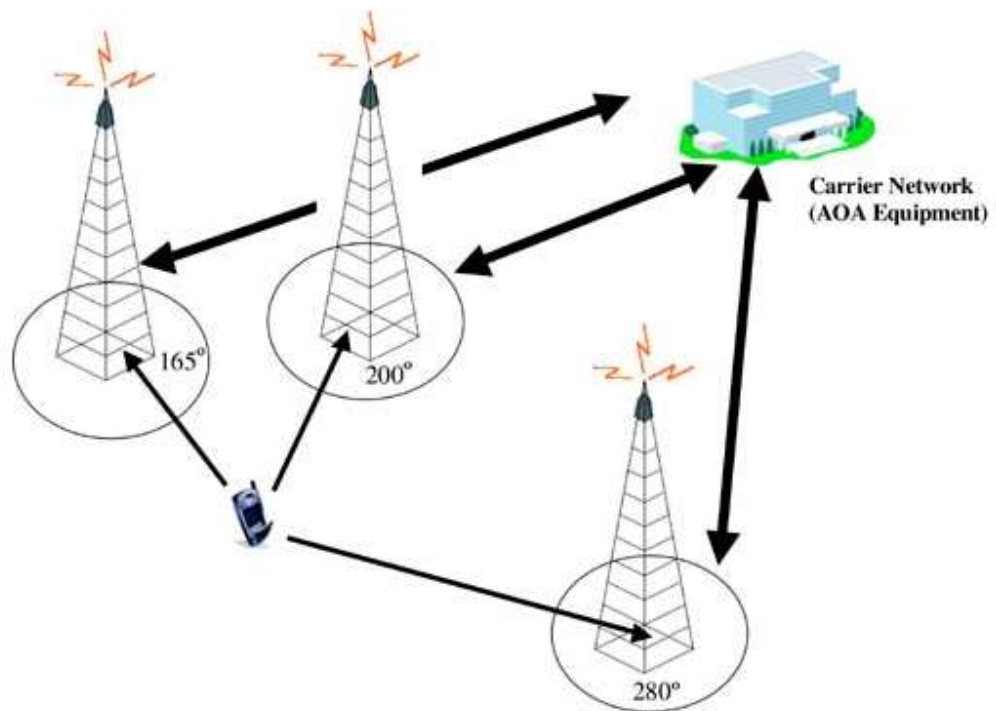




KUVA 4. Esimerkki korrelaatiopaikannuksesta (14)

## 2.6 Signaalin saapumissuunta

Signaalin saapumissuunta -tekniikassa (AOA, Angle of Arrival) tukiasemapari havaitsee signaalin suunnan antennijoukon avulla (13). Tukiaseman 360 astetta jaetaan antenniryhmän kesken ja näin saadaan signaalin saapumissuunta (kuva 5). Mitä useampi antenni, sitä tarkempaa suunnan paikannus on. Tämän ongelma on kuitenkin se, että jokaiseen tukiasemaan tulisi asentaa antennit ja puhelimella tulisi olla suora näkyvyys antenniin, jotta tekniikka toimisi. Tämä olisi käytännössä mahdotonta kaupungeissa, jossa rakennukset peittäisivät näkyvyyden antenniin.



KUVA 5. Signaalin saapumissuunta kolmeen tukiasemaan nähden (15)

### 3 MATKAPUHELINVERKKOPAIKANNUS

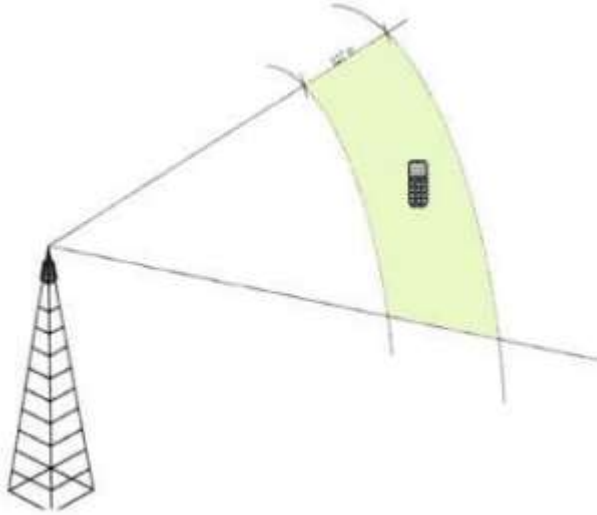
Matkapuhelinverkkopaikannus perustuu yleensä niin kutsuttuihin ei-itsenäisiin tekniikoihin. Puhelimen paikantamiseen on kaksi erilaista tapaa. Toinen perustuu puhelimesta tukiasemiin lähetettyjen signaalien kulkuajojen mittaamiseen tai tukiasemasta puhelimeen lähetettyjen signaalien kulkuajojen mittaamiseen. Näillä tiedoilla yritetään paikantaa laite. Toinen tekniikka perustuu siihen, että laitteessa on integroitu GPS-vastaanotin, joka on käytännössä jokaisessa nykyaikaisessa puhelimesta. Tällöin usein käytetään AGPS:ää (Assisted GPS) jossa matkapuhelinverkolla annetaan alkuparametrit eli käytännössä solun tiedot ja näin ollen GPS-paikannus ei vie niin paljon aikaa kuin normaalisti. AGPS:n ongelma on se, että monet eivät pidä GPS-paikannusta koko aikaa päällä johtuen sen virrankulutuksesta ja näin ollen monet sovellukset, jotka käyttävät tätä, kysyvät paikannetaanko GPS:ää käyttäen. Paikannustekniikan käyttö on aina puhelimesta riippuvainen eli riippuu siitä mitä tekniikoita puhelin tai laite tukee.

#### 3.1 GSM-paikannus

GSM-paikannus (Global System for Mobile Communications) tarkoittaa matkapuhelimen sijainnin määrittämistä matkapuhelinverkon avulla (1). GSM-paikannuksen suurimpia etuja ovat päätelaitteiden suuri määrä ja paikannuksen halvat kustannukset. GSM-paikannuksessa käytetään hyödyksi useampia tekniikoita, kuten solupaikannusta, saapumissuuntaa AOA (Angle of arrival), saapumisaikaan perustuvia menetelmiä TOA (Time Of Arrival), TDOA (Time Difference Of Arrival) sekä aikaeroaikapaikannusta E-OTD (Enhanced Observed Time Difference) (10).

GSM-solupaikannuksessa käytetään hyödyksi tukiaseman koordinaatteja, suunnattua antennia ja ajastusennakkoa paikan tarkentamiseksi. Suunnatulla antennilla voidaan mitata signaalin lähtö- ja loppukulma, jolloin saadaan tarkennettua mistä signaali tulee. Lisäksi ajastusennakkoa käyttämällä saadaan tarkennettua

signaalin kulku-aikaa ja näin saadaan jo huomattavasti tarkempi tulos kuin pelkästään solupaikannuksella (kuva 6). Nämä yhdistämällä voidaan päästä 550 metrin tarkkuuteen



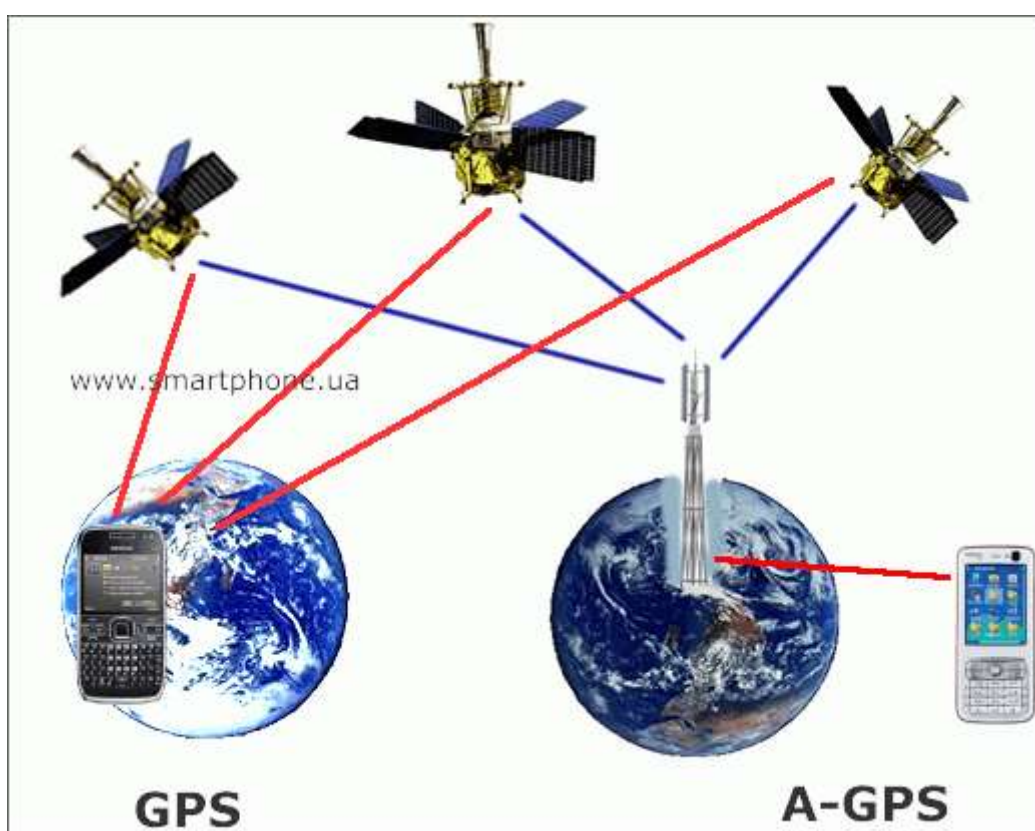
*KUVA 6. Solupaikannus, jossa on käytetty suunnattua antennia ja ajastusennakkoa (10, s.17)*

### 3.1.1 Ajastusennakko

Ajastusennakossa (TA, Timing advance) puhelimen lähetysajankohtaa muutetaan riippuen puhelimen etäisyydestä tukiasemaan (12). Näin vältetään päällekkäisiä signaaleja. TA-parametri kertoo kuinka paljon aikaisemmin puhelimen signaali täytyy lähettää, että se sattuu oikeaan kohtaan tukiaseman TDMA-vastaanottoajanjaksoon. TA-parametrin arvo on parametrisoitu välille 0...63 ja nämä kuvaavat puhelimen etäisyyttä tukiasemasta kilometreinä, kun parametrin arvo kerrotaan luvulla 0,55. (12.) Tämä parametri rajoittaa etäisyyden 35 kilometriin, mutta GSM-spesifikaatiot määrittävät myös laajennetun solun. Se kaksinkertaistaa välimatkan, mutta samalla se myös varaa kaksi solun fyysistä aikaväliä.

### 3.1.2 AGPS

AGPS (Assisted Global Positioning system) eli avustettu satelliittipaikannus toimii niin, että satelliittipaikannusta avustetaan matkapuhelinverkolla (9). GPS-paikannusta nopeutetaan antamalla alkuparametrit satelliittipaikannukselle matkapuhelinverkosta eli annetaan solun tiedot ja näin saadaan nopeasti lähimmät satelliitit selville. Toinen tapa on että satelliitista lähetetään tukiasemaan tiedot lentoradoista ja tukiasema välittää tiedon päätelaitteeseen. Tekniikan tarkoituksena on nopeuttaa GPS:n toimintaa ja saada puhelin paikannettua mahdollisimman nopeasti ja luotettavasti.



KUVA 7. GPS- ja AGPS-paikannuksen ero (18)

### 3.2 UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) on Kolmannen sukupolven eli 3G:n matkapuhelinteknologia ja GSM:n seuraaja. UMTS tarjoaa useita

uusja mahdollisuuksia paikannukseen. Vaikkakin 3GPP (Third Generation Partnership Program) -standardointijärjestö on luonut standardin ainoastaan OTDOA:lle.

Esimerkkinä uudesta mahdollisuudesta paikannukseen on SAI (Service Area Identification) joka vastaa GSM-verkon solupaikannusta. Lisäksi vain UMTS-verkoissa toimiva paikannusmenetelmä on lähetysskatkopaikannus OTDOA-IPDL (Observed Time Difference Of Arrival- Idle Period Down Link) ja tämä perustuu samaan tekniikkaan kuin EOTD (1). 3G-verkoissa puhelin voi keskustella usean tukiaseman kanssa samaan aikaan toisin kuin GSM-verkossa. Tästä johtuen lähetysskatkopaikannuksessa käytetään hyödyksi lähetyksissä olevia tyhjiä jaksoja, joita puhelin käyttää toisten tukiasemien kuunteluun.

### **3.2.1 Solupaikannus**

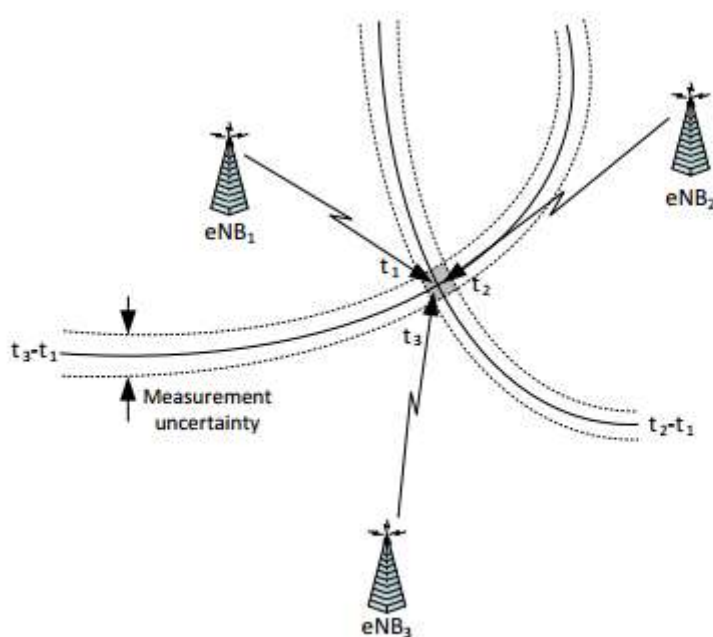
Solupaikannuksessa paikannetaan missä solussa puhelin kulloinkin on. Verkossa tiedetään tukiaseman koordinaatit. Kun puhelin on tämän tukiaseman peittoalueen sisällä, tiedetään minkä tukiaseman läheisyydessä puhelin on. Solupaikannuksen tarkkuus on suoraan riippuvainen solun koosta. Eli paikannus on paljon tarkempaa kaupungeissa kuin maaseudulla, koska kaupungeissa solut ovat paljon pienempiä suuresta käyttäjämäärästä johtuen.

Tämä on epätarkin, mutta myös halvin ja nopein tapa paikantaa. Joissain tapauksissa tämä on myös riittävä tapa paikantaa. Esimerkiksi mainostaessa riittää, kun tiedetään että puhelimenkäyttäjä on kaupungissa, jossa mainostus tapahtuu ja näin ollen ei tarvita tarkempaa tietoa puhelimen ja käyttäjän sijainnista.

### **3.2.2 OTDOA-IPDL**

OTDOA-IPDL (Observed Time Difference Of Arrival- Idle Period Down Link) käyttää samaa tekniikkaa kuin E-OTD eli tukiaseman lähettämän signaalin aikaeroja mitataan. OTDOA-IPDL eli lähetysskatkopaikannus perustuu siihen että hyödynnetään tukiaseman lähetyksissä olevat tyhjet jaksot toisten tukiasemien kuunteluun. Tekniikka perustuu siihen, että lasketaan kolmen eri tukiaseman signaalien

kulkuajat. Näitä kulku-aikoja vertailemalla voidaan määrittää leikkauspiste joka on puhelimen sijainti. Lisäksi aikaeron laskennassa tehdään korjauksia, joilla korjataan aikavirheitä paikkalaskennassa. Virhettä on kahdenlaista: todellista aikaeroa sekä geometristä aikaeroa. Todellinen aikaero kuvastaa tukiasemien lähetysaikaeroa ja geometrinen aikaero kuvastaa signaalin kulkuun liittyviä virheitä. Paikannus tapahtuu, kuten kuvassa 5 havainnollistetaan. Eli  $t_1$  kuvaa aikaa, joka menee tukiaseman (eNB1) lähettämältä signaalilta saavuttaa puhelin.  $t_3$  kuvastaa aikaa, joka menee tukiaseman (eNB3) lähettämältä signaalilta saavuttaa puhelin. Kun  $t_3$  vähennetään  $t_1$ :sestä ja korjataan virheet, saadaan ensimmäinen käyrä eli hyperbeli piirrettyä etäisyydestä. Kun sama tehdään tukiasemille 1 (eNB1) ja 2 (eNB2) saadaan toinen hyperbeli ja näiden leikkauspiste on se, missä puhelin sijaitsee. Tekniikan tarkkuus on noin 50–100 metriä.



KUVA 8. Paikannus OTDOA-tekniikalla (14)

### 3.2.3 U-TDOA

U-TDOA (Uplink Time Difference Of Arrival) eli lähtemisaikaero mittaa puhelimesta tukiasemaan lähetetyn signaalin kuluaikaa. Näin ollen laskeminen tapahtuu tukiasemalla ja puhelimen ei tarvitse osallistua paikannuksen laskentaan. Laskeminen tapahtuu samalla tavalla kuin OTDOA-tekniikassa eli lasketaan aikaeroja, joka signaalilla kestää saapua. Tässä tapauksessa se on signaalin matka puhelimesta tukiasemaan. Tätä käsittelemällä saadaan piirrettyä hyperbelit ja näiden leikkauspiste on puhelimen sijainti. Tämä vaatii laskentayksikön tukiasemaverkkoon, koska paikan laskenta ei tapahdukaan puhelimesta. Tekniikan tarkkuus on noin 50-300 metriä riippuen tukiasemaverkon tiheydestä (9).

## 3.3 LTE-paikannus

LTE (Long Term Evolution) eli 4G-tekniikka on UMTS:n seuraaja. Tekniikan tarkoituksena on kasvattaa kapasiteettia ja tiedonsiirron nopeutta. LTE-tekniikka on tällä hetkellä kehittyvä tekniikka ja paikannuksenkin osalta 3GPP-standartointijärjestö vasta luo standardeja paikannustekniikoihin liittyen, joista enemmän seuraavassa kappaleessa.

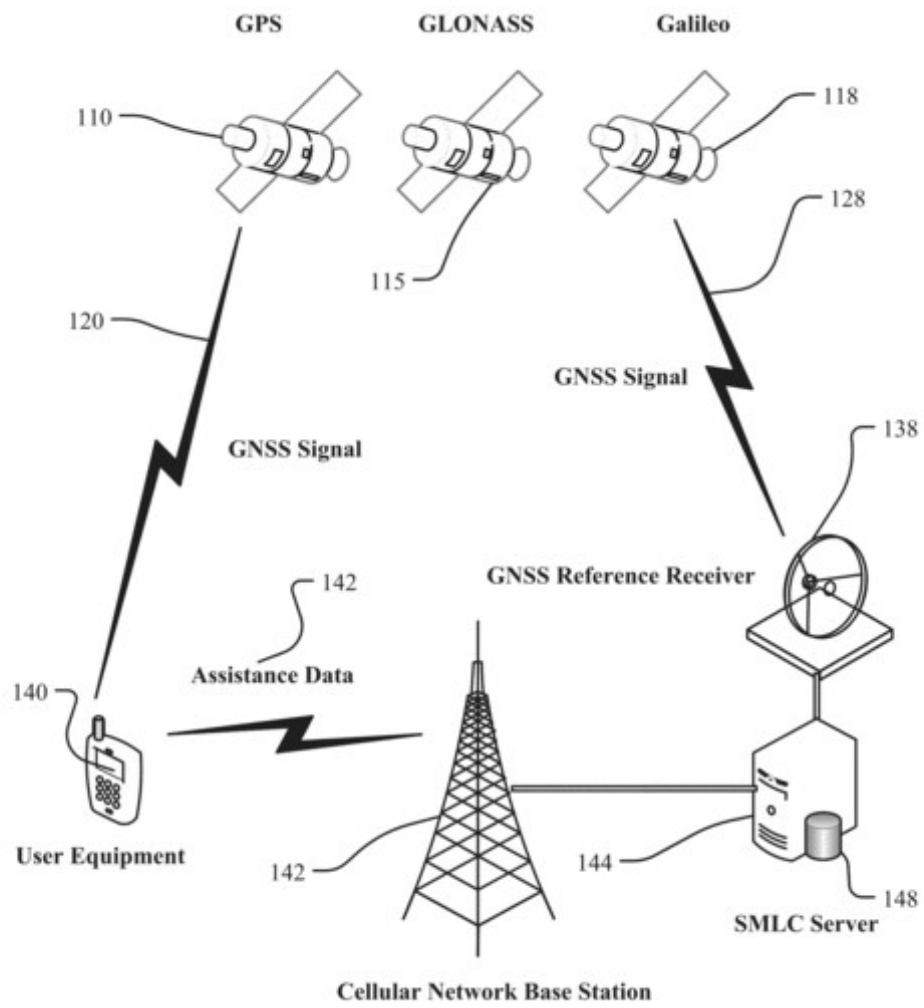
### 3.3.1 Verkkopohjaiset menetelmät

LTE-paikannuksessa käytetään lähes samoja tekniikoita kuin UMTS:n paikannuksessakin eli solupaikannusta, OTDOA sekä U-TDOA, jotka on esitelty kappaleissa 3.2.1, 3.2.2 ja 3.2.3. OTDOA:n ainoa ero UMTS-verkon OTDOA-IPDL:ään on se että tässä tekniikassa ei hyödynnetä tukiaseman lähetyskatkoja. Näin tukiaseman lähetyskatkoja ei käytetä hyödyksi muiden tukiasemien kuunteluun.

### 3.3.2 A-GNSS

A-GNSS on satelliittipohjainen paikannusmenetelmä, joka eroaa AGPS-paikannuksesta siinä mielessä, että se hyödyntää myös Venäjän GLONASS- ja EU:n Galileo-paikannusjärjestelmiä. Hyödynnetään siis kaikkia satelliitteja paikantamisessa (kuva 9).





KUVA 9. A-GNSS toimintaperiaate (15)

## 4 NYKYTILA

Tällä hetkellä kehitys keskittyy LTE-verkon paikannukseen ja sen ominaisuuksiin.

3GPP standardointijärjestön julkaisema LTE-spesifikaation Release 9 oli kevyt päivitys LTE-teknologiaan, joka keskittyi pääasiassa hätäpuheluiden paikannukseen ja paikannuksen eri tukiin. Release 9 julkaistiin 25.3.2010 ja se sisälsi paljon paikannukseen liittyvää parantelua ja määrittelyksiä, koska Release 8:sta puuttuivat paikannusmenetelmämääritteet. Esimerkiksi LCS:ään (Radio resource location services) lisättiin paikannukseen tarvittavat tiedot hätäpuhelua varten (16). Release 9 -päivitys oli niin kutsuttu paikannukseen keskittyvä päivitys. Kuten kuvista 10 ja 11 nähdään, 3GPP:n tehtävät Release 9:ssä olivat paikannuspainotteisia. LTE-verkolle lisättiin tuki paikannukseen ja lisäksi keskityttiin paikannukseen hätäpuheluissa. Lisäksi Release 11:een lisättiin paikannusmenetelmämääritteitä.

|        |                   |   |      |       |                |           |         |            |
|--------|-------------------|---|------|-------|----------------|-----------|---------|------------|
| 420006 | LCS_LTE           | ...Positioning Support for LTE                            | 100% | Rel-9 | R4, R3, R1, R2 | RP-091389 | history | 1970-01-01 |
| 470018 | LCS_LTE_UEConTest | ...Conformance Test Aspects – Positioning Support for LTE | 100% | Rel-9 | R5             | RP-111209 | history | 1970-01-01 |

*KUVA 10. Tuki paikannukselle (17)*

|  |        |                         |   |      |       |                |           |         |            |
|--|--------|-------------------------|---|------|-------|----------------|-----------|---------|------------|
|  | 420041 | IMS_EMER_LTE            | ...Support for IMS Emergency Calls over LTE                                   | 100% | Rel-9 | R3, R2         | RP-081140 | history | 1970-01-01 |
|  | 470017 | IMS_EMER_LTE_UEConTest  | ...Conformance Test Aspects – Support for IMS Emergency Calls over LTE        | 100% | Rel-9 | R5             | RP-100118 | history | 1970-01-01 |
|  | 410038 | IMS_EMER_GPRS_EPS-SRVCC | ...Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC) support for IMS Emergency Calls | 100% | Rel-9 | C3, C4, C1, S2 | SP-090099 | history | 1970-01-01 |

*KUVA 11. Paikannusmääritteitä hätäpuheluille (17)*

Release 9 -päivityksessä LTE-paikannukseen lisättiin määritelmät E-OTD:lle, OTDOA:lle sekä AGNNS:lle. Hätäpuheluihin lisättiin paikannustuki solupaikannukselle, A-GPS:lle ja AGNSS:lle, mutta ei vielä tässä vaiheessa muille tekniikoille kuten E-OTD:lle, OTDOA:lle tai U-TDOA:lle toisin kuin GSM:ssä ja WCDMA:ssa eli UMTS-verkossa on.

AGNNS:lle tehtiin testauksia sekä suorituskykytestauksia myös Release 10:ssä.

Release 11 julkaistiin 6.3.2013. Tässä julkaisussa U-TDOA paikannusmenetelmä otettiin Yhdysvalloissa käyttöön. Lisäksi se sisälsi tuen pelkästään verkon yli tapahtuvan paikannuksen tekniikoille (U-TDOA, TDOA).

## 5 YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin eri paikannusmenetelmiin. Selvitettiin, kuinka ne toimivat ja mitä tekniikoita eri puhelinverkoissa käytetään. Lisäksi selvitettiin LTE-verkko-paikannuksen nykytilaa. Käytiin läpi useita eri paikannusmenetelmiä ja sitä, minkä vuoksi osa ei sovi matkapuhelimen paikantamiseen, ja mitkä taas sopivat tarkoitukseen. Paikannushan on aina riippuvainen siitä, mitä tekniikoita matkapuhelin tukee, joten yhtä ja oikeaa tekniikka tähän ei ole. Lisäksi paikannukseen tarvittava tarkkuus riippuu siitä, mihin tarkoitukseen paikannus tulee. Joissain tapauksissa riittää, että tiedetään missä kaupungissa puhelin on, esimerkiksi mainostuksen tarpeisiin riittää tällainen tarkkuus. Joskus taas tulee tietää mahdollisimman tarkasti, missä puhelin sijaitsee, esimerkiksi kun paikannetaan hätäpuhelua. Tällä hetkellä kehityksen alla monellakin tapaa on LTE-teknologia. LTE:n paikannustekniikoihin liittyen standardointi on vasta tehty ja tekniikkaan liittyen on työn alla useampi Release-päivitys tällä hetkellä.

Työn aikana matkapuhelinverkkoon perustuva paikannus tuli aihealueena tutummaksi ja tuli todellisena yllätyksenä, kuinka laaja ja jossain määrin vaikea aihealue tämä on. Eri paikannusmenetelmät kävivät tutummaksi ja näiden perusperiaate tuli selväksi.

## LÄHTEET

1. Rashid, Hanan 2010. Insinööriyö matkapuhelinverkkojen paikannuspalvelut. Opinnäytetyö. Saatavilla: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15590/paikannuspalvelut.pdf?sequence=1> Hakupäivä 28.4.2016
2. Rainio, Antti 2003. Paikannus mobiilipalveluissa ja sovelluksissa. Helsinki: Tekes. Saatavilla: [https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/paikannus\\_mobiilipalveluissa.pdf](https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/paikannus_mobiilipalveluissa.pdf) Hakupäivä 28.4.2016
3. Laitinen, Janne 2004. GPS-paikkatiedon liittäminen matkapuhelinpalveluihin. Opinnäytetyö. Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/30295/TMP.objres.477.pdf?sequence=1> Hakupäivä 28.4.2016
4. Anderson, Christoffer 2001. GPRS and 3G Wireless Applications. Kirja. Saatavilla: <http://read.pudn.com/downloads86/ebook/332697/GPRS%20and%203G%20Wireless%20Applications.pdf> Hakupäivä 28.4.2016
5. Väkevä, Timo 2001. Matkapuhelinverkon MAP-protokollatestaus älyverkko- palveluiden ohjauspisteeseen. Diplomityö. Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/34579/nbnfi-fe20011393.pdf?sequence=1> Hakupäivä 28.4.2016
6. Lähteenmäki, Lauri, Iltasanomat, IS grafiikka: Näin matkapuhelinsignaalia käytettiin apuna Artun etsinnöissä. Saatavilla: <http://www.iltasanomat.fi/kotimaa/art-2000000569862.html> Hakupäivä 28.4.2016
7. Bensity, Alan 2008. Wireless Positioning technologies and applications, Ericsson White Paper, Positioning with lte, 2011.
8. Airu, Ville 2010. Paikannus GPS- ja GSM-järjestelmissä. Opinnäytetyö. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/10210/Airu.Ville.pdf?sequence=2> Hakupäivä 28.4.2016

9. Pylsy, Risto 2010. GPS- ja mobiilipaikannus. Opinnäytetyö. Saatavilla: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12578/Pylsy\\_Risto.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12578/Pylsy_Risto.pdf?sequence=1) Hakupäivä 28.4.2016
10. Vartiamäki, Ville 2012. 3GPP Long term evolution. Opinnäytetyö saatavilla: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43296/Vartiamaki\\_Ville.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43296/Vartiamaki_Ville.pdf?sequence=1) Hakupäivä 28.4.2016
11. Penttinen, Jyrki 2001. GSM-tekniikka, 3. painos.
12. Hakolahti, Teemu 2003. Mobiilit paikkasovellustiedot. Opinnäytetyö. Saatavilla: [ftp://cs.uef.fi/pub/Theses/2003\\_MSc\\_Hakolahti\\_Teemu.pdf](ftp://cs.uef.fi/pub/Theses/2003_MSc_Hakolahti_Teemu.pdf) Hakupäivä 28.4.2016
13. Mäkelä, Petteri 2008. Local positioning systems and indoor navigation.
14. Opinnäytetyö. Saatavilla: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/85245/Licenciate\\_Thesis\\_Petteri\\_Makela.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/85245/Licenciate_Thesis_Petteri_Makela.pdf?sequence=1) Hakupäivä 28.4.2016
15. eTutorials.org. Saatavilla: <http://etutorials.org/Mobile+devices/mobile+location+services/Part+2+The+Mobile+Location+Server/Chapter+5.+Mobile+Positioning/Angle+of+Arrival/> Hakupäivä 28.4.2016
16. 3GPP. A Global Initiative. Saatavilla: <http://www.3gpp.org> Hakupäivä 28.4.2016
17. 3GPP. 3GPP work programme. Saatavilla: <http://www.3gpp.org/DynaReport/GanttChart-Level-2.htm#bm430006> Hakupäivä 28.4.2016
18. Smartphone.ua. Saatavilla: [http://www.smartphone.ua/w\\_a-gps.html](http://www.smartphone.ua/w_a-gps.html) Hakupäivä 28.4.2016

Antti Tuovinen

**REICOVAIR TEST SYSTEM INTEGRATION**

## **REICOVAIR TEST SYSTEM INTEGRATION**

Antti Tuovinen  
Thesis, part 2  
Spring 2018  
Degree Programme in Information Technology  
Oulu University of Applied Sciences



## ABSTRACT

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

---

Author: Antti Tuovinen  
Title of the bachelor's thesis: ReICOvAir test system integration  
Supervisors: Kari Jyrkkä, Jani Kallankari  
Term and year of completion: Spring 2018  
Number of pages: 43

---

The main objective of this thesis was to integrate the ReICOvAir (Reliable Industrial Communication Over the Air) test system into an anechoic chamber; run the necessary tests for the system; and document the results. This thesis was commissioned by Verkotan Oy.

The integration of the test system included connecting all the necessary hardware; creating software for the test system; recording and repeating Bluetooth interference with a software radio; creating a channel model for the test system; and verifying the whole test system via calibration and tests. Also, this thesis explains how the integration test could be made when the ReICOvAir channel model is implemented in the test system.

The tasks that were completed this thesis include integrating the test system in an anechoic chamber; creating software, channel model and interference for the test system; calibrating the test system; and running tests with the software. Although some of the tasks were not completed, the results of this thesis can be considered successful and it is easy to continue validating the test system based on these results.

---

Keywords: Anechoic chamber, OTA, ReICOvAir, Wireless testing

## **PREFACE**

During my training at Verkotan Oy, I asked for the opportunity to write my thesis for them. I got two suggestions for the topic and I chose the topic of RelCOvAir test system integration, because my earlier projects in the company related to the subject.

I would like to thank Verkotan Oy and especially CEO Kari Komonen for giving me this opportunity. I thank my tutoring teacher Kari Jyrkkä and Verkotan's employee Jani Kallankari for their valuable guidance during the writing of this thesis. Finally, I thank my fellow students Ilari Kinnunen and Miikka Ahola for their work on this project.

Oulu, 12.4.2018

Antti Tuovinen

## CONTENTS

|   |    |
|---|----|
| ABSTRACT  | 3  |
| PREFACE   | 4  |
| CONTENTS  | 5  |
| VOCABULARY  | 7  |
| 1 INTRODUCTION  | 8  |
| 2 REICOVAIR   | 9  |
| 3 TEST EQUIPMENT  | 11 |
| 3.1 Anechoic chamber                                    | 11 |
| 3.2 Channel Emulator                                    | 12 |
| 3.3 Dual polarized horn antennas                        | 13 |
| 3.4 Power amplifiers                                    | 13 |
| 3.5 Calibration Antenna                                 | 14 |
| 3.6 VNA   | 14 |
| 3.7 Test control PC                                     | 15 |
| 3.8 DUT, clients and interference                       | 15 |
| 3.9 Software radio USPR X300                            | 16 |
| 4 TEST SYSTEM SETUP                                     | 17 |
| 4.1 ReICOvAir test system                               | 17 |
| 4.2 Steps for building an anechoic chamber test system  | 18 |
| 4.3 Anechoic chamber test system                        | 18 |
| 4.4 Interference for the test system                    | 22 |
| 4.5 Software  | 25 |
| 5 CHANNEL MODEL   | 27 |
| 5.1 QuaDRiGa channel model                              | 27 |
| 5.2 Channel model used for integration test             | 28 |
| 6 INTEGRATION TEST                                      | 30 |
| 6.1 Integration tests for test system and channel model | 30 |
| 6.1.1 Power Delay Profile                               | 32 |
| 6.1.2 Doppler correlation                               | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2 Interference and DUTs power level calibration | 32 |
| 6.2.1 Calibration result analysis                 | 33 |
| 6.3 Integration tests for software                | 35 |
| 6.3.1 Result analysis                             | 35 |
| 7 CONCLUSIONS                                     | 41 |
| REFERENCES  | 43 |

**VOCABULARY**

|           |  |
|-----------|--|
| ReICOvAir | Reliable Industrial Communication Over the Air |
| DUT       | Device Under Test                              |
| VNA       | Vector Network Analyzer                        |
| SA        | Signal Analyzer / Spectrum Analyzer            |
| MIMO      | Multiple Input Multiple Output                 |
| MU-MIMO   | Multi-User Multiple Input Multiple Output      |
| OTA       | Over-The-Air                                   |
| QuaDRiGa  | Quasi Deterministic Radio Channel Generator    |
| AWGN      | Additive White Gaussian Noise                  |
| CW        | Continuous Wave / Continuous Waveform          |
| PDP       | Power Delay Profile                            |
| CDF       | Cumulative Distribution Function               |

## 1 INTRODUCTION

This thesis was commissioned by Verkotan Oy. Verkotan Oy co-operates with the EU project called ReICOvAir (Reliable Industrial Communication Over the Air), which aims to create standardization and testing for wireless connections to advanced manufacturing and processing systems. The test system includes channel models based on a real-world environment and it creates reliable validation or rating for the tested wireless systems.

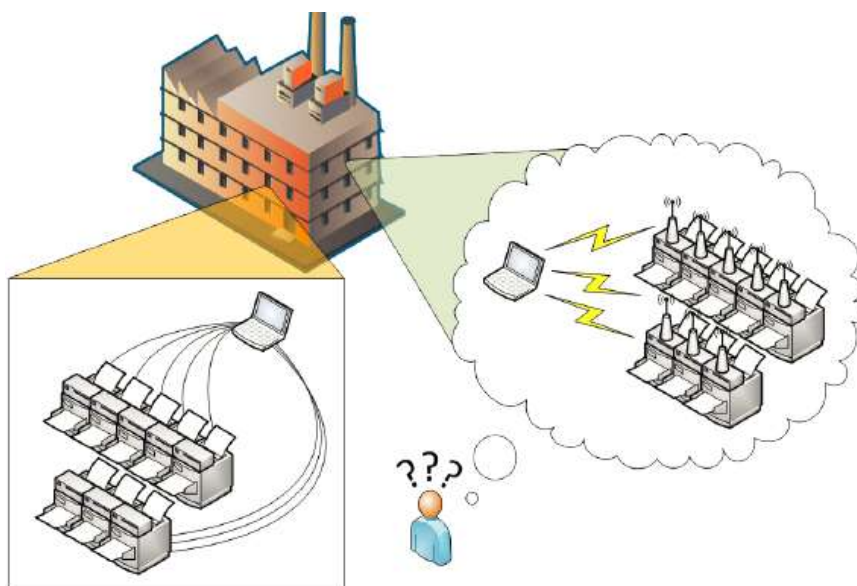
The main objective of this thesis is to integrate the ReICOvAir test system into Verkotan's anechoic chamber including all hardware and software as well as the necessary tests for the test system.

The structure of the text is divided into six parts. The first part explains what ReICOvAir is and why the project has been started. The second part deals with all the test equipment needed for the test system. The third part explains what the ReICOvAir test system is and how the test system has been implemented in an anechoic chamber. The fourth part of the text describes what a channel model is and how the ReICOvAir channel model and the channel model for tests have been made. The fifth part shows how the actual integration tests for the test system were made. The last section is the conclusion.

## 2 REICOVAIR

ReICOvAir is an EU project that started in January 2016 and ends in December 2018. The project involves companies and institutes from Finland, Germany and Spain from many different areas of expertise, from wireless expertise to steel industry and industry quality controlling (5).

The main question and motivation for the ReICOvAir as seen on figure 1 is the vision of wireless connections replacing or at least complementing the wired connections for advanced manufacturing and processing systems. This will provide on the one hand more flexibility in the deployment of machinery and a reduction of the overall installation costs. On the other hand, wireless communication is the enabler for areas which currently are not or only hardly reachable by wire those with rotating parts, autonomously moving machinery, intelligent moving objects like workpiece carriers and automatic guided vehicles (AGV). ReICOvAir will provide standardization for rating system. The test system includes different test cases which relate to real physical environments and test setup including software and hardware. (1, p. 11-12.)



*FIGURE 1. Is it possible to exchange wired communications to wireless communication in such difficult conditions? (1, p.11.)*

The main objective of this thesis is to integrate the ReICOvAir test system in anechoic chamber. This includes connecting all the necessary hardware for the test system and testing out the connections via cabling and Over-The-Air connections; Creating or integrating necessary software for system which includes communication software between devices, software for collecting and saving all measuring data and automating measurements; Integrating radio channel model and interference for test system; Run tests with system; integration test for the test system and the channel model according for the 3GPP TR 37.977 and compare results with other test systems and find a solution for different results if needed.



### 3 TEST EQUIPMENT

The test system contains many hardware components and this chapter explains what each one of the test equipment is and what its purpose is in the test system.

#### 3.1 Anechoic chamber

An anechoic chamber (figure 2) is a room where most of RF testing takes place. The purpose of the Chamber is to block RF signals from entering and leaving the chamber, utilizing the principles of the faraday cage. All chambers floors, ceiling and roof are coated with Radiation-Absorbent Material (RAM) which is used for scatter and absorb RF reflections. That way chamber creates space for measurement where unwanted RF signals no longer affects and signal field in quiet zone is constant. this ensures that the results are more reliable and repeatable. In this test system, DUT will be placed in the anechoic chamber and will be tested with Over-The-Air connections.

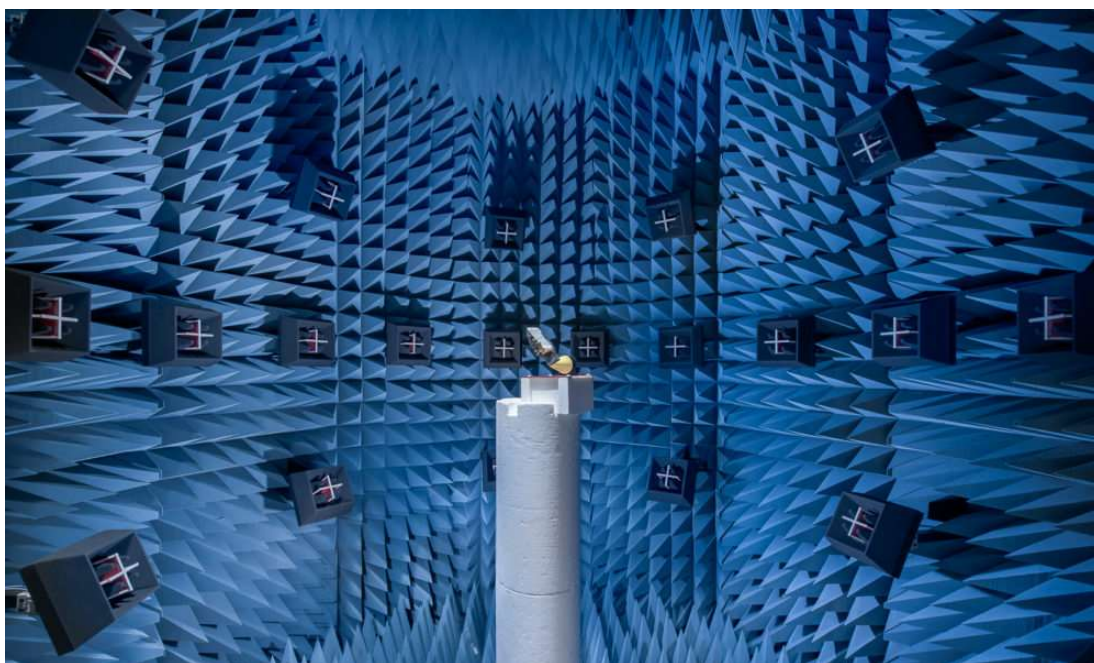


FIGURE 2. Picture of an anechoic chamber (11).

### 3.2 Channel Emulator

The Anite Prosim F32 channel emulator (figure 3) simulates characteristics of real-world radio channel conditions within a lab environment. It is used to test End-to-End performance of wireless devices and network infrastructures. The Prosim F32 channel emulator provides 32 RF interface channels that work between 350 MHz to 6 GHz with a bandwidth of 40 MHz (or 80 MHz for 16 channels) and changes the signal parameters like delay, amplitude and Doppler (2, p.11-12). In the test system the channel emulator interconnects the DUT and the clients and creates interference to the signal path such as delay, fading and reflections. The channel model that was created for the test system is downloaded into the channel emulator and the emulator creates interference to the signal path according to the channel model.



*FIGURE 3. Anite Prosim F32 Channel Emulator (2).*

### 3.3 Dual polarized horn antennas

The anechoic chamber contains 8 Dual polarized antennas (figure 4) to send and receive signals. The antennas are designed for frequencies between 700 MHz up to 6 GHz. Every one of the antennas have horizontal and vertical polarizations which means that the chamber can have up to 16 different signal paths for transmitting and receiving signals.



*FIGURE 4. ETS-LINDGREN 3164-04 Dual polarized antenna (2).*

### 3.4 Power amplifiers

Power amplifiers are connected to all chamber antennas and all different signal paths to provide appropriate signal strength. Amplifiers maximum power is about 20dBm. The amplifiers that are used on the test do not work on the 5 GHz channel, so the tests have been done using a 2,4 GHz WLAN channel.

### 3.5 Calibration Antenna

The anechoic chamber has been calibrated using sleeve and magnetic dipoles (figure 5) to calibrate absolute attenuation and delay in signal paths. WLAN uses 2.4 GHz and 5 GHz frequencies, so the chamber has been calibrated for those frequencies using Satimo's SD2450 and SD5000 electric sleeve dipoles. The calibration results are used to correct the measurement power levels.



FIGURE 5. Satimo's electric Sleeve dipoles (6).

### 3.6 VNA

The Agilent E5071 ENA Vector Network Analyzer (figure 6) is used for controlling signal levels in this test system. VNA is also used to calibrate the anechoic chamber.

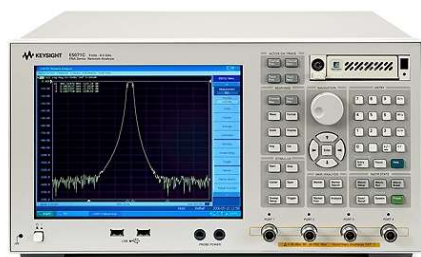


FIGURE 6. Agilent E5071 ENA Vector Network Analyzer (2).

### 3.7 Test control PC

The test control PC connects all the test equipment via software, creates payload between the DUT and the client and works as a common data storage device. All the test results are stored on the PC and the test is controlled through this PC. The test control PC is also used for automating the measurement.

### 3.8 DUT, clients and interference

The DUT (Device Under Test) was a TP-link archer c2600 (figure 7) which is a modern router that supports all the new signal processing techniques and all the new methods like beamforming and MU-MIMO. The router also supports the IEEE 802.11AC standard. The router's chipset is Qualcomm Atheros QCA9980. This router has 4 detachable antennas (4x4 MIMO), so coaxial cabling to the channel emulator that feeds the antennas inside the chamber is easy to do without major changes to the router. Another DUT is Netgear n300 which is used outside the chamber. This router has 2 antennas for transmitting and receiving signals (2x2 MIMO) and the chipset is Broadcom BCM4718A1.



Figure 7. TP-link Archer c2600 (2).

For clients there are several options such as computers, another router, mobile phones, network interface cards or anything that can use Wi-Fi to communicate.

For interference there are also many different options such as Bluetooth, which works on a 2,4 GHz channel; second network with a router and clients; and software radio which can be used as interference.

### **3.9 Software radio USRP X300**

Ettus Research USRP X300 is a high performance, scalable software defined radio (SDR) platform for designing and deploying next generation wireless communications systems. It has 2 wide-bandwidth RF daughterboards which provide up to 160 MHz bandwidth. (10.) In this test system, it is used for recording and repeating Bluetooth data.

## 4 TEST SYSTEM SETUP

This chapter explains what the whole RelCOvAir test system is and how it is implemented in an anechoic chamber. Chapter 4.1 covers the whole RelCOvAir project test system and rest of the chapter tells the steps for integrating the test system in Verkotan's anechoic chamber.

### 4.1 RelCOvAir test system

RelCOvAir test system connects all the software and hardware, so it creates a complete test environment for tests. Test system is used to demonstrate applications of the RelCOvAir channel model, measuring the performance of some actual industrial communication devices under channel conditions simulating a factory environment (2, p. 8). Figure 8 shows a block diagram for the whole RelCOvAir test system including all the software and hardware. On the left side of FIGURE 8, in a yellow box, is a system control pc and all the software in it. The blue boxes are DUTs and they can be in a chamber or in shielded boxes during measurements. At Verkotan the test system was implemented in an anechoic chamber and used the OTA connection to test the DUTs. This test system does not include software from the PC part or attenuator array parts of the block diagram.

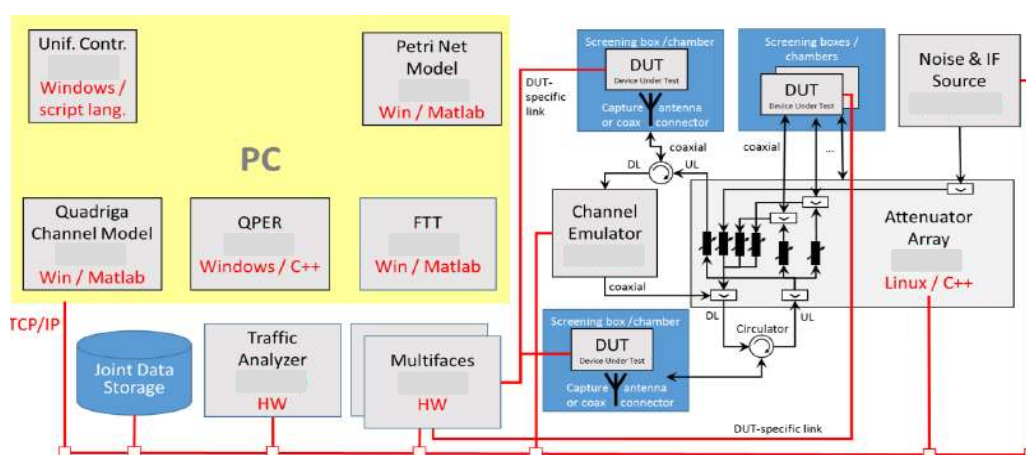


FIGURE 8. Block diagram of the hardware setup (1).

## **4.2 Steps for building an anechoic chamber test system**

Chapter 4.3, 4.4 and 4.5 covers how RelCOvAir test system is integrated in Verkotan's anechoic chamber. Chapter 4.4 explains how the test system works and how the hardware is connected. Chapter 4.5 covers how separate interference is measured and integrated in the test system. Chapter 4.5 explains the measuring software.

## **4.3 Anechoic chamber test system**

An anechoic chamber test system was used to connect the DUTs with over-the-air links in a controlled environment while using the DUTs' own antennas. This provided for an easier measurement of antenna gains and correlations, especially in MIMO environments.

As figure 9 shows, one of the DUTs is enclosed in the test chamber and acts as a receiver unit, the other DUT is located outside of the chamber. The outside DUT is connected to the channel emulator with coaxial cables and the emulator feeds the antennas inside the test chamber. An amplifier was inserted between the channel emulator and the chamber's antennas to provide appropriate signal strength. Each antenna was attached to a different channel emulator's output to simulate MIMO. Optional RF paths are for interference and interference can be connected straight to the chamber antennas or through the channel emulator for integrating radio channel effects to the interference signal.



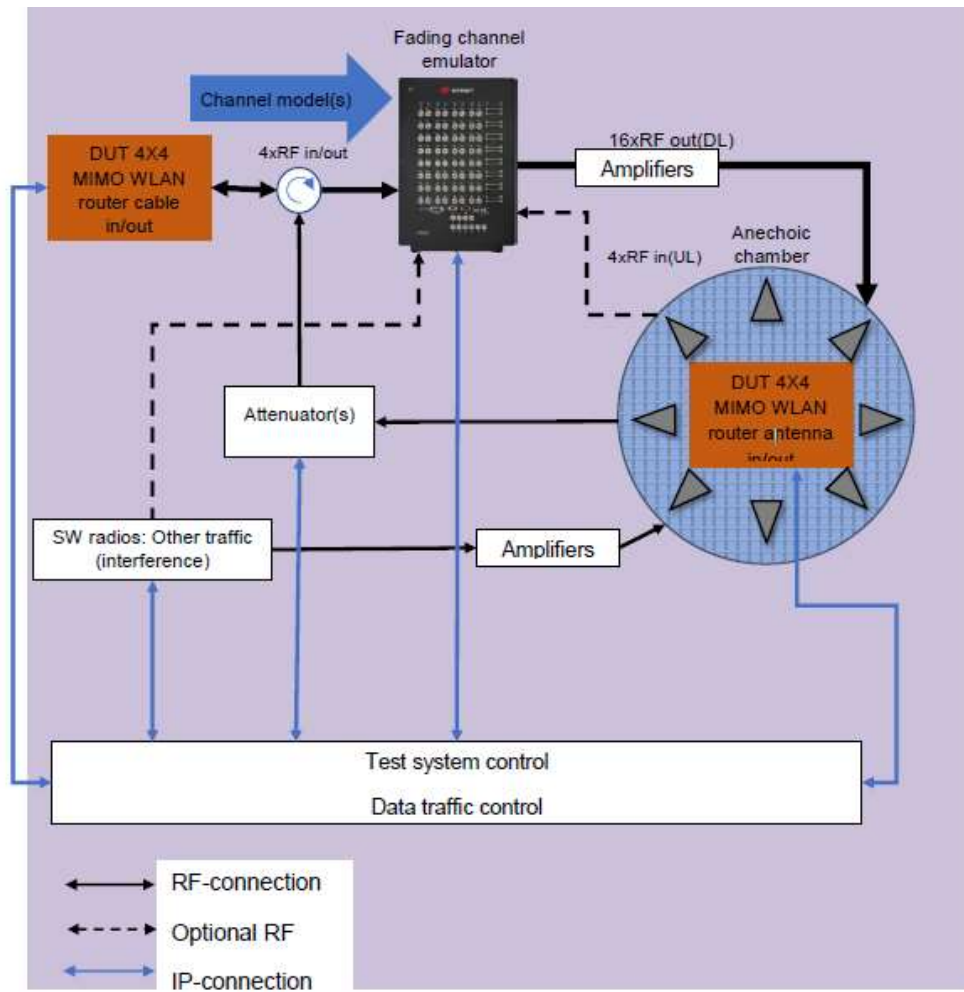
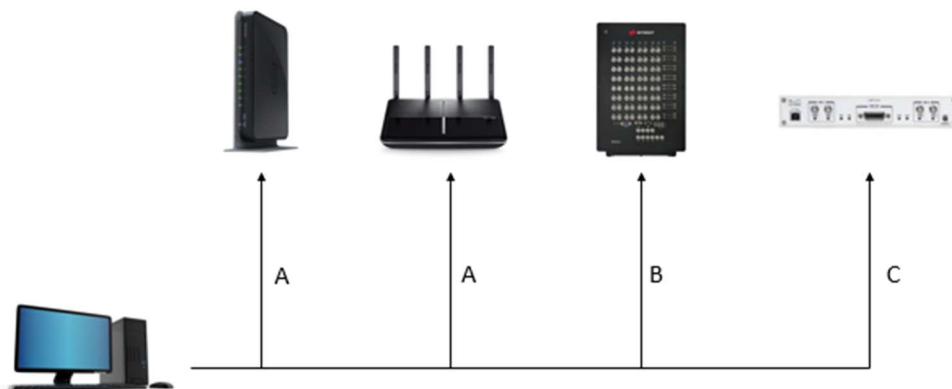


FIGURE 9. Anechoic chamber setup (2).

Figure 10 shows all IP-connections of the test system that are used in controlling the test hardware, creating traffic between DUTs and interference to the test system.



*FIGURE 10.*

#### Connection A

Connection A connects the test system PC and both DUTs. The test system PC creates payload between the DUTs and functions as a data storage.

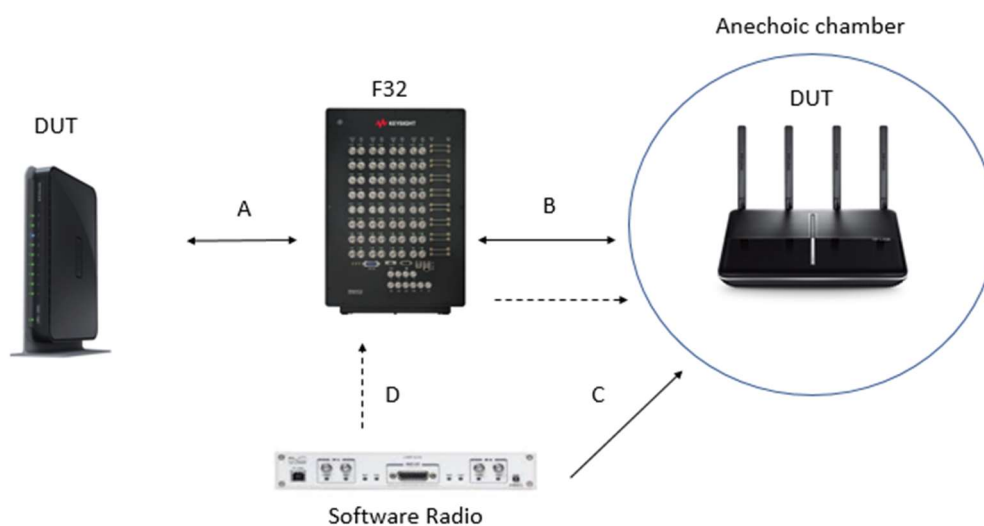
#### Connection B

Connection B connects the test system PC and channel emulator. The emulator is controlled through the PC. The Channel model for the test is downloaded to the channel emulator from the test system PC.

#### Connection C

Connection C connects test system PC and Software radio. The test system PC feeds recorded interference data to the software radio that creates interference to test system. See chapter 4.4 for further information about interference for the test system.

Figure 11 shows the RF-connections that connects DUTs, channel emulator and software radio in the test system with coaxial cabling or Over-The-Air connections.



**FIGURE 11.**

### Connection A

Connection A connects the transmitting DUT and the channel emulator with Coaxial cabling. The transmitting DUT sends data to another DUT and the channel emulator is between them. The transmitting DUT can be placed in a shielded box if needed.

### Connection B

Connection B connects channel emulator and the receiving DUT. The channel emulator is connected to the anechoic chamber's antennas with coaxial cabling. The antennas send a signal to the DUT with an over-the-air connection.

### Connection C or optional connection D

Connection C or D connects the software radio that playbacks interference to the test system. It can be connected straight to the chamber antennas or through the channel emulator for integrating radio channel effects to the interference signal. See chapter 4.4 for further information about interference for the test system.

#### **4.4 Interference for the test system**

As to interference, there are multiple options that are listed in chapter 3.7. We used the software radio and GNU Radio 3.7 which is an open-source toolkit and software radio to record Bluetooth's interference in WLAN channel 6 (2437 MHz) to use it as playback on our tests. The recording was about 1 minute long and had 20 MHz bandwidth. It also had some low-level Wi-Fi traffic on the background.

On Figure 12 the UHD: USRP Source opens the software radio's RX-port to receive the Bluetooth signal. Complex to IChar changes data format from complex to char (byte) format. The file sink creates the .dat-file from the Bluetooth data. For the Bluetooth device we used a typical Bluetooth headset and a mobile phone. As seen in figure 13, the phone was in a shielded box and it was connected to a headset outside with an antenna. As for software radio, we used USRP X300 which is connected to a shielded box with a coaxial cable and to a computer with a network cable, and it is controlled via computer using GNU Radio 3.7.

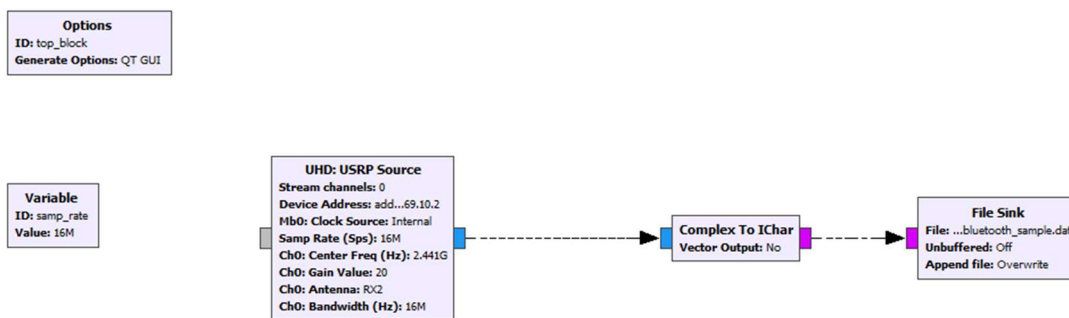


FIGURE 12. Block diagram for recording Bluetooth.

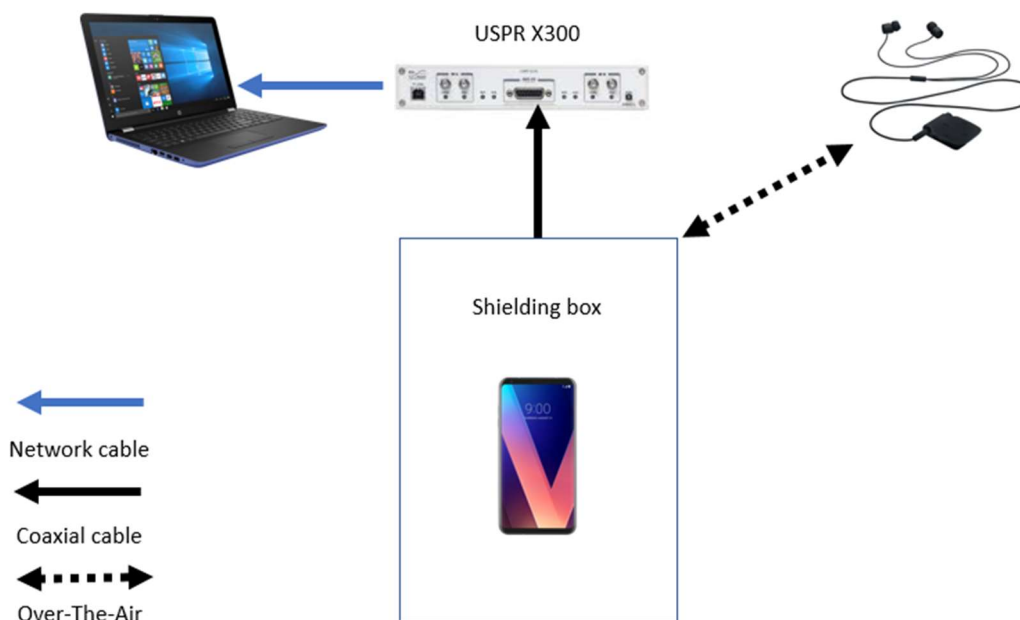


FIGURE 13. Bluetooth recording setup.

In the test system we use software radio to playback the recorded Bluetooth data as interference for WLAN (figure 14 and figure 15). In the GNU radios block diagram (figure 14) file source reads the file from the PC. IChar to complex changes IChar (byte) format back to complex. A USRP Sink opens the software radio's TX-port and forwards data to port. The PC feeds Bluetooth file to USPR 300X software radio via network cable and software radio sends it to channel emulator

via coaxial cable (figure 15). Figure 16 shows what the signal’s spectrogram looks like. It was measured with Signal analyser (SA).

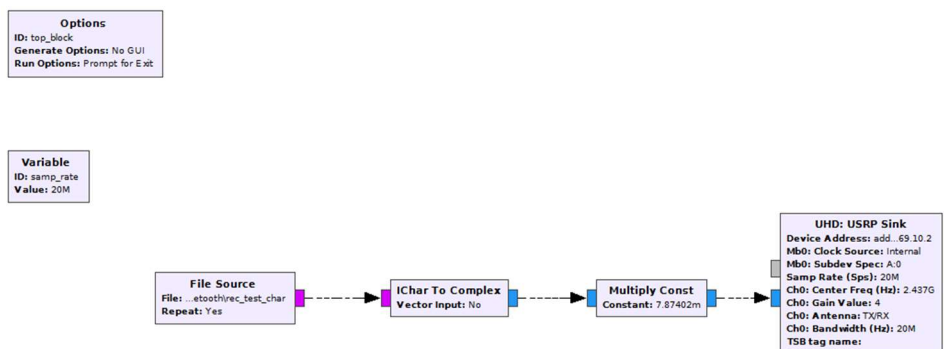


FIGURE 14. GNU Radio 3.7 Block diagram for repeating Bluetooth data.

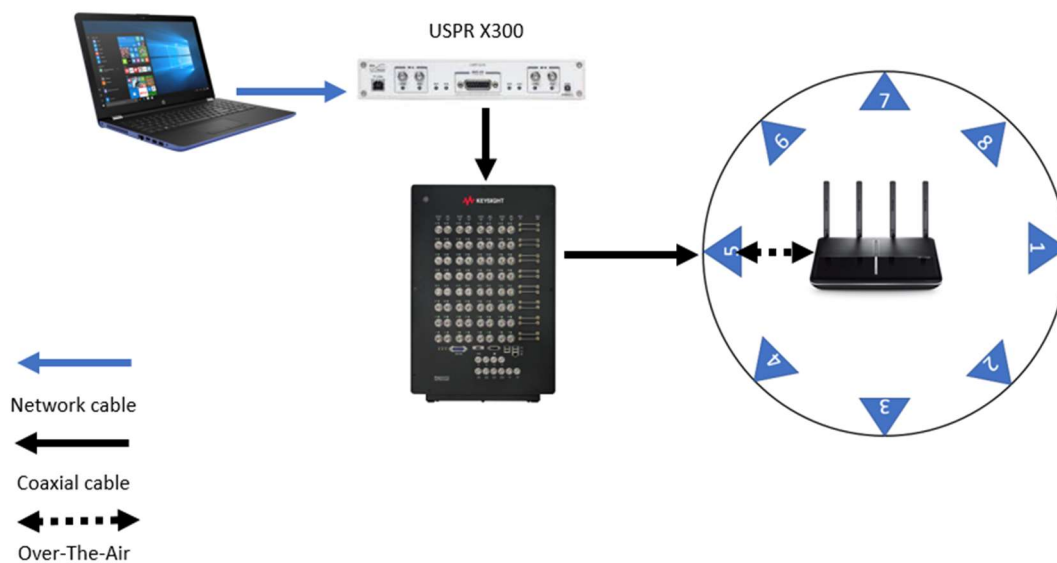


FIGURE 15. Bluetooth playback setup.

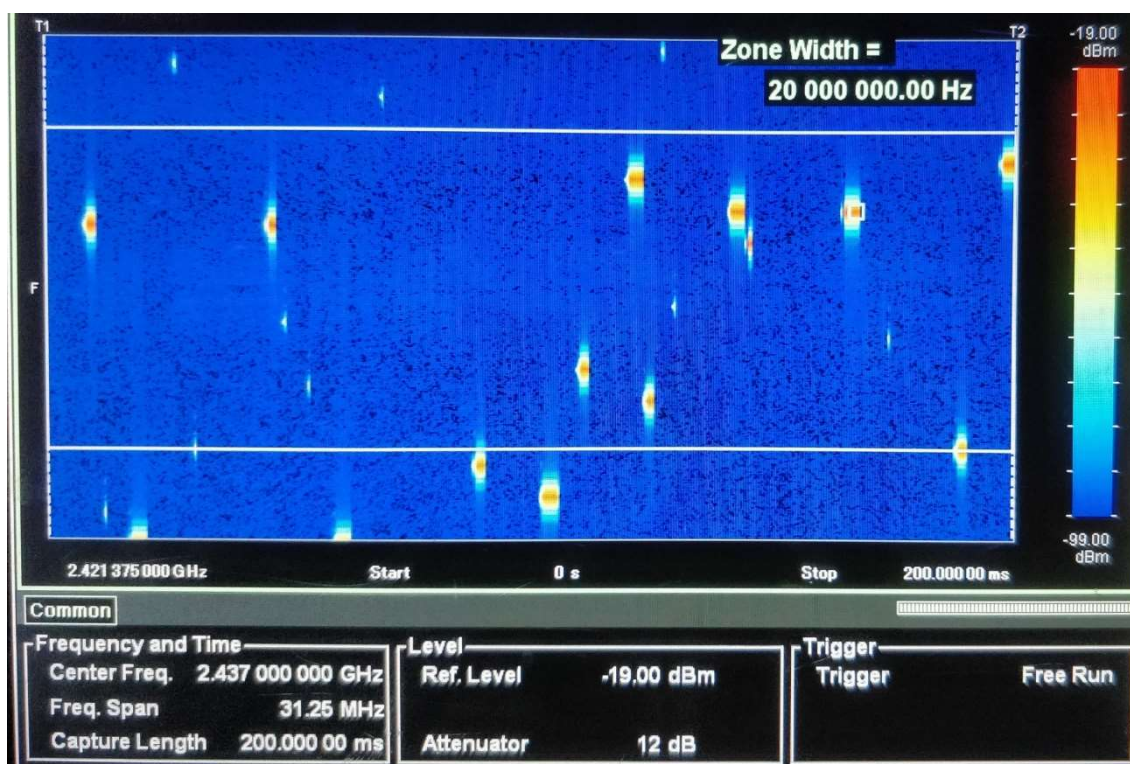


FIGURE 16. Picture of Bluetooth signals spectrogram measured with SA

#### 4.5 Software

For creating connection and payload between the DUTs, we made a python script that uses TCP-sockets to create a connection between the DUTs and send TCP packets of size 750 kB from client to server 200 times per one measurement. Both client and server script run on the test system PC but the traffic between the scripts goes through the test system. The client script is connected to an outside DUT (Netgear) and the server script is connected to the chamber DUT (TP-link) and the connection between the DUTs goes through the test system via OTA-connections. The script saves the data in the test control PC for later processing and it includes the received bytes and the time of arrival for each packet. More about data processing in chapter 6.3.1.

The channel emulator and chamber's turn table are also controlled through the client script because all hardware is connected to the outside DUT. This provides automated measurement functions for the test system. As seen in figure 17, the

TCP-connection between the DUTs is handled with one antenna and interference is circulated in the chamber by one antenna at a time. The power levels of the interference are adjusted with the channel emulator between 25 dBm to -20 dBm by steps of 3 dBm. This makes a total of 16 different power levels for each measurement before changing the antenna or polarization. At the same time, the router is turned slowly back and forth in the chamber between 0 to 360 degrees. This measurement shows how badly the interference affects the Wi-Fi's performance and how stable the connection is.

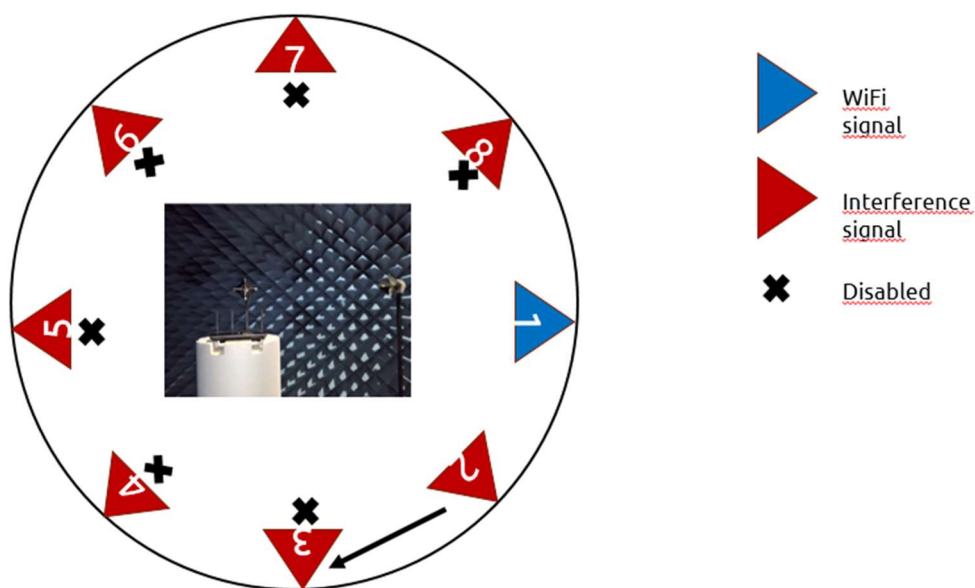


FIGURE 17. Interference circulation in chamber.



## 5 CHANNEL MODEL

The purpose of a channel model is to create a theoretical simulation of a signal path corresponding to a real-world radio channel which always have losses and interference such as path loss, shadowing, multipath delay spread, doppler spread and co-channel and adjacent channel interference. With a channel model it is possible to simulate in laboratory environments how DUT would perform in real-world.

The channel model is used with a channel emulator. A channel emulator has interference generators for creating interferences to the signal path according to the created channel model. Prosim has AWGN (Additive White Gaussian Noise) and CW (Continuous Wave) interference generators which are used to create interference to a signal by changing parameters like delay, fading and amplitude.

### 5.1 QuaDRiGa channel model

QuaDRiGa (QUAsi Deterministic Radlo Channel Generator) was developed at Fraunhofer HHI for modeling MIMO radio channels for specific network configurations, such as indoor, satellite or heterogeneous configurations. QuaDRiGa is a tool for generating realistic radio channel impulse responses for system-level simulation of mobile networks. These simulations are used to determine the performance of modern technologies to provide an objective indicator for the standardization process in bodies like the third-generation partnership program 3GPP. (8, p.8-12.)

QuaDRiGa 2.0 supports MATLAB and Octave and they are used to create and visualize channel model (8, p. 8). The ReICOvAir channel model for this project will be developed using QuaDRiGa. The measurements for radio channel have been carried out in two steel plants in Finland. From these measurements the channel model is going to be made. The channel model is a theoretical model

that corresponds to the results obtained in the real industry environment. RelCOvAir Channel model is going to be created by other participants in the project and its integration testing and validation will be carried out at a later stage of the project. Therefore, it will not be included in this thesis.

## 5.2 Channel model used for integration test

Because the RelCOvAir channel model was not going to be ready for these integration tests, we had to make a channel model of our own. We made a 2x2 MIMO channel model for the channel emulator that does not have interference included because interference is fed with a separate software radio. As seen in figure 18, both routers had 2 inputs and 2 outputs; and interference has 1 input and 12 outputs for circulation in the chamber. Figure 19 demonstrates how the DUTs and the software radio are connected to the channel emulator according to the channel model.

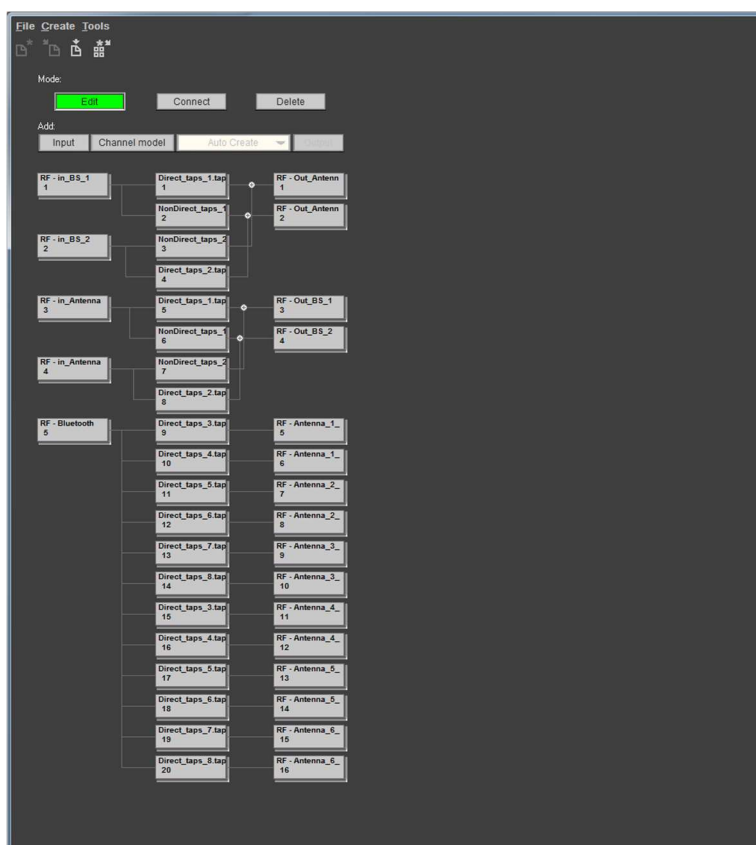


FIGURE 18. Channel model created with Prosim F32.

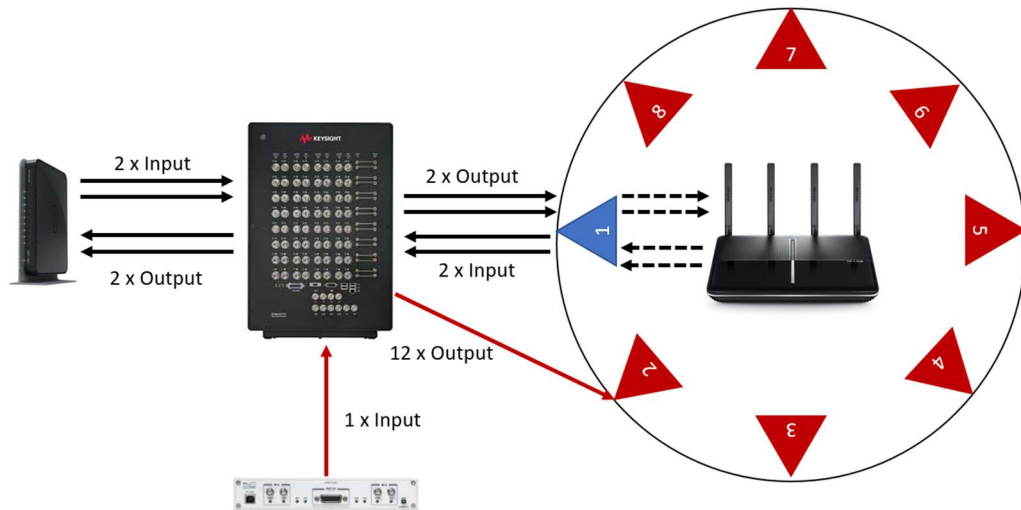


FIGURE 19. Picture of the channel emulator connections.

## 6 INTEGRATION TEST

The purpose of the integration tests is to calibrate the test system and the channel model. This ensures that the test system and channel model work as intended. Chapter 6.1 shows how the test system and the channel model are supposed to be calibrated according to the 3GPP TR 37.977 standard. Due the lack of RelCO-vAir channel model we could not calibrate the test system or the channel model properly. Chapter 6.2 explains how power levels for the interference and the DUTs is calibrated and chapter 6.3 explains how the software for the test system is tested.

### 6.1 Integration tests for test system and channel model

Integration tests for the test system and channel model is a 4-step process designed to verify and calibrate power levels, path loss, power delay profile and doppler. This verifies that the test system and the channel model work as intended, and the test conditions are correctly implemented as described by the model. This chapter explains the main idea of each step in the calibration process. More detailed information about calibration and result analysis in 3GPP's standard TR 37.997 on pages 141-154.

The integration measurements are made with VNA and spectrum analyser (SA). Other parts needed were sleeve and magnetic dipoles, signal generator and channel emulator. VNA setup (figure 20) is used for measure PDP. VNA transmits sweep signals through the channel emulator that is connected to the chamber antennas. The test antenna (dipole antenna) receives a signal and sends it back to VNA that analyzes the frequency response of the system. A number of traces (frequency responses) are measured and recorded by the VNA and post processed by software such as\_Excel or MATLAB (9, p. 141-154.).

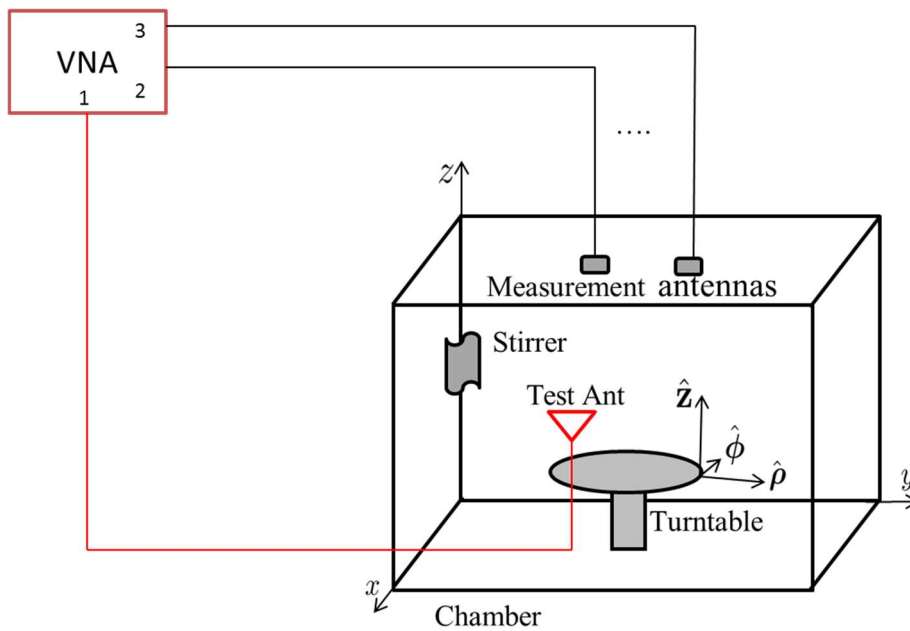


FIGURE 20. Picture of a VNA setup. (9)

The SA setup (figure 21) is used to measure the doppler spectrum. In this setup signal generator transmits the signal to the channel emulator that feeds the chamber antennas. The test antenna receives a signal and signal is analysed by a spectrum analyser. After the measurement, measured spectrum is compared to the target spectrum (9, p. 141-154).

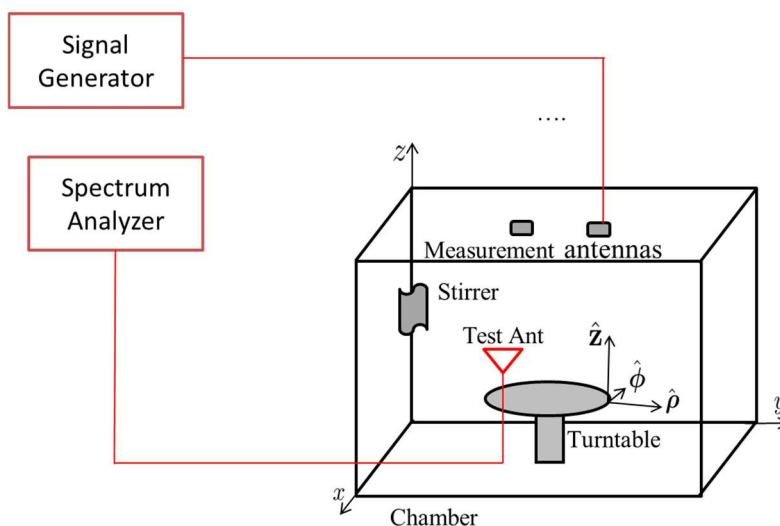


FIGURE 21. Picture of a SA setup. (9)

### **6.1.1 Power Delay Profile**

This measurement checks that power delay profile (PDP) is in line with the channel model's PDP. The VNA setup is used in this measurement. Measurement's idea is to record channel models traces with VNA and number of points depends on the used channel model and channels frequency. During the measurement, emulation must be stepped for every Channel Impulse Response (CIR) and all the CIR steps must be measured with VNA and that gives the channel model's frequency responses. The result analysis is done by taking a Fourier transform of each frequency response to generate impulse responses and compare these to the channel model's theoretical PDP. (9, p. 143-145.)

### **6.1.2 Doppler correlation**

This measurement validates the doppler correlation. SA setup is used during this measurement. The signal generator sends CW signal at the center frequency of a wanted channel to the channel emulator. Signal generator is connected to one input while other inputs are disabled. The channel emulator is set for free-run playback of the channel model. The dipole antenna receives generated signal in the center of the chamber and feeds that to the spectrum analyser. The doppler power spectrum is measured by the spectrum analyser. The measurement result analysis is performed by taking the Fourier transformation of the doppler power spectrum measured with the spectrum analyser. The resulting temporal correlation is compared to the channel model's theoretical temporal correlation. (9, p. 145-147.)

## **6.2 Interference and DUTs power level calibration**

Calibrating power levels for the interference and the DUTs we used VNA, channel emulator, sleeve dipole (SD2450) and magnetic dipole (SD2450). We calibrated all the signal path's that covers the DUTs sending and receiving signal paths and

all 12 interferences signal paths. The test setup is same as VNA setup in the 3GPP's standard (FIGURE 22). With this we know the signal path's path loss, for DUTs we can equalize both transmitting and receiving signal paths to each other and know exact power levels for the interference as would see by DUT. Also, this calibration checks what the differences between signal paths are and there are no broken coaxial cables or amplifiers. First, we tested out amplifiers with channel emulator. We changed emulators output gain between -10 dBm to 20 dBm with steps of 1 dBm for every signal path. Then we tested out that there are no broken coaxial cables. We measured the path loss with VNA setup three times and between measurements we moved the cables to see if there are any differences.

### **6.2.1 Calibration result analysis**

During the calibration we found out that three of the signal paths didn't work correctly. There was a problem with one of the amplifiers that did not work as well than the others and three of the cables were broken. As we can see from figure 21, amplifier number twelve's gain decreases a lot sooner than other amplifiers and it had to be replaced. In figure 22, we calculated an average path loss from all 3 measurements and compared how significant differences there are between measurements. As seen in figure 22, paths 8, 10 and 12 had over 0,5 dBm difference between the measurements and coaxial cables on those paths were broken and replaced. These problems could not have been found without calibration and they probably would not have been visible even in the results.

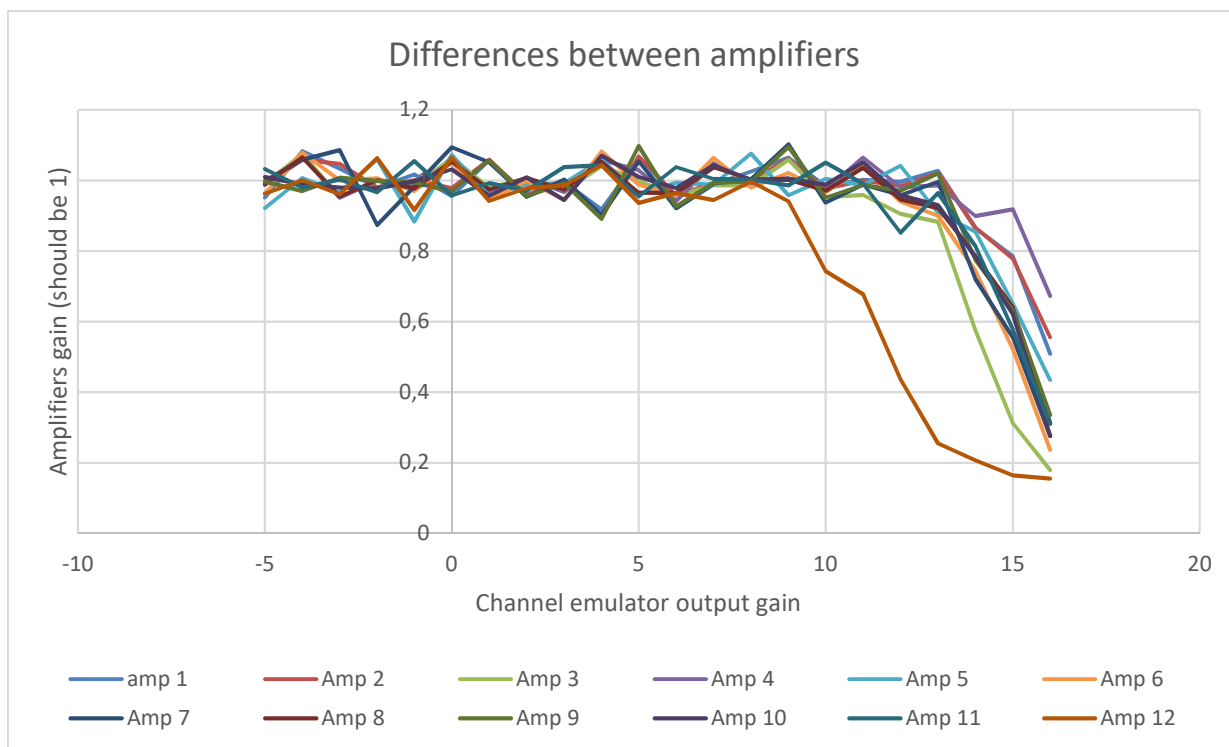


FIGURE 21. Differences between amplifiers.



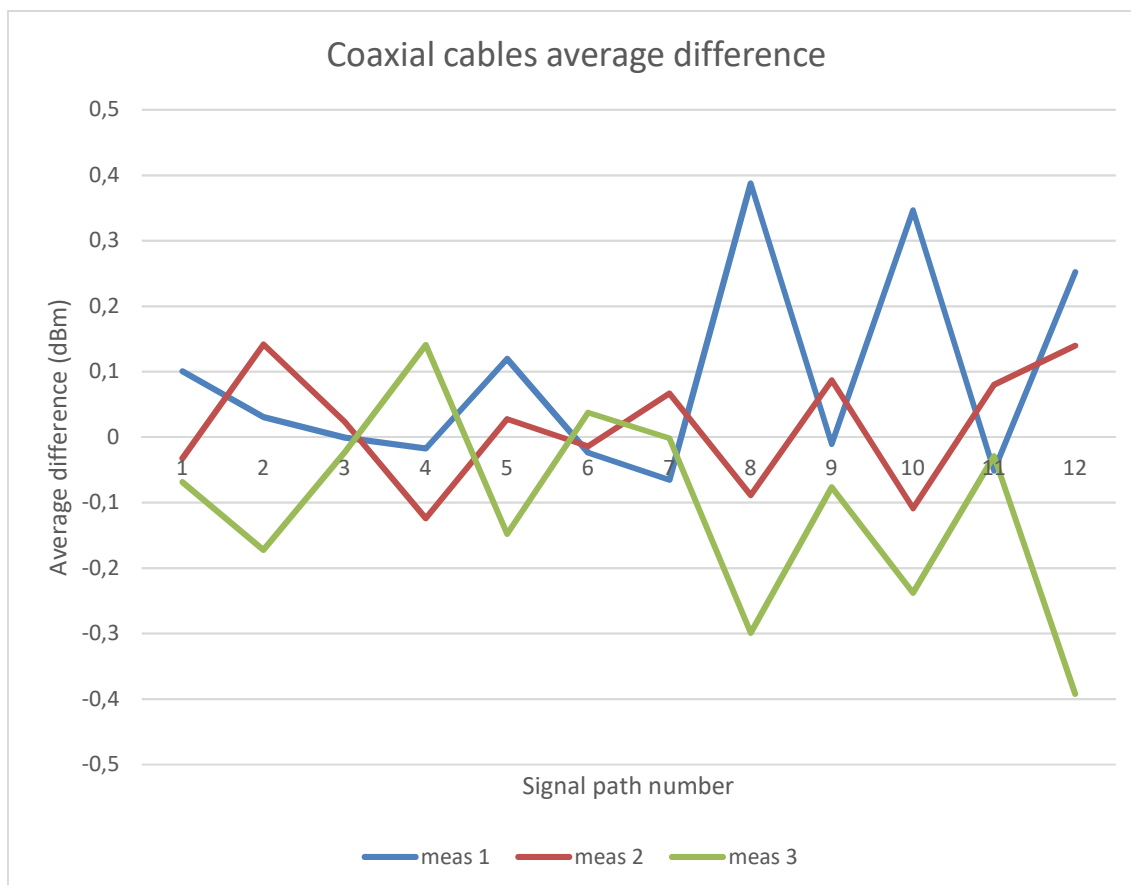


FIGURE 22. Coaxial cables average differences.

### 6.3 Integration tests for software

We made two different measurements with software as detailed in chapter 4.5. With these measurements we test that the software and test system work's as intended. In first measurement DUT's were TP-link and Netgear and both scripts were running in the test control PC. In second measurement we replaced TP-link with Lenovo T420 laptop and made the same measurement. The only change for the setup is that the server script runs on a laptop during this measurement. This way we had two results to compare.

#### 6.3.1 Result analysis

From these measurements we calculated 0,1%, 1%, 5% and 50% Cumulative distribution function (CDF) for a throughput (figure 23). For example, 1% CDF throughput means that 1% of the measurement throughput was at this level and

99% of the time the throughput was better. The CDF provides a detailed analysis of the weakest and the strongest phases in the connection's speed and stability. The CDF throughput is calculated so that the received bytes per packet are divided by the transmission time from previous the packet for getting an instantaneous throughput. These values were sorted in ascending order to get the CDF. The transmission times were scaled from 0% to 100%. Interpolating the sorted throughput and divided cumulative sum of time gives us the throughput CDF. The transmission cap CDF was calculated the same way as the CDF throughput.

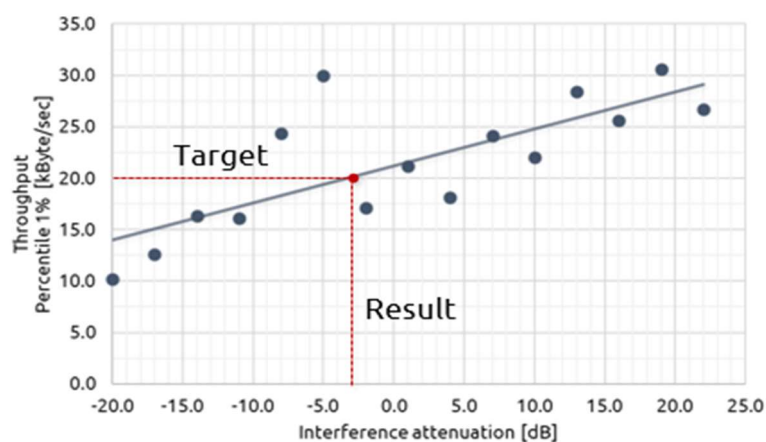


FIGURE 23. Definition of throughput percentile target.

The following figures 24-31, represent the measured throughput and the transmission cap levels for certain percentages of time. Chosen percentages are low because we wanted to analyse the weak phases in the connection. As we can see from the CDF throughput and CDF transmission cap, the connection varies according to the power levels of the interference so that when the interferences power level rises throughput drops and transmission time rises.

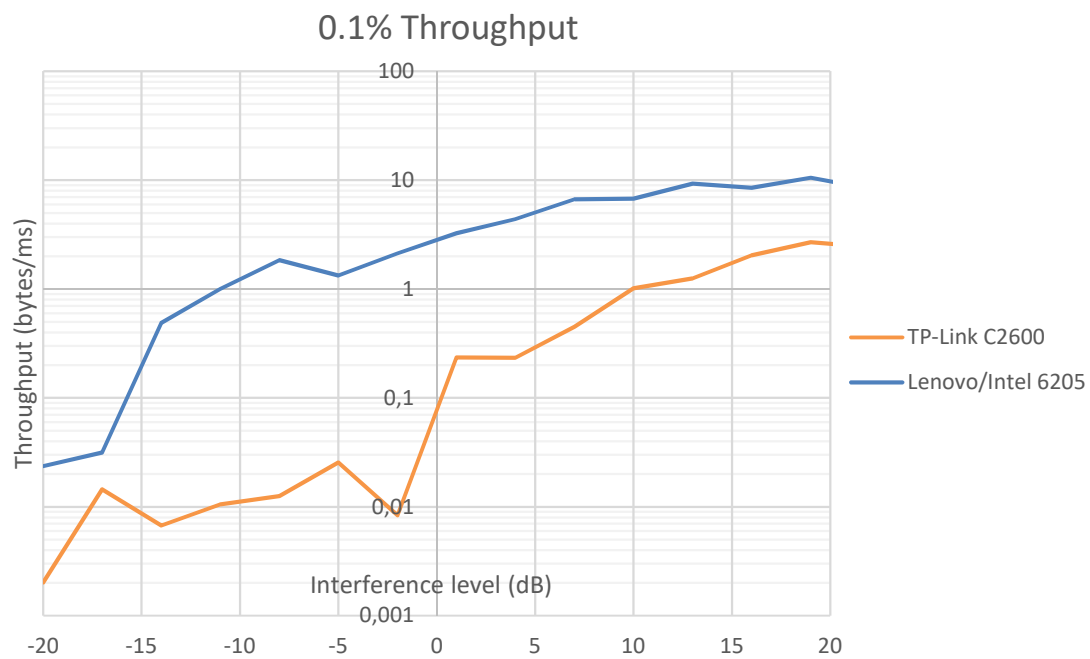


FIGURE 24. 0,1% Throughput.

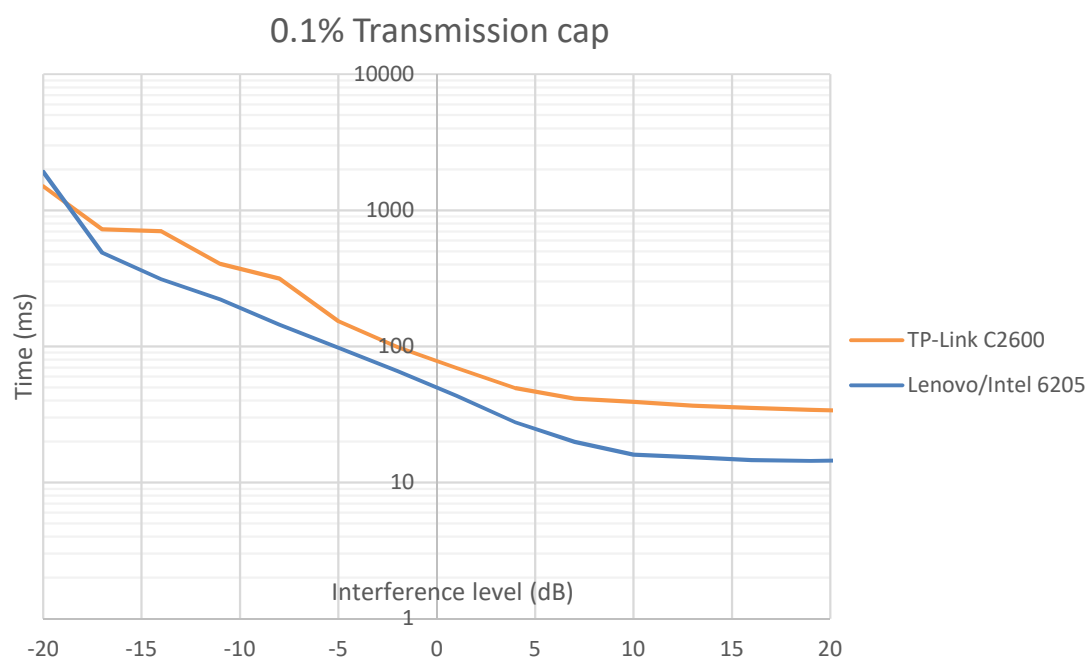


FIGURE 25. 0,1% Transmission cap.

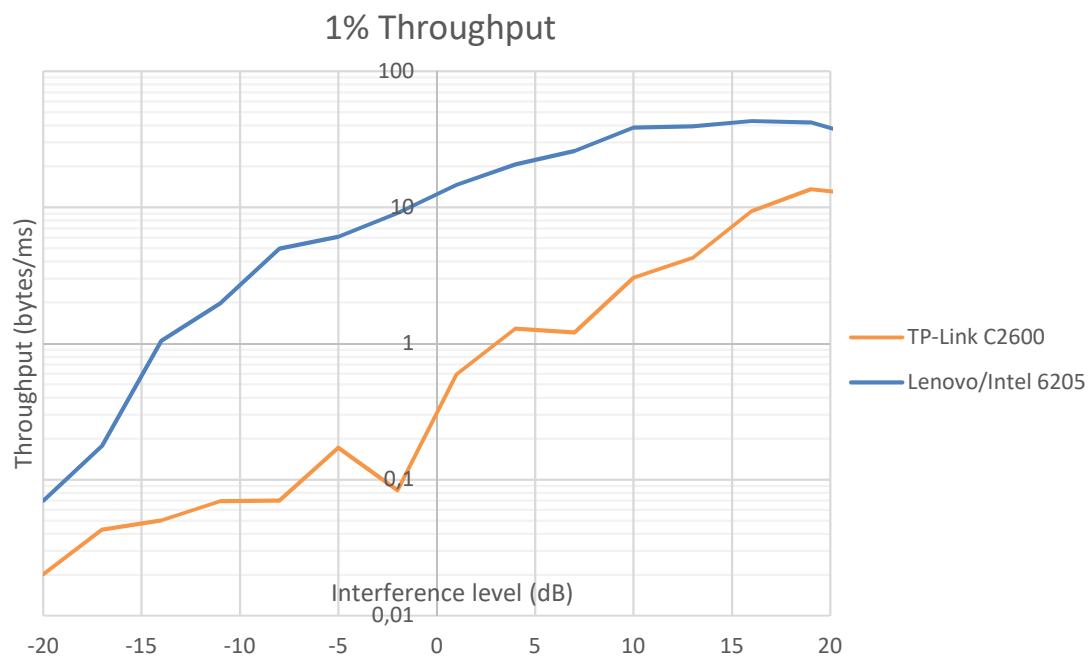


FIGURE 26. 1% Throughput.

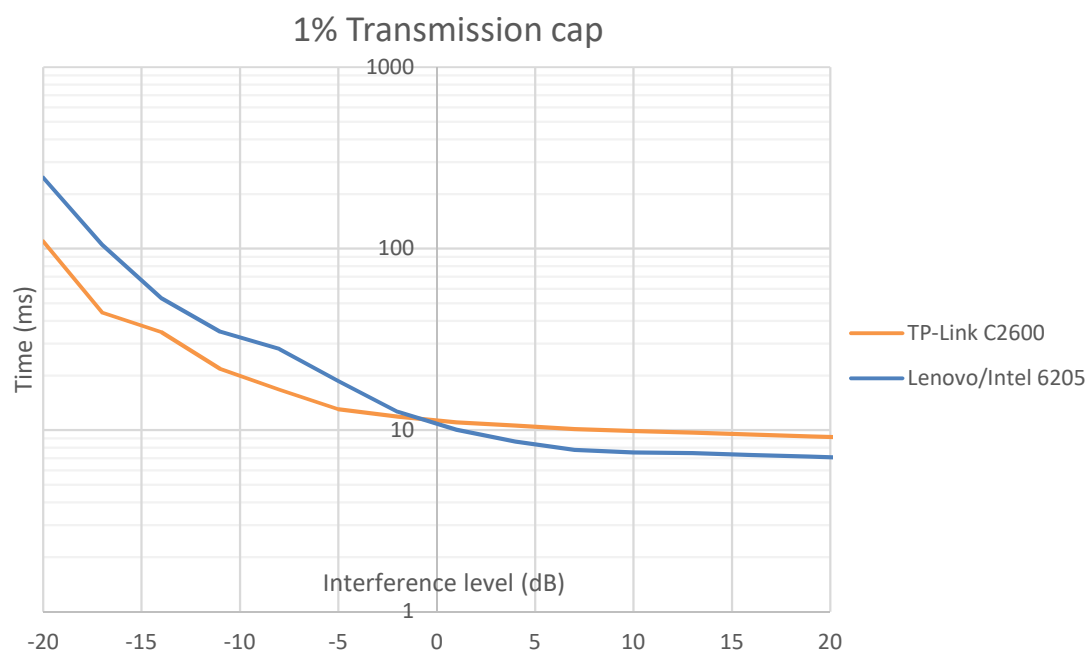


FIGURE 27. 1% Transmission cap.

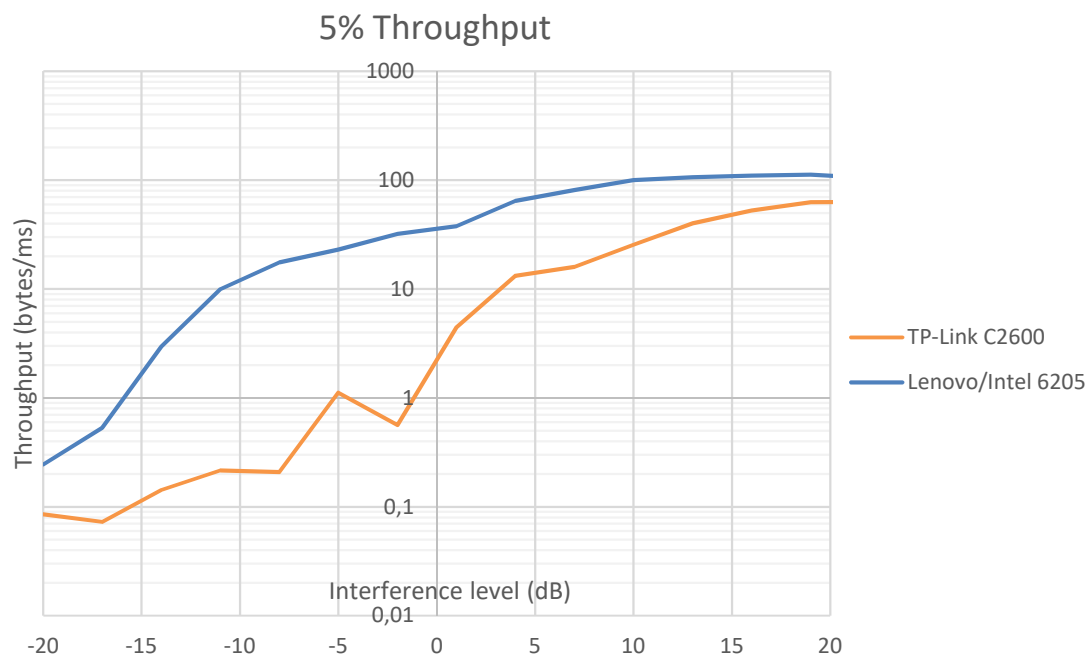


FIGURE 28. 5% Throughput.

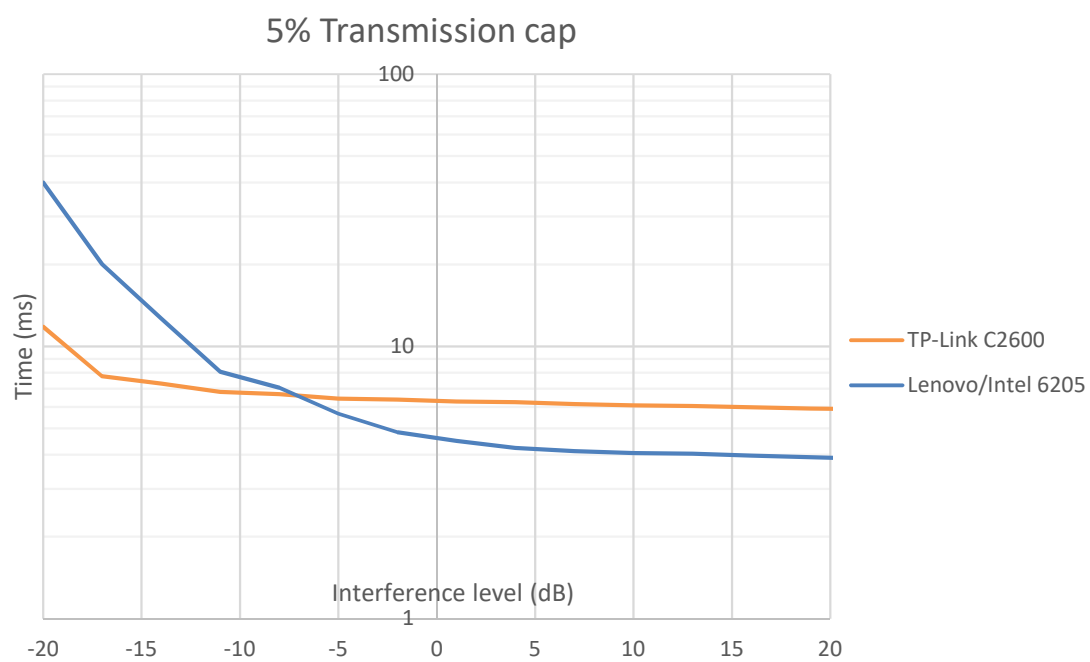


FIGURE 29. 5% Transmission cap.

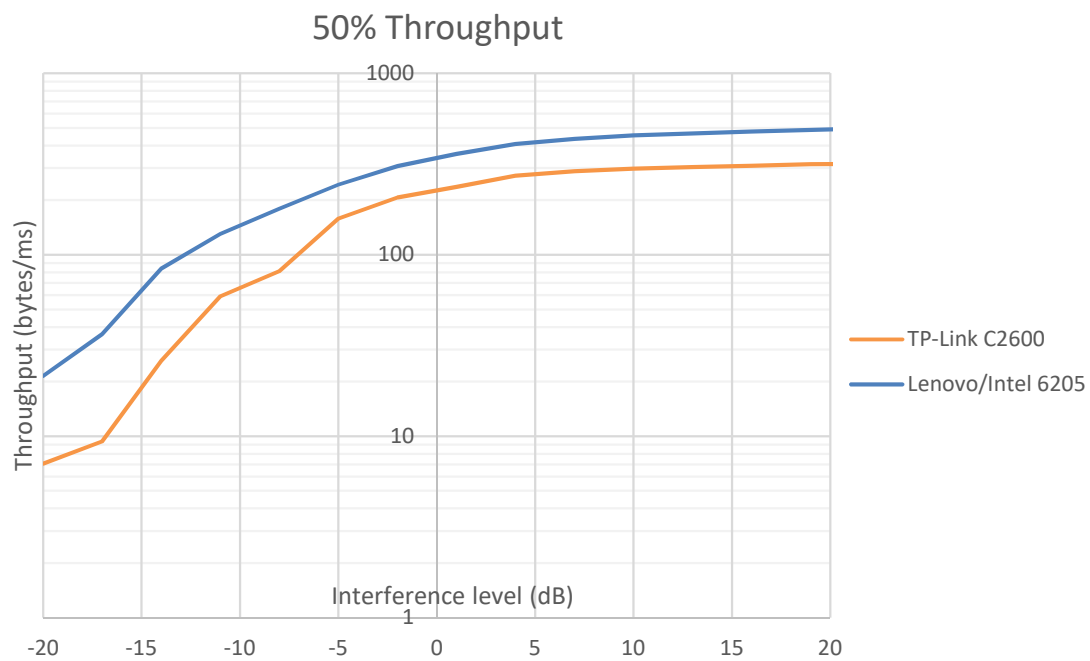


FIGURE 30. 50% Throughput.

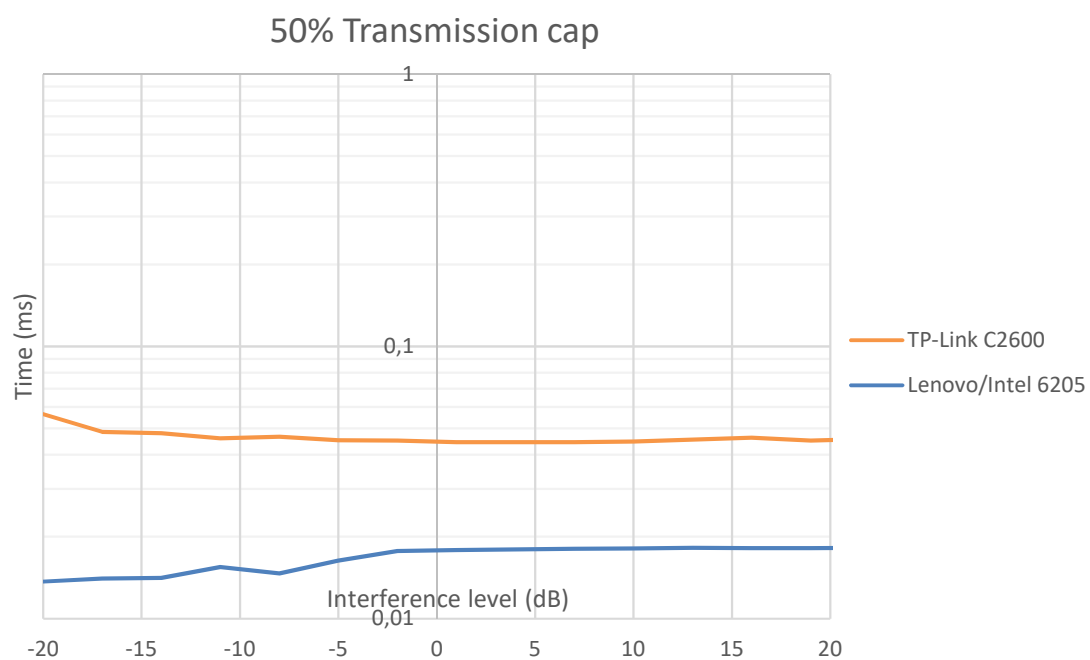


FIGURE 31. 50% Transmission cap.

## 7 CONCLUSIONS

The main objective of this thesis was to integrate the ReICOvAir test system in an anechoic chamber. This included connecting all the necessary hardware for the test system and test out the connections; creating or integrating the required software for the system; integrating the radio channel model and interference for the test system; running the tests with the test system; carrying out an integration test for the test system and the channel model according to the 3GPP TR37.977; comparing the results with other test systems and finding a solution for different results if needed.

The tasks that were carried out successfully included integrating the test system into an anechoic chamber and testing out the connections; coding the software that creates the connections, saves data and automates the measurement; integrating interference and the channel model into the test system. Most of the unsuccessful tasks were due to the absence of the ReICOvAir channel model. For example, it was not possible to integrate the ReICOvAir channel model into the test system, to carry out calibration testing for the test system or the channel model according to the 3GPP's standard; or to compare results with other systems. Although these tasks could not be completed, the thesis can be considered successful overall. Based on this work, it will be easy to continue validating the test system. When the ReICOvAir channel model is ready, it will be easy to continue integration testing according to the 3GPP's standard because the test system and its hardware are already connected and tested.

This thesis offered very specific learning opportunities for creating OTA test systems, including connecting the hardware used in measurements; programming test software; creating the channel model; and creating the test that verifies that the test system works as desired. Also, I learned a great deal about OTA-testing and RF in general. I believe that the knowledge obtained during this thesis will be useful in the future. This thesis also showed me good and bad aspects of working

in a larger project that involves multiple companies worldwide, especially how a delay in the tasks affects all participants of the project group and slows down the whole project.



## REFERENCES

1. ReICOvAir. 2017. PCR. Project document.
2. ReICOvAir. 2017. D2.4 - Hardware Testbed Design Report. Project document.
3. ReICOvAir. 2017. MTR. Project document.
4. ReICOvAir. 2017. D2.2 – Unified Control HL Design. Project document.
5. Fraunhofer IIS. 2018. ReICOvAir – Reliable Industrial Communication Over the Air. Date of retrieval: 10.12.2017.  
<https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/kom/iot/reicovair.html>
6. Satimo. 2011. Electric Sleeve Dipoles. Date of retrieval: 17.12.2017.  
[http://www.satimo.com/sites/www.satimo.com/files/sleevedipoles\\_dec2011.pdf](http://www.satimo.com/sites/www.satimo.com/files/sleevedipoles_dec2011.pdf)
7. CSE. 21.2.2007. Channel Models a Tutorial. Date of retrieval: 5.1.2018.  
[http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel\\_model\\_tutorial.pdf](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf)
8. Fraunhofer Heinrich Hertz Institute. 2017. Quasi Deterministic Radio Channel Generator User Manual and Documentation. Date of retrieval: 5.1.2018.  
[http://quadriga-channel-model.de/wp-content/uploads/2017/08/quadriga\\_documentation\\_v2.0.0-664.pdf](http://quadriga-channel-model.de/wp-content/uploads/2017/08/quadriga_documentation_v2.0.0-664.pdf)
9. 3GPP. 2017. 3GPP TR 37.977. Date of retrieval: 2.2.2018.  
<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2637>
10. Ettus Research. 2018. USRP X300. Date of retrieval: 10.1.2018.  
<https://www.ettus.com/product/details/X300-KIT>
11. Verkotan. 2018. Antenna and OTA Test Laboratory. Date of retrieval: 10.4.2018. <https://verkotan.com/antenna-and-ota-test-laboratory/>