

Marko Jalavisto

# WLAN-sisätilapaikannuksen tarkkuuden mittaus ja optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

4.4.2015

Tekijä Otsikko	Marko Jalavisto WLAN-sisätilapaikannuksen tarkkuuden mittaus ja optimointi
Sivumäärä Aika	35 sivua + 2 liitettä 3.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Digitaalinen media
Ohjaaja	Lehtori Olli Alm
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka ammattikorkeakoulun kampuksella toimivaa sisätilapaikannusjärjestelmää voitaisiin kehittää järjestelmän tarkkuuden parantamiseksi. Työssä selvitettiin erilaisia mittausmenetelmiä, joilla tilojen profiileja voidaan mitata, ja sitä, miten saadaan kattavin signaalikarttaprofiili luotua tilasta. Työssä myös keskityttiin laitteistoeroavuuksien tasaamisen, jotta yhdellä laitteella mitattua signaalikarttaa voidaan verrata myös muilla laitteilla otettuihin näytteisiin.</p> <p>Tilaprofiilien tutkimista varten kehitettiin sovellus, joka tuottaa vertailukelpoista informaatiota sekä tekstimuodossa että graafimuodossa. Tarkkuuden kehittämiseksi tilat kannattaa mitata parhaimmin tilassa näkyvät tukiasemat havaitsevalla menetelmällä, vaikka menetelmä on hitaampi kuin jotkin muut menetelmät. Sovelluksesta saaduilla näyteprofiileilla kehitettiin toinen sovellus, jonka avulla vertailtiin laitteistoeroavaisuuksien vaikutuksia havaittuihin signaalivoimakkuuksiin. Laitteiden välisiä eroja oli tarkoitus tasata ohjelman luomalla kalibraatioprofiililla, mikä mahdollistaisi yhden kartan käytön kaikilla laitteilla, koska näytteiden arvoja kyettäisiin muuttamaan koneellisen vertailun mahdollistamiseksi. Työssä huomattiin, että laitteistoerot eivät pysy laitteiden välillä vakiona, jolloin kalibrointi ei onnistu työssä käytetyllä menetelmällä.</p> <p>Työn lopputuloksena todettiin, että nykyiseen sisätilapaikannusjärjestelmään ei voida kehittää varmaa kalibraatiota, jolla kaikki laitteet saataisiin toimimaan tarkemmin järjestelmän kanssa, mutta työtä tehdessä saatiin kuitenkin suosituksia järjestelmän jatkokehittämiseen, kuten menetelmä huoneiden profiilin mittaamiseen.</p>	
Avainsanat	sisätilapaikannus, kalibrointi, mittaus

Author Title	Marko Jalavisto Improving and optimizing accuracy of indoor positioning system
Number of Pages Date	35 pages + 2 appendices 3 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Digital Media
Instructor	Olli Alm, Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to find out how it is possible to improve the accuracy of indoor positioning system in use at campus of a Finnish university of applied sciences. First, the project investigated the effects of different methods of measuring the fingerprints of rooms to create best possible mapping profile for rooms. Secondly, the project concentrates on equalizing differences found in signal strength observation on different client-side devices. To enable the measured fingerprint map of the university premises to be used accurately on multiple devices, the differences in device observations had to be calibrated to correspond to those of the base-fingerprinting device.</p> <p>To study the differences in fingerprinting methods, a program was developed to create comparable data in text and graph formats. It was found out that to improve accuracy it is best to select method that covers most of base station signals found in the room. With data created by the PythonPlotter program, another program was developed to compare the differences in devices' perception of signal strength. With the calibration program the intention was to create calibration profiles that could be used for equalizing differences in devices, enabling the option of comparing the base-fingerprint to every device.</p> <p>As result, it was found that with the current indoor positioning system it is impossible to create calibration that would work in all situations, But as result of this multiple suggestions to improve the accuracy of indoor positioning system were found.</p>	
Keywords	indoor positioning, calibration, sampling

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sisätilapaikannuksen periaatteita	2
2.1	Sisätilapaikannuksen menetelmät	3
2.2	WLAN-sisätilapaikannus sormenjälkimenetelmällä	5
2.3	WLAN-sisätilapaikannuksen tarkkuus	6
3	Tilojen sormenjäljen mittaaminen	8
3.1	Huomioitavat tekijät	8
3.2	Mittausmallit	11
3.3	Tilavertailu	16
4	Kalibrointisovellus	24
4.1	Mittaukset	24
4.2	PythonCalibrator-sovellus	28
4.3	Mittaustulokset	28
4.4	Kalibraation luominen	32
5	Yhteenveto	34
	Lähteet	36
	Liite 1. Ensimmäisen kalibraatiomittauksen data	
	Liite 2. Toisen kalibraatiomittauksen data	

## Lyhenteet

GNSS	Global Navigation Satellite System. Satelliittien lähettämiin radiosignaaleihin perustuva paikannusmenetelmä.
TOF	Time of Flight. Radiosignaalin käyttämä aika lähettimen ja vastaanottimen välillä.
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkko.
BSSID	Basic Service Set Identifier. Laitteen MAC-osoite
MAC	Media Access Control. Verkkolaitteen yksilöllinen tunniste.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol. Hypertekstin siirtämiseen käytettävä protokolla.

## 1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on kehittää menetelmiä, joilla voidaan mitata langattomiin lähiverkkoihin (WLAN) perustuvan sisätilapaikannuksen tarkkuutta ja kokeilla uusia ratkaisuja, joilla paikannuksen tarkkuutta saadaan parannettua. Työssä tehtäviä mittauksia ja ratkaisuja sovelletaan Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran kampuksella käytössä olevaan paikannusjärjestelmään.

Työssä tutkitaan menetelmiä, joilla nykyisen järjestelmän tarkkuutta pyritään mittaamaan ja kehittämään. Jotta sovelluksen tarkkuutta kyetään kehittämään, on tärkeää saada tilojen erottelu toimimaan luotettavasti ja tarkasti. Tilojen erottelun kannalta on oleellista luoda tiloille selkeästi erotettava sormenjälki, joka on kuitenkin helppo ja nopea luoda. Sormenjälkien vertaamiseksi työssä kehitetään sovellus, joka luo numeerista ja visuaalista dataa.

Tarkkuuden kehittämiseksi tutkitaan, minkälaisia vaikutuksia näytteenottotavalla on paikannusprofiilin muodostamiseen. Tilojen vertailuun vaaditaan esitystapa, josta profiilien eroja on helppo vertailla sekä silmämääräisesti että koneellisesti. Tilaprofiilien vertailun lisäksi insinööriyön tavoitteena on kehittää sovellus, jonka avulla paikannusjärjestelmässä kyettäisiin korjaamaan laitteistoeroista johtuva epätarkkuus luomalla kalibraatioprofiileja. Kalibraatioprofiilin tarkoitus olisi sovittaa erilaisten päätelaitteiden lähettämiä näytteitä vastaamaan palvelimella olevaa sormenjälkeä.

## 2 Sisätilapaikannuksen periaatteita

Sisätilapaikannuksen tarve on lisääntynyt viime vuosina, ja kasvaneen tarjonnan ansiosta se on yleistymässä jatkuvasti. Ulkotiloissa on yleisesti käytössä satelliittipaikannus, joka ei kuitenkaan sovellu sisätilapaikannukseen teknologian luonteen vuoksi. GNSS-teknologia käyttää hyväkseen paikannussatelliittien lähettämää radiosignaalia, josta lasketaan signaalin matka-aika, jonka avulla voidaan määrittellä käyttäjän sijainti. Satelliittien radiosignaali ei läpäise rakenteita, joten niiden kuuntelua ei kyetä hyödyntämään sisätiloissa. [1.]

Radiosignaaleja voidaan käyttää kolmella eri tavalla avuksi paikannuksessa: signaalin suunta, signaalin kulkeman matkan mittaus ja signaalin nopeuden mittaus. Signaalin suunnan mittaaminen vaatii yleensä pyörivän antennin, jotta signaalilähteen suunta pystytään määrittelemään tarkasti, eikä siksi sovellu pienikokoisiin mobiililaitteisiin. Kun signaalilähteiden sijainti suhteessa käyttäjän sijaintiin on tiedossa, käytettävä menetelmä on usein etäisyyden mittaaminen. Etäisyyden mittaamiseen voidaan käyttää monenlaisia menetelmiä, kuten time of flight (TOF), jossa mitata radiosignaalin matkaan käyttämää aikaa [1]. Mikäli signaalilähteiden, eli WLAN-sisätilapaikannuksessa tukiasemien, sijainnit eivät ole tiedossa, voidaan hyödyntää signaalivoimakkuuksista mitattua karttaa, johon käyttäjän lähettämää signaaliprofiilia vertaamalla voidaan laskea käyttäjän sijainti [2; 3].

Sisätilapaikannuksessa käytetään yleisesti hyväksi WLAN-verkkojen radiosignaaleita, koska monissa kohteissa, joissa sisätilapaikannukselle on tarvetta, on valmiina kattava WLAN-infrastruktuuri. WLAN-verkkojen hyödyntämisessä käytetään signaalivoimakkuuden mittaamiseen perustuvia ratkaisuja, koska yleisesti paikannukseen käytettävässä laitteistossa on huonot mahdollisuudet muiden radiosignaalin ominaisuuksien mittaamiseen. [1.]

Sisätilapaikannuksessa ongelmallista on usein päätelaitteiden eriävät havainnot tiloista, minkä seurauksena kerätyn paikkadatan sovittaminen muille päätelaitteille on merkittävä haaste [1; 3]. Ongelmaan haetaan ratkaisuja monin keinoin, joista työssä perehdytään kalibrointiin laitteiden välillä. Kaupallisissa ratkaisuissa on korjattu yhdistelemällä sisätilapaikannusmenetelmiä, jolloin voidaan käyttää useita päätelaitteen sensoreita paikannuksen apuna [1; 2].

Laitteistoeroista johtuva paikannusepätkä tarkkuus voidaan poistaa käyttämällä vakioitua päätelaitetta, jolloin kaikkien laitteiden havainnot ovat suoraan verrattavissa toisiinsa. Työssä keskitytään laitteistoihin, jotka eivät ole vakioituja ja siksi vaativat kalibroinnin laitteistojen välillä.

Sisätilapaikannusjärjestelmän käytettävyyden kannalta on tärkeää, että käyttäjän ei tarvitse tehdä monimutkaisia toimenpiteitä, jotta paikannus toimii. Tärkeää on, että käyttäjän sijainti löytyy luotettavasti ja nopeasti sovelluksen käynnistämisen jälkeen. Kalibraation näkökulmasta tämä aiheuttaa tarpeen käyttäjän kannalta yksinkertaiseen toimenpiteeseen, joka on helppo käyttäjän toteuttaa esimerkiksi seisomalla tietyssä paikassa rakennuksessa kalibroimassa sovellus. Sovelluksen käyttökohteesta ja käyttötarkoituksesta riippuen on tärkeää, että käyttäjä kyetään paikallistamaan riittävän tarkasti ja käyttäjän liikkeitä kyetään seuraamaan vaadittavalla nopeudella. [1; 2.]

## 2.1 Sisätilapaikannuksen menetelmät

Sisätilapaikannukseen vaaditaan päätelaite, joka kykenee havaitsemaan eroja tiloissa käyttäjän siirtyessä. Sisätilapaikannukseen on käytetty yleisesti päätelaitteista valmiiksi löytyviä sensoreita tai antennia, joiden määrä on kasvanut runsaasti älypuhelimien käytön lisääntyessä. Useat paikannusmenetelmät hyödyntävät paikannuksessa päätelaitteen yhteyksiä, kuten WLAN tai bluetooth. Myös menetelmiä, joissa hyödynnetään päätelaitteen muita sensoreita, kuten kiihtyvyyssanturia, on käytetty sisätilapaikannukseen. [1; 2; 3.]

Sisätilapaikannuksessa esiintyvien epätarkkuuksien, kuten sensorien epätarkkuuden tai laitteiston eroavuuksien, kompensoimiseksi on usein hyödyllistä sisällyttää paikannusmenetelmään myös sääntöjä, joiden avulla voidaan seurata käyttäjän aiempia mitattuja sijainteja. Heuristiikan avulla pystytään estämään siirtymiä, jotka eivät ole fyysisesti mahdollisia, vaan tapahtumat, kuten kerrostenvaihdokset, ovat mahdollisia vain portaikoissa tai hisseissä. Päätelaitteen tilojen välistä siirtymistä rajataan, mikäli tiloissa ei ole yhteyttä toiseen tilaan, jolloin voidaan päätellä, että siirtymää ei ole voinut tapahtua. Heuristiset operaatiot vaativat kuitenkin tiedon käyttäjän aiemmista liikkeistä, jotta niiden avulla voidaan arvioida käyttäjän nykyistä sijaintia, ja niiden on tarvittaessa osattava ottaa myös huomioon mahdolliset virhemittaukset, jotka voivat aiheuttaa väärän

tilan näkymisen käyttäjälle. Virhemittauksia voidaan pyrkiä erottelemaan luotettavasta tiedosta erilaisilla virhesuodattimilla. [4.]

## **WLAN**

WLAN-sisätilapaikannus on yleisesti käytössä oleva sisätilapaikannusteknologia. Sen yleisyys johtuu vähäisestä tarpeesta lisäinvestoinneille järjestelmää rakennettaessa, koska WLAN-tukiasemien infrastruktuuri on saatavilla monin paikoin. WLAN-sisätilapaikannus perustuu yleisesti tukiasemien lähettämien radiosignaali-voimakkuuksien mittaamiseen, ja niiden perusteella käyttäjälle lasketaan arvioitu sijainti tiloissa. Käyttäjän sijaintia arvioidaan vertaamalla käyttäjän laitteen havaitsemien tukiasemasignaalien profiilia palvelimella olevaan tietoon tiloissa havaittavista tukiasemasignaaleista. [1; 2; 3.]

## **Inertia**

Inertiaan perustuvassa paikannuksessa hyödynnetään tietoa laitteen kiihtyvyydestä, nopeudesta ja jatkuvasta liikkeestä. Tärkeä etu inertia- ja paikannuksessa on riippumattomuus ulkopuolisesta infrastruktuurista. Koska sijainnin seuranta onnistuu ilman ulkoisia laitteita, voidaan inertia- ja paikannusta soveltaa myös käyttökohteissa, joissa ei ole saatavilla tarvittavia laitteistoja muille paikannusmenetelmille. Inertia- ja paikannuksen ongelmana on yleisesti käytön aikana kasvava epätarkkuus: mittausten lisääntyessä pienet virheet kertautuvat, mikä johtaa sijainnin epätarkkuuteen. Paikannuksen suhteuttaminen muuhun kuin laitteen aikaisempaan sijaintiin vaatii myös tiedon lähtöpaikan sijainnista suhteessa vertailuympäristöön. [1.]

## **Bluetooth**

Bluetooth- ja paikannus perustuu sisätiloihin asennettaviin Bluetooth-majakoihin, joiden sijainti on järjestelmän tiedossa. Käyttäjän yhdistäessä palvelimeen voidaan sijainti päätellä yhdistettyjen majakoiden tunnisteen avulla. Järjestelmän ongelmana on majakoiden signaalien lyhyt kantama verrattuna WLAN-signaalien pitempään kantamaan. Joissakin järjestelmissä hyödynnetään myös päätelaitteiden muodostamaa verkkoa kantaman parantamiseksi. Järjestelmässä voidaan käyttää apuna käyttäjälaitteiden luomaa verkkoa, jonka avulla kantamaa voidaan parantaa. [5.]

## RFID

RFID-tunnisteisiin perustuva paikannus perustuu yleensä helposti havaittaviin paikkoihin sijoitettujen tunnisteiden lukemiseen. Tunnisteiden lukeminen vaatii kuitenkin usein käyttäjältä toimia, jolloin kynnyks järj estelmän käyttämiseen kasvaa. Järj estelmän ongelmana on lyhyt lukuetaisyys passiivisten tunnisteiden yhteydessä ja suuret käyttöönottokustannukset aktiivisten tunnisteiden yhteydessä. [6.]

## Hybridijärj estelmät

Hybridijärj estelmät yhdistävät kaksi tai useampia teknologioita ja kompensoivat järjestelmien heikkouksia toisella järjestelmällä. Käyttämällä langattomiin verkkoihin perustuvaa järjestelmää yhdessä inertiaan perustuvan järjestelmän kanssa voidaan järjestelmän tarkkuutta parantaa huomattavasti pelkästään toiseen järjestelmään perustuvaan ratkaisuun verrattuna. RFID- tai Bluetooth-majakoilla voidaan avustaa WLAN-paikannusta tarkentamaan sijaintiaan, kun järjestelmä havaitsee tiloihin sijoitetun majakan, mutta majakoiden ei tarvitse olla välittömästi toistensa läheisyydessä, vaan paikannusta voidaan soveltaa muilla keinoilla. [4.]

### 2.2 WLAN-sisätilapaikannus sormenjälkimenetelmällä

WLAN-sisätilapaikannusmenetelmistä tutustutaan fingerprinting- eli niin sanottuun sormenjälkimenetelmään. Sormenjälkimenetelmä perustuu tilojen esimitauksiin, joiden perusteella tiloissa havaitut radiosignaalien voimakkuudet kartoitetaan ja tallennetaan tietokantaan palvelimelle. Tämän kartan ajatellaan olevan tilan yksilöllinen sormenjälki. Palvelimella olevaa karttaa verrataan käyttäjän laitteen lähettämään mittaukseen havaituista radiosignaali voimakkuuksista, minkä perusteella palvelin palauttaa käyttäjän sijainnin.

Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksella käytössä oleva sisätilapaikannusjärjestelmä perustuu sormenjälkimetodiin, jossa mitattujen radioaaltojen signaali voimakkuuksia ja lähetimien BSSID-tunnisteita verrataan palvelimella oleviin ennalta mitattuihin arvoihin ja niiden perusteella arvioidaan käyttäjän sijaintia.

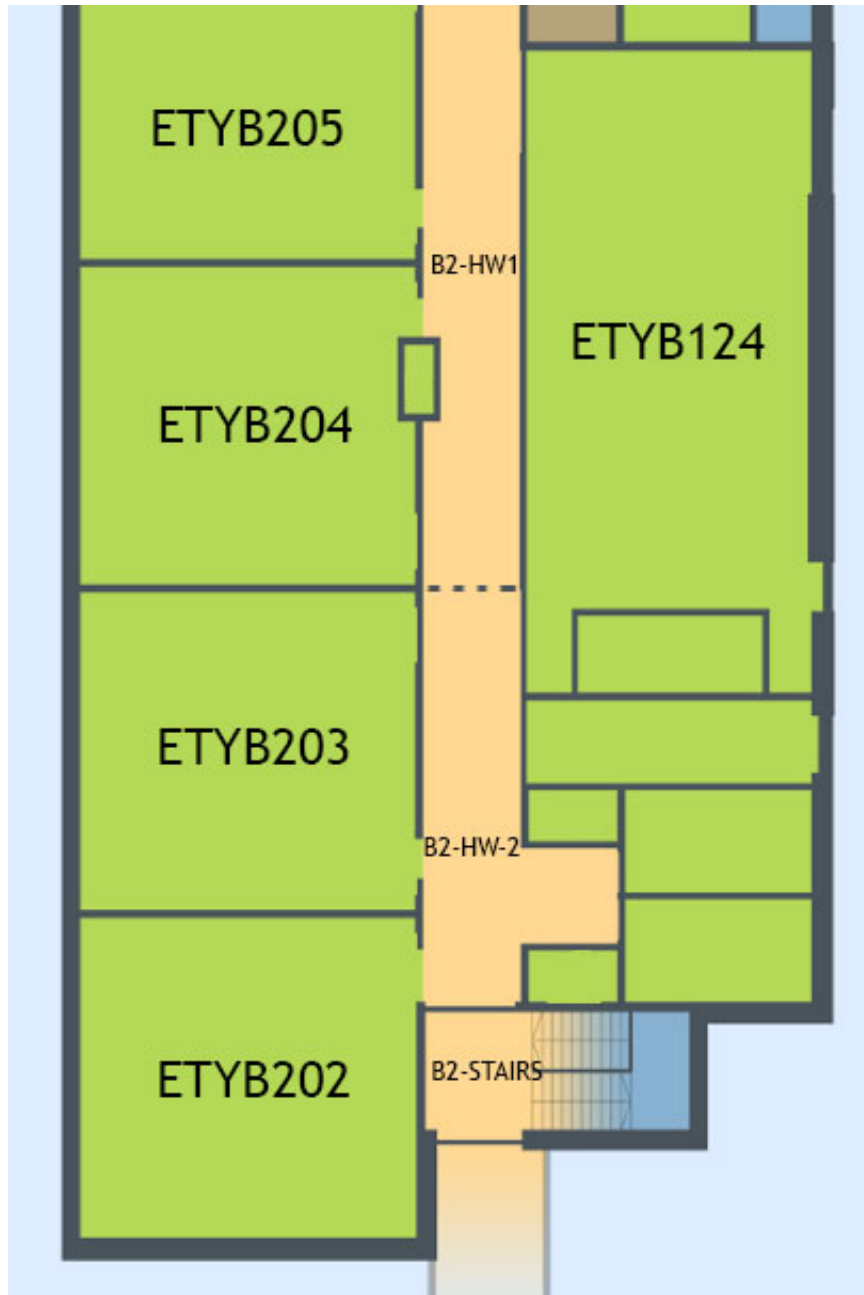
Metropolian paikannusjärjestelmä toimii Naive Bayes -luokittimen avulla, jossa näytteiden lähetysvoimakkuutta verrataan diskreettinä datana, joka on jaettu luokkiin 10 dB:n asteikolla. Naive Bayes -luokitin laskee saamastaan näytteestä käyttäjän todennäköisimmän sijainnin vertaamalla sitä jo olemassa oleviin näytteisiin ja huomioi jokaisen havaitun verkon täysin itsenäisenä kokonaisuutena. [7.]

Paikannusjärjestelmä on toiminnassa Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksella, ja palvelun pohjalle on kehitetty testiohjelmistoja, jotka hyödyntävät mobiililaitteista löytyviä WLAN-antenneja. Antenneilla mitataan laitteelle kuuluvat verkot, joista tieto lähetetään palvelimelle, joka palauttaa käyttäjän sijaintitiedon HTTP-protokollan välityksellä.

Testisovelluksia ovat KaNa – Kampus Navigator, joka kertoo käyttäjälle tämänhetkisen tilan nimen, ja MetroNavi, joka näyttää kartalla käyttäjän sijainnin palvelimelta saamansa tilatiedon perusteella.

### 2.3 WLAN-sisätilapaikannuksen tarkkuus

WLAN-sisätilapaikannusta toteutettaessa on otettava huomioon järjestelmältä vaadittava tarkkuus. Toisin kuin GNSS-paikannuksessa WLAN-sisätilapaikannuksessa ei ole aina tarpeen saada käyttäjän koordinaatteja esimerkiksi pituus- ja leveysasteina, vaan hyödyllisempi tieto voi olla tilan nimi, jossa käyttäjä sijaitsee. Joissakin yhteyksissä on kuitenkin tarpeellista saada tarkempaa tietoa käyttäjän sijainnista tilassa, jolloin tiloja voidaan jakaa useisiin osiin. Kuvassa 1 havainnollistetaan tilojen nimeämistä ja käytävätilojen jaottelua pienempiin osiin joko luonnollisten jakajien avulla tai käyttäjätarpeiden mukaisesti.



Kuva 1. Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksen B-puolen 2. kerroksen tilojen nimeämisesimerkki.

Tärkeä elementti sisätilapaikannuksen tarkkuudessa on tilojen erottuvuus. Jotta järjestelmä voisi paikantaa käyttäjän tilaan, on tilojen profiileihin saatava koneellisesti havaittavia eroja. Päällekkäisyyksien tulisi olla mahdollisimman vähäisiä, jotta järjestelmä pystyy yksiselitteisesti valitsemaan käyttäjän sijainnin ja tilanteita, joissa käyttäjä voidaan paikantaa useaan sijaintiin samalla mittauksella ei syntyisi.

Sormenjälkien tarkkuutta suunniteltaessa on hyvä ottaa huomioon, että liian pienet alueet sekoittuvat helposti keskenään, koska sormenjäljet ovat hyvin samankaltaiset, mutta myös liian isoiksi valituilla alueilla ongelmaksi muodostuvat suuret erot mitattujen verkkojen voimakkuuksissa. [1; 2; 3.]

Sormenjälkien tarkkuuteen voidaan vaikuttaa myös jättämällä huomioimatta tilapäiset ja mahdollisesti liikkuvat verkot, joita voi syntyä muiden käyttäjien laitteistoista. Sormenjälkiä kartoitettaessa olisi hyvä tehdä mittauksia useana ajonkohtana, jotta voidaan poistaa juuri tilapäisesti näkyviä verkkoja tai hyödyntää tietoa luotettavista tukiasemista. Sormenjälkiä voidaan myös moninaisten menetelmien avulla korjata käyttäjien lähettämien sijaintikyselyiden perusteella. Mikäli järjestelmä kykenee sijoittamaan käyttäjän tarpeellisella varmuudella tilaan mutta monissa näytteissä havaitaan poikkeavia verkkoja, voidaan karttaa korjata vastaamaan viimeisintä tietoa. Tämänkaltainen mallin automaattinen korjaantuminen vaatii kuitenkin paljon näytteitä, jotta voidaan estää tilapäisten muutoksien siirtyminen karttaan. [3; 8.]

### **3 Tilojen sormenjäljen mittaaminen**

#### **3.1 Huomioitavat tekijät**

Sormenjälkiä mitattaessa on huomioitava radiosignaalien luonteeseen liittyviä ongelmia, jotka saattavat vaikuttaa tilan profiiliin ja tilojen eroteltavuuteen. Jotta tilojen sormenjäljestä saataisiin yhtenäinen kuva, on mittaukset hyvä suorittaa samoissa olosuhteissa jokaisen tilan kohdalla. Työtä varten tehdyissä mittauksissa varmistettiin, että mitattavien tilojen ovet ja ikkunat olivat suljettuja ja tiloissa ei ollut mittauksia suorittavan henkilön lisäksi muita ihmisiä.

#### **Heijastuminen**

Radioaaltojen heijastuminen vaikuttaa mittausten tarkkuuteen, ja mittauksia suoritettaessa tulisi huomioida mahdolliset heijastuksiin vaikuttavat tekijät, jotta tilasta saataisiin todellisesta käyttöä vastaava profiili. Heijastuksia voidaan ohjelmallisesti hallita huomioimalla tukiasemien signaaleista vain voimakkain kuuluvuus ja jättämällä huomioimatta heikommat kuuluvuudet, jotka todennäköisesti johtuvat signaalin reiteistä, jotka

ovat heijastuneet pidemmän matkan kautta. Heijastuneita signaaleita voidaan myös erotella signaalin matka-ajan perusteella ja huomioida vain pienimmällä matka-ajalla saapuva signaali, mutta signaalista ei voida kuitenkaan suoraan päätellä, onko sen reitti lähettimeltä suora vai onko signaali heijastunut muuta reittiä. [9; 10.]

### **Pintamateriaalit**

Radiosignaalien voimakkuuteen vaikuttavat signaalin heijastumisen lisäksi mahdolliset esteet, joita signaalilähteen ja vastaanottimen välissä on. Kevyet rakennusmateriaalit, kuten puu ja kipsilevyt, päästävät signaalin läpi vähemmällä vaimennuksella kuin raskaammat materiaalit, kuten betoni ja kivi. On myös materiaaleja, kuten metallit, joita heikkotehoisten WLAN-tukiasemien radioaallot eivät läpäise. [11; 12.]

Mikäli mitattavissa tiloissa on vähäinen määrä tukiasemia ja rakenteissa on käytetty runsaasti raskaita materiaaleja, joita radioaallot läpäisevät huonosti, on mahdollista, että mittaukset heikkenevät nopeasti ja tarkkaa sormenjälkeä ei saada luotua, koska tilassa ei kyetä havaitsemaan riittävällä tarkkuudella tarpeeksi radiosignaaleja.

### **Tilamuutokset**

Tilojen mittauksissa tulisi ottaa huomioon, että tila on mahdollisimman hyvin käyttöä vastaavassa tilassa mittauksia tehtäessä eikä siellä olisi ylimääräisiä esteitä, jotka vaikuttavat signaalien voimakkuuksiin. Tiloissa vaikuttavia tekijöitä voi olla muun muassa aukinainen ovi, josta signaali pääsee kulkemaan vapaasti toisin kuin oven ollessa suljettuna.

### **Sähkömagneettiset häiriöt**

Radiosignaaleiden kulkuun vaikuttaa myös muiden laitteiden aiheuttama sähkömagneettinen kenttä, jota saattaa aiheutua tilassa olevien elektronisten laitteiden käytöstä. Laitteiden aiheuttaman sähkökentän voimakkuus vaikuttaa radiosignaalin vääristymiseen. Sähkömagneettisten häiriöiden huomioiminen tiloissa, joissa on paljon elektroniikka-laitteita, on usein mahdotonta, ja niiden aiheuttama häiriö on hyväksyttävä ja pyrittävä korjaamaan ohjelmistotasolla. Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-

kampuksen tiloissa suoritetuissa mittauksissa arvioitiin sähkömagneettiset häiriöt muuttuvaksi tekijäksi tilan käytöstä riippuen, eikä niihin ei puututtu mittaustilanteessa. [13.]

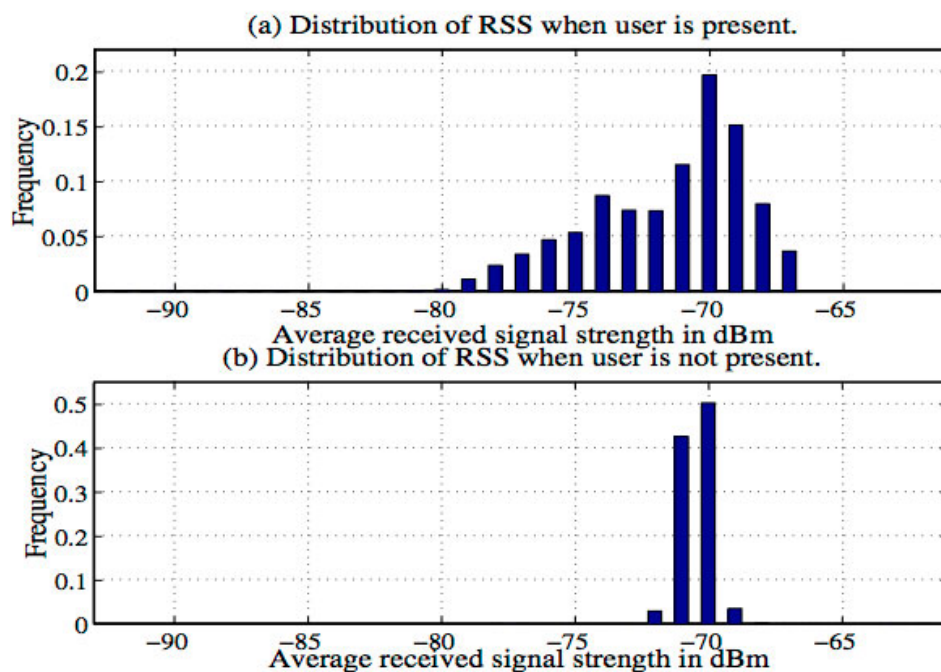
### **Tukiasemien muutokset**

Tärkeä tekijä WLAN-sisätilapaikannuksessa on tukiasemien sijainnin pysyvyys. Koska paikannus perustuu signaalivoimakkuuksiin, jotka ovat riippuvaisia signaalilähteen etäisyydestä ja välissä olevista materiaaleista, on tärkeää, että signaalilähde havaitaan samalla voimakkuudella. Kuitenkin on mahdollista, että tukiasemia joudutaan vaihtamaan tai niiden sijainti muuttuu, jolloin tilan sormenjälki muuttuu.

Mobiililaitteiden yleistyessä ovat myös yleistyneet liikkuvat tukiasemat, jotka täytyy ottaa huomioon mittauksia tehtäessä ja paikannusjärjestelmää suunniteltaessa. Niiden vuoksi mittauksia tulisi tehdä useita ja useista sijainneista tilan sisällä, jotta pystytään karsimaan tilapäiset tukiasemat tai mahdollisesti havaitsemaan tukiasemat, jotka ovat eivätkä ole lähettäneet radiosignaaleja aikaisemmissa mittauksissa.

### **Ihmisten vaikutus**

Radiosignaalien luonteen vuoksi jopa ihmisen keho vaikuttaa mittaustuloksiin, koska radiosignaali ei läpäise ihmisen kehoa vapaasti, vaan signaalin voimakkuus heikkenee sen kohdatessa esteen. Kuvassa 3 havainnollistetaan signaalivoimakkuuden heikkenemistä, kun signaali liikkuu vapaassa ilmassa tai kun välissä on ihmiskeho. Kuvassa näkyy merkittävä signaalitehon heikkeneminen ihmiskehossa, ja keskihajonta muuttuu 0,68 dBm:stä 3,0 dBm:ään käyttäjän ollessa läsnä. [3.]



Kuva 2. Signaalivoimakkuuden heikkeneminen ihmiskehossa. Y-akselilla on taajuus ja x-akselilla havaittu signaalivoimakkuus desibeleinä. [3.]

Kuvasta nähdään, miten -70 dB:n voimakkuudella ilman ihmiskehoa havaittu signaali hajoaa muilla signaalivoimakkuuksilla ja on merkittävästi heikompi läpäistyään ihmiskehon.

Mittauksia tehtäessä on suositeltavaa, ettei tilassa ole ylimääräisiä henkilöitä, ja optimaalisessa tilanteessa mittaukset suoritettaisiin tilassa mittaajan pitäessä mittauslaitteistoa käyttöolosuhteita vastaavassa sijainnissa kehon suhteen. Ihmiskehon vaikutuksia mittaustuloksiin voidaan kuitenkin minimoida mittaamalla saman pisteen arvot vaihtamalla ihmiskehon sijaintia, jotta kaikille signaalivoimakkuuksille saadaan arvo ilman ihmiskehon aiheuttamaa vaimentumista. [3.]

### 3.2 Mittausmallit

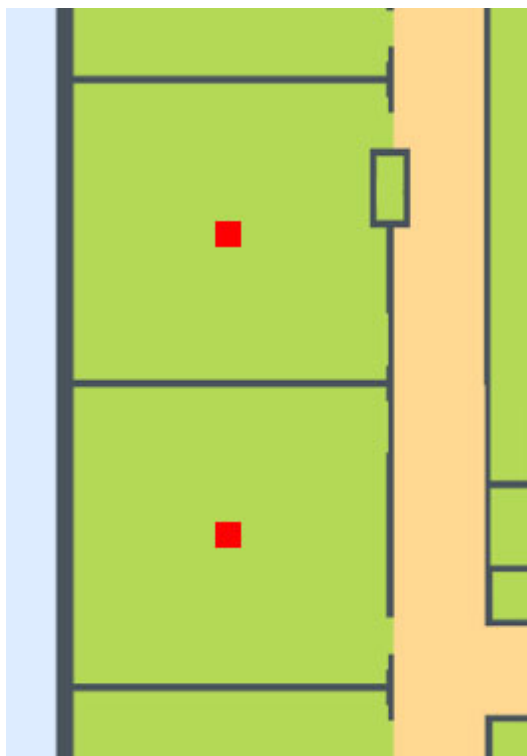
Metropolian kampuksella tehtiin mittauksia, joiden perusteella tutkittiin, minkälaiset mittausmallit sopivat parhaiten tilojen erotteluun. Mittauksia tehtäessä mitattavat tilat pyrittiin mittaamaan ovet suljettuina ja vain yhden henkilön ollessa läsnä tilassa, jotta mah-

dolliset ihmiskehon aiheuttamat vaimentumat jäisivät minimiin. Kaikki testimittaukset suoritettiin Samsung Galaxy S3 -puhelimella.

Tiloista tehtiin neljä erityyppistä mittausta, joista muodostettiin tilaprofiilit, joita vertailemalla tutkitaan parasta vaihtoehtoja tilojen mittaamiseen, jotta tilat kyettäisiin luotettavasti erottelemaan toisistaan ja käyttäjä kyettäisiin paikallistamaan oikein. Jotta paras erottuvuus saavutettaisiin, on tarpeellista saada tilojen profiilit kattaviksi ja selkeästi poikkeaviksi viereisten tilojen profiileista. Mittausreittien pituuksista riippuen mittauksista saatujen näytteiden määrä vaihtelee huomattavasti. Mallit valittiin osittain tehtyjen mittauksien perusteella ja pyrkien kehittämään nopea menetelmä, jonka avulla saataisiin kattava profiili tilasta. Piste- ja viivamallit valittiin niiden nopeuden takia vertailuun. Ympyrämalli valittiin sen kattavuuden puolesta, mutta huonona puolena arvioitiin olevan mahdolliset tiloissa olevat esteet ja menetelmän hitaus. Ristimallissa pyrittiin yhdistämään viivamallin nopea mittaus, kuitenkin säilyttäen mittaukset mahdollisimman kattavina huoneen alaan nähden.

### **Pistemalli**

Pistemallissa mittaukset tehtiin tilan keskellä ottamalla näytteitä mittauslaitteen ollessa kohdistettuna eri suuntiin ja vaihtamalla käyttäjän sijaintia laitteeseen nähden, jotta vaimentuma ei näkyisi vain yksittäisessä kohdassa. Kuvassa 3 näkyvässä pohjapiirroksessa on havainnollistettu punaisella pisteellä näytteidenottoa.

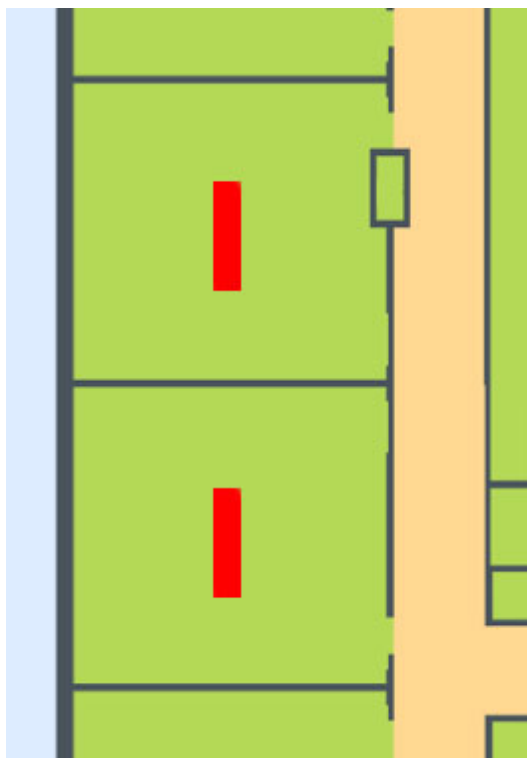


Kuva 3. Pistemallin mittauskohdat merkittynä punaisella tilan keskellä.

Pistemallissa mittaus tuloksia on vähäisin määrä, koska mittalaite on samassa sijainnissa ja data pysyy samankaltaisena näytteissä. Pistemalli on mittauksista nopeimmin toteutettava, koska mittalaitteisto voidaan kääntää eri suuntiin sen ollessa samassa sijainnissa eikä mittaus vaadi käyttäjän liikkumista huoneessa.

### **Viivamalli**

Viivamallissa mittauslaitetta pidettiin mittaajan edessä ja viiva kuljettiin molempiin suuntiin, jotta saataisiin molemmista suunnista näkyvät verkot mitattua sekä mittaajan kehon vaimentaessa signaalia että ilman. Kuvassa 4 havainnollistetaan mittausreittiä.

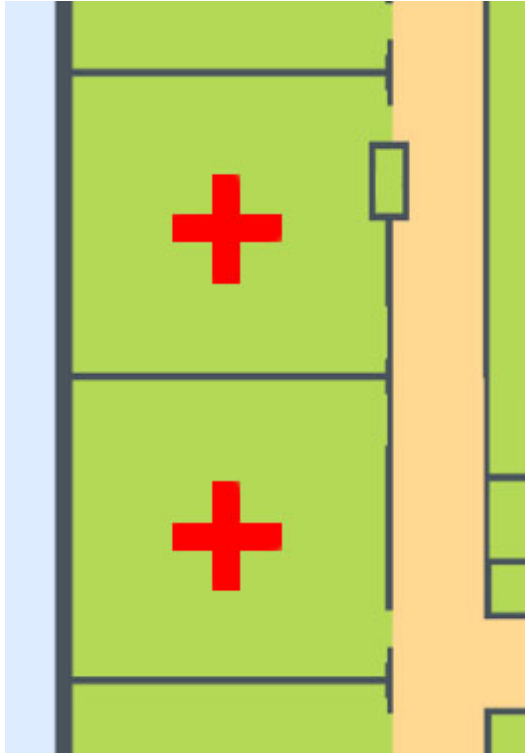


Kuva 4. Viivamallin mittausreitit merkittynä kuvaan punaisella.

Viivamallin mittaukset tehtiin tiloissa sijaitsevien esteiden sallimissa rajoissa mahdollisimman keskellä tilaa. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin mittausasetelman pitäminen samanlaisena tilojen välillä, koska tilojen kalustus vaihtelee. Viivan suunnan valinta on myös vaikea perustella ennen varsinaisia mittaustuloksia, jolloin nähdään selkeämmin, kummalla tekniikalla havaitaan kattavampi kuva tilassa havaittavista verkoista.

### **Ristimalli**

Ristimallissa mittaukset toteutettiin samalla tavalla kuin viivamallissa on, mutta mittausreittiin lisättiin viivamalliin suhteen poikittainen mittaus. Kuvassa 5 on havainnollistettu mittausreittiä.

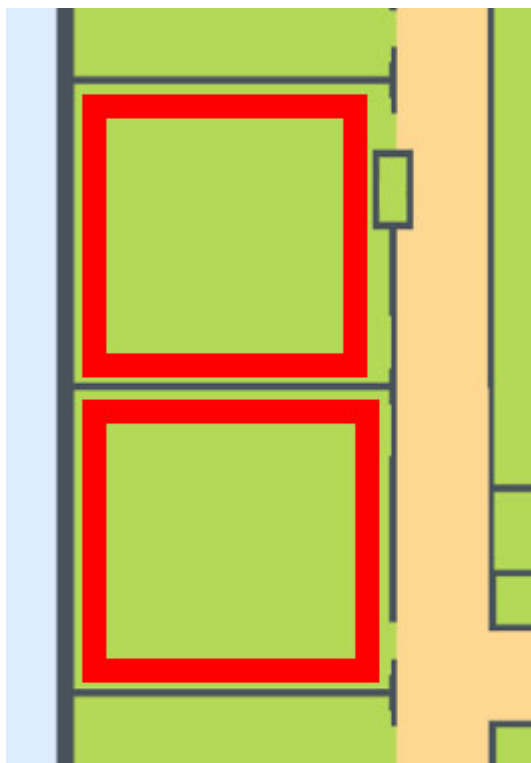


Kuva 5. Ristimallin mittausreitit merkittynä kuvaan punaisella.

Ristimallissa poistuu viivamallin ongelma suunnan valinnassa, mutta edelleen on valittava, suhteutetaanko ristin koko tilan kokoon vai tehdäänkö mittaukset samankokoisella alueella tilan keskellä riippumatta tilan koosta.

### **Ympyrämalli**

Ympyrämallissa tilat mitattiin kulkemalla tilan seinustoja pitkin kierros. Jotta mittajaan kehon vaikutukset tuloksiin saataisiin minimoitua, mittaukset tehtiin kiertäen tila sekä vasta- että myötäpäivään. Kuvassa 6 on havainnollistettu reittiä tilan seinustoilla.



Kuva 6. Ympyrämallin mittausreitti merkittynä kuvaan punaisella.

Ympyrämalli on kaikista mittauksista selkeästi hitain toteuttaa, koska mittalaitteistolla kierretään tila molempiin suuntiin osoittaen, jotta saadaan minimoitua mittausta tekevän henkilön aiheuttama heikkenemä signaaleista, jotka tulevat mittajaan suunnalta. Ympyrämalli on kuitenkin mittausmalleista yksinkertaisin toteuttaa, koska tilasta ei tarvitse etsiä keskipistettä tai valita mittausaluetta, vaan tilan rajat rajaavat mittausalueen.

### 3.3 Tilavertailu

Tilojen vertailua varten jouduttiin miettimään, miten mitattuja profiileja kyettäisiin vertaamaan toisiinsa niin, että olisi helppo havainnollistaa mittauksien eroja ja samalla esittää visuaalisesti, miten kahden eri tilan profiilit eroavat toisistaan. Samalla on myös tarpeellista kyetä suodattamaan mittauksista vähämerkityksiset signaalit pois, jotta profiiliin ei muodostuisi vääriä painotuksia tukiasemille, jotka näkyvät vain pienessä osassa mittauksia. Koska tilan profiilissa ei erotella sijaintia tilan osiin, on tarpeellista saada kattava kuva koko tilassa näkyvistä signaaleista, eikä signaaleita, jotka esiintyvät vain pienessä osassa huonetta, voida käyttää mallissa.

## PythonPlotter

Tilamittauksista saatavien mallien vertailuun ei ollut olemassa valmista työkalua, jolla vertailua olisi kyetty tekemään tehokkaasti, joten vertailuun rakennettiin työtä varten oma sovellus.

PythonPlotter-sovellus toteutettiin Python-kielellä, ja se tuottaa mittausnäytteistä visuaalisen mallinnuksen, josta nähdään tukiasemasignaalien maksimi-, minimi- ja keskiarvovoimakkuudet. Sovellus rakennettiin helpottamaan huoneprofiilien vertailua. Sovellus ottaa huomioon mittauksien määrään suhteutettuna vähäiset tukiasemat ja jättää ne näyttämättä kuvaajassa. Tilassa mitatuista radiosignaaleista ja niiden lähteiden BSSID-nimistä tuotetaan numpy-kirjaston avulla viivakuvaaja. Esimerkissä 1 nähdään ote sovellukselle syötettävä tiedosta.

```
7c:0e:ce:b7:6c:3c -67 metropolia-student
7c:0e:ce:b7:6c:3a -68 metropolia-secure
0c:68:03:48:92:ca -77 metropolia-secure
0c:68:03:48:92:cc -76 metropolia-student
0c:68:03:48:92:ce -77 metropolia-guest
```

Esimerkki 1. Ote huoneesta ETYB204 tehdyn mittauksen näytteestä.

Sovellus prosessoi sille syötetyistä näytteistä löytyvät verkot tai tukiasemat ja näyttää käyttäjälle tiedot verkkojen tai tukiasemien voimakkuuksista sekä sen, kuinka paljon uniikkeja verkkoja tai tukiasemia näytteistä löytyy. Käyttäjän on mahdollista vaikuttaa sovelluksen rajaukseen: kuinka suuressa osuudessa näytteistä verkon tai tukiaseman on oltava läsnä, jotta se sisällytetään tiedosta piirrettyyn kuvaajaan. Esimerkissä 2 näytetään ote käyttäjälle esitettävästä tiedosta.

7c:0e:ce:b7:6c:3c sample count: 42 min: -73.0 max: -62.0 avg: -66.8

7c:0e:ce:b7:6c:3a sample count: 38 min: -76.0 max: -62.0 avg: -69.1

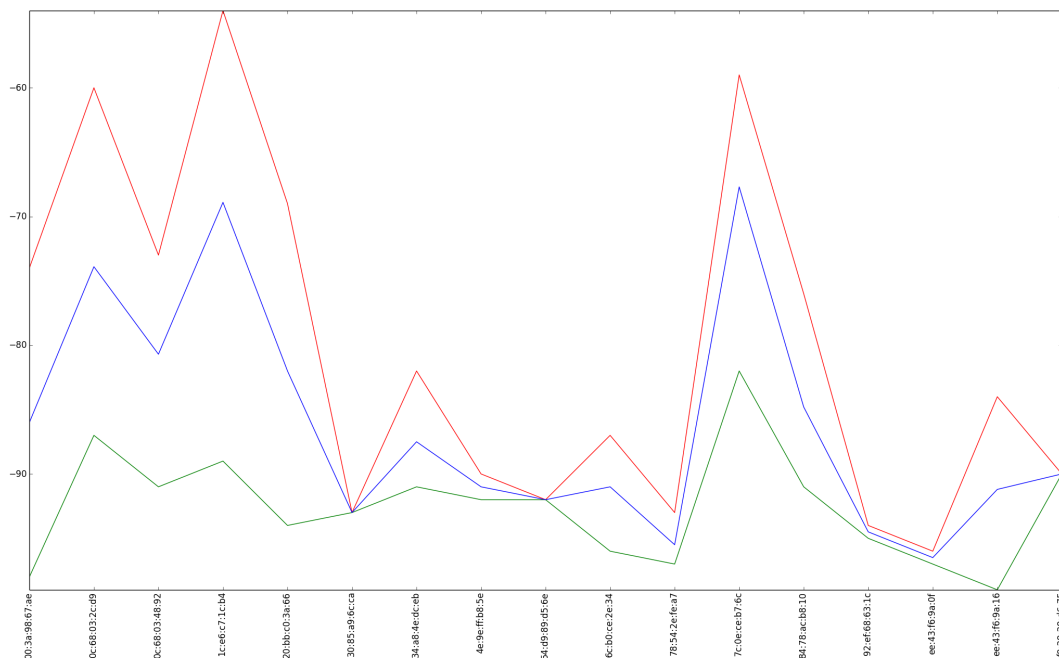
0c:68:03:48:92:ca sample count: 40 min: -88.0 max: -73.0 avg: -79.6

0c:68:03:48:92:cc sample count: 38 min: -89.0 max: -73.0 avg: -79.4

0c:68:03:48:92:ce sample count: 37 min: -87.0 max: -74.0 avg: -79.9

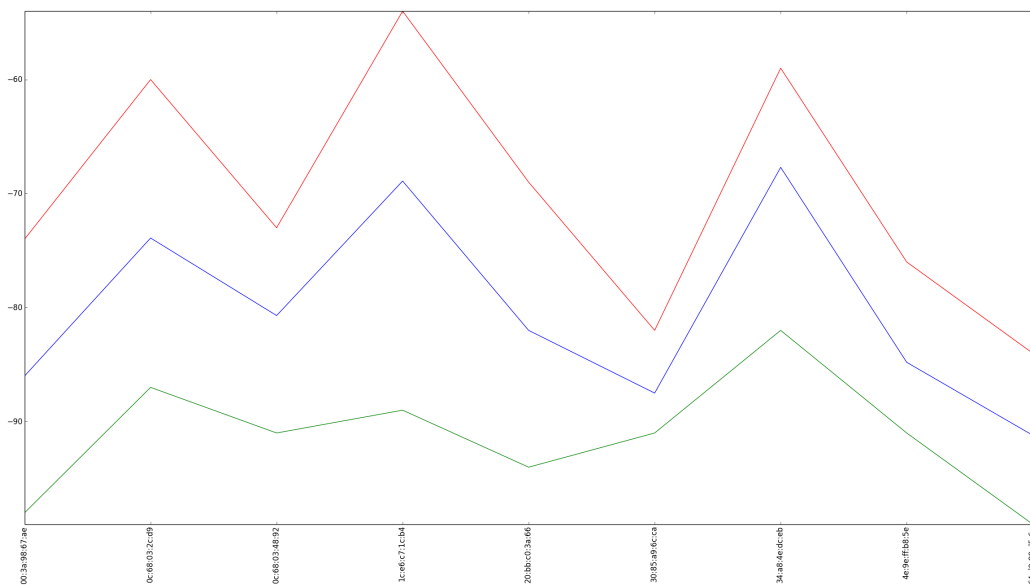
Esimerkki 2. Ote sovelluksen huoneesta ETYB204 tuottamasta datasta. Ensimmäinen elementti on verkon tai tukiaseman BSSID-tunniste, sen jälkeen mitattujen näyttöiden määrä sekä minimi-, maksimi- ja keskiarvoimakkuus.

Kuvassa 7 nähdään sovelluksen tuottama kuvaaja huoneen ETYB204 ympyrämallin sormenjälkiprofiilista, jossa näytetään kaikki tukiasemat. Kuvassa havaittavat arvojen vaihtelut johtuvat käytettävän laitteiston epätarkkuudesta. Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksella käytössä olevassa järjestelmässä huomioidaan kaikki näytteissä näkyvät tukiasemat kuten kuvassa 7.



Kuva 7. Huoneen ETYB204 ympyrämallin sormenjälki. Maksimiarvot punaisella, minimiarvot vihreällä ja keskiarvo sinisellä. X-akselilla tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla desibeliarvot.

Kuvassa 8 nähdään huoneen sormenjälki, josta on poistettu tukiasemat, jotka näkyvät alle 20 %:ssa näytteistä. Datasta ja kuvista voidaan havaita, että tukiasemien signaalivoimakkuuksien vaihtelu näkyy selvemmin, jos tukiasema havaitaan useassa näytteessä. Signaalivoimakkuuksissa -60 dB ja suuremmat arvot katsotaan vahvoiksi kuuluvuuksiksi ja -90 dB ja heikommät arvot ovat heikkoja.



Kuva 8. Huoneen ETYB204 ympyrämallin sormenjälki, josta on poistettu alle 20 %:ssa näytteitä näkyvät signaalit. Maksimiarvot punaisella, minimiarvot vihreällä ja keskiarvo sinisellä. X-akselilla tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla desibeliarvot.

Taulukossa 1 nähdään huoneen ETYB204 eri mittausmallien kokonaisnäytteiden määrä ja huomioimatta jätettyjen näytteiden määrät. Määristä voidaan päätellä, että vaikka näytteiden määrä on suurempi joissain käytetyissä menetelmissä, on varsinaiseen erotteluun vaikuttavien tukiasemien määrä yhtenäisempi riippumatta mittausmenetelmästä.

Taulukko 1. Huoneen ETYB204 mittauksissa nähtävien tukiasemien tilastoja.

Malli	Näytteitä	Tukiasemia	Esitettyjä tukiasemia	Vähäarvoisia tukiasemia
Piste	12	7	7	0
Viiva	12	7	7	0

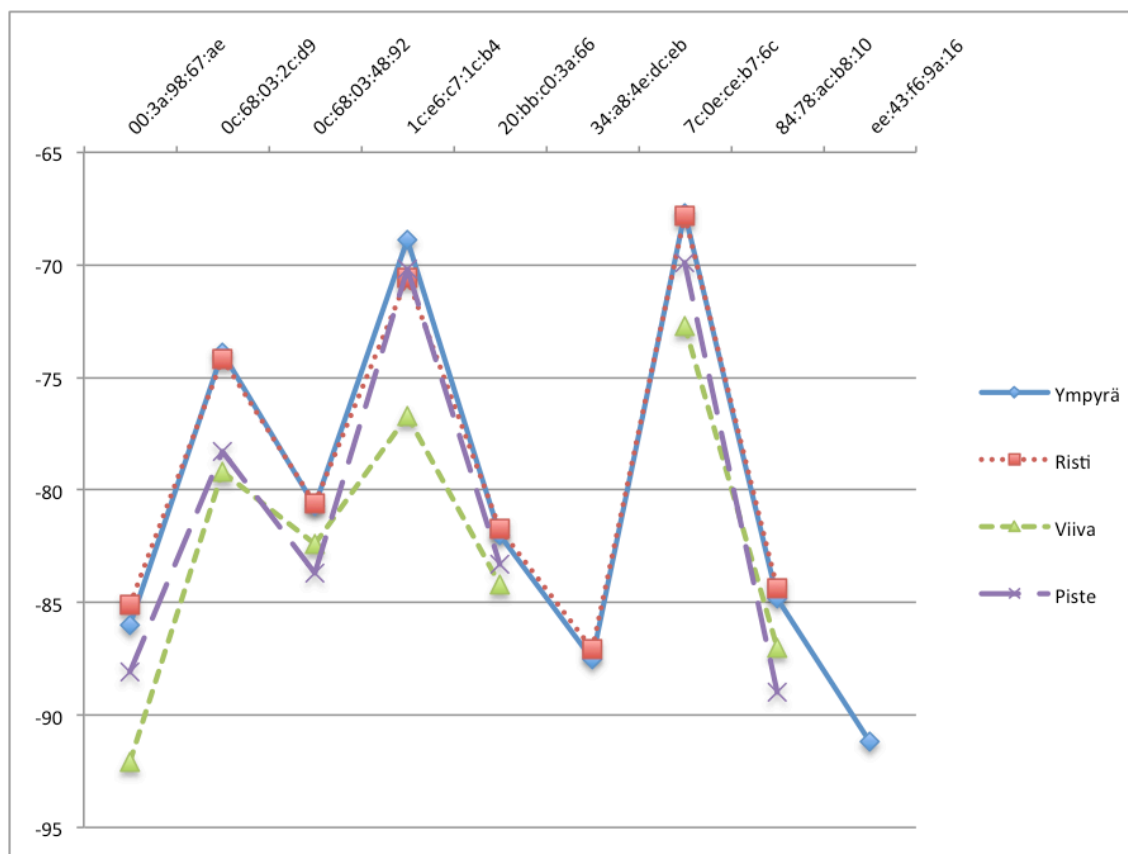
Risti	22	9	8	1
Ympyrä	42	17	9	8

Tutkimalla havaittujen tukiasemien määriä ei kyetä sanomaan yksiselitteisesti, mikä mittausmenetelmä on ollut oikeellisin. Huonemittauksissa pyrittiin rakentamaan huoneelle profiili, joka eroaisi selkeästi viereisten tilojen profiileista mutta olisi myös kattava koko tilalle. Rajoittamalla alle 20 %:ssa näytteitä havaittujen tukiasemien näkyvyyttä pyrittiin saavuttamaan koko tilan kattava profiili.

Datasta havaitaan, että tilojen profiilissa on selkeämpi vaihtelu paremmin havaituissa tukiasemasignaaleissa, kun taas heikompana havaitut tukiasemat vaihtelevat signaali-voimakkuudeltaan selvästi vähemmän. Muuttuvat vaihteluvälit tarkoittavat, että huoneen profiilia on haasteellista esittää keskiarvoina. Jatkokehityksen kannalta paikannusjärjestelmän tarkkuuden kehittämiseksi olisi suositeltavaa huomioida vaihtelu jo paikannusjärjestelmää kehitettäessä.

### **Mittausmenetelmien erottelu**

Tilojen erottelun kannalta on tärkeää, että huoneen profiili on mahdollisimman tarkasti erotettavissa kyseisen huoneen profiiliksi. Kuvassa 9 havainnollistetaan eri mittausmallien luomaa profiilia huoneesta ETYB204. Tukiaseman kohdalta puuttuva merkintä tarkoittaa, että tukiasemaa ei havaittu tällä mittausmenetelmällä.

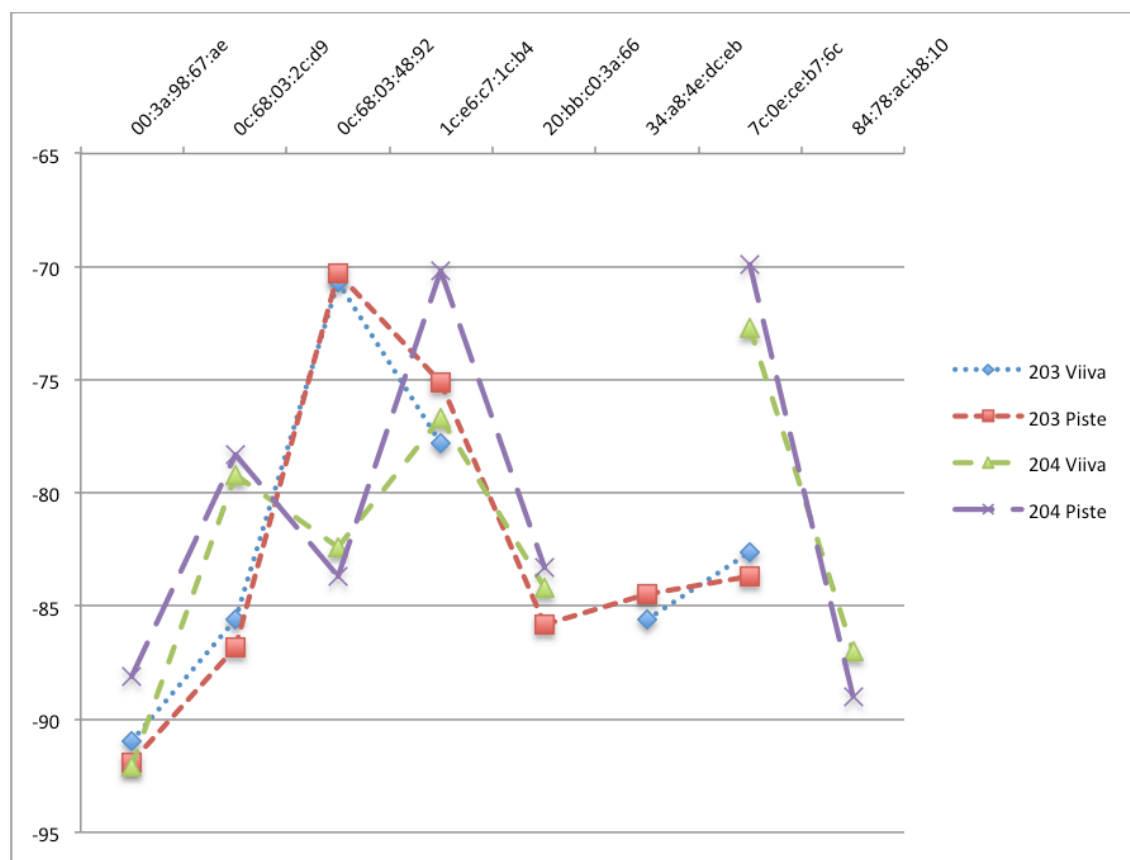


Kuva 9. Huoneen ETYB204 mittaustulokset. X-akselilla ovat tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla on tukiasemien havaitut desibeliarvot.

Kuvan luomiseksi käytetystä datasta laskettujen Pearson-korrelaatioiden perusteella havaitaan, että ympyrä- ja ristimallin mittauksissa saadut tulokset ovat yhdenmukaisemmat kuin kahden muun mittausmallin tulokset. Pearson-korrelaatio antaa arvon, jossa -1 tarkoittaa käänteistä vastaavuutta, 0 että vastaavuutta ei löydy ja 1 täyttä vastaavuutta. Korrelaatio mittaa lineaarista riippuvuutta näytteiden välillä. Risti- ja ympyrämallien välinen korrelaatio on 0,989, kun taas vertaamalla ristimallia viiva- tai pistemalliin on tulos 0,938 tai 0,946. Ympyrä- ja ristimallissa havaittiin verkkoja, joita ei viiva- ja pistemallin mittauksissa havaittu lainkaan, ja tilan profiili jäi siksi vajaaksi. Keskellä huonetta tehdyissä mittauksissa useat heikosti havaitut tukiasemat ovat jääneet kokonaan pois, kun taas ympyrä- ja ristimallissa on selkeästi paremmin havaittu heikkotehoisia verkkoja.

Huoneiden välistä erottelua varten valittiin tarkempaan vertailuun risti- ja ympyrämallit, koska niiden näytteistä oli selkeämmin havaittavissa huoneiden profiilit ilman puutteelli-

sia tietoja tukiasemien signaalien voimakkuuksista. Kuvassa 10 esitetään huoneiden ETYB203 ja ETYB204 ympyrä- ja ristimallilla tehtyjen mittausten tuloksia.

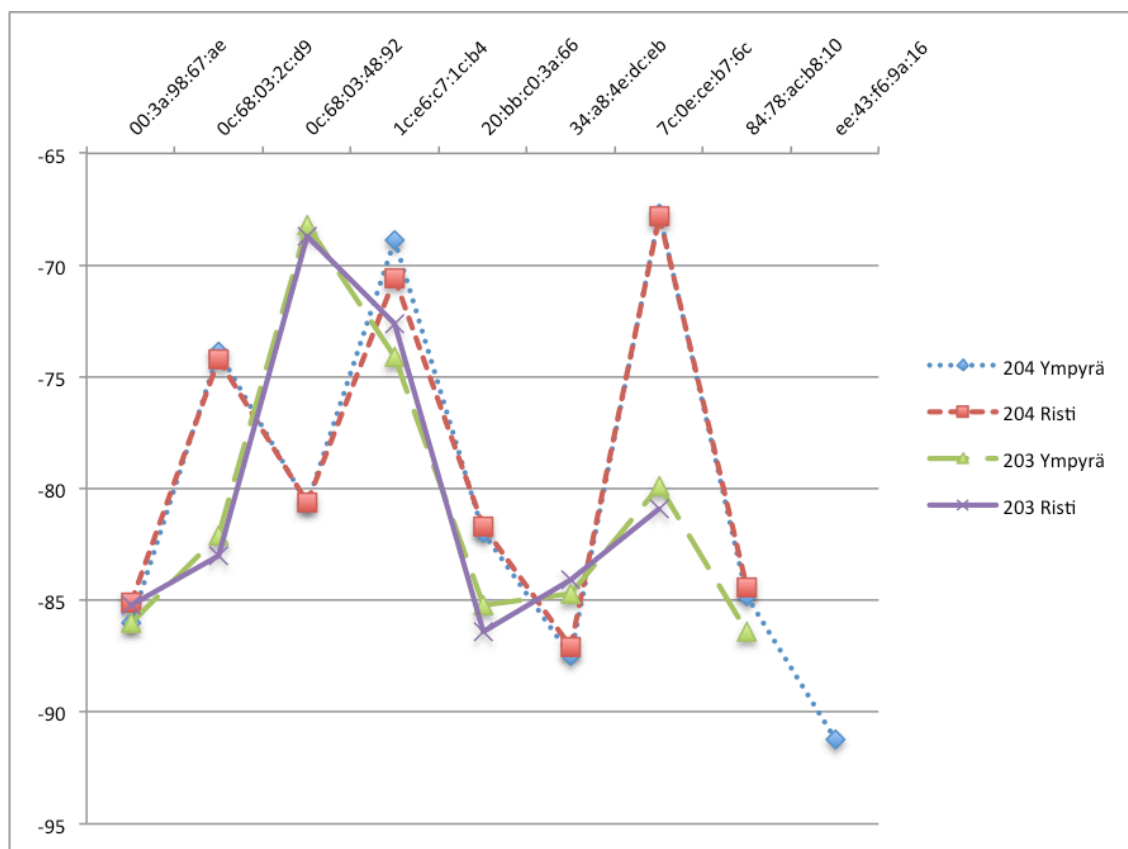


Kuva 10. Huoneiden ETYB203 ja ETYB204 risti- ja ympyrämallien vertailu. X-akselilla ovat tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla on tukiasemien havaitut desibeliarvot.

Tuloksista voidaan havaita, että huoneiden profiilit eroavat selkeästi toisistaan ja ko-neellisesti erottelu on mahdollista. Huoneiden ristimallin mittausten Pearson-korrelaatio on 0,65, joka on selkeästi pienempi kuin huoneen sisäisten mittausten eroavaisuus. Kuvasta voidaan kuitenkin havainnoida erojen suuruuksia. Selkeät voimakkuuserot tukiasemien kuuluvuudessa ovat 10 dB – 15 dB:n kokoisia, kun taas pienemmät erot ovat alle 5 dB:n suuruisia.

Kuvassa 11 nähdään huoneiden ETYB203 ja ETYB204 viiva- ja pistemallien mittaustuloksia, joista havaitaan, että huoneiden erot eivät ole yhtä selkeitä ja yhdenmukaisia kuin risti- ja ympyrämallien mittaauksissa ja profiileista puuttuu useita tukiasemia. Kuvassa olevat erot huoneiden näytteiden välillä ovat enimmillään enää 5 dB – 10 dB:n suuruisia, ja heikommin erottuvat verkot näkyvät lähes samanlaisina voimakkuuksina.

Huoneiden välinen Pearson-korrelaatti piste- ja viivamallilla oli 0,271 ja 0,331. Vaikka korrelaatiota vertaamalla saadaan selkeästi suurempi ero, on tiedon yhdenmukaisuus muiden huoneessa tehtyjen mittausten kanssa huonompi, jolloin on mahdollista, että tilan reunoja ei tunnisteta oikein samaksi tilaksi. Ympyrämallisissa huoneen reunoilta tehdyissä mittauksissa havaitut korrelaatioerot huoneen keskeltä tehtyihin mittauksiin verrattuna kertovat, että profiili ei ole täydellinen vain huoneen keskeltä mitattaessa.



Kuva 11. Huoneiden ETYB203 ja ETYB204 viiva- ja pistemallien vertailu. X-akselilla ovat tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla on tukiasemien havaitut desibeliarvot.

Mittausmalleilla tutkitaan, mikä mittausmenetelmä sopii parhaiten Metropolia Ammatti-korkeakoulun Leppävaaran-kampuksella toimivan järjestelmän tarkoituksiin. Järjestelmä käyttää näytteiden arviointiin diskretisointia, joka nykyisessä järjestelmässä diskretisoi arvot 10 dB:n arvoväleihin. Risti- ja ympyrämalleilla tehdyissä mittauksissa havaitaan selvemmin erot tilojen välillä kuitenkin säilyttäen yhtenäinen ja kattava tilaprofiili, toisin kuin viiva- ja pistemallin mittauksissa, joissa tilasta syntyvä profiili on vajaa.

Tilojen sormenjälkien mittaamiseen näyttäisi alustavan tutkimuksen perusteella olevan suositeltavaa käyttää risti- tai ympyrämallia, jotta tilasta saadaan kartoitettua kattavasti havaittavissa olevat tukiasemat. Ristimallin mittaaminen on nopeampi suorittaa mutta vaikeampi toteuttaa samoilla mittaussasetelmilla kuin ympyrämalli, jossa huoneen rajat rajaavat mitattavan alueen. Kattavan analyysin tuottamiseen vaaditaan lisätutkimuksia tilojen erottelussa raja-alueilla, kuten seinien läheisyydessä.

## 4 Kalibroitsovellus

Tilojen profiilien kartoitusmallien lisäksi tärkeä tekijä mittaustarkkuuden optimoinnissa on laitteistoerojen huomioiminen. Tilojen mittauksessa käytettävän mobiililaitteen lähettämät näytteet ovat suoraan verrannollisia vain toisen vastaavan laitekonfiguraation näytteisiin, koska mobiililaitteen antennin kyky vastaanottaa signaaleja sekä mahdolliset sovelluspuolen erot vaikuttavat vastaanotettuun signaalivoimakkuuteen.

Laitteistoerojen tutkimiseen ja korjaamiseen suunniteltiin insinööriyössä kalibroitsovellus, joka loisi näytteiden perusteella laitteiden välisten erojen kompensoimiseksi kalibroitsofiiliin jokaiselle laitteelle, tai mikäli laitteiden profiilit olisivat tarpeeksi samankaltaiset, voitaisiin käyttää molemmissa tapauksissa samaa profiilia. Profiilin luomista varten tehtiin mittauksia laitteistoeroavaisuuksista Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksella.

Kalibroitsofiilin suunnittelussa keskityttiin ottamaan huomioon mahdolliset eroavaisuudet eriävillä signaalivoimakkuuksilla. Koska eroavuuksien uskottiin muuttuvan signaalivoimakkuuksien mukaan, sovelluksen suunnittelussa otettiin huomioon tarve useammalle kalibroitsofiilille, joita voitaisiin soveltaa eri signaalivoimakkuusalueella.

### 4.1 Mittaukset

Mittauksia varten valittiin viisi puhelinmallia, joilla otettaisiin näytteitä samassa sijainnissa samoissa olosuhteissa ja sijoittaen laitteet samaan asentoon. Puhelimiksi (valmistusvuosi) valittiin

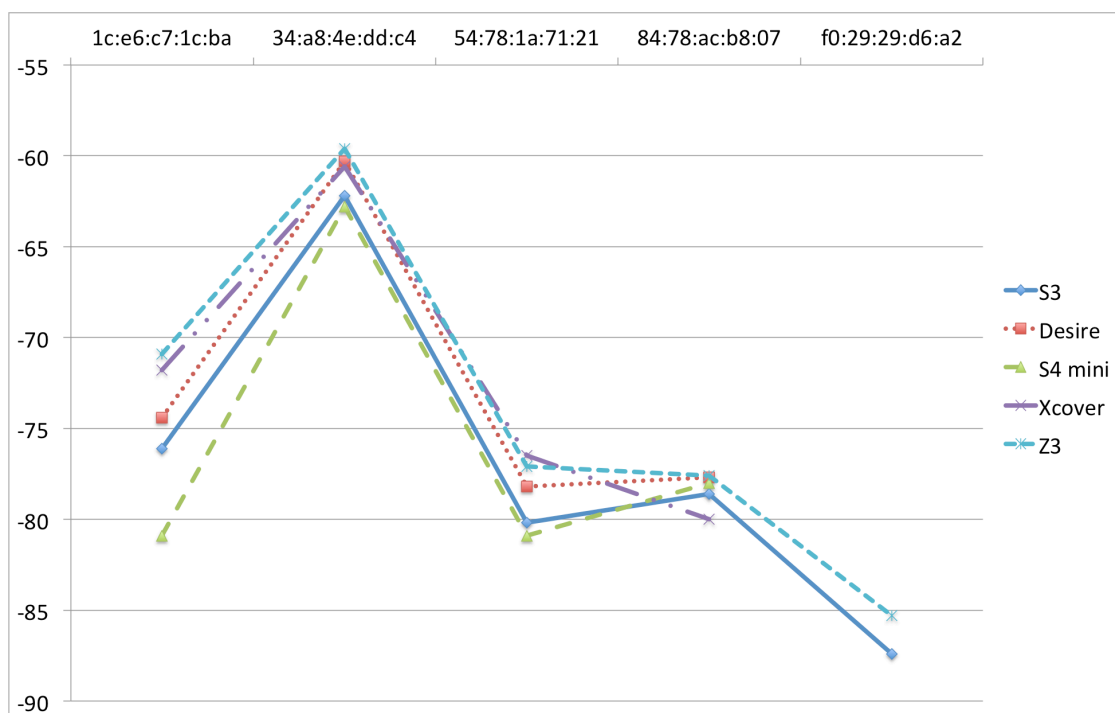
- Sony Z3 Compact, 2014

- HTC Desire, 2010
- Samsung Galaxy S3, 2012
- Samsung Galaxy S4 mini, 2013
- Samsung Galaxy Xcover, 2011.

Peruskalibraation puhelinmalliksi valittiin Samsung Galaxy S3, koska sillä on tehty osittain nykyisessä järjestelmässä olemassa olevia tilojen sormenjälkiä. Tähän sormenjälkeen verrattaisiin muiden puhelinmallien palvelimelle lähettämien näytteiden eroavaisuuksia, ja niiden perusteella luotaisiin kalibrintiprofiili, jonka avulla kyettäisiin korjaamaan laitteiden eroavaisuuksia signaalivoimakkuuden vastaanotossa.

Mittauksia tehtiin kahdessa pisteessä Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksen tiloissa. Mittauspisteistä toinen sijaitsi B-puolen tilassa, jossa seinät olivat lähellä mittauspistettä ja puhelin oli pöydällä mittauksia tehtäessä. Toinen mittauspiste sijaitsi pääsisäänkäynnin viereisessä oleskelutilassa, josta on yhteys suoraan kampuksen pääaulaan, jolloin laitteet olivat selvästi avarammassa tilassa kuin ensimmäisessä mittauksessa. Molemmista pisteistä jokaisella laitteella otettiin 15 näytettä, jotka lähetettiin palvelimelle. Tilat valittiin erilaisten ominaisuuksiensa vuoksi, jotta kalibraatiomittauksista saataisiin kattava kuva eri olosuhteissa, mutta oli kuitenkin tärkeää, että molemmissa pisteissä havaittaisiin useita verkkoja, jotta kalibrintilaskelmiin saataisiin tarpeeksi tuloksia.

Mittausnäytteistä muodostettiin PythonPlotter-sovelluksen avulla kuvaajat, joista voitiin vertailla laitteiden havaitsemien verkkojen signaalivoimakkuuksia ja niiden eroavaisuuksia. Kuvassa 12 nähdään ensimmäisessä mittauksessa saadut tulokset, joissa havainnollistetaan puhelinmallien havaittujen signaalivoimakkuuksien tukiasemakohtaisia eroja. Liitteessä 1 on esitetty kuvan luomiseksi laskettu numeerinen data.



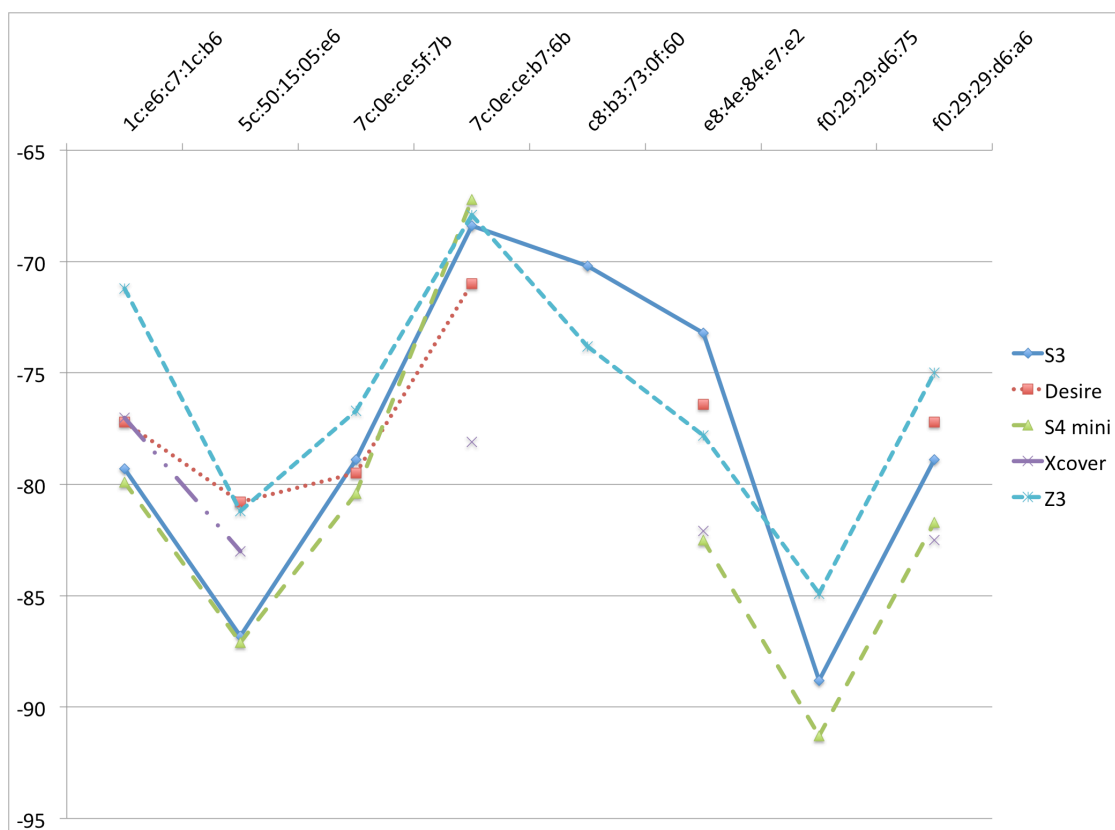
Kuva 12. Ensimmäisessä mittauksessa havaittujen tukiasemakohtaisten signaalivoimakkuuksien erot. X-akselilla ovat tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla on tukiasemien havaitut desibeliarvot.

Datasta voidaan havaita, että uudemmilla puhelimilla havaittiin enemmän tukiasemia kuin vanhemmilla malleilla. Puhelinten havaitsemien tukiasemien lukumäärät nähdään taulukossa 2. Uudempien puhelinmallien tulokset ovat selkeästi lähempänä samoja arvoja kuin vanhojen puhelinmallien mittauksista saadut tulokset. Samsung Galaxy S3:n ja Sony Z3 compactin mittaustulosten välinen Pearson-korrelaatti oli 0,993, kun verrattaessa Samsung Galaxy S3:a Samsung Xcover -puhelimeen korrelaatti oli 0,966. Ensimmäisestä mittauksesta saatujen korrelaattiarvojen perusteella arvioitiin kalibroinnin onnistuvan, koska puhelinmallien kuvaajat vastasivat hyvin toisiaan. Puhelinmallien havaitsemien tukiasemien lukumäärät

Taulukko 2. Puhelinmallien havaitsemien tukiasemien lukumäärät.

Puhelinmalli	Ensimmäisessä mittauksessa havaittujen tukiasemien määrä	Toisessa mittauksessa havaittujen tukiasemien määrä
Sony Z3 Compact	10	15
Samsung Galaxy S3	5	8
Samsung S4 mini	5	7
Samsung Xcover	5	8
HTC Desire	4	7

Kuvassa 13 nähdään mittaustulokset toisesta mittauksesta. Mittaus paljastaa, että toisessa mittauksessa erot havainnoissa eivät olleet yhteneväisiä ensimmäisen mittauksen kanssa. Liitteessä 2 on esitetty kuvan luomiseen käytetty numeerinen data.



Kuva 13. Toisen mittauksen signaalivoimakkuudet. X-akselilla ovat tukiasemien BSSID-tunnisteet. Y-akselilla on tukiasemien havaitut desibeliarvot.

Kuvien ja numeerisen tiedon perusteella voidaan päätellä, että laitteistoeroja on, sillä havaituissa signaalivoimakkuuksissa on selkeitä eroavaisuuksia, jotka vaihtelevat laitemallin perusteella. Datasta nähdään selkeä ero puhelinmallien välisissä tukiasemahavaintojen määrissä. Datan ja kuvien perusteella ei sen sijaan kyetä suoraan sanoamaan, miten mallintamalla voidaan kalibroida mittaustulokset paremmin vastaamaan peruskalibraatiota.

Kuvien perusteella katsottiin tarpeelliseksi kehittää sovellus, joka mallintaisi paremmin signaalivoimakkuuksien eroja ja kykenisi tekemään vertailuja suoraan palvelimelle lähetetyistä näytteistä.

## 4.2 PythonCalibrator-sovellus

Insinööriyössä kehitettiin PythonCalibrator-sovellus tuottamaan kalibraatitiedostoja siihen syötetyn peruskalibraation ja näytteiden avulla. Peruskalibraatio luodaan PythonPlotterilla, jota PythonCalibrator käyttää pohjana kalibroinnille. PythonCalibrator tuottaa tiedostoista laskennalliset eroavaisuudet eri signaalivoimakkuusasteilla vertaamalla peruskalibraatiossa näkyviä tukiasemia ja niiden signaalivoimakkuuksia näytteistä saataviin tukiasemien signaalivoimakkuuksiin.

Esimerkissä 3 nähdään PythonCalibratorin signaalien eroavuuksista tuottamaa tietoa joka on jaettu 5 dB:n välein lokeroihin. Ensimmäinen arvo on havaittu signaalivoimakkuuksien välinen ero tukiasemille, jotka näkyvät peruskalibraatiossa voimakkuuksilla 0 – -5 dB, seuraava väli on -5 dB – -10 dB ja niin edelleen aina -95 dB – -100 dB:iin asti. Koska mittauskohdissa ei ole havaittuja verkkoja kaikilla arvoväleillä, on arvoja sijoitettu vain niihin arvoväleihin, joissa havaintoja on ollut. Mikäli arvovälillä on havaittu useampi tukiasema, on signaalivoimakkuuksien eroista laskettu keskiarvo, joka on sijoitettu arvoväliin yksittäisen tukiaseman signaalivoimakkuuden eron sijasta.

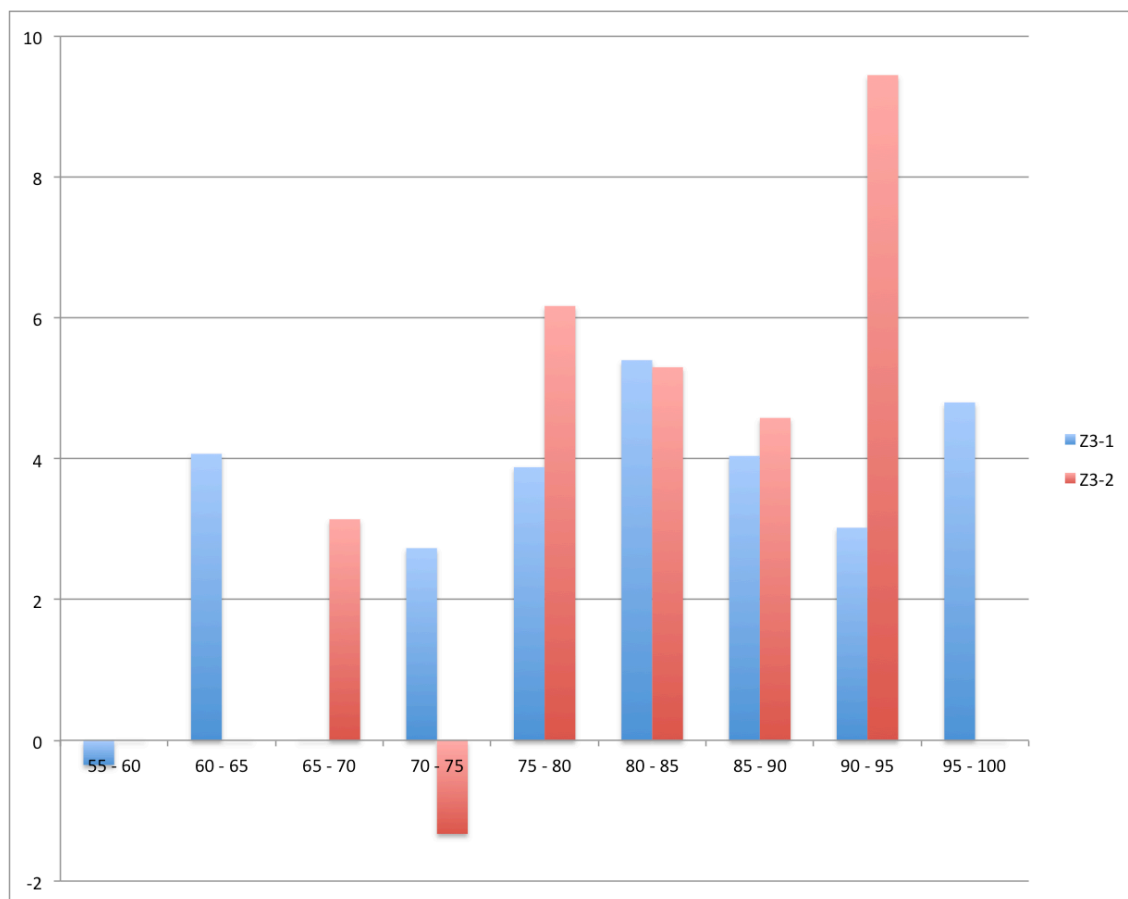
```
[nan, nan, nan, nan, nan, nan, nan, nan, nan, nan, nan, -0.35, 4.07, nan, 2.73, 3.88, 5.4, 4.04, 3.02, 4.8]
```

Esimerkki 3. Tuloste PythonCalibrator-sovelluksesta.

Ohjelman on tarkoitus jatkossa tuottaa mittaustulosten perusteella ja matemaattista mallinnusta hyödyntäen arvot tyhjäksi jääviin lokeroihin, jotta kalibraatitiedostoa voidaan käyttää palvelimella vertailuun muissakin sijainneissa, joissa verkot saattavat näkyä signaalivoimakkuusalueilla, joita ei saatu mitattua kalibrointisijainneissa.

## 4.3 Mittaustulokset

Lasketuista signaalivoimakkuuksien eroista tuotettiin visuaaliset kuvaajat helpottamaan sisätilapaikannuksen jatkokehityksen kannalta tärkeää kalibraatitiedoston arvovälien täyttämiseen vaadittavan matemaattisen mallin kehittämistä. Kuvassa 14 nähdään graafinen esitys Sony Z3 Compact- ja peruskalibraationa käytetyn Samsung Galaxy S3 -puhelimien mittaustulosten eroista.

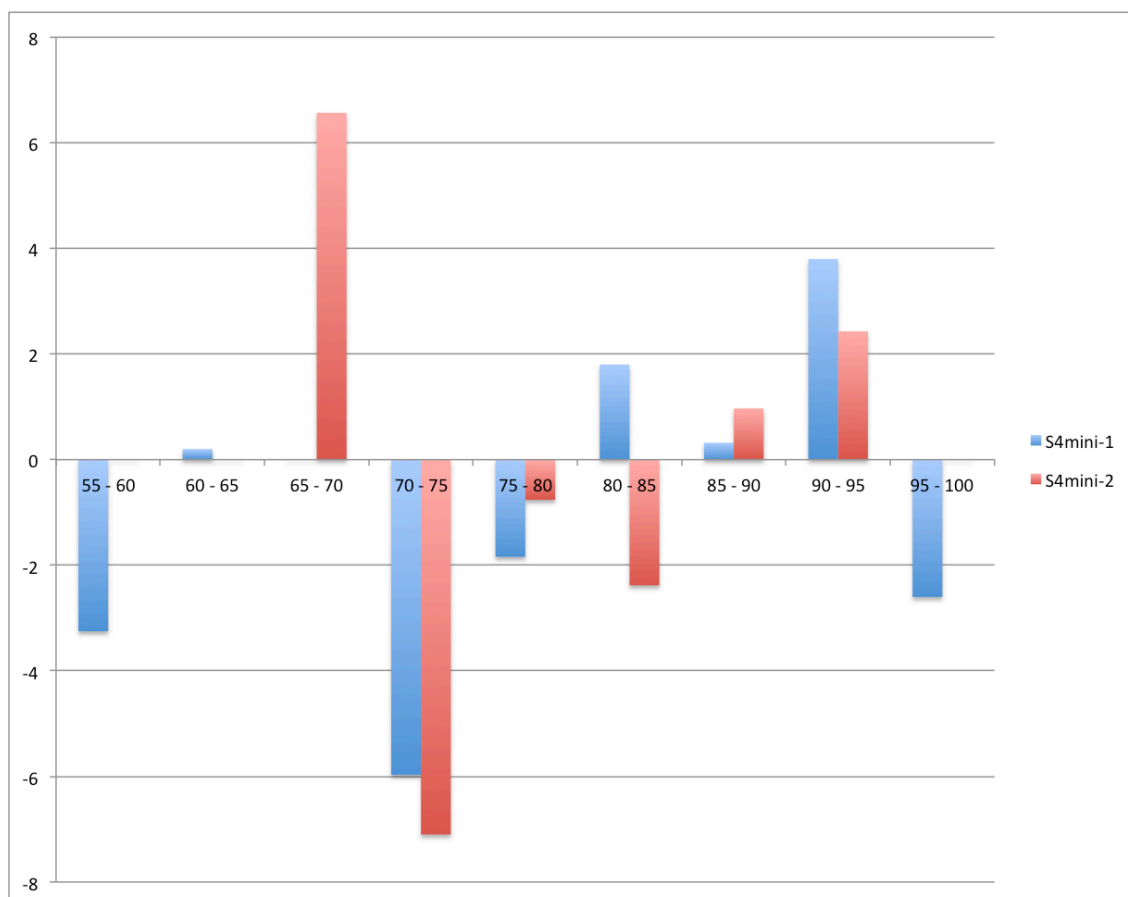


Kuva 14. Sony Z3 Compact- ja Samsung Galaxy S3 -puhelimien vertailu. Ensimmäisen mittauksen erot sinisellä ja toisen mittauksen erot punaisella. X-akselilla voimakkuusvälit. Y-akselilla havaittu ero desibeleinä.

Datasta voidaan havaita, että puhelimilla eroavaisuuksia pystytään mallintamaan hyvin, koska molemmat laitteet havaitsevat paljon verkkoja, jolloin näytteistä on helppo luoda vertailuja. Kuvan näytteet ovat myös pääasiallisesti lineaariset ja pysyvät noin +4 dB:n suuruisina muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Ensimmäisessä mittauksessa Sony Z3 Compact havaitsi 59 verkkosignaalia, kun Samsung Galaxy S3 oli havainnut vain 48 verkkoa. Toisessa mittauksessa Sony Z3 Compact havaitsi 92 verkkoa ja Samsung Galaxy S3 54 verkkoa. Ensimmäisessä mittauksessa Pearson-korrelaatio oli 0,993 ja toisessa 0,802.

Kuvasta voidaan kuitenkin myös havaita, että lokeroissa -70 dB – -75 dB ja -90 dB – -95 dB mittauspisteiden väliset erot ovat huomattavat. Mikäli näytteissä näkyvät erot voidaan yksilöidä yksittäisen mittavirheen syyksi, voidaan luoda kalibraatio, joka on pätevä kaikissa tiloissa tehdyille mittauksille.

Kuvassa 15 vertaillaan eroja Samsung Galaxy S4 mini- ja Samsung Galaxy S3 -puhelinmallien välillä. Puhelimet ovat saman valmistajan valmistamia, ja niissä on samanlaiset Wi-Fi-ominaisuudet, joten ennen testiä uskottiin puhelinten signaalihavaintojen vastaavan parhaiten toisiaan.

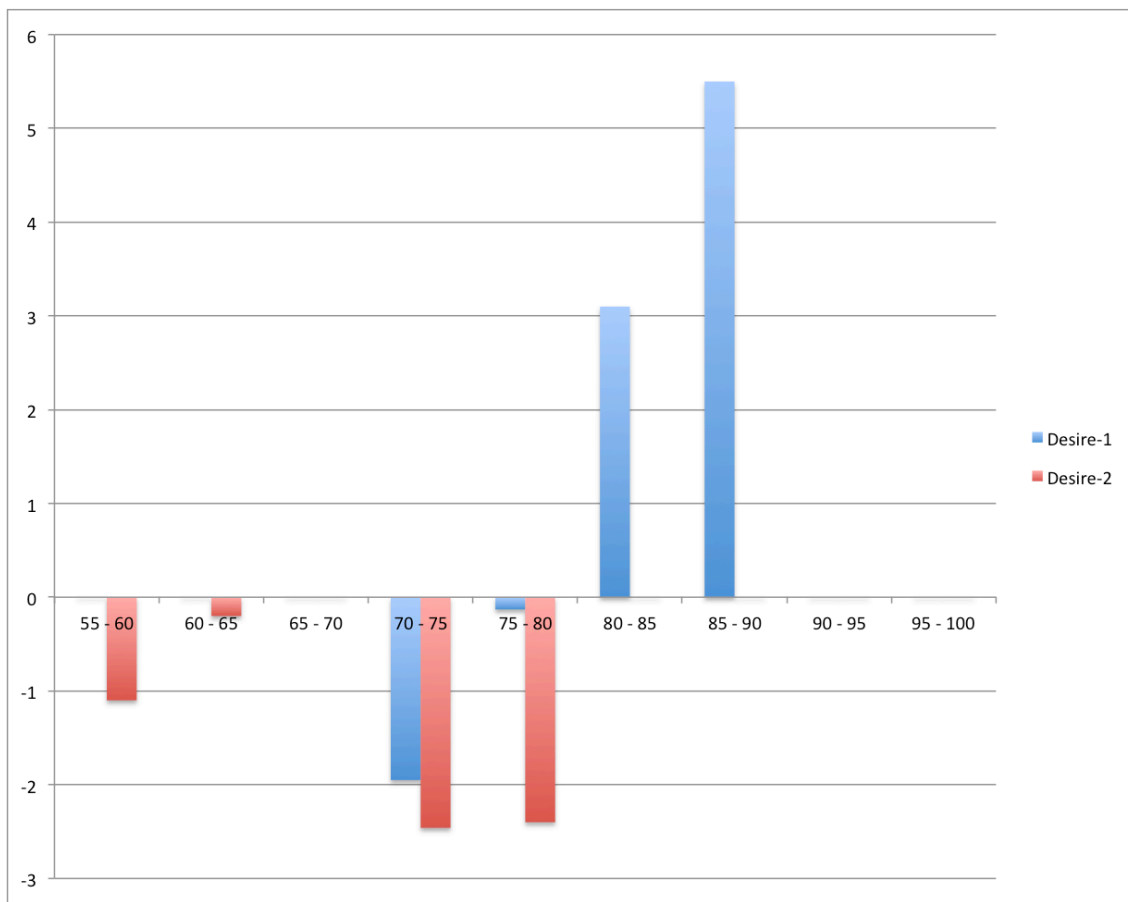


Kuva 15. Samsung Galaxy S4 mini- ja Samsung Galaxy S3 -puhelimien vertailu. Ensimmäisen mittauksen erot sinisellä ja toisen mittauksen erot punaisella. X-akselilla voimakkuusvälit. Y-akselilla havaittu ero desibeleinä.

Mittauksissa huomattiin, että näiden kahden puhelimen vastaavat ominaisuudet antenneissa eivät takaa samankaltaista signaalivoimakkuuksien havaitsemista. Samsung Galaxy S4 mini -puhelimella havaittujen verkkojen määrä oli selvästi vähäisempi kuin Sony Z3 Compactilla tai Samsung Galaxy S3:lla havaittujen. Ensimmäisessä mittauksessa Samsung Galaxy S4 mini havaitsi vain 26 verkkoa ja toisessa mittauksessa 34 verkkoa. Puhelinten välisten tulosten Pearson-korrelaatiot olivat ensimmäisessä mittauksessa 0,971 ja toisessa mittauksessa 0,853.

Kuvasta ja korrelaatiosta voidaan havaita, että puhelinmallien signaalivoimakkuuksien erot eivät ole yhtä samankaltaiset kuin Sony Z3 Compact- ja Samsung Galaxy S3 -puhelimien väliset erot ovat. Samsung S4 mini -puhelimien havaitsema selkeästi vähäisempi tukiasemien määrä vaikuttaa kuvaajassa näkyvien pylväiden määrään. Mittauksista ei voida myöskään havaita selkeää matemaattista mallia, jolla arvot poikkeavat peruskalibraatiosta.

Viimeisenä esimerkkinä nähdään kuvassa 16 esitetyt HTC Desiren ja Samsung Galaxy S3:n eroavaisuudet, joiden odotettiin ennen mittauksia olevan huomattavia, koska puhelimilla on selkeä ikäero. HTC Desire havaitsi ensimmäisessä mittauksessa vain 12 verkkoa ja toisessa 17 verkkoa. Havaittujen signaalien vähäisestä määrän vuoksi oli odotettavissa, että puhelimelle olisi hankala luoda kalibraatiotiedostoa, koska suuri määrä arvovälejä jouduttaisiin täyttämään matemaattisilla menetelmillä käyttäen hyväksi hyvin vähäistä määrää näytepisteitä. Ensimmäisen mittauksen Pearson-korrelaatti oli 0,979 ja toisen mittauksen 0,815.



Kuva 16. HTC Desiren ja Samsung Galaxy S3:n vertailu. Ensimmäisen mittauksen erot sinisellä ja toisen mittauksen erot punaisella. X-akselilla voimakkuusvälit. Y-akselilla havaittu ero desibeleinä.

Datasta voidaan havaita hyvin suuret signaalivoimakkuuksien havaitut erot. Eroista voidaan myös havaita, että osittain signaalien arvoja olisi pienennettävä selkeästi, kun osittain arvoja taas olisi kasvatettava, jotta arvoja voitaisiin vertailla peruskalibraation tilaprofiileihin.

#### 4.4 Kalibraation luominen

Kalibraation luomiseksi pohdittiin ennen mittauksia tehtyjen alustavien suunnitelmien perusteella lineaarista mallia, jossa PythonCalibratorin laskemiin signaalivoimakkuuksien aukkokohtiin olisi laskettu lineaarisen regressioanalyysin avulla arvo. Mikäli mittauksien tulokset osoittaisivat, että arvot eivät olisi lineaarisesti laskettavissa, oli tarkoituksena sovittaa saadut mittaustulokset valmiiseen matemaattiseen malliin, jonka avulla olisi voitu laskea puuttuvat arvot.

Mittaustuloksista lasketuista Pearson-korrelaateista huomattiin, että mittausten välinen poikkeama puhelinten eroissa oli suuri ja tämä saattaisi vaikuttaa kalibraation luomiseen. Korrelaation muuttuminen mittauksien välissä kertoo, että mittaustulosten välinen suhde muuttuu mittausten välillä. Mittaustulosten vertailun perusteella huomattiin nopeasti ongelma kalibraation luomisessa. Sony Z3 Compact -puhelimella havaittiin -70 dB – -75 dB:n arvovälillä, että kahdessa eri mittauksessa saaduissa arvoissa puhelimen ero Samsung Galaxy S3 -puhelimien arvoon erosi huomattavasti: se oli ensimmäisessä mittauksessa 3,88 dB suurempi ja toisessa mittauksessa 1,33 dB pienempi. Sama ongelma toistui Samsung Galaxy S4 mini -puhelimien mittauksissa arvovälillä -80 dB – -85 dB: ensimmäisessä mittauksessa saatu arvo oli 1,8 dB suurempi kuin Samsung Galaxy S3 -puhelimella saatu arvo, mutta toisessa mittauksessa saatu arvo oli 2,38 dB pienempi.

Koska mittausten väliset arvot eroavat paikoin yli 5 dB toisistaan ja ovat osittain jopa eri puolilla peruskalibraation arvoja, näyttäisi siltä, että on haastavaa soveltaa matemaattista mallia tai edes mittaustulosten perusteella luotua kalibraatiota, jota voitaisiin soveltaa kaikissa sijainneissa puhelinkohtaiseen profiiliin. Puhelinmallien välisten erojen kalibrointia ei voida tehdä suoraan signaalivoimakkuuksia vertailemalla tai niiden eroja tasoittamalla. Taulukossa 3 nähdään Sony Z3 Compact -puhelimien erot signaalivoimakkuusalueilla verrattuna peruskalibraation Samsung Galaxy S3 -puhelimeen.

Taulukko 3. Signaalivoimakkuusalueiden ero Sony Z3 Compact -puhelimella verrattuna peruskalibraation Samsung Galaxy S3 -puhelimeen.

<b>Signaalivoimakkuusalue</b>	<b>Ensimmäisen mittauksen ero</b>	<b>Toisen mittauksen ero</b>
-70 db – -75 dB	-1,33 dB	+2,73 dB
-75 dB – -80 dB	+6,17 dB	+3,88 dB
-80 dB – -85 dB	+5,3 dB	+5,4 dB
-85 dB – -90 dB	+4,58 dB	+4,04 dB
-90 dB – -95 dB	+9,45 dB	+3,02 dB

Kahdessa pisteessä tehtyjen mittauksien perusteella voidaan havaita, että kalibraatioprofiilien arvot eivät pysy samankaltaisina kaikilla arvoväleillä, mikä on edellytys kalibraation luomiseksi. Ensimmäisestä mittauksesta tehdyllä kalibraatioprofiililla ei kyettäisi korjaamaan toisen mittauksen tuloksia niin, että näyttöjen profiilit vastaisivat toisiaan, koska toisen mittauksen arvot eroavat ensimmäisen mittauksen arvoista. Koska kalibraatiota ei kyetty luomaan, PythonCalibratorin kehitys keskeytettiin ja sovellus tuottaa tietoja vain peruskalibraation ja näyttöjen välisistä eroista.

Jotta kalibraation luominen olisi ollut mahdollista, olisi signaalivahvuuksien eroavuuksien tullut olla lähes yhteneväiset mittausten välillä. Koska mittauskertojen välissä on huomattavia eroja, ei voida tarpeellisella tarkkuudella sanoa, että mitattujen laitteiden signaaliero olisi tietyn suuruinen tietyssä arvovälissä, vaan mitattuun signaalivoimakkuuteen vaikuttaa muu tekijä kuin laitteen ominaisuudet.

On kyseenalaista, olisivatko laboratorio-olosuhteissa tehdyt mittaukset, joissa kaikki muut elementit olisi poistettu, ollut hyödyllinen, jotta kalibraatio olisi saatu luotua. Todellisen maailman olosuhteissa laboratoriossa luotu kalibraatio ei olisi toiminut, koska ulkopuoliset vaikutteet olisivat muuttaneet kalibraation vaatimia arvomuokkauksia.

## 5 Yhteenveto

Insinööriyössä perehdyttiin sisätilapaikannuksen teknologioihin ja tutkittiin tarkemmin Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-kampuksella käytössä olevaa WLAN-tukiasemasignaaleihin perustuvaa paikannusmenetelmää. Työn tavoitteena oli kehittää paikannuksen tarkkuutta tai luoda kehitysideoita, joita ei voitaisi laajuutensa takia toteuttaa työn puitteissa. Tutkittujen teknologioiden avulla kampuksella olevaa sisätilapaikannusjärjestelmää voitaisiin kehittää lisäämällä nykyiseen WLAN-pohjaiseen paikannukseen avuksi myös muita menetelmiä.

Työssä keskityttiin pääasiassa kahteen osa-alueeseen tarkkuuden parantamiseksi: tiloista mitattujen sormenjälkien mittaamismenetelmien yhtenäistämiseen ja erottelun parantamiseen sekä laitteistoerojen kompensoimiseen kalibroimalla laitteita vastaamaan palvelimella olemassa olevia tiloista otettuja signaalikarttoja.

Sormenjälkien mittaamiseen testattiin erilaisia malleja, joiden avulla tiloja voidaan mitata, ja kehitettiin sovellus, jonka avulla mittaustuloksien eroja on helppo havainnollistaa. Tehtyjen mittauksien perusteella voidaan suositella, että tilat mitataan jatkossa kiertämällä tila tilan seinustoja pitkin sekä myötä- että vastapäivään, jolloin tilasta saadaan mahdollisimman kattava signaalikartta ilman, että mittaavan henkilön keho vaikuttaa karttaan. Mitattaessa on myös hyvä varmistaa, että tila on tyhjä muista henkilöistä ja tilan ovet ovat suljettuina.

Mittauksissa havaittujen laitteistoeroavaisuuksien korjaamiseksi kehitettiin toinen sovellus, joka laskee puhelimen palvelimelle lähettämistä näytteistä vertailuarvot, joiden avulla näytteet saadaan kalibroituja peruskalibraatiota vastaaviksi. Mikäli kalibrointi onnistuisi, olisi mahdollista vertailla kahdella eri puhelimella tehtyjä mittauksia suoraan toisiinsa kompensoiden toisen näytteiden arvoja puhelimelle luodulla kalibrointiprofiililla. Kalibrointi poistaisi tarpeen tehdä tilojen signaalikartat erikseen jokaisella puhelimella, ja sen sijaan olisi mahdollista vertailla yhdellä puhelimella tehtyä karttaa toiselta saatuihin kalibroituihin tuloksiin.

Kalibrointiprofiilien luomisessa ongelmaksi muodostuivat puhelinten mittauksissa havaitut suuret vaihtelut. Kalibroinnin luomiseksi kalibraatioarvoilta olisi vaadittu yhteneväisyyttä, mutta mittauksissa saadut tulokset vaihtelivat liikaa, jotta kalibrointia voitaisiin suorittaa. Kalibrointimittauksien ja näytteistä tehtyjen kuvaajien perusteella voidaan kuitenkin suositella uusia kokeiluja paikannusjärjestelmän diskretisointivälien valikoimiseksi. Nykyinen 10 dB:n diskretisointi jättää helposti huomioimatta tilojen eroja, jos välissä ei ole vahvasti signaalia heikentävää välirakennetta.

Lopputuloksena voidaan todeta, että vaikka työssä ei saatu aikaan tavoiteltua automaattista menetelmää kalibraatioiden luomiseksi, oli kuitenkin järjestelmän tarkkuuden kannalta hyödyllistä tehdä kokeiluja tilaprofiilien erottuvuuden parantamiseksi ja todeta, että kalibraatioiden luomiseksi on tarpeellista ensin kehittää järjestelmän muita osioita.

## Lähteet

- 1 Bartlett, David. 2013. Essentials of Positioning and Location Technology. Cambridge University Press.
- 2 Mautz, Rainer. 2012. Indoor Positioning Technologies. Verkkodokumentti. <<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:5659/eth-5659-01.pdf>>. Luettu 5.3.2015.
- 3 Kaemarungsi, Kamol; Krishnamurthy, Prashant. 2004. Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting. Verkkodokumentti. <<http://www1.cs.columbia.edu/~andrea/Downloads/01331706.pdf>>. Luettu 5.3.2015.
- 4 Butz, Andreas; Baus, Jörg; Krüger, Antonio; Lohse Marco. 2001. A Hybrid Indoor Navigation System. Verkkodokumentti. <<http://marcolohse.com/publications/2001/hybrid-iui.pdf>>. Luettu 24.3.2015.
- 5 Bekkelien, Anja. 2012. Bluetooth Indoor Positioning. Master's Thesis. Verkkodokumentti. University of Geneva. <[http://cui.unige.ch/~deriazm/masters/bekkelien/Bekkelien\\_Master\\_Thesis.pdf](http://cui.unige.ch/~deriazm/masters/bekkelien/Bekkelien_Master_Thesis.pdf)>. Luettu 24.3.2015.
- 6 Saab, Samer. 2011. A Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags. Verkkodokumentti. <[http://www.researchgate.net/profile/Samer\\_Saab2/publication/224153238\\_A\\_Standalone\\_RFID\\_Indoor\\_Positioning\\_System\\_Using\\_Passive\\_Tags/links/0c960536bae690da36000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Samer_Saab2/publication/224153238_A_Standalone_RFID_Indoor_Positioning_System_Using_Passive_Tags/links/0c960536bae690da36000000.pdf)>. Luettu 24.3.2015.
- 7 Mitchell, Tom M. 2015. Generative and Discriminative Classifiers: Naïve Bayes and Logistic Regression. Verkkodokumentti. <<http://www.cs.cmu.edu/~tom/mlbook/NBayesLogReg.pdf>>. Luettu 23.3.2015.
- 8 Prasithsangaree, P; Krishnamurthy, P; Chrysanthis, P.K. 2002. On indoor position location with wireless lans. Verkkodokumentti. <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.3543&rep=rep1&type=pdf>>. Luettu 23.3.2015
- 9 Bose, Atreyi; Foh, Chuan Heng. 2007. A Practical Path Loss Model For Indoor WiFi Positioning Enhancement. Verkkodokumentti. <[http://www.researchgate.net/profile/Chuan\\_Foh/publication/224305774\\_A\\_practical\\_path\\_loss\\_model\\_for\\_indoor\\_WiFi\\_positioning\\_enhancement/links/00b49516d76399ceb0000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Chuan_Foh/publication/224305774_A_practical_path_loss_model_for_indoor_WiFi_positioning_enhancement/links/00b49516d76399ceb0000000.pdf)>. Luettu 23.3.2015.

- 10 Andersen, Jorgen Bach; Rappaport, Theodore; Yoshida, Susumu. 1995. Propagation Measurements and Models for Wireless Communication Channels. Verkkodokumentti. <<http://www.csie.ntu.edu.tw/~b92004/course/wms/paper/w2p1.pdf>>. Luettu 23.3.2015.
- 11 Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials. 1997. Verkkodokumentti. United States Department of Commerce. <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97123.pdf>>. Luettu 23.3.2015.
- 12 Stein, John. Indoor Radio WLAN Performance. Verkkodokumentti. <[http://erasme.org/IMG/experience\\_attenuation.pdf](http://erasme.org/IMG/experience_attenuation.pdf)>. Luettu 23.3.2015.
- 13 Radio Frequency Interference – And What to Do About It. 2001. Verkkodokumentti. Radio-Sky Publishing. <<http://www.radiosky.com/journal0901.html>>. Luettu 24.3.2015.

### Ensimmäisen kalibraatiomittauksen data

Taulukossa nähdään mittauksista saaduista näytteistä tunnistettujen tukiasemien voimakkuuksien minimi-, maksimi- ja keskiarvovoimakkuus. Arvot ovat desibelejä.

Taulukko 1. Samsung Galaxy S3

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
1c:e6:c7:1c:ba	-82	-68	-76,1
34:a8:4e:dd:c4	-69	-55	-62,2
54:78:1a:71:21	-90	-72	-80,2
84:78:ac:b8:07	-91	-68	-78,6
f0:29:29:d6:a2	-91	-85	-87,4

Taulukko 2. HTC Desire

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
1c:e6:c7:1c:ba	-78	-73	-74,4
34:a8:4e:dd:c4	-64	-59	-60,3
54:78:1a:71:21	-80	-77	-78,2
84:78:ac:b8:07	-82	-76	-77,7

Taulukko 3. Samsung Galaxy S4 mini

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
1c:e6:c7:1c:ba	-86	-74	-80,9
30:85:a9:6c:ca	-100	-94	-97,6
34:a8:4e:dd:c4	-68	-53	-62,8
54:78:1a:71:21	-88	-77	-80,9
84:78:ac:b8:07	-89	-71	-78

Taulukko 4. Samsung Xcover

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
00:3a:98:67:ae	-95	-91	-93,1
1c:e6:c7:1c:ba	-77	-69	-71,8
34:a8:4e:dd:c4	-68	-58	-60,6
54:78:1a:71:21	-81	-74	-76,5
84:78:ac:b8:07	-86	-77	-80

Taulukko 5. Sony Z3 Compact

<b>Tukiasema</b>	<b>Minimi</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Keskiarvo</b>
00:3a:98:67:ae	-91	-88	-89
1c:e6:c7:1c:b4	-89	-86	-87,4
1c:e6:c7:1c:ba	-77	-67	-70,9
30:85:a9:6c:ca	-93	-87	-90,2
34:a8:4e:dd:c4	-86	-55	-59,6
54:78:1a:71:21	-82	-72	-77,1
54:79:75:67:da	-91	-88	-89,9
84:78:ac:b8:07	-86	-69	-77,6
a2:be:05:79:96	-95	-94	-94,5
f0:29:29:d6:a2	-89	-83	-85,3
00:3a:98:67:ae	-91	-88	-89

## Toisen kalibraatiomittauksen data

Taulukossa nähdään mittauksista saaduista näytteistä tunnistettujen tukiasemien voimakkuuksien minimi-, maksimi- ja keskiarvovoimakkuus. Arvot ovat desibelejä.

Taulukko 6. Samsung Galaxy S3

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
1c:e6:c7:1c:b6	-85	-75	-79,3
5c:50:15:05:e6	-93	-79	-86,8
7c:0e:ce:5f:7b	-90	-74	-78,9
7c:0e:ce:b7:6b	-75	-63	-68,4
c8:b3:73:0f:60	-75	-65	-70,2
e8:4e:84:e7:e2	-78	-69	-73,2
f0:29:29:d6:75	-92	-86	-88,8
f0:29:29:d6:a6	-93	-72	-78,9

Taulukko 7. HTC Desire

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
02:20:a0:a0:f9	-90	-86	-88,7
1c:e6:c7:1c:b6	-79	-75	-77,2
5c:50:15:05:e6	-82	-78	-80,8
7c:0e:ce:5f:7b	-81	-78	-79,5
7c:0e:ce:b7:6b	-77	-69	-71
e8:4e:84:e7:e2	-79	-75	-76,4
f0:29:29:d6:a6	-79	-75	-77,2

Taulukko 8. Samsung Galaxy S4 mini

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
1c:e6:c7:1c:b6	-84	-75	-79,9
5c:50:15:05:e6	-92	-81	-87,1
7c:0e:ce:5f:7b	-87	-71	-80,4
7c:0e:ce:b7:6b	-84	-56	-67,2
e8:4e:84:e7:e2	-91	-75	-82,5
f0:29:29:d6:75	-92	-91	-91,3
f0:29:29:d6:a6	-89	-79	-81,7

Taulukko 9. Samsung Xcover

Tukiasema	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
00:40:96:5c:40	-99	-96	-98,1
02:20:a0:a0:f9	-91	-82	-87,1
1c:e6:c7:1c:b6	-79	-76	-77

5c:50:15:05:e6	-85	-81	-83
7c:0e:ce:b7:6b	-81	-75	-78,1
dc:7b:94:35:df	-92	-90	-91,2
e8:4e:84:e7:e2	-86	-77	-82,1
f0:29:29:d6:a6	-84	-80	-82,5

Taulukko 10. Sony Z3 Compact

<b>Tukiasema</b>	<b>Minimi</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Keskiarvo</b>
00:40:96:5c:40	-93	-91	-92,2
02:20:a0:a0:f9	-84	-82	-83,3
0c:68:03:4c:fa	-90	-83	-88,2
1c:e6:c7:1c:b6	-80	-67	-71,2
5c:50:15:05:e6	-85	-66	-81,2
5c:50:15:1d:38	-86	-80	-82,4
7c:0e:ce:5f:7b	-84	-70	-76,7
7c:0e:ce:b7:6b	-74	-59	-67,9
c8:b3:73:0f:60	-81	-64	-73,8
d0:57:4c:cb:cf	-89	-87	-88,2
dc:7b:94:35:ce	-89	-81	-85,7
dc:7b:94:35:df	-90	-85	-86,9
e8:4e:84:e7:e2	-83	-70	-77,8
f0:29:29:d6:75	-89	-74	-84,9
f0:29:29:d6:a6	-84	-70	-75
00:40:96:5c:40	-93	-91	-92,2