

Antti Haataja

UWB-PAIKANNUSJÄRJESTELMÄN AUTOMAATTINEN KALIBROINTI

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Kevät 2014



Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Antti Haataja	
Työn nimi UWB-paikannusjärjestelmän automaattinen kalibrointi	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot	Ohjaaja(t) Timo Lehikoinen, Jukka Kämäräinen, Asko Kinnunen
	Toimeksiantaja TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT
Aika Kevät 2014	Sivumäärä ja liitteet 37
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin VTT:n kehittämän UWB-paikannusjärjestelmän kalibrointia ja selvitettiin sen automaattista toteuttamista. UWB-paikannustekniikkaa on tutkittu VTT:llä jo pitkään, kuten esimerkiksi DecaWave Sensor 1000 -mikropiirillä toteutettua järjestelmää sekä kaupallista Ubisense-järjestelmää. VTT:n kehittämä järjestelmä pohjautuu DecaWave-yrityksen suunnittelemaan DW1000-mikropiiriin, ja perustuu eri teknologiaan kuin kaupallinen Ubisense-järjestelmä.</p> <p>Työssä selvitettiin automaattisen kalibroinnin toteuttamista ja suunniteltiin sekä toteutettiin aiheeseen liittyvät mittaukset. Järjestelmälle tehdyt mittaukset suoritettiin toimistotiloissa ja prosessihallissa, jotta voitiin todeta kalibroinnin tarkkuus. Vertailumittaukset tehtiin laseretäisyysmittarilla. Mittauksista talteen kerätty data käsiteltiin tietokoneella selkeämpään muotoon ja data analysoitiin Excel- ja Matlab -ohjelmien avulla. Mittauksien aikana havaitut ongelmat raportoitiin eteenpäin, jotta järjestelmän toimintaa saatiin kehitettyä paremmaksi.</p> <p>Mittaustulokset vahvistivat laitteen aiemmista mittauksista saatuja tuloksia ja järjestelmän paikannustarkkuuden todettiin olevan alkuperäisen arvion mukainen. Insinööriyöstä on hyötyä UWB-paikannusjärjestelmistä kiinnostuneille ja työssä on ideoitu, miten UWB-paikannusta voidaan soveltaa esimerkiksi palo- ja pelastustoimintaan tulevaisuudessa.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	UWB, paikannus, kalibrointi, paikannusmenetelmät,
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto



School Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Antti Haataja	
Title Automatic Calibration of UWB Positioning System	
Optional Professional Studies	Instructor(s) Mr Timo Lehtikoinen, Mr Jukka Kämäräinen, Mr Asko Kinnunen
	Commissioned by VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND
Date Spring 2014	Total Number of Pages and Appendices 37
<p>The commissioner of this Bachelor's thesis was VTT Technical Research Centre of Finland. The purpose of the thesis was to develop UWB positioning system calibration and find out how to do it automatically. VTT has been researching different types of positioning systems for a long time, e.g. commercial Ubisense system and DecaWave Scensor 1000 integrated circuit implemented system. The system is based on DecaWave technology, which was developed by DecaWave company. VTT's system is based on DW1000 IC and it is based on different technology from the commercial Ubisense system.</p> <p>Possibilities for automatic calibration were investigated and the planned measurements made. Field measurements were carried out in order to estimate the accuracy of the calibration. Reference measurements were made using a laser distance meter. The obtained data was processed into a more explicit format and the data was analysed using Excel and Matlab software. Problems detected during the measurements were reported in order to enhance the function of the system.</p> <p>The field measurements confirmed the previous measurements and the positional accuracy of the device was found to be as estimated. This Bachelor's thesis will be useful for anyone interested in the UWB systems and for those who want to know how these systems could be applied to the fire and rescue operations in the future.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	UWB, positioning, calibration, positioning methods
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Insinööriyön tekeminen oli mielenkiintoista, opettavaista ja haastavaa. Työ opetti pitkäjän-
teistä työskentelyä ja oli askel eteenpäin insinöörin uralla. Tahdon kiittää lämpimästi Tekno-
logian tutkimuskeskus VTT:n Kajaanin toimipisteen vastaavaa Timo Lehikoista. Hän ohjasi
työskentelyäni kokonaisuutena ja auttoi eteen tulleiden haasteiden ratkaisemisessa. Suuri kii-
tos kuuluu myös Jukka Kämäräiselle, jonka kanssa käytyt useat keskustelut valottivat työn
sisältöä ja ohjasivat oikeaan suuntaan työn kirjoittamisessa.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita henkilöitä ja tahoja, jotka osaltaan edistivät ja mahdollis-
tivat työn valmistumisen.

Kajaanissa 23.3.2014

Antti Haataja

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	2
2 ULTRA WIDEBAND -TEKNOLOGIA	3
2.1 Historia	3
2.2 Tekniikka	3
2.3 Määräykset ja rajoitukset UWB-signaalille	7
2.3.1 Määräykset Yhdysvalloissa	7
2.3.2 Määräykset EU-alueella	8
3 PAIKANNUSMENETELMÄT	10
3.1 Paikannus TOA-menetelmällä	10
3.2 Paikannus TDOA-menetelmällä	14
3.3 Paikannus AOA-menetelmällä	15
3.4 Paikannus RSS-menetelmällä	16
4 DECAVAWE-PIIRI	17
5 TUKIASEMIEN AUTOMAATTINEN KALIBROINTI	20
5.1 Järjestelmän kalibrointi	20
5.2 Mittauksissa syntyvä virhe	24
5.3 UWB-paikannuksen ja automaattisen kalibroinnin sovellutusesimerkkejä	26
6 MITTAUKSET KALIBROINNIN TESTAAMISEKSI	28
6.1 Laitteet	28
6.2 Mittaukset toimistotiloissa	29
6.2.1 Ympäristö	29
6.2.2 Mittauksien suorittaminen	30
6.3 Mittaukset prosessihallissa	30
6.3.1 Ympäristö	30
6.3.2 Mittauksien suorittaminen	31
7 MITTAUSTULOKSET	33
7.1 Mittaustulosten käsittely	33
7.2 Mittaustulokset toimistotilat	34
7.3 Mittaustulokset prosessihalli	35
8 YHTEENVETO	37

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

Ad hoc	Jotain tiettyä tarkoitusta varten muodostettava langaton verkko.
AOA	Angle Of Arrival. Signaalin saapumiskulmaan perustuva paikannustekniikka.
ASK	Amplitude Shift Keying. Vaihtoamplitudiavainnus.
BPM	Burst Position Modulation. Purskepaikkamodulaatio.
BPSK	Binary Phase Shift Keying. Binäärinen vaihesiirtoavainnus.
CRC	Cyclic Redundancy Check. Syklinen virheen havaitsemismenetelmä.
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying. 1/4-vaiheistettu differentiaalinen modulointitekniikka.
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power. Isotrooppinen antenni
FCC	Federal Communications Commission. Yhdysvaltain tietoliikennekomissio.
FEC	Forward Error Control. Eteenpäin suuntautuva virheenkorjausmenetelmä.
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying. Gaussinen digitaalinen nelivaihemodulaatio.
GPS	Global Positioning System. Paikannusjärjestelmä.
Haamupiste	Paikannuksessa syntyvä ylimääräinen koordinaattipiste.
IEEE 802.12.4	IEEE:n määrittelemä UWB-standardi.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
LOS	Line Of Sight. Suora näköyhteys.
Matlab	Kaupallinen tietokoneohjelma, jota käytetään laskentaan. Tarkoittaa myös ohjelmointikieltä.
MPSK	M-ary Phase-Shift Keying. Digitaalivaihesiirtoavainnus.
NB	Narrowband. Kapeakaistainen spektri.
NLOS	Non Line Of Sight. Epäsuora näköyhteys.
OOK	On-Off Keying. Binäärinen amplitudimodulointi.
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying. Siirretty nelivaiheinen vaiheavainnus.
PAM	Pulse Amplitude Modulation. Pulssiampitudimodulaatio.
PPM	Pulse Position Modulation. Pulssipaikkamodulaatio.

QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying. Nelivaiheinen vaiheavainnus.
RFID	Radio Frequency IDentification. Radiotaajuinen etätunnistusmenetelmä tiedon etälukuun ja -tallentamiseen käyttäen RFID-tunnisteita.
RSS	Received Signal Strength. Tarkoittaa vastaanotetun signaalin voimakkuusmittausta ja paikannusmenetelmää.
RTLS	Real Time Location System. Reaaliaikainen paikannusjärjestelmä.
SDS-TWR	Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging. Synkronoinnin korvaamisprotokolla, jonka avulla vaihdetaan aikatieta.
SNR	Signal to Noise Ratio. Signaali-kohinasuhde.
SPI	Serial Peripheral Interface. Synkronoitu sarjaväylä.
SS	Spread-Spectrum. Hajaspektri.
TAG	Tunniste.
TDOA	Time Difference Of Arrival. Signaalin saapumisaikaeroihin perustuva paikannustekniikka.
TERA TERM	Ohjelma, jonka avulla voidaan käyttää tietokoneen sarjaporttia.
TOA	Time Of Arrival. Signaalin saapumisaikaan perustuva paikannustekniikka.
TOF	Time Of Flight. Signaalin kulkuaikaan perustuva paikannustekniikka.
UWB	Ultra Wideband. Ultralaajakaistainen.

1 JOHDANTO

Teknologian tutkimuskeskus VTT on soveltavan tutkimuksen alueella Pohjois-Euroopan suurin. Vuonna 2012 sen liikevaihto oli 316 M€, ja sillä on noin 2900 työntekijää. Kajaanin toimipisteessä työskentelee alle kymmenen työntekijää. Kajaanin toimipisteen osaamisalueet ovat erilaiset paikannusteknologiat, sensoriverkot ja energian harvestointi, sekä langattomat tiedonsiirto- ja anturointiratkaisut.

Keväällä 2013 työskentelin VTT:llä työharjoittelussa viisi kuukautta ja sen jälkeen kesätoissa. Harjoitteluajana tein töitä Ubisense-paikannusjärjestelmän parissa ja sitä kautta perehdyin paikannusjärjestelmien teknologioihin. Kun minulle tarjottiin mahdollisuutta päästä tekemään opinnäytetyötä aiheen tiimoilta, innostuin heti asiasta.

Tässä insinööriyössä tutkittiin VTT:n kehittämän UWB-paikannusjärjestelmän kalibrointia ja selvitettiin sen automaattista toteuttamista. UWB-paikannustekniikkaa on tutkittu VTT:llä jo pitkään, esimerkiksi DecaWave Scensor 1000 -mikropiirillä toteutettua järjestelmää sekä kaupallista Ubisense-järjestelmää. VTT:n kehittämä järjestelmä pohjautuu DecaWave-yrityksen suunnittelemaan DW1000-mikropiiriin, ja se perustuu eri teknologiaan kuin kaupallinen Ubisense-järjestelmä.

Työssä selvitettiin automaattisen kalibroinnin toteuttamista ja suunniteltiin sekä toteutettiin aiheeseen liittyvät mittaukset. Järjestelmälle tehdyt mittaukset suoritettiin toimistotiloissa ja prosessihallissa kalibroinnin tarkkuuden toteamiseksi. Vertailumittaukset tehtiin laser-etäisyysmittarilla. Mittauksista talteen kerätty data käsiteltiin tietokoneella selkeämpään muotoon ja sitä analysoitiin Excel- ja Matlab -ohjelmien avulla. Mittauksien aikana havaitut ongelmat raportoitiin eteenpäin, jotta järjestelmän toimintaa saatiin kehitettyä paremmaksi.

2 ULTRA WIDEBAND -TEKNOLOGIA

Ultra Wideband (UWB) -tekniikan alkujuuret ovat kaukana historiassa, mutta viime vuosikymmeninä tekniikkaa on kehitetty eteenpäin ja otettu laajasti käyttöön. Seuraavissa osioissa perehdytään sen historiaan, tekniikkaan ja käyttöä rajoittaviin määräyksiin.

2.1 Historia

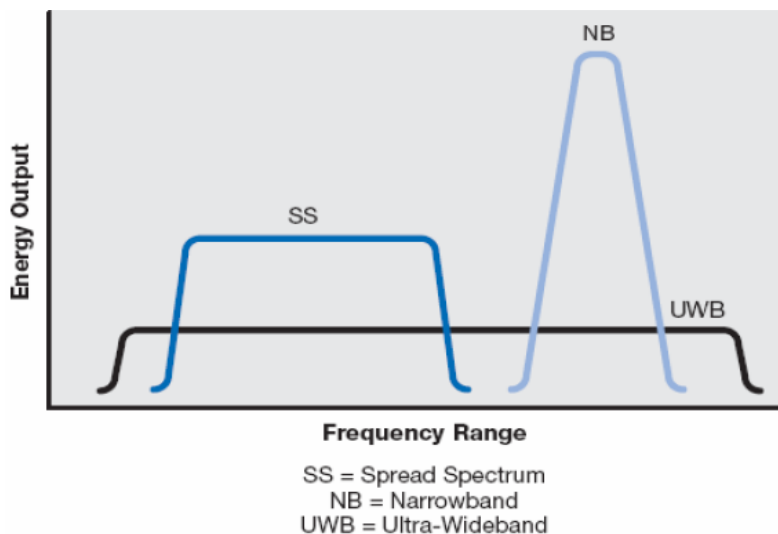
Marco Guglielmo kehitti 1800-luvun loppupuolella langatonta lennätintä, joka perustui kipinäväliin. Lennättimen perusideana oli lähettää pulsseja, jotka olivat pituudeltaan lyhyitä ja joiden spektri levittyi laajalle taajuusalueelle. Kyseistä tekniikkaa alettiin myöhemmin hyödyntää sotilaskäytössä, esimerkiksi tutkissa. UWB on ollut olemassa historiallisesti yhtä kauan kuin radiolähetyksetkin, mutta pääasiallisesti UWB-tekniikka on peräisin 1960-luvulta. Ensimmäinen UWB-viestintää perustaajuusalueella koskeva patentti pulssisignaalien lähettämisestä ja vastaanottoa koskien myönnettiin vuonna 1973 Gerald F. Rossille. [1, s. 3.] [2, s. 20.]

UWB-teknologiaa on aikaisemmin kutsuttu seuraavilla nimillä: peruskaista, kantoaalloton, ei sinimuotoinen ja impulssi. Terminä UWB syntyi Yhdysvaltain puolustusministeriössä 1980-luvun lopulla. [2, s. 20.]

2.2 Tekniikka

Yleisesti Ultra Wideband -signaali määritellään niin, että se on signaali, jonka suhteellinen kaistanleveys on enemmän kuin 20 % absoluuttisesta kaistanleveydestä tai vähintään 500 MHz. UWB käyttää laajempaa taajuusaluetta verrattuna muihin kapeakaistaisiin järjestelmiin. Tästä johtuen UWB-tekniikkaa käyttävät laitteet joutuvat jakamaan käytössä olevat taajuudet vakiintuneiden järjestelmien kanssa, jonka vuoksi on asetettu määräyksiä siitä, kuinka järjestelmät lähettävät UWB-signaalia. [2, s. 20.]

Kuva 1 havainnollistaa UWB-spektrin erilaisuutta, kun sitä verrataan hajaspektrilähetykseen (Spread Spectrum, SS) ja kapeakaistaiseen lähetysspektriin (Narrow Band, NB). NB käyttää datan kuljettamiseen hyvin pientä kaistanleveyttä, kun taas SS käyttää datan kuljettamiseksi enemmän kaistanleveyttä kuin on tarpeen. SS levittää kuljetettavan datan useille käytännöllisille taajuuksille. Esimerkiksi SS-radio voi siirtää dataa yli 22 MHz:n taajuudella 100 mW:n teholla, kun taas NB-radio voi siirtää dataa 2 MHz:n taajuudella 80 W:n teholla. [1, s. 4.] [3, s. 197-200.]



Kuva 1. UWB:n käyttämän taajuuskaistan vertailu muihin tekniikoihin [1, s. 4].

Absoluuttinen kaistanleveys B lasketaan käyttämällä yhtälöä (1). Taajuuskaistan ylärajasta, jota kutsutaan f_h -10 dB, vähennetään taajuuskaistan alaraja f_L -10 dB. [2, s. 20.]

$$B = f_H - f_L \quad (1)$$

Yllä olevaa yhtälöä (1) voidaan myös sanoa -10 dB taajuuskaistaksi. Suhteellinen kaistanleveys B_{frac} on määritelty yhtälössä (2). [2, s. 21.]

$$B_{frac} = \frac{B}{f_c} \quad (2)$$

Yhtälössä (2) f_c tarkoittaa keskitaajuutta, ja se on laskettu yhtälöllä (3) [2, s. 21].

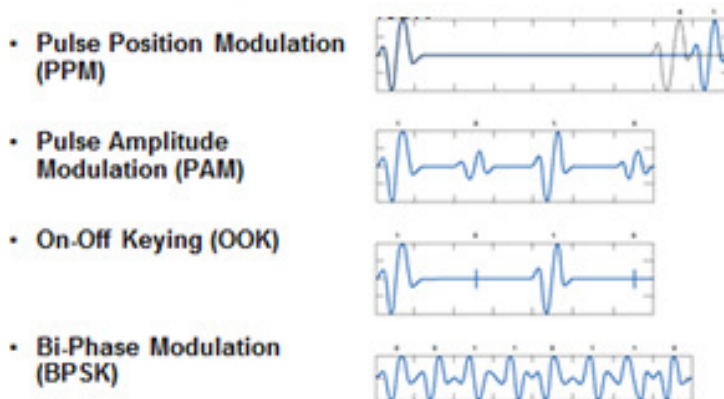
$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (3)$$

Suhteellinen kaistanleveys B_{frac} saadaan yhdistämällä yhtälöt (2) ja (3) ja näistä saatu yhtälö (4) voidaan kirjoittaa muodossa [2, s. 21].

$$B_{frac} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \quad (4)$$

UWB-järjestelmälle on tunnusomaista hyvin lyhytkestoiset pulssit, jotka ovat kestoiltaan noin nanosekunnin mittaisia. Järjestelmä lähettää peräkkäisiä ultralyhyitä pulsseja lyhyissä jaksoissa. UWB-viestintäjärjestelmissä, joita kutsutaan myös impulssiradioiksi, on sallittua käyttää lähetyksessä pulssimuotoista tai jatkuvasti lähetettävää lähetystapaa. [2, s. 20-21.]

Tiedonsiirrossa UWB signaalia moduloidaan, jolloin kantoaaltoon liitetään dataa. Käytettävissä olevia tekniikoita modulointiin ovat esimerkiksi nelivaiheinen vaiheavainnus (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), binäärinen amplitudimodulointi (On-Off Keying, OOK), pulssipaikkamodulaatio (Pulse Position Modulation, PPM), pulssiampitudimodulaatio (Pulse Amplitude Modulation, PAM) ja binäärinen vaihesiirtoavainnus (Binary Phase Shift Keying, BPSK). Kuva 2 havainnollistaa äsken mainittuja signaalien modulointimenetelmiä.

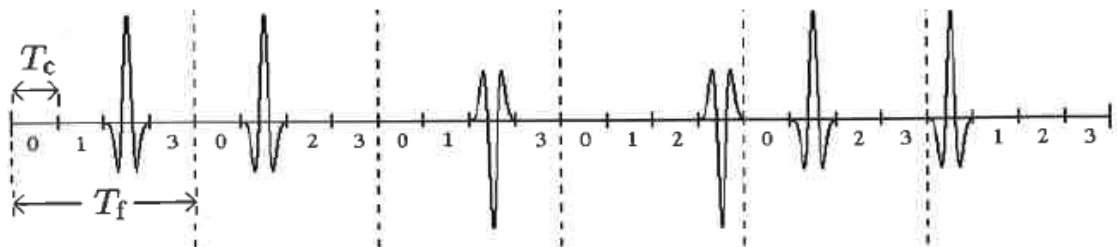


Kuva 2. Erilaisia modulointimenetelmiä [2].

IEEE 802.15.4-2011 -standardi tukee seuraavia modulointimenetelmiä: siirretty nelivaiheinen vaiheavainnus (Offset Quadrature Phase-Shift Keying, O-QPSK), (BPSK), vaihtoamplitudiavainnus (Amplitude Shift Keying, ASK), 1/4-vaiheistettu differentiaalinen modulointitekniikka (Differential Quadrature Phase-Shift Keying, DQPSK), pusrkepaikkamodulaatio (Burst Position Modulation, BPM), eräs digitaalivaihesiirtoavainnus (M-ary Phase-Shift Keying, MPSK) ja Gaussinen digitaalinen nelivaihemodulaatio (Gaussian Frequency-Shift Keying, GFSK). Decawave tukee modulointimenetelmistä BPM:ää ja BPSK:ta. [1, s. 10.] [4, s. 146.]

Kuvassa 3 näkyy kuinka informaatio on moduloinnilla sisällytetty pulssin polariteettiin tai sen sijaantiin. Kuvassa modulointitekniikkana käytetään pulssin paikkamodulaatiota. Yksittäistä informaationsymbolia kohti lähetetään lukuisia lyhyitä pulsseja. Jokainen kehys sisältää pulsseja, ja pulssien sijainnit kehyksessä määrittävät aikahyppelykoodin (Time-Hopping, TH) perusteella. Näin pienennetään pulssien yhteentörmäyksen todennäköisyyttä toisten UWB-pulsseja lähettävien UWB-järjestelmien kanssa. Kuvasta näemme selkeästi aikahyppelyn. Aikahyppelyn avulla UWB-lähteen spektristä yritetään poistaa jaksollisuuden aiheuttamat piikit. Pulssien paikka määräytyy aikahyppelyssä aikahyppelykehysten sisällä pseudosatunnaisesti. [2, s. 21.] [1, s. 10.]

Kuva 3 havainnollistaa tilannetta, jossa kolme informaationsymbolia on lähetetty, ja kukin näistä informaatiobiteistä sisältää joko kaksi jaksoa tai kaksi pulssia. Ensimmäiselle bitille on annettu aikahyppelykoodiksi $\{2,1\}$, jolla tarkoitetaan, että kyseistä pulssia on liikutettu $2 T_c$ sekunnin verran ensimmäisessä jaksossa. Samalla periaatteella on seuraavassa jaksossa olevaa pulssia siirretty eteenpäin T_c sekunnin verran. Tällä T_c :llä tarkoitetaan aikahyppelyn osaa, T_f :llä jaksoa ja ne kummatkin on merkitty kuvaan. Kuvassa pulssien sijainnit jaksoissa määrittyvät TH-koodin perusteella, joka on $\{2,1,2,3,1,0\}$. [2, s. 21.] [1, s. 10.]



Kuva 3. UWB-impulssiradion signaali, jossa kaksi pulssia on lähetetty yhtä informaationsymbolia kohti [2, s. 22].

2.3 Määräykset ja rajoitukset UWB-signaalille

UWB-signaalit vievät laajan osan spektriä. Tästä johtuen niiden täytyy toimia säädetysti muiden radiosignaaleita käyttävien järjestelmien kanssa, jotta radiosignaalit eivät häiritse toisiaan. Lähetettäessä UWB-signaaleja ilman tehorajoituksia, kaikki samalla kaistalla toimivat langattomat järjestelmät voivat häiriintyä UWB-signaalista. Tällaisten ongelmien estämiseksi on UWB-lähettimien täytettävä niille asetetut vaatimukset, jotta muiden järjestelmien toimintaa ei häiritä. Esimerkiksi kaupallisesti ja sotilaallisesti käytettävän paikannusjärjestelmän (Global Positioning System, GPS) suorituskyvyn ei pitäisi heiketä UWB-signaalien vaikutuksesta. [2, s. 24.]

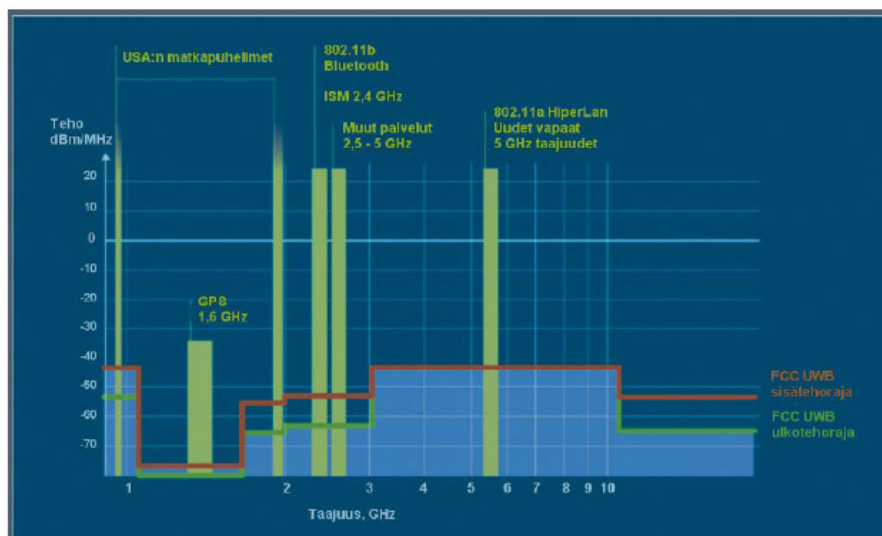
2.3.1 Määräykset Yhdysvalloissa

Yhdysvaltain tietoliikennekomissio (Federal Communications Commission, FCC) aloitti UWB-määritelmän valmistelun vuonna 1998. Tavoitteena oli, että UWB:n tarjoamia etuja voitaisiin hyödyntää heikentämättä muiden laitteiden suorituskykyä. Ensimmäiset määräyksensä FCC julkaisi vuoden 2002 helmikuussa. Niissä sallitaan rajoitetusti UWB-laitteiden käyttö. Määräyksen mukaisesti UWB-laite saa lähettää signaalia vain tietyn tehotason alapuolella, jotta se ei aiheuta merkittäviä häiriöitä muille laitteille samalla taajuuskaistalla. Taajuusalueella 3,1–10,6 GHz tehotiheys ei saa ylittää $-41,3$ dBm/MHz. Taajuusalueen ulkopuolella tehotiheyden pitää olla tätäkin matalampi riippuen erityisestä käyttötarkoituksesta. UWB:n kantama riippuu ympäristöstä, mutta se voi olla jopa 400–500 m. [2, s. 25.]

FCC on määritellyt määräyksissään useimmille laitteille käyttökelpoiseksi kaistanleveydeksi 7,5 GHz. Eri maiden sallimat ja kieltämät UWB-taajuudet näkyvät kuvassa 5. Esimerkiksi Yhdysvalloissa on sallittua käyttää UWB-taajuuksia 3432–10296 MHz ja Kiinassa sallittuja taajuuksia ovat 4486 MHz ja 6600–8712 MHz. Käytettävät taajuudet vaihtelevat jonkin verran eri maiden välillä, osa taajuuksista on sallittuja kaikissa maissa. [2, s. 25.]

Tehotasorajoitukset määritellään suhteessa isotrooppisen antennin säteilytehoon (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP). Raja määritellään mittaamalla signaalin suurin voimakkuus mitta-alueeseen kuuluvilla taajuuksilla mistä tahansa suunnasta. Keskiarvo EIRP-spektritiheydessä mitataan 1 MHz:n resoluutiokaistaleveydellä RMS-ilmaisimella keskimääräisen mittausajan ollessa 1 ms tai vähemmän.

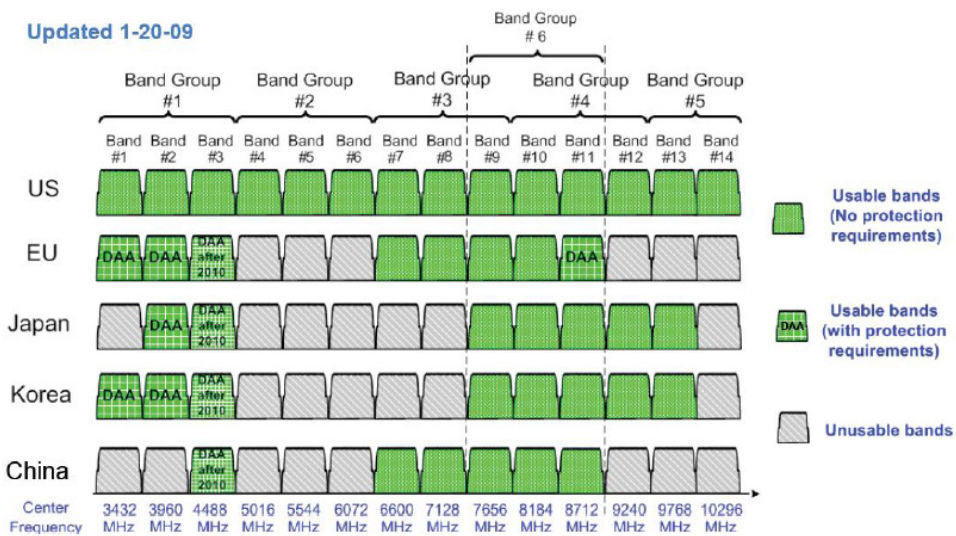
Tahattomia säteilylähteitä, kuten televisioita ja tietokoneiden näyttöjä varten on säädetty $-41,3$ dBm/MHz raja. Joissakin laitteissa on käytettävä tätäkin matalampia rajoja, jotta aiemmin määritelty raja ei ylity. Kuva 4 havainnollistaa, millaisia FCC:n asettamat rajoitukset ovat ja millaisia taajuuksia muutama esimerkkilaitte käyttää. Rajoitukset, jotka FCC on antanut, voidaan yleisesti ajatellen jakaa kolmeen eri alueeseen: kuvantaminen, viestintä ja ajoneuvotutka. Myös sisä- ja ulkokäyttöön oleville UWB-laitteille on säädetty erilaisia määräyksiä. [2, s. 25-26.]



Kuva 4. FCC:n määrittelemät maksimilähetystehot eri UWB-taajuuksille [1, s. 6].

2.3.2 Määräykset EU-alueella

Suomessa radiotaajuuksien käyttöä ohjaa ja valvoo viestintävirasto, jonka päätöksissä on otettu huomioon kansainväliset määräykset ja sopimukset. Kuvassa 5 näkyy Euroopassa käytettäväksi hyväksytyt UWB-taajuudet, jotka ovat EIRP-säteilyteholtaan maksimisuuntaan korkeintaan $-41,3$ dBm/MHz. Kuvasta nähdään, että EU-rivillä olevat taajuusalueeryhmä 1 (Band Group #1) ja taajuusalue 11 (Band #11) on merkitty merkinnällä (Detection and Avoid, DAA). Se tarkoittaa, että laite kuuntelee kanavan liikennettä ja käyttää kanavaa sen ollessa vapaa. Näin vältetään kanavan ylikuormittuminen, ja laitteiden toisillensa aiheuttamat häiriöt pysyvät pieninä. Taajuusalueeryhmiä 2 (5016–6072 MHz) ja 5 (9768–10296 MHz) ei ole sallittu käytettäväksi EU-alueella. [2, s. 25.] [5.]



Kuva 5. Eri maiden sallimat ja kieltämät UWB-taajuudet [6, s. 17].

3 PAIKANNUSMENETELMÄT

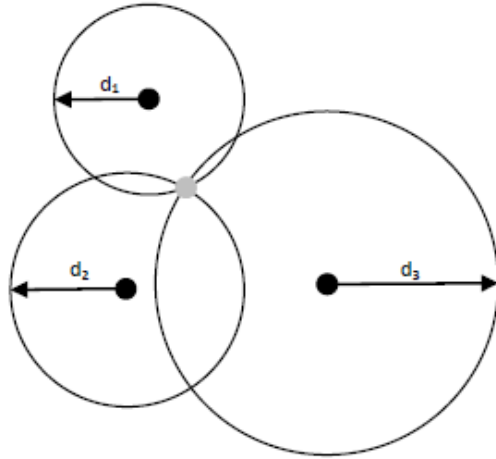
Real Time Location System (RTLS) tarkoittaa reaaliaikaista paikannusjärjestelmää. RTLS-järjestelmän avulla voidaan paikantaa ihmisiä, eläimiä tai muita kohteita. Toiminnan perustana on RTLS-tagit eli tunniste, joka kiinnitetään seurattavaan kohteeseen. Tagin sijainti voidaan määrittää, kun kiinteät vertailusolmut saavat tietoa tagin etäisyydestä. Järjestelmän avulla voidaan esimerkiksi paikallistaa kalliita hoitoinstrumentteja sairaaloissa, etsiä tuotteita isosta varastosta tai seurata metsäkoneiden etenemistä tuotantolinjastolla. [7.]

RTLS-järjestelmät perustuvat useimmiten radiotaajuuteen, mutta muitakin teknisiä toteutuksia käytetään. Tällaisia toteutuksia ovat esimerkiksi akustiikka- ja ultraäänitekniologia. On olemassa lukematon määrä vaihtoehtoja, joilla vertailusolmut ja tagit voivat vastaanottaa, lähettää, tai sekä lähettää että vastaanottaa dataa. [7.]

Seuraavassa on kuvattu neljä paikannustekniikkaa.

3.1 Paikannus TOA-menetelmällä

Saapumisaikapaikannus (Time Of Arrival, TOA) mittaa etäisyyttä. Useamman tukiaseman etäisyyksistä voidaan geometrisesti laskea paikka kolmiomittauksella. Mittaukset antavat tiedon etäisyydestä kahden solmun välillä mittaamalla signaalin lentoaikaa. Kuva 6 havainnollistaa kolmiomittausta, jossa mustat pisteet kuvassa ovat vertailusolmuja. Ne mittaavat etäisyyttä ympyröiden kaarien keskellä olevasta harmaasta kohdesolmusta. Tuloksena saadaan kolmen ympyrän muodostama leikkauspiste. [6, s. 32.]



Kuva 6. Kolmiomittausta havainnollistava kuva [6, s. 36].

Kolmella TOA-mittauksella saatuja etäisyyksiä merkitään d_1 , d_2 ja d_3 . Seuraavat yhtälöt täytyy ratkaista, jotta pystytään laskemaan kohteen sijainti kolmiomittauksella. [6, s. 34.]

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

Yhtälössä (5) vertailusolmun tiedetty sijainti on (x_i, y_i) ja kohdesolmun sijainti on (x, y) . Yhtälöstä voidaan ratkaista sijainti (x, y) yhtälöiden (6) ja (7) mukaisesti. [6, s. 34.]

$$x = \frac{(y_2 - y_1)y_1 + (y_2 - y_3)y_2}{2[(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)]} \quad (6)$$

$$y = \frac{(x_2 - x_1)y_1 + (x_2 - x_3)y_2}{2[(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) + (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)]} \quad (7)$$

jossa

$$\begin{aligned} y_1 &= x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_2^2 \\ y_2 &= x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2 \end{aligned} \quad (8)$$

TOA-mittauksissa tukiaseman ja tagin keskinäinen synkronointi on olennainen osa järjestelmän toimintaa, koska etäisyysmittaus ei onnistu ilman synkronointia. Synkronoinnin lisäksi toinen vaihtoehto on käyttää jotakin protokollaa, esimerkiksi (Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging, SDS-TWR), ja sen avulla vaihtaa aikatietaa. Protokollalla korvataan synkronointi, ja siksi menetelmää kutsutaan asynkroniseksi. Kiteiden taajuuspoikkeama puo-

litetaan edestakaisella lähetyksellä, sillä kiteiden taajuudet eivät ole täsmälleen samat. Asiaa käsitellään myöhemmin tässä luvussa. Synkronointiin sisältyvää virhettä ei ole mahdollista täysin poistaa, sitä voidaan ainoastaan vähentää. Normaalissa TOA-menetelmässä käytetään suodatusta tai korrelointia, jossa verrataan kahden liipaisun välistä riippuvuutta toisiinsa. Signaalin saapuminen radioon aiheuttaa liipaisun ja näin tiedetään signaalin saapumisaika tarkasti. [6, s. 36.]

Kuva 7 havainnollistaa DecaWaven käyttämän SDS-TWR-protokollan toimintaa. Protokolla käyttää etäisyysmittauksessa lisättyä viestinvaihtoa, jolla vähennetään kiteiden keskinäisen taajuuspoikkeaman aiheuttamaa vaikutusta. Device A ja Device B ovat radioita. Alla olevissa kappaleissa kerrotaan tarkemmin SDS-TWR-protokollasta, joka perustuu kansainvälisen tekniikan alan järjestön (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) vuonna 2011 määrittelemään IEEE 802.15.4 -standardiin. [4, s. 273–274.]

Edestakainen aika t_{roundA} ja t_{roundB} voidaan ilmaista kahden t_p :n avulla ja vastaavasti t_{replyA} ja t_{replyB} seuraavasti:

$$t_{roundA} = 2t_p + t_{replyB} \quad (9)$$

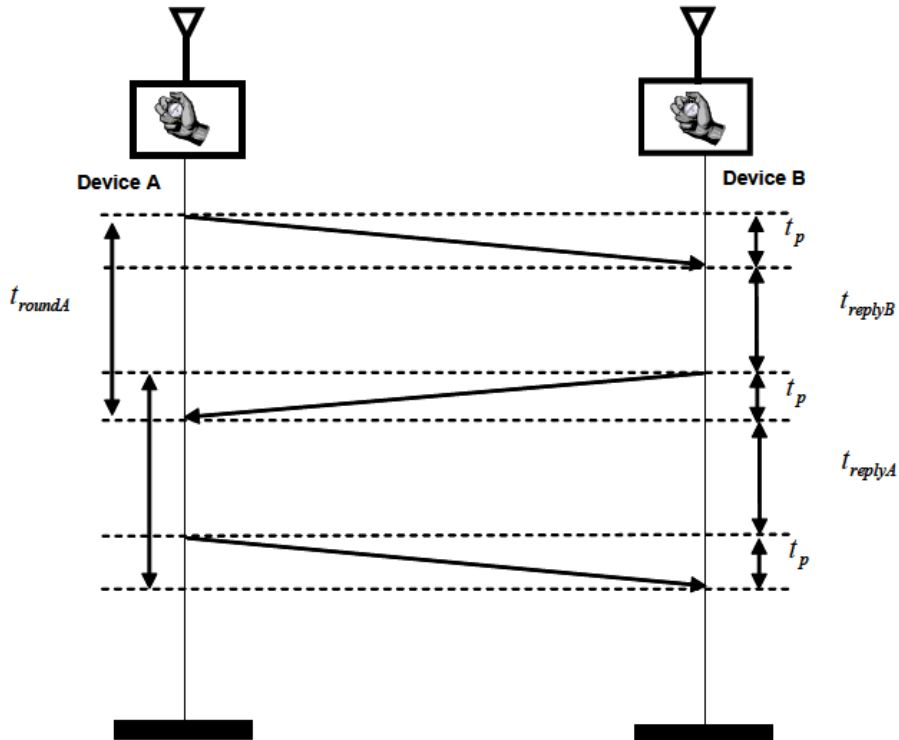
$$t_{roundB} = 2t_p + t_{replyA} \quad (10)$$

Tätä on havainnollistettu kuvassa 7. Yhdistämällä yllä olevat kaksi yhtälöä (9) ja (10) voidaan todellinen arvo saada t_p :stä:

$$4t_p = t_{roundA} - t_{replyA} + t_{roundB} - t_{replyB}$$

ja arvioitu \hat{t}_p ottamalla huomioon kiteiden toleranssit e_A and e_B :

$$4\hat{t}_p = (t_{roundA} - t_{replyA}) \times (1 + e_A) + (t_{roundB} - t_{replyB}) \times (1 + e_B)$$



Kuva 7. Viestiliikenne radioiden A ja B välillä SDS-TWR-protokollassa [4, s. 274].

t_{replyA} ja t_{replyB} voidaan korvata seuraavasti:

$$t_{replyA} = t_{reply} \quad (11)$$

$$t_{replyB} = t_{reply} + \Delta_{reply} \quad (12)$$

vähennetään se:

$$\hat{t}_p - t_p = \frac{1}{2} \times t_p \times (e_A + e_B) + \frac{1}{4} \times \Delta_{reply} \times (e_A - e_B) \quad (13)$$

Olettaen, että $t_p \ll \Delta_{reply}$, yhtälö yksinkertaistuu muotoon:

$$\hat{t}_p - t_p \approx \frac{1}{4} \times \Delta_{reply} \times (e_A - e_B) \quad (14)$$

Taulukossa 1 näkyy SDS-TWR-protokollaa käyttävän TOA-paikannusjärjestelmän tyypillisimmät virheet taajuustoleranssiin verrattuna. SDS-TWR:n lisäviesti on virhemarginaaliltaan paljon pienempi kuin heikkolaatuisten kiteiden käytöstä aiheutuva virhe 80 ppm. Kiteen merkintä ppm tarkoittaa, kuinka monta miljoonasosaa kiteen taajuus poikkeaa sen normaaliarvosta. Esimerkiksi jos kello käyttää 20 ppm:n merkinnällä varustettua kideä, niin kello poikkeaa oikeasta ajasta noin minuutin verran kuukauden tarkastelujakson aikana. Mitä pie-

nempi on kiteen ppm-lukema, sitä kalliimpia ne ovat. Ympäristön olosuhteet vaikuttavat kiteiden virheisiin, ja hyvälaatuinenkin kite voi värähdellä väärissä olosuhteissa ilmoitettua virhearvoaan suuremmalla taajuusalueella.

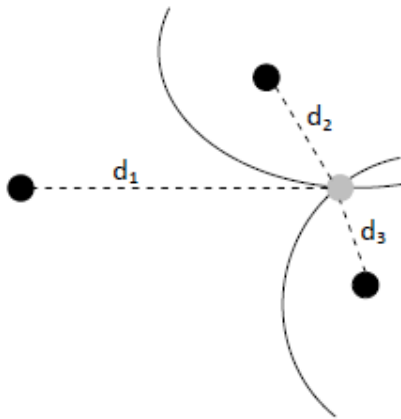
Taulukko 1. Tyypillinen virhe TOA-arvioinnissa käytettäessä SDS-TWR-protokollaa [4, s. 25].

$\Delta_{reply}/(e_A - e_B)$ (ms)	2 ppm (ns)	20 ppm (ns)	40 ppm (ns)	80 ppm (ns)
1	0.0005	0.005	0.01	0.02
10	0.005	0.05	0.1	0.2
100	0.05	0.5	1	2

TOA-mittauksen tarkkuutta voidaan parantaa kasvattamalla signaalin käyttökelpoista kaistanleveyttä. Toinen mahdollisuus on parantaa signaalin kohinasuhdetta (Signal to Noise Ratio, SNR). TOA-mittauksien tarkkuus perustuu siihen, että UWB-signaalilla on hyvin laaja kaistanleveys ja UWB-radioita käytettäessä päästään todella tarkkoihin mittaustuloksiin etäisyyttä arvioitaessa. Teoreettiset rajat ovat muutaman senttimetrin luokkaa kun signaalikohinasuhde on pieni. [6, s. 36.] [8, s. 76.]

3.2 Paikannus TDOA-menetelmällä

Saapumisaikaeropaikannus (Time Difference Of Arrival, TDOA). Vertailusolmujen ollessa synkronoituja keskenään on mahdollista, että TDOA-mittaukset tehdään ilman, että vertailuja kohdesolmua on synkronoitu keskenään. Normaali TDOA toimii seuraavalla tavalla. Tagi lähettää pulssin, ja useampi tukiasema ottaa pulssin vastaan. Tukiasemat on synkronoitu keskenään hyvin tarkasti. Tukiasemat tietävät pulssin vastaanoton aikaerot toisiinsa nähden ja aikaeroista voidaan laskea paikka. TDOA-paikannuksen toimintaa on havainnollistettu kuvassa 8. Kuvassa oleva alempi paraabeli saadaan piirrettyä d1 ja d3 välisestä saapumisaikaerosta. Vastaavasti d1 ja d2 välisestä saapumisaikaerosta saadaan piirrettyä toinen paraabeli, joka sijaitsee kuvassa ylempänä. Paraabelikäyrien leikkauspisteessä on tagi. [6, s. 36.] [9.]

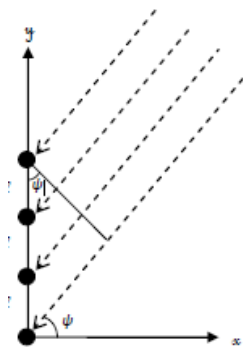


Kuva 8. TDOA-paikannusmenetelmä [6, s. 36].

3.3 Paikannus AOA-menetelmällä

Saapumiskulmapaikannuksessa (Angle Of Arrival, AOA) määritetään radioaallon saapumiskulma suhteessa tukiaseman antenniryhmään. Se perustuu saapumisaikaeroinformaation mittaamiseen antennielementeistä. Saapuvien signaalien aikaeroista pystytään laskemaan saapumiskulma AOA. Kuva 9 havainnollistaa aaltojen saapumista antennielementteihin hieman eri aikaan. [10, s. 1–2.]

Tämän tekniikan tarkkuus on riippuvainen signaalin heijastuksista ja antennin suuntakuvios-
ta. Yksittäinen tukiasema tietää vain kulman. AOA:ssa riittää kaksi tukiasemaa 3D-
paikannukseen. [11, s. 4.]



Kuva 9. AOA-paikannusmenetelmä [2, s. 67].

3.4 Paikannus RSS-menetelmällä

Paikannusmenetelmässä (Received Signal Strength, RSS) etäisyyden määrittämiseen käytetään vastaanotetun signaalin voimakkuusmittausta. Tunnettaessa ympäristön, käytettävien radiolaitteistojen ja etäisyyden parametrit on mahdollista signaalin voimakkuuden perusteella määrittää etäisyys mitattavaan kohteeseen. [12, s. 1.]

Ennen järjestelmän käyttöä tarvitaan voimakkuuskartta alueesta, jossa paikannus halutaan toteuttaa. Voimakkuuskartta on ikään kuin sormenjälki alueesta. Sen avulla voidaan päätellä, missä kohtaa tagi liikkuu kartalla. Mitattavan tilan muuttuessa voimakkuuskartta on mitattava uudestaan. Tämä tekniikka ei sovellu reaaliaikaiseen ja tarkkaan paikantamiseen, sillä sen tarkkuus on parhaimmillaankin metriluokkaa. RSS:ää käytetään radiotekniikassa myös varmistamaan signaalin riittävä voimakkuus, josta voidaan päätellä, toimiiko laite oikein.

4 DECAVAWE-PIIRI

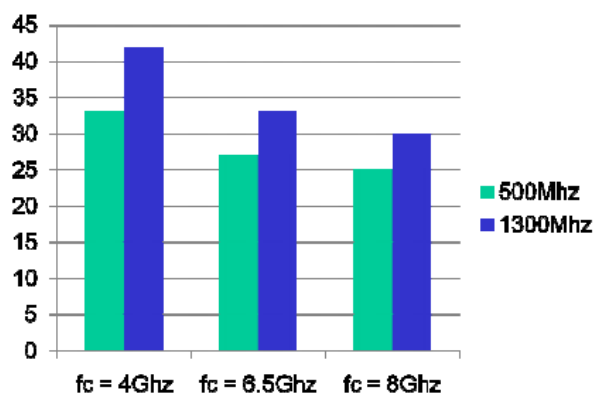
VTT:n prototyypilaitteisto perustuu DecaWave-yrityksen valmistamaan DW1000-mikropiiriin, joka täyttää IEEE:n määrittelemän IEEE 802.15.4 -standardin. Piiri on suunniteltu erityisesti langattomia sensoriverkkoja ja paikannusjärjestelmiä varten. Laitteella saavutettavan paikannuksen tarkkuus on muutaman senttimetrin luokkaa. Laitteisto kykenee havaitsemaan 11 000 tagia halkaisijaltaan 40 m:n kokoisen ympyrän sisältä. Näiden 11 000 tagin ei tarvitse olla suorassa näköyhteydessä tukiasemaan. Signaalit eivät kuitenkaan kykene läpäisemään esteitä, jotka ovat rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan yhtenäistä lasipintaa tai metallilevyä. Paikannusmenetelmänä käytetään TOA:ta tai TDOA:ta. TOA:ssa on hyödynnetty SDS-TWR-tekniikkaa, joka mahdollistaa tarkan etäisyysmittauksen ilman, että laitteet on synkronoitu keskenään. [13, s. 6.]

Piirin valmistus on edullista, koska siinä syntyvät piikulut ovat hyvin pienet. Piiri tukee kuutta RF-kanavaa, jotka toimivat taajuusalueella 3,5–6,5 GHz. Piiri toimii käyttöjännitteellä 2,5–3,6 V ja on virrankulutukseltaan alhainen, sillä Watch dog -tilassa se vie virtaa 2 μ A, Deep sleep -tilassa 100 nA ja IDLE-tilassa 8 mA. Piiriin on integroitu MAC-tuki, joka tukee sekä (Forward Error Control, FEC) että (Cyclic Redundancy Check, CRC) -tarkistusta. Piiri tukee SPI-liitäntää ja on pakattu 48 pinniseen QFN-koteloon. Piirin mittasuhteita havainnollistaa kuva 10, jossa piiri on asetettu kahden euron kolikon päälle. [13, s. 6.]



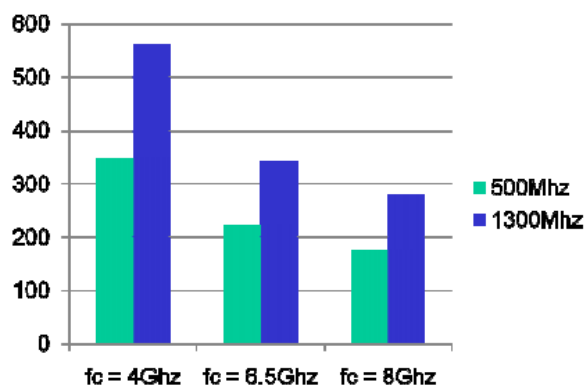
Kuva 10. DW1000-mikropiiri kahden euron kolikon päälle asetettuna [14].

DecaWave-yritys on tutkinut valmistamansa DW1000-mikropiirin ominaisuuksia testilaitteistollaan erilaisten mittausten avulla. Kantomatkaa on mitattu eri kaistanleveyksillä tilanteissa, joissa signaali on voinut edetä suoraan, sekä tilanteissa, joissa signaalille on tapahtunut monitie-etenemistä. Non Line Of Sight (NLOS) tarkoittaa tilannetta, jossa UWB-radioilla ei ole esteetöntä näköyhteyttä toisiinsa, jolloin signaali kiertää esteen ja heijastuu esimerkiksi seinistä. Kuvassa 11 on esitetty valmistajan mittaamia kantomatkoja DecaWavelle eri kaistanleveyksillä NLOS-tilanteessa. Kuvan pystyakselilla näkyy signaalin kantomatka metreinä, ja f_c tarkoittaa kantoaallon taajuutta. Esimerkkikäyttökohteita ovat väliseinälliset toimistotilat tai omakotitalot.

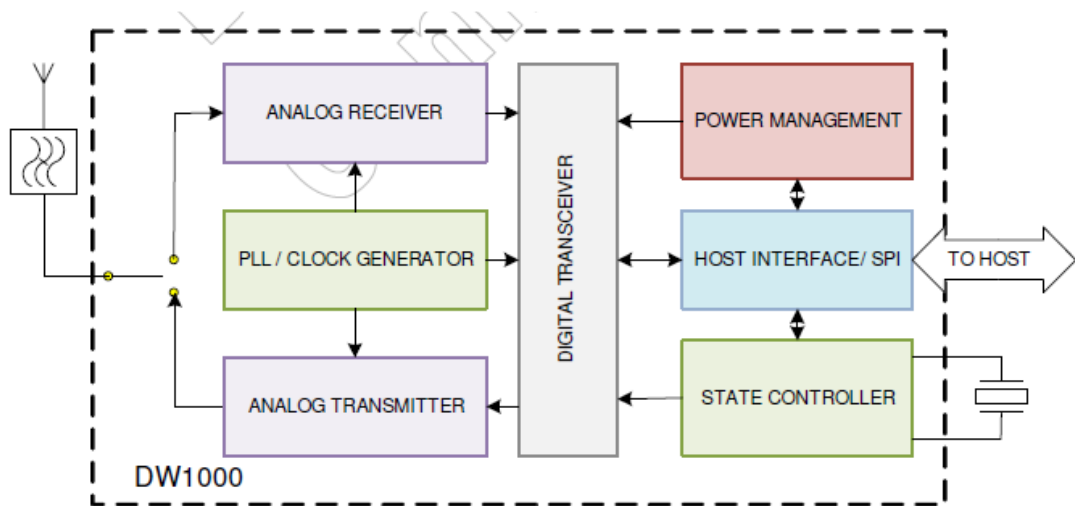


Kuva 11. DecaWaven kantama ei suoralla näköyhteydellä eri kaistanleveyksillä [15, s. 7].

Line Of Sight (LOS) tarkoittaa tilannetta, jossa UWB-radioilla on esteetön näköyhteys toisiinsa. Kuvassa 12 on esitetty valmistajan mittaamia kantomatkoja DecaWavelle eri kaistanleveyksillä LOS-tilanteessa. Esimerkkikäyttökohteita ovat isot tehdashallit, jotka ovat pääosin suurta ja avaraa tilaa.



Kuva 12. DecaWaven kantama suoralla näköyhteydellä eri kaistanleveyksillä [15, s. 7].



Kuva 13. DecaWave piirin toiminnallinen lohkokaaavio [13, s. 6].

Kuvassa 13 näkyy Decawaven IC-piiri, joka sisältää analogia- ja digitaalielektroniikkaa. Piiriä ohjataan mikrokontrollerilla, jossa on sulautettu ohjelmisto. Liikenne mikrokontrolleriin hoidetaan käyttämällä sarjaliikenneväylää (Serial Peripheral Interface, SPI). Sitä käyttämällä voidaan tietoa vuorotellen vastaanottaa tai lähettää, ja sen avulla laitetta voidaan komentaa esimerkiksi ulkoisella tietokoneella. [16, s. 180.]

SPI:n kautta saapuvien käskyjen perusteella State Controller päättää ja ohjaa laitteen toimintatiloja. Erilaisia virranhallintatiloja on viisi: idle, init, sleep, deepsleep ja off. Analog Transmitter ja Analog Receiver tarkoittavat lähettimen ja vastaanottimen analogista elektroniikkaa. Laitte pystyy lähettämään ja vastaanottamaan radiosignaaleja, mutta se ei kykene tekemään niitä yhtä aikaa. Digital Transceiver tarkoittaa lähettimen/vastaanottimen digitaalista elektroniikkaa. [13, s. 6–25.]

5 TUKIASEMIEN AUTOMAATTINEN KALIBROINTI

Insinööriyössä tutkittiin VTT:n kehittämän UWB-paikannusjärjestelmän kalibrointia ja kehitettiin sen automaattista toteuttamista. Ongelmana paikannusjärjestelmissä on niiden työläs käyttökuntoon laittaminen, joka vie paljon aikaa ja vaatii käyttäjältään teknistä tietämystä. Ongelma haluttiin ratkaista suunnittelemalla kalibroinnista automaattista, jotta se tapahtuisi käyttäjän näkökulmasta ajateltuna mahdollisimman yksinkertaisesti ja olisi nopea toteuttaa. Automaattinen kalibrointi sisältää kokonaisuutena tukiasemien keskinäisen sijainnin määrittämisen xy-koordinaatistossa suhteessa ympäristöön. Käyttäjän ei tarvitse tehdä tukiasemien kulmien säätöä tai muuta mittaamista, vaan ainoastaan painaa kalibrointinappia. Tämän jälkeen järjestelmä on käyttövalmis.

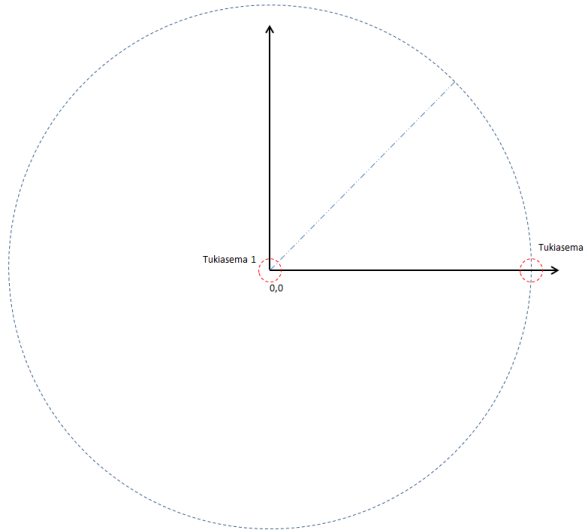
5.1 Järjestelmän kalibrointi

Ad hoc -verkolla tarkoitetaan sellaista langatonta verkkoa, joka muodostetaan jotain tiettyä tarkoitusta varten, eikä se vaadi kiinteää asennusta. Tällaisen verkon muodostaminen on nopeaa. Kalibroinnin ideana on pystyä määrittelemään tukiasemien paikat Ad hoc -verkossa ja pystyä sijoittamaan ne fyysiseen maailmaan, kuten esimerkiksi talon pohjapiirustukseen tai karttaan.

Järjestelmän mittaukset tapahtuvat TOA-menetelmällä, jossa mitataan signaalin lentoaikaa. TOA:n toimintaa on selvitetty tarkemmin kohdassa 3.1. Pelkän signaalin lentoajan perusteella ei tiedetä, missä suunnassa tukiaseman ympärille kuvitellun 360 asteen kehällä tunnettu koordinaattipiste sijaitsee. Koordinaattipiste pystytään määrittelemään, kun tunnetaan kahden muun pisteen tarkka sijainti.

Opinnäytetyössä on kyseessä 2D-paikannus, sillä 3D-paikannuksessa tukiasemien etäisyyksiä ei enää tarkastella ympyrän kehinä vaan palloina. Tällöin tukiasemien leikkauskohdat sijoittuvat pallopintojen leikkauspinoille.

Ensimmäisessä vaiheessa, kun tukiaseman 1 paikkaa määritetään, se sijoitetaan origoon. Kuva 14 selventää tilannetta. Pisteestä 1 mitataan etäisyys pisteeseen 2, jossa tukiasema 2 sijaitsee. Tukiasema 1 ja 2 välillä oleva vektori sijoitetaan siten, että se on positiivisen x-akselin suuntaisesti. Näin ollen tukiasemalle 2 saadaan määriteltyä paikaksi koordinaattipiste $(X, 0)$.

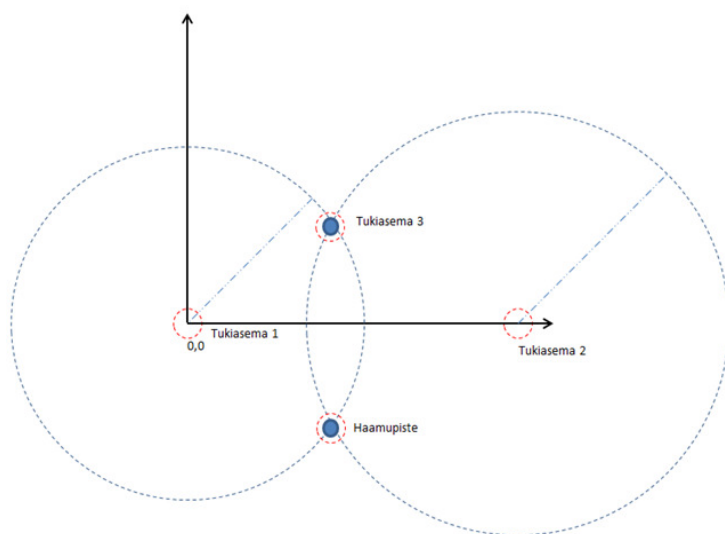


Kuva 14. Tukiaseaman 1 ja 2 välisen etäisyyden määrittely.

Toisessa vaiheessa on tiedossa tukiasemien 1 ja 2 koordinaattipiste, kun tukiaseman 3 sijaintia määritetään. Tukiaseaman 3 sijainnin määrittelemisen tapahtuu siten, että tukiasemat 1 ja 2 mittaavat etäisyytensä tukiasemaan 3. Tukiaseama 1 piirtää kuvitteellisen ympyrän muotoisen alueen ympärilleen, joka sivuaa tukiasemaa 3. Tukiaseama 2 mittaa oman etäisyytensä tukiasemaan 3 samalla tavalla kuin tukiasema 1 mittasi oman etäisyytensä. Kuva 15 havainnollistaa tilannetta, jossa tukiasemat 1 ja 2 piirtävät ympärilleen kuvitteellisen 360 asteen kehän kohti tukiasemaa 3. Nämä kaksi ympyrän kehää leikkaavat toisensa tukiasema 3 sijaintikoordinaattipisteissä, jotka on merkitty sinisillä palloilla kuvaan.

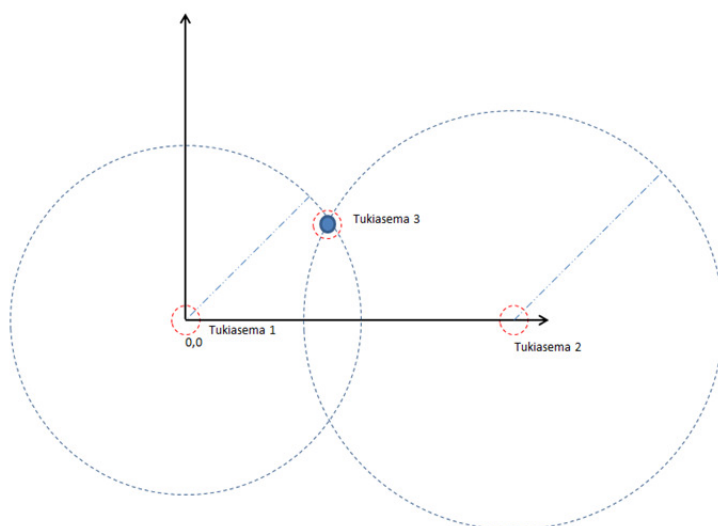
Tukiasemalle 3 syntyy kaksi eri vaihtoehtoista koordinaattipistettä, joista vain toinen on todellinen koordinaattipiste ja toinen niin sanottu haamupiste. Kuva 15 selventää kyseistä ongelmaa. Tähän mennessä ei ole löytynyt hyvää keinoa saada poistettua haamupistettä automaattisesti. Haamupisteen poistamiseksi ei voida olettaa, että tukiasema 3 olisi aina x-akselin positiivisella puolella, sillä tämä ei todellisuudessa ole mahdollista. Tukiaseama 3 voi sijaita kuvitteellisella ympyrän kehällä missä tahansa, ja sille saadaan aina kaksi koordinaattipistettä, joista vain toinen on todellinen. Tällä hetkellä ainoa keino haamupisteen poistamiseksi on, että järjestelmän käyttäjä poistaa kuvasta manuaalisesti väärän koordinaattipisteen. Käyttäjän on helppo havaita väärä koordinaattipiste, sillä hän näkee järjestelmän ohjauskuvasta, miten esimerkiksi kohteena oleva talo sijoittuu karttaan. Väärän koordinaattipisteen poistaminen tapahtuu esimerkiksi napsauttamalla sitä hiirellä. Haamupisteen poistamisen jälkeen ei enää muodostu uusia haamupisteitä. Mikäli haamupistettä ei tässä kohtaa kalibrointia poistettaisi,

muodostuisi niitä lisää sitä mukaa, kun tukiasemien määrää lisättäisiin järjestelmään. Tällöin tukiasemien koordinaattipisteiden määrittely menisi mahdottomaksi.



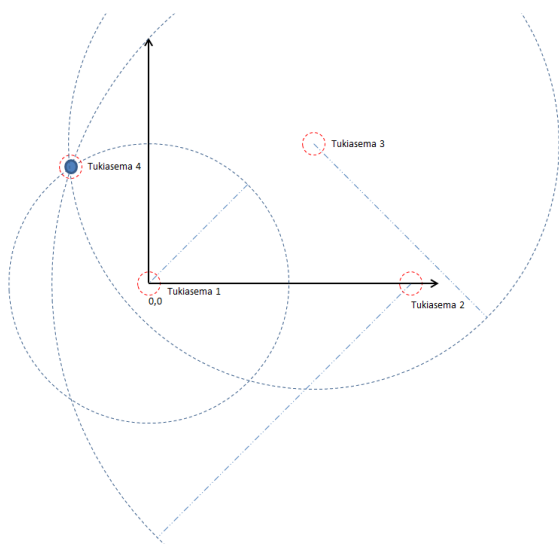
Kuva 15. Tukiaseman 3 sijainnin määrittely ja haamupiste mukana.

Vaiheessa kolme tiedetään koordinaattipisteet tukiasemille 1, 2 ja 3, kun haamupiste on otettu pois kuvasta. Kuva 16 havainnollistaa tukiasemien sijoittumisen ja paikat ennen tukiasema 4 koordinaattipisteen määrittelyä.



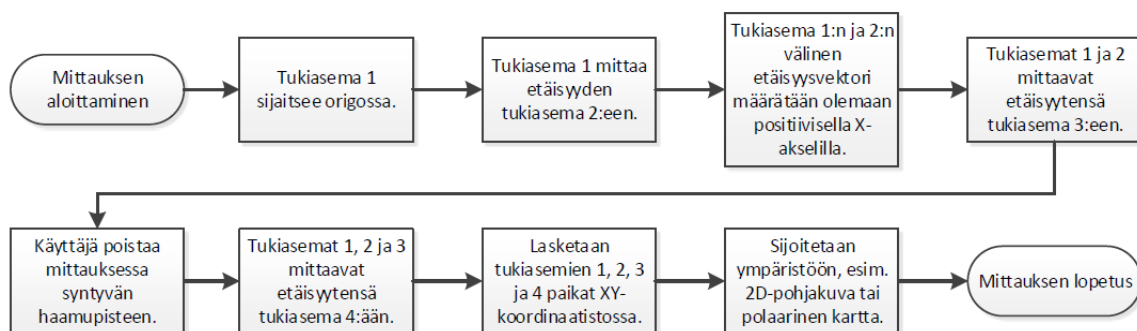
Kuva 16. Tukiasemien 1, 2 ja 3 paikat haamupisteen poistamisen jälkeen.

Kuva 17 havainnollistaa tilannetta, kun tukiasemat 1, 2 ja 3 mittaavat etäisyytensä tukiasemaan 4. Tässä vaiheessa ei muodostu enää lisää haamupisteitä, vaan tukiasemalle 4 saadaan määritettyä alue, jossa sen koordinaattipiste sijaitsee.



Kuva 17. Tukiasema 4 sijainnin määrittely.

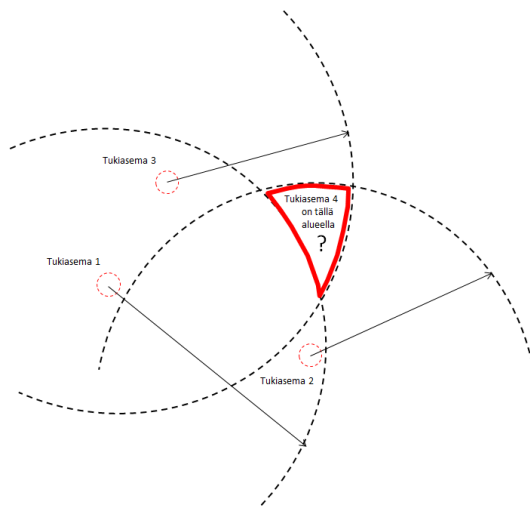
Kuva 18 esittää tiivistetysti mittauksen vaiheet.



Kuva 18. Vuokaavio kalibroinnista

5.2 Mittauksissa syntyvä virhe

Tukiasemien paikan mittaamisessa syntyy virhettä. Tämä johtuu siitä, että kuvitellut ympyrän kaaret eivät leikkaa mitattavan tukiaseman keskeltä, vaan ne menevät sen ylä- tai alapuolelta. Kun tukiasemat 1, 2 ja 3 mittaavat tukiaseman 4 paikkaa, muodostuu mitattavan tukiaseman kohdalle alue, jossa tukiaseman todellinen koordinaattipiste sijaitsee. Kuvat 19 ja 20 havainnollistavat tukiaseman paikan määrittelyssä tapahtuvan virheen. Todennäköisyyslaskennan numeerisilla menetelmillä on mahdollista laskea todennäköisin paikka.



Kuva 19. Tukiaseman paikan määrittelyssä tapahtuva virhe.



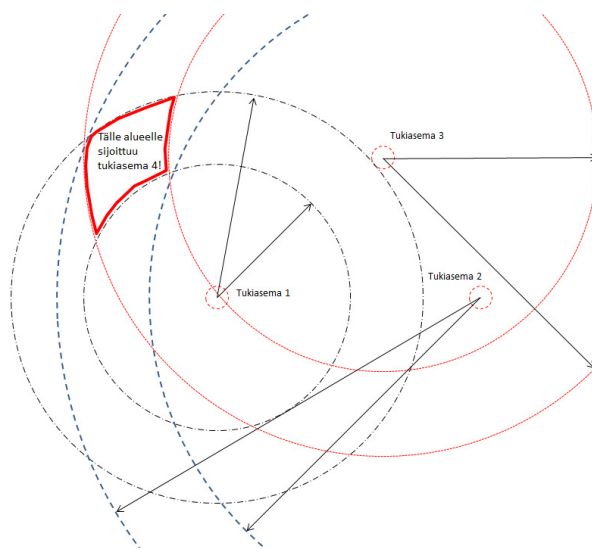
Kuva 20. Epätarkkuus tukiasemien mittauksissa

Kuvassa 21 tukiasemat 1, 2 ja 3 mittaavat etäisyyttä tukiasemaan 4. Jokainen näistä kolmesta tukiasemasta piirtää kuvitteelliset kaksi ympyrän kaarta. Ympyrän kaaret kuvastavat sitä, että etäisyyttä toiseen tukiasemaan ei täysin tiedetä. Tukiasema sijaitsee ympyrän kaarien väliin jäävällä alueella. Kun jokainen tukiasema on piirtänyt omat kaarensa, muodostuu salmiakkimainen alue, johon tukiasema 4 hyvin todennäköisesti sijoittuu.

Jos oletetaan, että etäisyyden mittausvirhe jakautuu Gaussin käyrän mukaisesti ja mitattu etäisyys on aina 95 %:n todennäköisyydellä ympyrän kaarien välisellä alueella, voidaan laskea, että tukiasema 4 koordinaattipisteet ovat todennäköisyydellä P piirretyllä salmiakkialueella. Kuva 21 näyttää syntyvän salmiakkialueen.

$$P = (0,95 * 0,95 * 0,95) * 100 = 86 \%$$

Paikannusjärjestelmän käyttöön tarvitaan vähintään kaksi tukiasemaa, jotta tagi saadaan paikannettua. Kahta tukiasemaa käyttämällä syntyy tagin oikean sijainnin lisäksi myös haamupiste. Tämä johtuu siitä, että tukiasemat eivät tiedä suuntaa vaan ainoastaan etäisyyden. Kolme tai useampaa tukiasemaa käyttämällä ei saada yksittäistä pistettä, vaan alue, jossa mitattu koordinaattipiste sijaitsee. Tämä johtuu siitä, että mitatut säteet eivät ole oikean mittaisia, koska etäisyydsmittaus ei ole absoluuttisen tarkka, virhe on tällöin noin muutama senttimetri.



Kuva 21. Tukiasemat 1, 2 ja 3 määrittävät tukiaseman 4 paikkaa.

Keskihajonta

Keskihajonta s laskettiin yhtälöllä (15). Kaavassa olevat x :t tarkoittavat havaintoarvoja ja havaintojen lukumäärän ilmaisee n . Kaavassa jakajana oleva $(n-1)$ vaihdetaan lukumäärää tarkoittavaksi n :ksi, jos tehdään kokonaistutkimuksia, joiden tuloksia ei yleistetä. Keskihajontaa käyttämällä saadaan tieto, kuinka paljon keskimäärin mittaustulokset poikkeavat keskiarvosta. Mitä pienempi poikkeama on, sitä tarkempia tuloksia järjestelmä antaa. [17.] [18.]

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{n - 1}} \quad (15)$$

5.3 UWB-paikannuksen ja automaattisen kalibroinnin sovellutus esimerkkejä

Yleisötapaukset

Yksi sovelluskohde järjestelmälle ovat suuret yleisötapaukset, joissa henkilökuntaa ja kävijöitä on paljon. Esimerkiksi vahtimestareiden sijainnin näkeminen kartalta on tärkeää, jotta ongelmatapauksissa lähimpänä tilannepaikkaa oleva turvallisuushenkilökunta voidaan ohjata nopeasti oikeaan paikkaan. Ulkoilmatapauksissa paikannusta hoidetaan nykyään GPS:n avulla, mutta se ei toimi sisätiloissa, koska satelliittisignaalit eivät kuulu sisälle. Järjestelmään voidaan liittää helposti lisälaitteita, esimerkiksi kamera ja sankakuulokkeet. Kuvan ja äänen siirtäminen ovatkin järjestelmän tärkeimpiä ominaisuuksia. Erityisesti UWB-radion kuuluvuus, luotettavuus ja häiriöttömyys ovat merkittävästi parempia verrattuna muihin radiojärjestelmiin. UWB-radiojärjestelmät eivät häiriinny monitie-etenemisestä ja UWB-signaalit läpäisevät seiniä ja muita esteitä paljon paremmin kuin tavanomaisten radiojärjestelmien signaalit. UWB-järjestelmät soveltuvatkin luotettavuutensa perusteella haastaviin olosuhteisiin. Tällä hetkellä tapahtumien henkilökunta käyttää radiopuhelimia, joiden avulla siirretään vain ääntä. Datan siirtäminen ja paikkatiedon määrittäminen sekä välittäminen ovat sellaisia ominaisuuksia, joille olisi paljon käyttöä.

Palo- ja pelastustyö

Tämän alan järjestelmille tärkeimpiä ominaisuuksia ovat nopeus ja luotettavuus. Kyseessä oleva järjestelmä on niin sanottu Ad hoc -verkko. Se voidaan pystyttää ja ottaa nopeasti käyttöön missä tahansa maanpäällisessä ympäristössä. Automaattisella kalibroinnilla varustetun

paikannusjärjestelmän toiminta tapahtuu kuvitteellisessa tilanteessa seuraavalla tavalla. Paloauton kylkeen on kiinnitetty kaksi tukiasemaa ja talon ympärille sijoitetaan lisää tukiasemia. Järjestelmän käyttäjä painaa nappia, ja järjestelmä alkaa kalibroida itseään. Käyttäjä poistaa hallintapaneelin näytöltä esimerkiksi hiirellä napsauttamalla muodostuvan haamupisteen, ja järjestelmä jatkaa kalibrointia siitä eteenpäin automaattisesti. Kun järjestelmä on laskenut tukiasemien paikat xy-koordinaatistossa, mitatut paikat sijoitetaan haluttuun karttapohjaan, ja järjestelmä on käyttövalmis. Tässä esimerkkitapauksessa kyseessä on 2D-pohjapiirustus talosta. Talon pohjapiirustus saadaan syötettyä järjestelmään skannaamalla, kuvaamalla tai hakemalla se tietokannasta.

Järjestelmän antama hyöty on, että palomiesten liikkeitä voidaan seurata hallintänäytöltä ja heidän kanssaan on mahdollista vaihtaa datayhteyden kautta esimerkiksi puhetta. Palomiehillä on taskussaan käyttöpääte, ja siihen on liitántärajapinnan kautta liitettävissä erilaisia antureita, kuten lämpötila- tai kaasuantureita. Anturi voi mitata esimerkiksi palomiehillä olevan ilman määrää ja antaa savusukellusvalvojalles hälytyksen, kun paineilmapullon paine laskee liian alas.

Palomiehiä voidaan ohjata reaaliajassa kohteessa, koska paikkatieto on koko ajan saatavilla. Mahdollisessa onnettomuustilanteessa turvaparit osataan ohjata heti oikeaan paikkaan hakemaan loukkaantuneita pois. Mikäli palavassa talossa on pelastettavia ihmisiä tai eläimiä, asukkaiden antamien ohjeiden perusteella palomiehet voi helposti ohjata oikeaan paikkaan.

Teollisuus

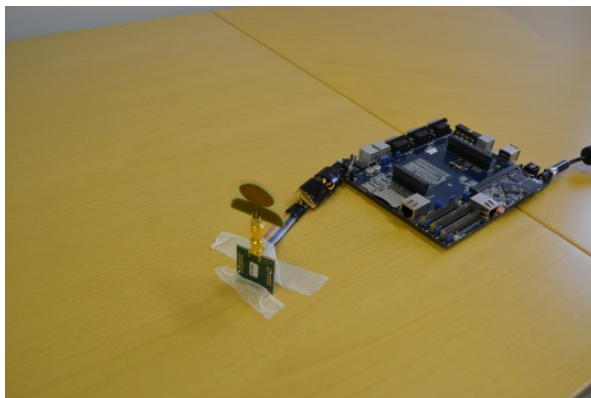
Teollisuusalueet ovat laajoja, ja liikkuvat työkonet tuovat suuren vaaratekijän mukanaan. Järjestelmä voidaan asentaa kiinteästi tehdasalueelle tai pystyttää lyhyeksi aikaa pienemmälle rakennustyömaalle. Järjestelmän käyttäjä pystyy seuraamaan työntekijöiden ja työkonoiden liikkeitä valvomosta käsin ja tarvittaessa antamaan radiolla ohjeita ja varoituksia. Työntekijöiden on helppo käyttää järjestelmää, sillä akut sijoitetaan esimerkiksi vyöhön lantiolle, käyttöpääte ranteeseen ja sankakuulokkeet mahtuvat kypärän sisään. Järjestelmän datayhteyden kautta voidaan välittää esimerkiksi purkukaavioita ja muita tietoja ongelmien ratkaisemiseksi, ja niitä voidaan katsella laitteeseen liitetyn ulkoisen näytön avulla.

6 MITTAUKSET KALIBROINNIN TESTAAMISEKSI

Järjestelmälle tehtiin mittaukset toimistotiloissa ja prosessihallissa, jotta voitiin todeta kalibroinnin tarkkuus. Mittauksien aikana havaitut ongelmat raportoitiin eteenpäin järjestelmän toiminnan kehittämiseksi.

6.1 Laitteet

Mittaukset tehtiin käyttämällä sulautettua laitteistoa, SAM9X35-EK-prosessorimoduuleita ja VTT UWB -radioita. Kuvassa 22 näkyvät käytettävät laitteet, jotka ovat identtisiä keskenään ja joiden ohjelmistot on suunniteltu tukiasemia sekä tageja varten.

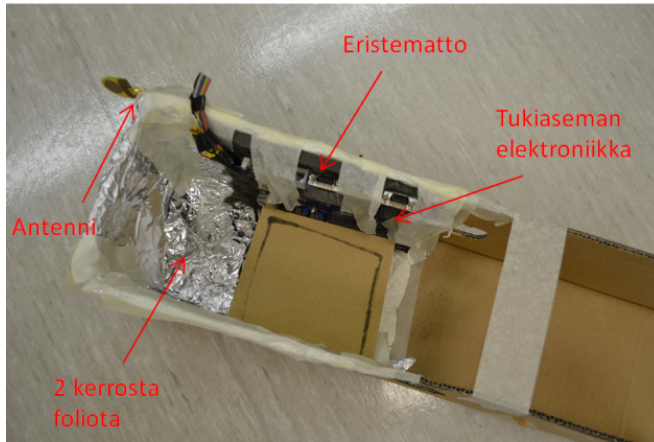


Kuva 22. Tukiaseman elektronikka ja antenni



Kuva 23. Tukiaseman teline

Kuva 23 havainnollistaa telineen, joka on alumiinifoliolla päällystetty pahvirakenne. Alumiinifoliolla pyrittiin estämään tukiaseman elektronikan mahdollisesti aiheuttamat häiriöt mittauksille. Kuvassa 24 näkyy elektronikan alle laitettu eristematto, jolla estettiin oikosulkujen syntyminen. Etäisyys toiseen tukiasemaan varmistettiin laseretäisyysmittarilla. Kuvassa 25 näkyy laite mittausvalmiina prosessihallissa.



Kuva 24. Tukiasema ja antenni kiinnitettyinä telineeseen.



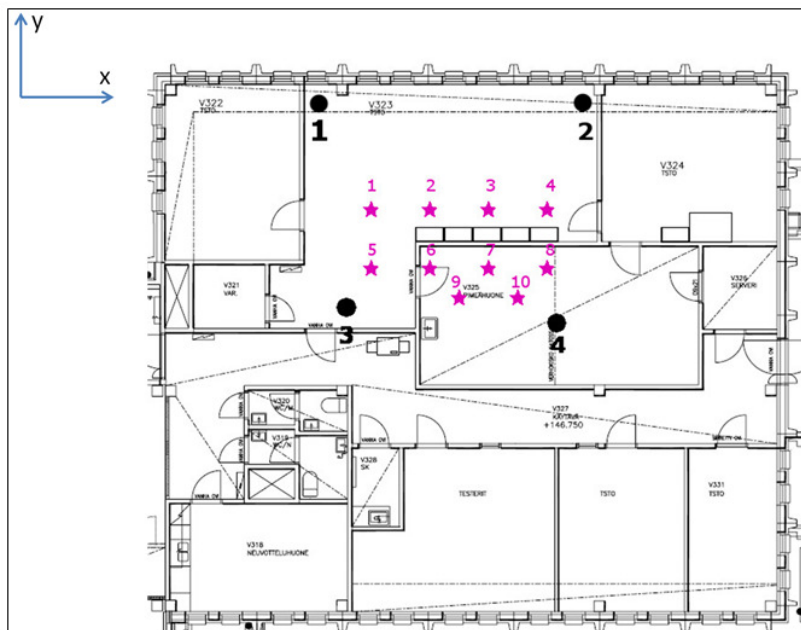
Kuva 25. Laite mittausvalmiina prosessihallissa.

6.2 Mittaukset toimistotiloissa

Järjestelmän alustavat mittaukset tehtiin toimistotiloissa, jotta voitiin todeta kalibroinnin tarkkuus ja perehtyä sen toimintaan ennen prosessihallimittauksia.

6.2.1 Ympäristö

Mittaukset tehtiin VTT:n toimistotiloissa Kajaanissa. Kuvassa 26 näkyvät tukiasemien ja taigin sijoituspaikat.



Kuva 26. Mittausympäristö, VTT:n Kajaanin toimisto.

6.2.2 Mittauksien suorittaminen

Tukiasemat eli solmut (mustat pisteet) sijoitettiin eri paikkoihin toimistoa, jotta nähtiin, miten seinät ja erilaiset toimistossa käytettävä laitteet vaikuttivat mittauksiin. Kuvassa 26 näkyvät neljän solmun paikat, jotka kalibroitiin ensimmäiseksi. Alla olevassa esimerkissä tunnettujen solmujen avulla määritettiin sijainnit muille solmuille. Kalibrointiproseduuri perustui solmuihin 1 ja 2, joiden paikat tunnettiin. Solmut (1 ja 2) mittasivat etäisyyttänsä kaikkiin muihin solmuihin. Sijainti solmuille 3 ja 4 pystyttiin laskemaan geometrisesti solmujen 1 ja 2 mittaustulosten pohjalta. Solmujen 1–4 sijaintien avulla pystyttiin laskemaan sijainnit tagin paikoille 1–10. Kuvassa 26 näkyvät myös sijainnit tagille kymmenessä tunnetussa pisteessä, jotka on merkitty punaisilla tähdillä kuvaan.

Esimerkki:

1. Etäisyys solmusta 1 solmuihin 3, 4 on mitattu.
2. Etäisyys solmusta 2 solmuihin 3, 4 on mitattu.
3. Sijainti solmulle 3 ja 4 on laskettu geometrisesti.

6.3 Mittaukset prosessihallissa

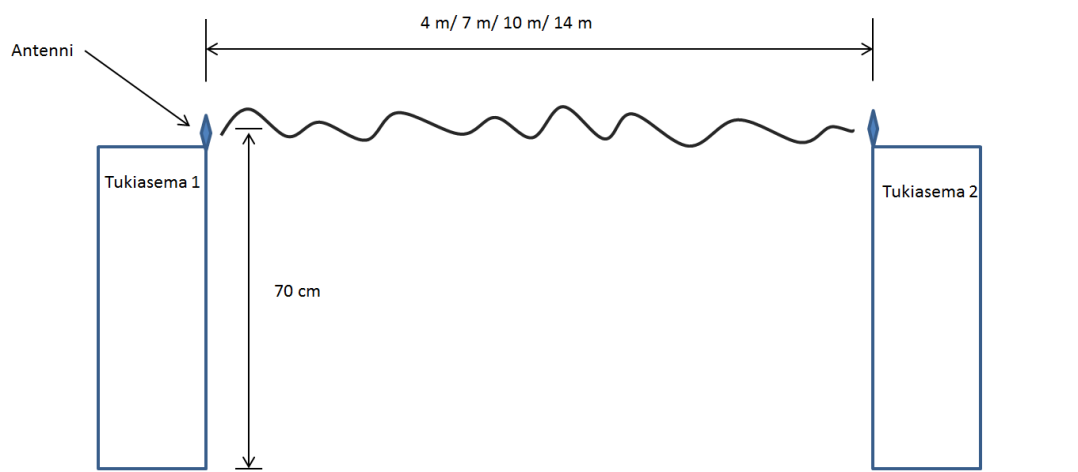
Järjestelmän mittaukset tehtiin prosessihallissa, jotta voitiin tutkia kalibroinnin tarkkuutta.

6.3.1 Ympäristö

Kuvassa 27 näkyy prosessihallin pitkä keskikäytävä, jossa mittaukset tehtiin. Ympäristössä oli paljon erilaisia metallisia työkoneita ja putkistoja. Mittauksessa käytettyjen laitteiden etäisyydet olivat 4 m, 7 m, 10 m ja 14 m. Kuva 28 havainnollistaa mittaustilannetta.



Kuva 27. Prosessihalli

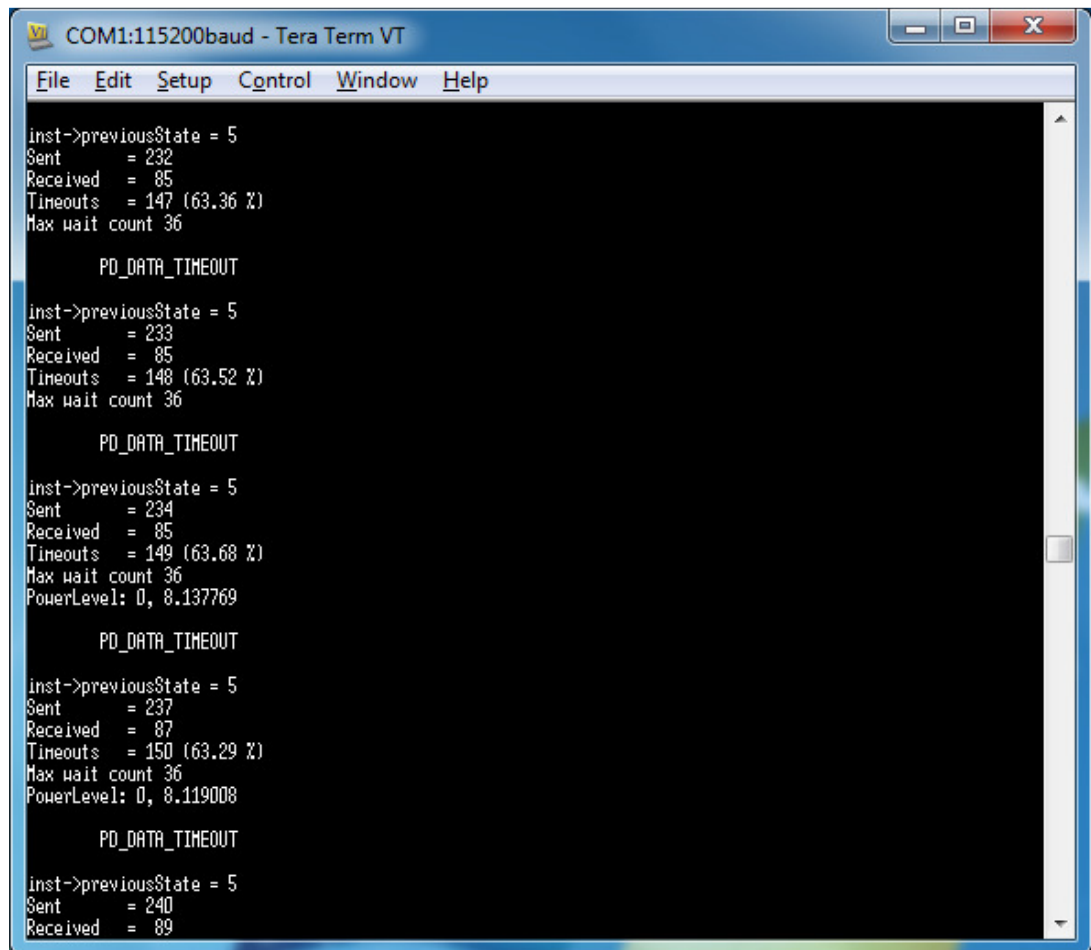


Kuva 28. Mittaustilanteen havainnollistaminen.

6.3.2 Mittauksien suorittaminen

Tukiasemien välillä oli suora näköyhteys kaikissa mittauksissa viimeisintä mittausta lukuun ottamatta, jossa mittaus suoritettiin tärustinlaitteen lävitse. Tukiasemien antennien väli mitattiin laseretäisyysmittarilla. Elektroniikan annettiin lämmitä 10 min ennen mittausten aloittamista. Kumpikin tukiasema resetoitiin varmuuden vuoksi ja käynnistettiin Tera Term -ohjelma. Sen jälkeen tarkistettiin, että tukiasemat saavat yhteyden toisiinsa ja aloitettiin mittaustiedon kerääminen Tera Term -ohjelmalla.

Kuvassa 29 näkyy Tera Term -ohjelmasta otettu kuvakaappaus ohjelman kerätessä mittausdataa. Ohjelma keräsi tiedostoon datan mittauksista, ja tämä data muokattiin puhtaaksi muista ohjelman tallentamista tiedoista. Tämän jälkeen data siirrettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan ja arvoista laskettiin halutut arvot eri kaavoja käyttäen. Jokaisesta neljästä etäisydestä kerättiin 78 arvoa, jotka taulukoitu Excel-ohjelmaan.



```
COM1:115200baud - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help

inst->previousState = 5
Sent      = 232
Received  = 85
Timeouts  = 147 (63.36 %)
Max wait count 36

PD_DATA_TIMEOUT

inst->previousState = 5
Sent      = 233
Received  = 85
Timeouts  = 148 (63.52 %)
Max wait count 36

PD_DATA_TIMEOUT

inst->previousState = 5
Sent      = 234
Received  = 85
Timeouts  = 149 (63.68 %)
Max wait count 36
PowerLevel: 0, 8.137769

PD_DATA_TIMEOUT

inst->previousState = 5
Sent      = 237
Received  = 87
Timeouts  = 150 (63.29 %)
Max wait count 36
PowerLevel: 0, 8.119008

PD_DATA_TIMEOUT

inst->previousState = 5
Sent      = 240
Received  = 89
```

Kuva 29. Kuvakaappaus Tera Term -ohjelmasta.

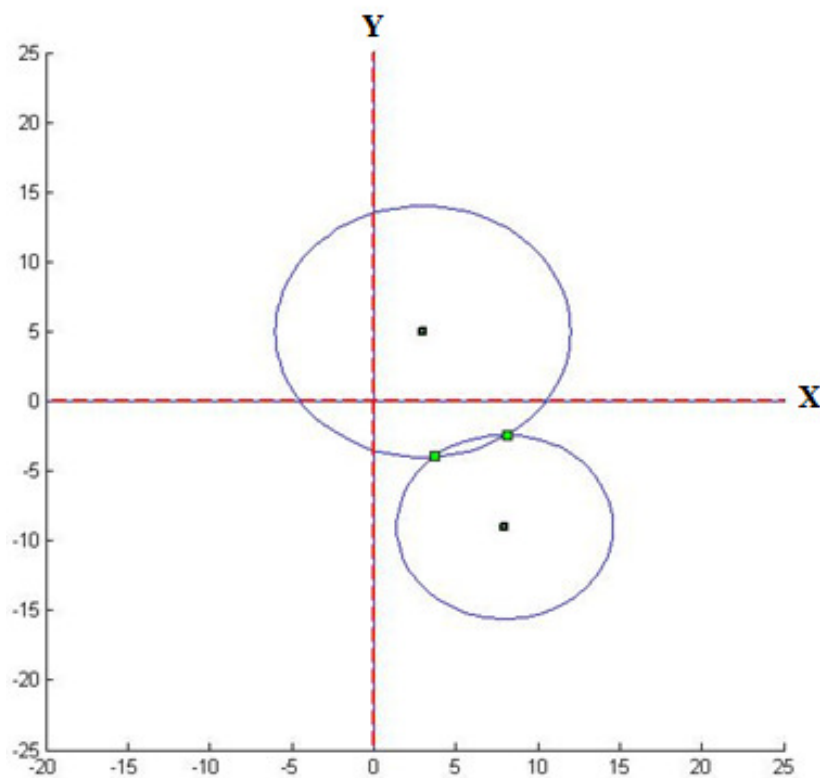
7 MITTAUSTULOKSET

7.1 Mittaustulosten käsittely

Mittauksista kerättyä dataa käsiteltiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla sekä Matlab-ohjelmistolla tehdyllä sovelluksella, jonka periaate on seuraava.

1. Ohjelma luo x- ja y-koordinaatiston.
2. Ohjelmaan syötetään kahden eri pisteen x- ja y-koordinaatit, joiden perusteella piirretään kummankin pisteen ympärille kuvitteellinen ympyrän kaari.
3. Ohjelma laskee piirrettyjen ympyränkaarien leikkauspisteet, piirtää kuvan ja tulostaa leikkauspisteiden koordinaatit.

Kuvassa 30 on Matlab-ohjelman piirtämä kuva, jossa ympyröiden keskipisteet on merkitty pienellä mustalla neliöllä. Ympyröiden kaarien leikkauspisteet on merkitty pienillä vihreillä neliöillä. Ohjelman päätarkoitus oli nopeuttaa laskemista, ohjelmalla myös saatiin havainnollistava kuva leikkauspisteiden sijainnista.



Kuva 30. Leikkauspisteiden selvittäminen Matlab-ohjelmalla.

7.2 Mittaustulokset toimistotilat

Kun sijainnit oli määritelty tukiasemalle 1 (0, 0) ja tukiasemalle 2 (6, 0), voitiin sijainnit laskea jokaiselle tukiasemalle. Taulukossa 2 on esitelty saadut sijainnit. Tukiasemien sijaintien laskeminen tapahtui seuraavalla tavalla. Ensimmäiseksi kerättiin mittaustulokset tukiasemien (1–3), (1–4), (2–3), (2–4) ja (3–4) väliltä. Näille jokaiselle välille laskettiin keskiarvot kerätyistä mittaustuloksista. Tukiasemien 3 ja 4 sijainnit laskettiin käyttämällä äskettäin laskettuja keskiarvoja Matlab-laskennassa. Ohjelmalla lasketuista paikkakoordinaateista laskettiin vielä keskiarvot, jotta saatavat paikkakoordinaatit olisivat mahdollisimman todenmukaiset. Lisäksi laskettiin keskihajonnat tukiasemien mittaustuloksille, ja ne olivat luokkaa 0,0046–0,0112 m.

Taulukko 2. Lasketut sijainnit tukiasemille toimistotiloissa.

Lasketut sijainnit tukiasemille		
Tukiasema	Sijainti	
	X	Y
Tukiasema 1	0	0
Tukiasema 2	6	0
Tukiasema 3	0,10	-4,03
Tukiasema 4	6,66	-4,73

Sijainnit määritettiin tagin paikoille 1–10 seuraavasti. Tukiasemat 1–4 mittasivat vuorotellen omat etäisyysmittauksensa paikkojen 1–10 määrittämistä varten. Tämän jälkeen laskettiin kunkin tukiaseman mittauksien keskiarvot jokaista paikkaa 1–10 varten. Näitä äsken laskettuja keskiarvoja käyttäen alettiin määrittää paikkojen 1–10 todellisia paikkoja x- ja y-koordinaatteina tukiasemapareittain. Tukiasemapareina toimivat tukiasema 1 + tukiasema 2, tukiasema 1 + tukiasema 3, tukiasema 2 + tukiasema 3 ja tukiasema 3 + tukiasema 4. Tukiasemien tulokset syötettiin pareittain Matlab-ohjelmaan, joka sitten laskee annettujen tietojen perusteella paikoille 1–10 x- ja y-koordinaatit. Kun laskenta oli suoritettu, käytössä oli paikoille 1–10 neljän tukiaseman määrittämät x- ja y-koordinaatit. Jotta paikoille 1–10 saatiin vain yhden x- ja y-koordinaatit, laskettiin neljän tukiaseman koordinaateista keskiarvot. Taulukossa 3 on esitelty saadut sijainnit.

Taulukko 3. Mittaustulokset tunnetuille paikoille toimistotiloissa.

Tagi	Laskettu sijainti		Esimääritetty sijainti	
	X	Y	X	Y
Paikka 1	1,60	-2,12	1,5	-2,00
Paikka 2	3,00	-1,93	3	-2,00
Paikka 3	4,49	-1,82	4,5	-2,00
Paikka 4	6,13	-1,84	6	-2,00
Paikka 5	1,44	-3,48	1,5	-3,50
Paikka 6	3,00	-3,62	3	-3,50
Paikka 7	4,71	-3,52	4,5	-3,50
Paikka 8	6,23	-3,24	6	-3,50
Paikka 9	3,79	-4,23	3,75	-4,25
Paikka 10	5,29	-4,20	5,25	-4,25

Mitatut arvot verrattuna esimääritettyihin sijainteihin näkyvät taulukossa 3. Arvot olivat sellaisia kuin oletettiin, mutta joitakin poikkeamia oli huomattavissa verrattaessa esimääritettyjä ja laskettuja sijainteja keskenään. Oletettavasti poikkeamat johtuivat siitä, että osassa mittauksista oli NLOS-tilanne. Tukiasemien ja paikoissa 1–10 olevien tagien välissä olevat väliseinät sisältävät sähköjohdotuksia ja vesiputkia, jotka mahdollisesti estivät suoran lähetyksen tukiasemilta tageille. Tämä selittää mitattuja eroja, sillä signaali siroaa törmätessään esteisiin. Työssä käytetyt moduulit sisältävät UWB-piirit, jotka ovat varhaisia prototyyppisiä, ja osa virheistä saattoi aiheutua niistä. Tulokset tästä mittauksesta osoittavat, että saadaan riittävän tarkkoja arvoja, jotta voidaan toteuttaa automaattinen/puoliautomaattinen kalibrointijärjestelmä.

7.3 Mittaustulokset prosessihalli

Lasketut virheen suuruudet mittaustuloksissa etäisyyksille 4–14 m olivat noin 23–30 cm ja ne on esitetty taulukossa 4. Syyksi virheelle todettiin tukiasemien ohjelmistossa väärin määritelty antenniviive. 14 m matka mitattiin uudelleen kiinnittämällä toisen tukiaseman antenniin lisäantennijohto. Taulukosta nähdään, että virhe oli tämän jälkeen noin 7 cm.

Taulukko 4. Prosessihallin mittaustulokset.

Lisätiedot	-	-	-	-	lisäantenni	tärustinlaite
Näkyvyys	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	NLOS
Todellinen etäisyys (m)	4	7	10	14	14	8,17
Etäisyyksien keskiarvo (m)	3,71	6,72	9,77	13,78	14,07	8,13
Mittausten keskihajonta (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,06

Kuvassa 31 näkyy prosessihallissa mittausten aikaan olleen suuren tärustinlaitteen, jolla tutkitaan työkonneissa esiintyviä erilaisia värinöitä. Lisämittauksena tutkittiin kalibroinnin tarkkuutta, kun tukiasemat sijoitettiin niin, että mittaus tapahtui tärustinlaitteen lävitse. Tukiasemilla ei tilanteessa ollut täysin suoraa ja avointa näköyhteyttä, vaan kyseessä oli NLOS-tilanne ja osa signaaleista sirosi tärustinlaitteen putkista. Tulokset ilman lisäantennin käyttöä olivat varsin tarkkoja. Prosessihallissa signaalille tapahtui todennäköisesti monitie-etenemistä, mutta se ei näissä mittauksissa vaikuttanut heikentävän mittaustarkkuutta.



Kuva 31. Mittaus tärustinlaitteen lävitse.

Myöhemmissä tutkimuksissa havaittiin, että signaalin lähetysteho oli ollut tukiasemien ohjelmissa hyvin pieneksi säädettyä. Tukiasemien väliset todelliset maksimikantamat ovat huomattavasti pidemmät kuin mitattu 14 m. Myös aiemmin mainituissa antenniviiveiden säädöissä oli virhettä, joka näkyi tutkimustuloksissa virhettä tuovana tekijänä. Tuloksia tarkasteltaessa on tärkeää huomata, että keskihajonta on kaikissa mittauksissa hyvin pieni. Tämä tarkoittaa, että järjestelmän tarkkuus on erittäin hyvä ja paikannusjärjestelmän kehittämisessä ollaan menossa oikeaan suuntaan.

8 YHTEENVETO

Yksi opinnäytetyön päätavoitteista oli kalibrointimittauksien suunnittelu sekä toteuttaminen, ja tämä tavoite saavutettiin. Mittauksien toteuttaminen vaati enemmän valmisteluita ja poh-timista kuin olin aiemmin kuvitellut. Alun perin kalibrointijärjestelmän toiminta suunniteltiin automaattiseksi, mutta tästä jouduttiin luopumaan, koska ei kyetty keksimään täysin aukoton-ta tapaa sen toteuttamiseksi. Järjestelmän toiminta saatiin toteutettua puoliautomaattisena, ja se toimi hyvin. Jatkokehityksenä tulisi miettiä järjestelmän automatisointia ja ohjelmiston pa-rantamista.

Opinnäytetyön tekeminen on ollut mielenkiintoinen ja pitkä prosessi. Se on opettanut paljon lähteiden hausta, insinöörin työstä sekä siitä, miten työskennellä pitkäjänteisesti. Mitä enem-män työhön on käyttänyt aikaa, sitä syvemmin asioiden takana olevia ilmiöitä on alkanut ymmärtämään.

Opinnäytetyön tekemisen jälkeen tiedän huomattavasti enemmän UWB-tekniikkaa hyödyn-tävistä paikannusjärjestelmistä ja erilaisten mittauksien tekemisestä. Työn aikatauluttaminen sujui luontevasti, ja työ valmistui aikataulussa. Työn tekeminen oli kokonaisuudessaan opet-tavainen prosessi ja se on antanut tekijälleen paljon.

LÄHDELUETTELO

- 1 Salo Harri. UWB-tekniikka. [Opinnäytetyö]
Tampereen ammattikorkeakoulu, tietotekniikan koulutusohjelma. 2006.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003065104>
- 2 Sinan Gezici, Ismail Güvenc. Zafer Sahinoglu, Ultra-wideband Positioning Systems, Cambridge: Cambridge university Press, 2008. ISBN: 978-0-521-87309-3
- 3 Coleman David D. ja Westcott David A. CWNA®: Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide, Sybex, 2009. 768 s. ISBN: 978-0-470-61268-2
- 4 IEEE. 802.15.4-2011 Standard for Local and metropolitan area networks, [Sisäinen dokumentti] New York, USA, 2011.
- 5 Air-Stream. Tietoa radiotekniikasta, EIRP. viitattu 5.1.2014 [WWW-sivusto]
<http://www.air-stream.org/technical-references/effective-isotropic-radiated-power-eirp>
- 6 Koskinen Toni. UWB in 3d indoor positioning and base station calibration. [Opinnäytetyö] Vaasan yliopisto. 2010.
- 7 Clarinox Technologies Pty. Real-time locating system. viitattu 27.12.2013 [WWW-dokumentti] http://www.clarinox.com/docs/whitepapers/RealTime_main.pdf
- 8 Wang, Yiyin. Localization and Communication for for UWB-based Wireless Sensor Networks, Chengdu, China., 2011.
- 9 Nanotron-company. Technology: SDS-TWR (Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging). viitattu 1.1.2014 [WWW-sivusto] http://www.nanotron.com/EN/CO_tech-sdstwr.php
- 10 Peng R. ja Sichitiu M. L. Tieteellinen julkaisu: Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor. 2006. viitattu 18.1.2014 [WWW-dokumentti]
<http://www4.ncsu.edu/~mlsichit/Research/Publications/aoaLocalizationSecon06.pdf>
- 11 Kortelainen Ilkka. ZIGBEE-PAIKANNUS. [Opinnäytetyö]
Lahden ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala. 2010.
http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/17179/Kortelainen_Ilkka.pdf?sequence=1

- 12 Fadjukoff Toni. Karttarajoitteiden käyttäminen sisätilapaikannuksessa. [Opinnäytetyö] Tampereen Teknillinen yliopisto. 2012.
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21385/fadjukoff.pdf?sequence=3>
- 13 DecaWave. Datalehti DW1000-mikropiiristä. viitattu 11.6.2013 [Sisäinen dokumentti]
- 14 DecaWave. Kuva DW1000-mikropiiristä. 26.12.2013 [WWW-sivusto]
<http://decawave.com/downloads.html>
- 15 DecaWave. Markkinointimateriaali: Ultra Low Power Transceiver for Wireless Sensors Enabling Precision Location. viitattu 20.7.2013 [WWW-dokumentti]
http://docbox.etsi.org/workshop/2008/200812_wirelessfactory/decawave_connell_ice_e802.15.4a.pdf
- 16 Microchip. SPI - Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface. viitattu 25.12.2013 [WWW-dokumentti]
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001561A.pdf>
- 17 Microsoft. Keskihajonta. viitattu 31.12. 2013 [WWW-sivusto]
<http://office.microsoft.com/fi-fi/excel-help/keskihajonta-s-keskihajonta-s-funktio-HP010335698.aspx>
- 18 Opetushallitus. Tilastollisia menetelmiä, keskihajonta. viitattu 18.1.2014 [WWW-sivusto]
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/tilastomatikka/haj_5.html