

Markku Hannula

## **ROBOTIN PAIKANNUS ULTRALAAJAKAISTARADIOLLA**

# **ROBOTIN PAIKANNUS ULTRALAAJAKAISTARADIOLLA**

Markku Hannula  
Opinnäytetyö  
Syksy 2017  
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, älykkäät järjestelmät

---

Lopputyön tekijä: Markku Hannula  
Opinnäytetyön nimi: Robotin paikannus ultralaajakaistaradiolla  
Työn ohjaajat: Antti Tikanmäki Probot Oy, Pekka Alaluukas OAMK  
Syksy 2017  
Sivumäärä: 46 + 3 liitettä

---

Työn aiheena oli robotin paikannus ultralaajakaistaisella radiolla. Tavoitteena oli saada aikaan järjestelmä, jolla robotin paikka saadaan huonetilassa selville mahdollisimman tarkkaan ja nopeasti.

Työtä varten suunniteltiin kortti, jossa on ultralaajakaistamoduuli DWM1000 etäisyyksien mittaamiseen sekä ohjelmaa ja datansiirtoa varten WiFi-moduuli ESP-WROOM-32.

Moduuleilla tehtiin vertailumittaukset siitä, kuinka tarkkoihin mittauksiin voidaan päästä.

Moduuleilla tehtiin vielä paikannustestit, jotka tehtiin Oulun yliopiston robotiikan laboratoriossa. Tuloksena saatiin lähetettyä 2D-koordinaatit PC:lle. Saadut tulokset olivat oikeanlaisia, mutta ohjelmisto vaatii vielä paljon lisäkehitystä.

---

Asiasanat: ultralaajakaista, WiFi-moduuli, paikannus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme of Information Technology, Intelligent Systems

---

Author: Markku Hannula

Title of thesis: Localization of robot with ultra-wideband radio

Supervisors: Antti Tikanmäki Probot Oy, Pekka Alaluukas OAMK

Autumn 2017

Pages: 46 + 3 appendices

---

The goal of this thesis was to develop a robot localization system using ultrawideband radios. Location of robot would be as accurate and as fast as possible.

A printed circuit board was designed to this task. It has a ultrawideband module for distance measurements and a WiFi module for data transfer.

Comparison measurements were done to find out what kind of accuracies one can achieve with this technique.

Some location measurements were done and the results were promising. Location data in 2D was sent to the PC. More development is needed to get all aspects of the system fulfilled.

---

Keywords: Ultra-wideband, UWB, DW1000, ESP32, Location

## **ALKULAUSE**

Kiitän Probot Oy:tä siitä, että sain tehdä tämän lopputyön heille.

Eryteisesti haluan kiittää työn ohjaajaani Antti Tikanmäkeä ohjauksesta ja neuvoista työn kuluessa. Haluan myös kiittää ohjaajaani Oulun ammattikorkeakoulusta Pekka Alaluukasta työni ohjauksesta.

8.12.2017 Markku Hannula

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	10
2 PAIKANNUS	11
2.1 Trilateraatio	12
2.2 Multilateraatio	13
2.3 Etäisyyden mittausmenetelmät	14
2.3.1 Aikaan perustuvat menetelmät	14
2.3.2 Signaalin tulokulma	15
2.3.3 Signaalin voimakkuuteen perustuvat menetelmät	15
3 ULTRALAAJAKAISTATEKNIikka	17
4 LAITTEISTO	20
4.1 UWB-moduuli DWM1000	20
4.1.1 Sanomien välittäminen	23
4.1.2 Vastaanotto	23
4.2 ESP-WROOM-32 WiFi-Bluetooth –moduuli	24
4.3 IMU, Inertiamittausmoduuli	25
4.4 Mittauskortti	27
5 JÄRJESTELMÄ	31
6 OHJELMAT	32
6.1 Käytetyt modulit ja Arduino IDE	32
6.2 Ankkurin ja liikkuvan kohteen ohjelmat	34
6.2.1 Ankkuri	34
6.2.2 Liikkuva kohde eli tagi	35
7 MITTAUKSET	38
7.1 Etäisyysmittaus	38
7.2 Paikannusmittaukset	40

8 LOPPUSANAT	42
LÄHTEET	44
LIITTEET	

Liite 1 UWB-kortin piirikaavio

Liite 2 UWB-kortin osasijoittelu

Liite 3 Ultralaajakaistan mittaustarkkuuden vertailu

## SANASTO

AOA	Angle of Arrival; tulokulma
BLE	Bluetooth Low Energy; langaton tietoliikennetekniikka
CAN	Controller Area Network; automaatioväylä
CLK	kellosignaali
FCC	Federal Communications Commission; toimielin, joka vastaa USA:ssa radiolaitteiden standardoinnista
ETSI	European Telecommunication Standards Institute; EU:n alueella toimiva elin, joka vastaa radiolaitteiden standardoinnista
GPIO	General Purpose Input Output, liitäntäpinni
GPS	Global Positioning System; satelliittipaikannusjärjestelmä
I2C	IIC; Inter-Integrated Circuit; sarjaväylä
IDE	Integrated Development Environment; integroitu kehitysympäristö
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
MCU	microcontroller unit; mikrokontrolleri
MISO	Master In, Slave Out; SPI-datalinja kontrollerille
MOSI	Master Out, Slave In; SPI-datalinja ohjattavalle laitteelle
MQTT	Message Queue Telemetry Transport; tiedonsiirtoprotokolla
Preamble	datan synkronointiin käytetty signaali
PRF	Pulse Repetition Frequency, pulssien toistotaajuus
RSS	Received Signal Strength; vastaanotetun signaalin voimakkuus



SPI	Serial Peripheral Interface bus; sarjaliikenneväylä
SS	Slave Select; SPI-laitteen valintasignaali
TDOA	Time Difference on Arrival; etäisyyden mittausmenetelmä
TOF	Time of Flight; signaalin kulku-aika
TWR	Two Way Ranging; etäisyyden mittausmenetelmä
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter; sarjaväylä
UWB	Ultrawideband; ultralaajakaista
WiFi	langaton lähiverkko
WLAN	Wireless Local Area Network; langaton lähiverkko

# 1 JOHDANTO

Esineiden ja ihmisten paikannus on nykyään paljon kiinnostusta herättänyt ja jatkuvasti kasvava ala. Arvokkaiden esineiden ja ihmisten sijainti halutaan tietää mahdollisimman tarkasti ja mieluiten reaaliaikaisesti. Esimerkiksi sairaaloissa tai tehtaissa kalliiden laitteiden paikkatieto on erityisen tärkeää. Kun laitteiden paikka tiedetään, niiden etsintään ei kulu turhaa aikaa, samoin niiden vieminen tai varastaminen on huomattavasti vaikeampaa.

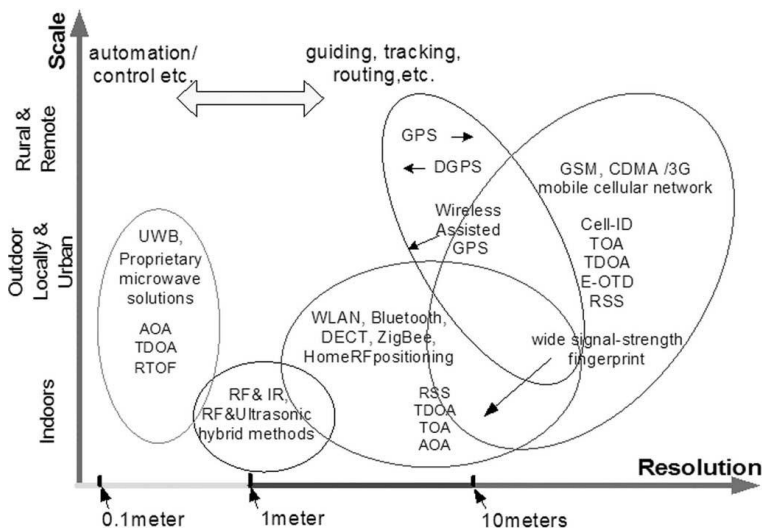
Paikannukseen on kehitetty useita eri tekniikoita, joista tunnetuin on GPS. Muita tekniikoita ovat Bluetooth, WiFi, mobiilitekniikka (3G, 4G) ja useat muut vähemmän tunnetut tekniikat. GPS:n huonona puolena on se, ettei sillä pystytä paikantamaan rakennuksien sisätiloissa tai muissa kohteissa, joissa ei ole suoraa näköyhteyttä taivaalle. GPS:n paikannustarkkuus on joitain kymmeniä metrejä. Bluetooth ja WiFi toimivat sisätiloissa, mutta niiden tarkkuus rajoittuu minimissään muutama metriin. Käytännössä kohteen sijainti voidaan paikantaa huonekohtaisesti. Jos kohteen sijainti halutaan paikantaa tarkemmin, on mietittävä muita keinoja. Eräs keino on käyttää ns. sekatekniikoita, joissa käytetään useimmiten kahden eri tekniikan yhdistelmää. Viime vuosina on suurta kiinnostusta saavuttanut ultralaajakaistatekniikka (UWB), jossa päästään jopa 10-30 cm:n tarkkuuksiin. (1, s. 1; 2, s. 1; 3, s. 3.)

Tässä lopputyössä pyritään selvittämään UWB-tekniikan soveltuvuutta ja tarkkuutta robotin paikantamiseksi sisätiloissa. Työhön on valittu Decawaven UWB-moduuli DWM1000, jota käytetään paikannuksessa. Langatonta tiedonsiirtoa varten kortille on valittu Espressif ESP-WROOM-32 -moduuli. Työtä varten on suunniteltava piirikortti, johon moduulit asennetaan.

## 2 PAIKANNUS

Kohteiden paikannus voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: ulkopaikannus ja sisäpaikannus. Ulkotiloissa tapahtuvasta paikannuksesta kaikkein tunnetuin tekniikka on GPS. Toinen tunnettu tekniikka on mobiilitekniikka (3G, 4G). Sisätiloissa paikannuksessa käytetään yleisimmin Bluetoothia ja WLANia. Muita vähemmän tunnettuja ja käytettyjä tekniikoita ovat RFID, ultraäänipaikannus ja kuvaukseen perustuvat tekniikat. Myös sekatekniikoita voidaan käyttää mittaustarkkuuden parantamiseksi. Niissä yhdistetään kaksi teknologiaa mittaustarkkuuden parantamiseksi. Näistä yleisimmät ovat WLAN ja Bluetooth sekä WLAN ja UWB. (2, s. 13–16.)

Kuvassa 1 on esitelty yleisimpiä paikannustekniikoita. Kuten kuvasta näkyy, on ultralaajakaistatekniikka tarkkuudeltaan ylivoimainen muihin tekniikoihin nähden. Ultralaajakaistatekniikalla päästään tällä hetkellä muutaman kymmenen sentin tarkkuuteen ja se soveltuu hyvin sekä sisä- että ulkopaikannukseen. Tekniikka soveltuu vain lyhyen matkan paikannukseen johtuen käytetystä taajuusalueesta ja pienestä tehosta.

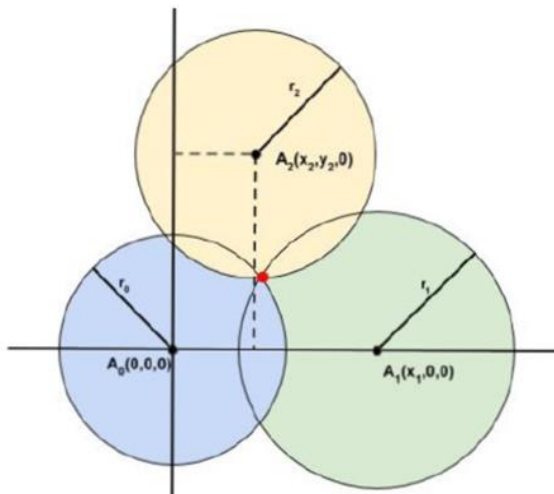


KUVA 1. Yleiskuva tämän hetken langattomista paikannustekniikoista (4, s. 7)

## 2.1 Trilateraatio

Trilateraatio on paikannusmenetelmä, jossa vähintään kolmen tunnetun pisteen perusteella kohteen todennäköinen sijainti voidaan selvittää. Kun kohteen etäisyydet tunnettuihin pisteisiin on selvitetty, saadaan matemaattisesti laskettua missä kohde sijaitsee. Kohteen sijainti saadaan määritettyä saatujen etäisyyksien leikkauspisteen perusteella. Kolmella ankkurilla tai vastaanottimella saadaan sijainti laskettua 2D-tilassa. 3D-tilassa vastaanottimia tarvitaan neljä tai useampi. Mitä useampi vastaanotin eli ankkuri on käytössä, sitä tarkemmin sijainti voidaan laskea. (5.)

Trilateraatioissa yksi ankkuri toimii referenssipisteenä tai nollapisteenä muihin ankkureihin nähden, toinen ankkuri sijoitetaan x-akselin suuntaisesti ja kolmas ankkuri voidaan sijoittaa vapaasti haluttuun paikkaan kuvan 2 mukaisesti. Kohteen todennäköinen sijainti saadaan laskemalla kaavoista 1, 2 ja 3. (5.)



KUVA 2. Trilateraatio kolmella ankkurilla (2, s. 12)

$$x = \frac{r_0^2 - r_1^2 + d^2}{2d}$$

KAAVA 1

$r_0$  = ankkurin A0 etäisyys kohteeseen

$r_1$  = ankkurin A1 etäisyys kohteeseen

$d$  = ankkurien A0 ja A1 välinen etäisyys

$$y = \frac{r_0^2 - r_2^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x$$

KAAVA2

$r_0$  = ankkurin A0 etäisyys kohteeseen

$r_2$  = ankkurin A2 etäisyys kohteeseen

$i$  = vektorin A0-A2 x-komponentin etumerkillinen suuruus

$j$  = vektorin A0-A2 y-komponentin etumerkillinen suuruus

$x$  = kaavassa 1 laskettu  $x$

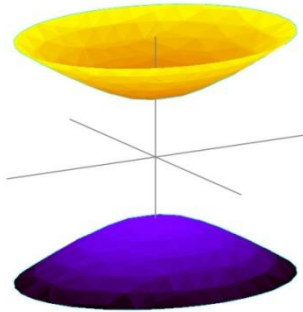
$$z = \pm \sqrt{r_0^2 - x^2 - y^2}$$

KAAVA 3

z-koordinaatin laskeminen kolmea ankkuria käytettäessä on käytännössä tarpeetonta, koska niillä voidaan laskea kohteen sijainti ainoastaan kahdessa tasossa (2D).

## 2.2 Multilateraatio

Multilateraatio perustuu liikkuvan kohteen etäisyyseron mittaamiseen tietyissä paikoissa oleviin vastaanottimiin. Liikkuva kohde lähettää tietyin väliajoin sanoman, jonka perusteella paikka voidaan arvioida. Koska tuloksena saadaan useita mahdollisia paikkoja, tehdään useita mittauksia eri vastaanottimilla, joiden perusteella saadaan tarkempi kuva. Jos mittaustuloksista tehtäisiin kuvaaja, tulisi siitä kuvan 3 mukainen hyperboloidi. Useista mittauksista useiden vastaanottimien perusteella saadaan laskemalla liikkuvan kohteen sijainti. Kuvaajassa se olisi hyperboloidien leikkauspisteessä. (6.)



*KUVA 3. Hyperboloidi (kaksi vastaanotinta) (6)*

## **2.3 Etäisyyden mittausmenetelmät**

Etäisyyden mittaamiseen on olemassa useita menetelmiä. Niitä ovat aikaan perustuvat ja signaalin voimakkuuteen perustuvat menetelmät.

### **2.3.1 Aikaan perustuvat menetelmät**

#### **2.3.1.1 Signaalin kulku-aika**

Signaalin kulku-aika, Time-of-Flight (TOF), tarkoittaa aikaa, joka signaalilta menee, kun se kulkee liikkuvasta kohteesta ankkurille. Liikkuvaa kohdetta kutsutaan usein myös tagiksi. Sitä voidaan mitata kahdella tavalla, synkronisoidulla ja synkronoimattomalla. (7, s. 8–9.)

Synkronisoidussa mittauksessa tagin ja ankkureiden kellot on synkronoitu samaan aikaan. Kun ankkuri saa tagin lähettämän sanoman ja sanoman lähetysaika tiedetään, voidaan etäisyys laskea. Tässä menetelmässä on yksi haastava asia: kaikkien laitteiden kellojen tulee olla samassa ajassa. Tämä on erittäin vaikea toteuttaa, joten synkronista menetelmää ei juurikaan käytetä. (7, s. 8–9.)

Yleisimmin käytetty menetelmä on synkronoimaton menetelmä. Siinä sekä tagi että ankkuri liittävät sanomaan aikaleiman. Yksinkertaistettuna sanomien vaihto tapahtuu seuraavasti:

- Ankkuri lähettää tagille sanoman, johon se liittää lähetysaikansa.
- Tagi vastaanottaa sanoman ja vastaa ankkurille.
- Ankkuri vastaanottaa vastauksen ja rekisteröi tuloajan.
- Nyt ankkuri voi laskea etäisyyden lähetys- ja tuloaikojen perusteella.
  - Etäisyys =  $c * (\text{tuloaika} - \text{lähtöaika}) / 2$ .

Tätä menetelmää kutsutaan kaksisuuntaiseksi etäisyyden mittaukseksi (Two-Way Ranging, TWR). (7, s. 8–9.)

### **2.3.1.2 Signaalin tuloaikaero**

Signaalin tuloaikaero, Time-Difference-on-Arrival (TDOA), tarkoittaa ankkureille tulevan sanoman aikaeroa. Kaikki ankkurit on synkronoitu samaan aikaan. Ero kohdan 2.3.1.1 synkronoituun esimerkkiin verrattuna on se, että tagia (liikkuvaa kohdetta) ei ole synkronoitu ankkureiden aikaan. Tagin paikka voidaan selvittää matemaattisesti multilateraatiomenetelmällä. Tätä menetelmää käytetään yleisesti ilmailussa lentokoneiden sijainnin määrittämiseen. (7, s. 10.)

### **2.3.2 Signaalin tulokulma**

Signaalin tulokulma -menetelmällä voidaan määrittää liikkuvan kohteen suunta. Ankkurissa on useita antennia, joihin saapuvan signaalin tuloaikoja verrataan keskenään. Koska aikaerot ovat erittäin pieniä, vaatii se aikojen tarkan mittauksen. Tämä menetelmä ei sovellu paikkoihin, jossa kohde ei ole jatkuvasti näköyhteydessä ankkuriin. Menetelmä on kustannuksiltaan korkeampi kuin muut ratkaisut, koska antennia tarvitaan useita. (7, s. 11.)

### **2.3.3 Signaalin voimakkuuteen perustuvat menetelmät**

RSS, Received Signal Strength tai RSSI, Received Signal Strength Indication on radiotekniikassa yleisesti käytetty signaalin voimakkuuden

mittausmenetelmä. Mitä lähempänä kohde on, sitä suurempi signaalin teho saadaan mitattua. Menetelmä ei ole tarkka, koska heijastumat voivat vaikuttaa huomattavasti signaalin voimakkuuteen. Menetelmä sopii sovelluksiin, joissa kohteen paikantamiseen riittää muutaman metrin tarkkuus. RSS:ää käyttäviä teknologioita ovat mm. WLAN ja Bluetooth. Menetelmää sovelletaan yleisesti koiratutkissa. Koiratutkissa ja muissakin suuntimalaitteissa käytetään suuntaavaa antennia. Suuntaavan antennin säteilykeila on vahva yhdessä suunnassa.



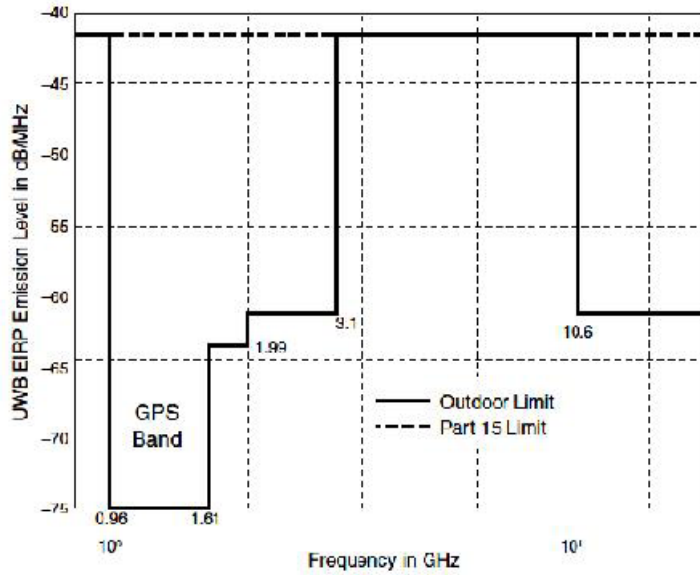
### 3 ULTRALAAJAKAISTATEKNIikka

Ultralaajakaistatekniikka (UWB, Ultrawideband) on tällä hetkellä eri paikannusteknologioista mielenkiintoisin. Se lupaa suurempaa tarkkuutta muihin tekniikoihin verrattuna. Sen tarkkuus on useiden eri lähteiden mukaan luokkaa 10–30 cm.

Ultralaajakaistatekniikan tutkimus on lähtenyt nousuun 2000-luvun alusta. Viimeisen 20 vuoden aikana sitä on käytetty sotilaallisissa sovelluksissa, kuten tutkatekniikassa. Viime vuosina UWB:tä on alettu käyttää paikannus- ja datansiirtosovelluksissa. (1, s. 1; 8 s. 1.)

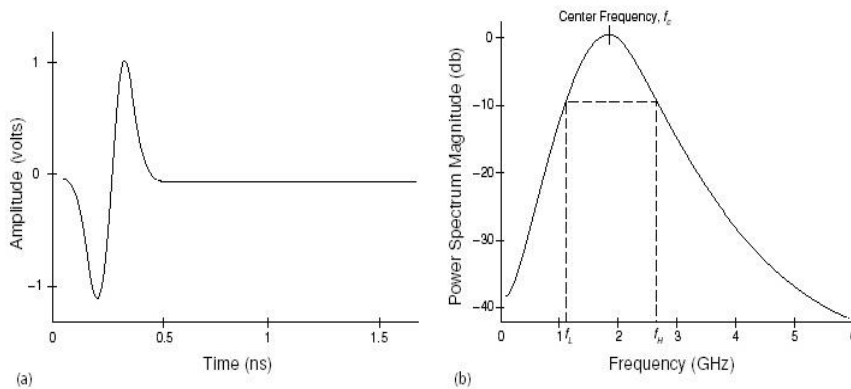
Ultralaajakaistasiinaalin määritelmä on IEEE:n mukaan signaali, jonka osakaistanleveys  $\geq 20\%$  tai signaalin kaistanleveys  $\geq 500$  MHz. Osakaistanleveyden (fractional bandwidth) määritelmä on kokonaiskaistanleveyden suhde taajuuskaistan keskitaajuuteen. Kaistanleveys on määritelty ns. 10 dBm:n kaistanleveytenä eli kun signaalin teho on laskenut keskitaajuuden molemmin puolin  $-10$  dBm maksimitehoon nähden. (9)

UWB:n luvasta vapaa taajuuskaista on 3,1–10,6 GHz. Ultralaajakaistan maksimisäteilyteho on standardissa rajattu  $-41,3$  dBm:ään. Amerikkalaisen FCC:n määrittelemät tehorajat näkyvät kuvassa 4. UWB:n laajakaistaisuuden ansiosta sen datanopeus voi olla 100–500 Mbit/s. (8, s. 1; 8, s. 10.)



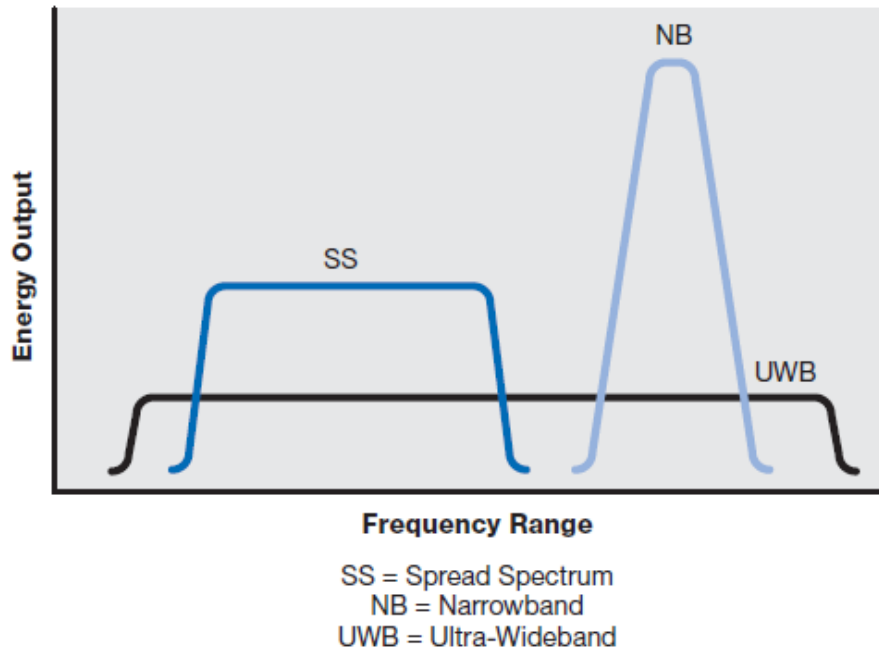
KUVA 4. UWB:n tehorajat eri taajuuksilla (FCC) (8, s.1)

Ultralaajakaistatekniikassa käytetyt datapulssit ovat erittäin lyhytkestoisia, luokkaa nanosekunteja. Tästä johtuen signaalin taajuusspektri leviää laajalle kaistalle ja signaalin tehojakautuma pienenee (kuva 5).



KUVA 5. Ultralaajakaistainen signaali (500ps Gaussian yksittäispulssi) aika- ja taajuustasossa (9)

Verrattuna muihin tekniikoihin ultralaajakaistaisen signaalin teho jakautuu leveämmälle taajuuskaistalle. Kuvassa 6 on esitetty hajaspektri-, kapeakaista- ja ultralaajakaistatekniikan taajuuskaistoja.



*KUVA 6. Eri tekniikoiden taajuuspektrivertailu (10, s. 4)*

Ultralaajakaistatekniikalla saadaan aikaan turvallinen tietoliikenne. Leveän taajuuskaistan ja pienen tehonsa johdosta ultralaajakaistainen signaali jää yleisen kohinatason alapuolelle ja sitä on näin ollen vaikea havaita. Ultralaajakaistaisignaali ei myöskään häiritse muita samalla taajuudella toimivia kapeakaistaisempia laitteita. (8, s. 10.)

Ultralaajakaistatekniikassa käytetyt lyhyet pulssit mahdollistavat tarkan etäisyyden mittauksen. Lisäksi signaalin käyttöjakso (duty cycle) on pieni, vain 0,5 %. Lisäksi signaaleilla on hyvä aineiden läpäisykyky. (8, s. 10.)

## 4 LAITTEISTO

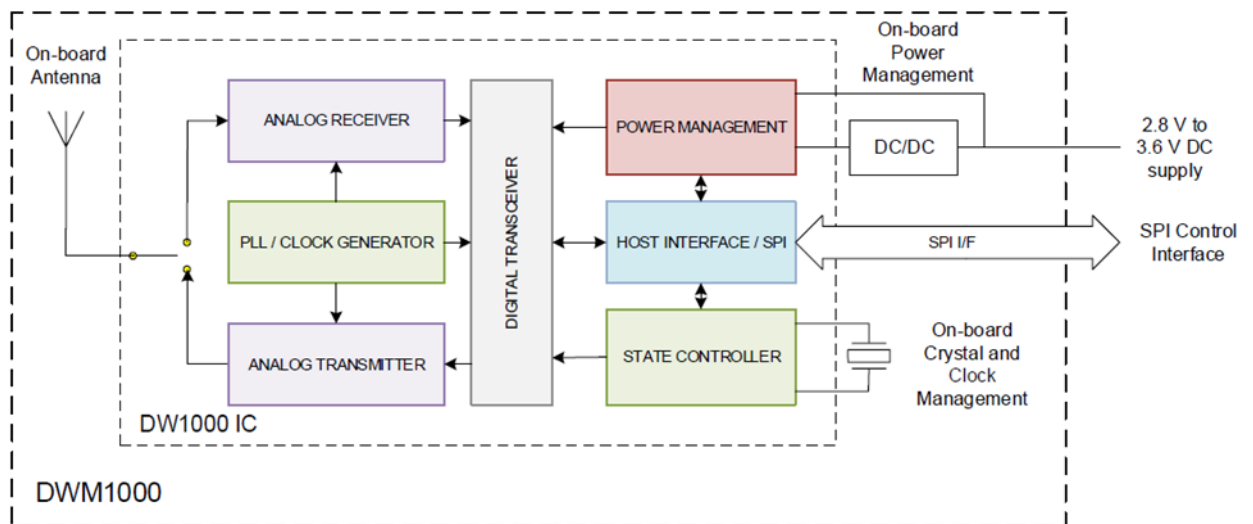
Paikannusjärjestelmää varten työhön suunniteltiin piirilevy, johon käytetyt moduulit juotettiin. Kaikki käytetyt moduulit toimivat +3,3 V:n käyttöjännitteellä.

Mittauskortti koostuu kolmesta moduulista: UWB-moduuli DWM1000, WiFi-moduuli ESP-WROOM-32 ja inertiamoduuli IMU.

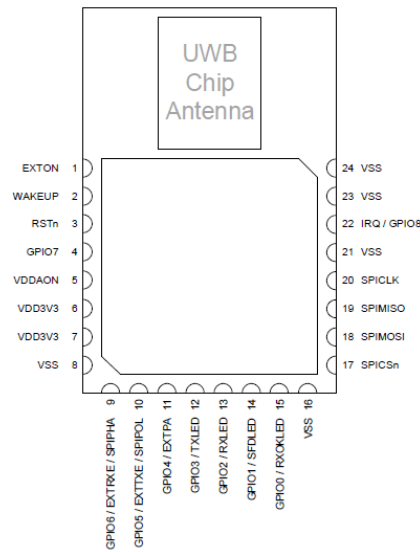
### 4.1 UWB-moduuli DWM1000

Lopputyössä käytetään Decawaven DWM1000 UWB-moduulia. Sen ytimenä on saman yrityksen kehittämä DW1000-IC-piiri. DWM1000:n käyttö ei edellytä RF-tekniikan tuntemusta, koska kaikki RF-osat on integroitu moduuliin valmiiksi. Siihen on integroitu myös käyttöjännitteen hallinta ja kellopiiri (kuva 7).

Moduuli on pienikokoinen, mitoiltaan vain 23 mm x 13 mm x 2,9 mm ja pienitehoinen (kuva 8).



KUVA 7. UWB-moduulin lohkokaavio (12, s. 1)



KUVA 8. UWB-moduuli (13) ja sen pinnijärjestys (12, s. 9)

Moduulin liittämiseen mikrokontrolleriin käytetään SPI-väylää. SPI-väylä käyttää neljää signaalilinjaa (CLK, MOSI, MISO ja SS) datan siirtoon mikrokontrollerin ja moduulin välillä.

Moduulissa on myös 8 kpl yleiskäyttöön tarkoitettuja liitäntänastoja (GPIO). Näistä GPIO 1, 2 ja 3 voidaan käyttää ohjaamaan ledejä, joilla voidaan ilmaista modulin toimintoja. GPIO 5 ja 6 käytetään käynnistysvaiheessa SPI-moodin määrittämiseen. Oletuksena, mikäli nastoja ei ole kytketty, SPI-moodi = 0. Tässä moodissa data luetaan kellon nousevalla reunalla ja lähetetään kellon laskevalla reunalla. Niitä voidaan myös käyttää ulkoisen tehovahvistimen ohjaukseen (Rx/Tx-kytkin). (14, s. 25.)

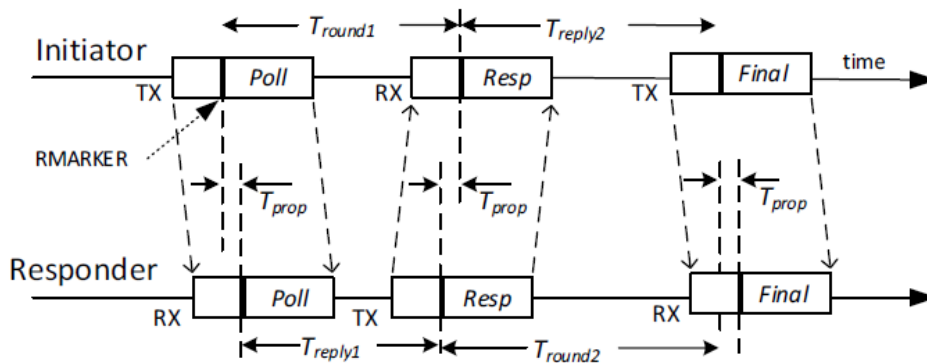
UWB-moduuli on IEEE 802.15.4-2011 -standardin mukainen ja täyttää kaikki FCC:n ja ETSI:n spektrivaatimukset. Moduuli tukee TWR- ja TDOA-menetelmiä etäisyyden mittaamiseen. Moduulin datanopeudet ovat 110 kbit/s, 850 kbit/s ja 6,8 Mbit/s. (14, s. 17.) Käytössä on kuusi taajuuskaistaa, jotka on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. DW1000:n tukemat UWB-kanavat (14, s. 17)

UWB Channel Number	Centre Frequency (MHz)	Band (MHz)	Bandwidth (MHz)
1	3494.4	3244.8 – 3744	499.2
2	3993.6	3774 – 4243.2	499.2
3	4492.8	4243.2 – 4742.4	499.2
4	3993.6	3328 – 4659.2	1331.2*
5	6489.6	6240 – 6739.2	499.2
7	6489.6	5980.3 – 6998.9	1081.6*

\*DW1000 maximum receiver bandwidth is approximately 900 MHz

Tässä työssä on käytetty kaksisuuntaista radiomittausta (two-way ranging, TWR), jossa mittaamalla signaalin kuluaikaa (TOF, Time of Flight) saadaan laskettua kohteen etäisyys. Decawaven DW1000 käyttää asymmetristä mittaussuunnitelmaa. Tässä menetelmässä lähetetään kuvan 9 esittämällä tavalla kaksi sanomaa kohteen ja vastaanottimen välillä. Tämä pienentää moduulien kellopiirin ja taajuuden heilahteluista aiheutuvaa virhettä. (11, s. 14.)



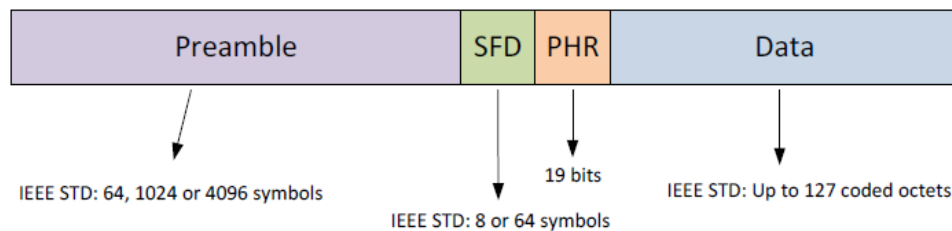
KUVA 9. Kaksisuuntainen etäisyysmittaus (11, s. 14)

DWM1000-moduulin signaalin kantama riippuu käytetystä datanopeudesta, synkronointisignaalin pituudesta, käytetystä taajuudesta ja kaistanleveydestä. Käytännössä mitä suurempi taajuus, sitä lyhyempi kantama. Toisaalta laaja kaista mahdollistaa suurempien tehojen käytön, mikä kasvattaa myös tehonkulutusta.

#### 4.1.1 Sanomien välittäminen

##### 4.1.1.1 Lähetys

Kuvassa 10 on esitetty ultralaajakaistasanoman yleinen rakenne. Sitä käytetään sekä lähetyksessä että vastaanotossa.



*KUVA 10. Lähetysosan kehysrakenne (15, s. 215)*

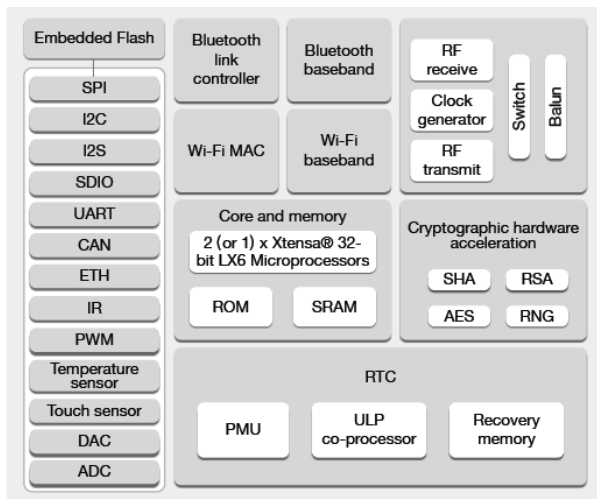
Sanoman alussa on synkronointiosuus, joka koostuu synkronointisignaalista (preamble) ja sanoman kehyksen alkumerkistä (SFD, Start of Frame Delimiter). Näiden jälkeen tulee fyysinen aloituskenttä (PHR), jossa kerrotaan datan pituus ja nopeus. Sanoman lopussa datalohko. Dataan lisätään automaattisesti virheenkorjauskoodi (CRC, Cyclic Redundance Check). Synkronointisignaali eli preamble koostuu n. 500 jaksosta, jolloin voidaan lähettää joko negatiivinen tai positiivinen pulssi tai ei pulssia lainkaan. (15, s. 215–216.)

##### 4.1.2 Vastaanotto

Vastaanotin etsii tulevista signaaleista synkronointisignaalia. Kun signaali on havaittu, luetaan sanoman kehyksen alkumerkki (SFD), josta selviää datan pituus ja nopeus. Tämän jälkeen luetaan data. (15, s. 32.)

## 4.2 ESP-WROOM-32 WiFi-Bluetooth -moduuli

ESP32 on kiinalaisen yrityksen Espressif Systems kehittämä IC-piiri (kuva 11). Siihen on integroitu 2 kpl mikrokontrollereita, WiFi, Bluetooth ja Bluetooth Low Energy (BLE).



KUVA 11. ESP32-IC-piirin lohkokaavio (16, s. 5)

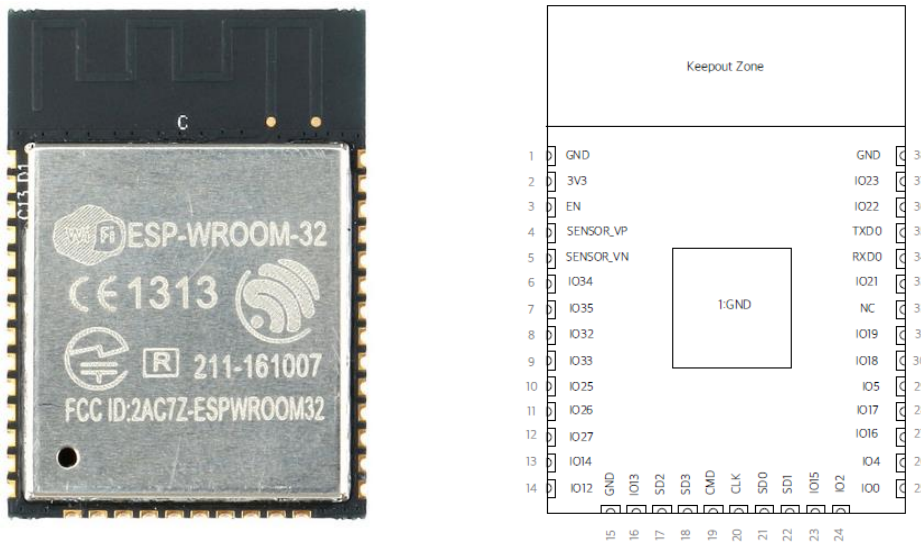
IC-piirissä on riittävästi laskentatehoa kahden 32-bittisen prosessorin ansiosta. Piirin sisällä on ROM-muistia 448 kB ja SRAM-muistia 520 kB. Sisäistä flash-muistia ei ole, mutta piiriin voi liittää maksimissaan 4 kpl 16 MB:n flash-muistipiiriä. (16, s. 3.)

Ulkoisia liitäntöjä on useita. Tässä työssä moduulin liitännöistä on käytetty SPI-väylää UWB-moduulin ohjaamiseen, I2C-väylää IMU-moduulin datan lukemiseen ja UART-väylää piirin ohjelmoimiseen. Näiden lisäksi piiristä löytyvät D/A- ja A/D-muuntimien liitännät. Piiri voidaan jopa liittää tarvittaessa Ethernetiin tai CAN-väylään.

Langaton tiedonsiirto hoituu joko WLAN- tai Bluetooth/BLE-liitännän kautta. WLAN tukee täysin TCP/IP-protokollaa ja MAC-protokollaa. Samoin Bluetooth on tuettu kaikilta osin. Lisätietoa löytyy valmistajan datalehdestä (16).



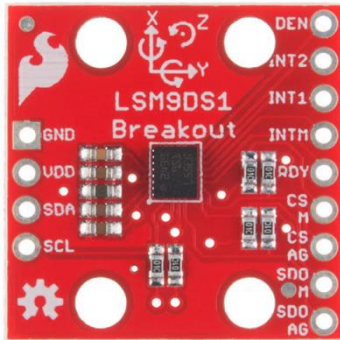
ESP-WROOM-32-moduulissa on ESP32-piirin lisäksi 4 MB flash-muistia, kellopiiri ja PCB-antenni sovituskomponentteineen. Moduulin pinnejä GPIO6, GPIO7, GPIO8, GPIO9, GPIO10 ja GPIO11 (pinnit 17–22) ei voida käyttää sovelluksissa, koska ne on varattu moduulin sisällä olevan flash-muistin käyttöön. (17, s. 6.)



KUVA 12. ESP32-moduuli (18) ja sen pinnijärjestys (17, s. 3)

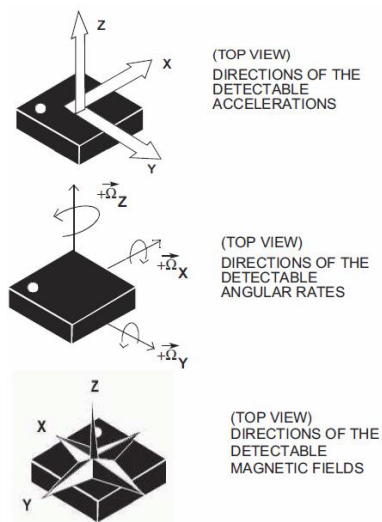
### 4.3 IMU, inertiamittausmoduuli

Liikkuvassa kohteessa käytetään inertiamittausmoduulia, Sparkfun LMS9DS1 Breakout Board. Moduulissa on LSM9DS1-piirin lisäksi muutama oheiskomponentti (kuva 12).



KUVA 12. Sparkfun IMU-moduli (19)

LSM9DS1-piiriin on integroitu 3-akseliset kiihtyvyyssanturi, gyroskooppi ja magnetometri. Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä ja sitä, nouseeko nopeus ja laskeeko se. Gyroskooppi mittaa kulmanopeutta ja sitä, kuinka nopeasti ja minkä akselin suuntaisesti pyörimisliike tapahtuu. Magnetometri mittaa maan magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa, (19.)

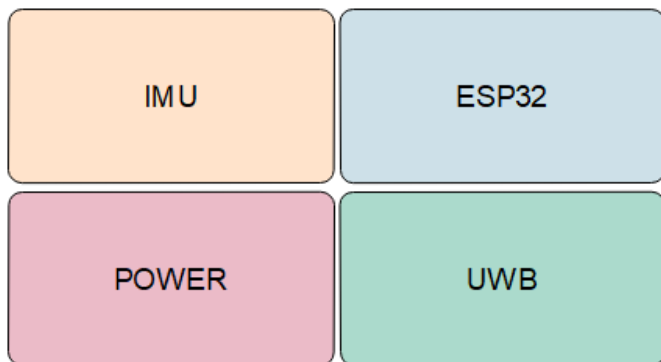


KUVA 13. LSM9DS1 anturin mittaussuunnat (20, s. 10)

IMU-kortin liittämiseksi mikrokontrollerille on kaksi vaihtoehtoa, SPI- ja I2C-väylät. Tässä sovelluksessa käytetään I2C-väylää, koska UWB-moduuli on jo kytketty SPI-väylään ja ESP32-moduulissa on vapaa I2C-väyläliitäntä. Samalla eri moduulien ohjaaminen on yksinkertaisempaa.

#### 4.4 Mittauskortti

Kuvassa 15 on suunnitellun kortin eri toimintayksiköt: jännitteenhallinta POWER, inertiamoduuli IMU, WiFi- ja mikrokontrollerimoduuli ESP32 ja ultralaajakaistamoduuli UWB.

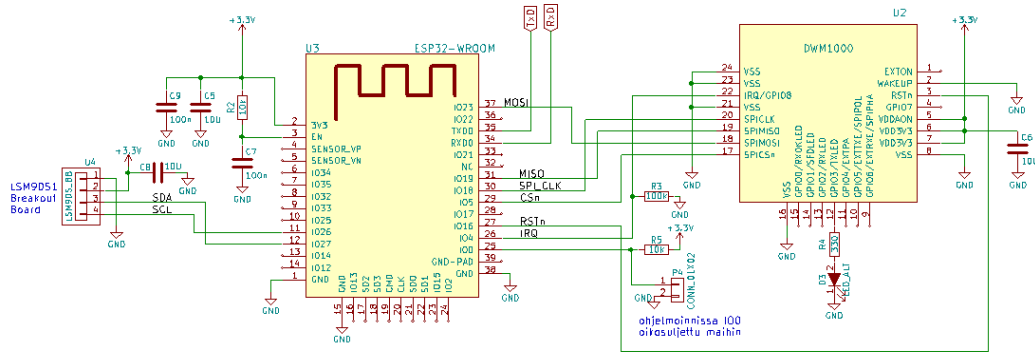


*KUVA 14. Mittauskortin lohkokaavio*

Sekä kiinteästi asennettavissa että liikkuviin kohteisiin asennettavissa laitteissa voidaan käyttää samaa korttia. Kiinteästi asennettavassa laitteessa ei ole IMU-moduulia.

Kortin ohjelmointi tapahtuu USB-kaapelilla riviliittimeltä. Ohjelmointi vaatii ainoastaan kaksi datalinjaa (RxD, TxD) ja maan. Kaapelin signaalien tason on oltava 3,3 V, koska kortin moduuli toimii 3,3 V:lla eikä kestä korkeampia jännitteitä.

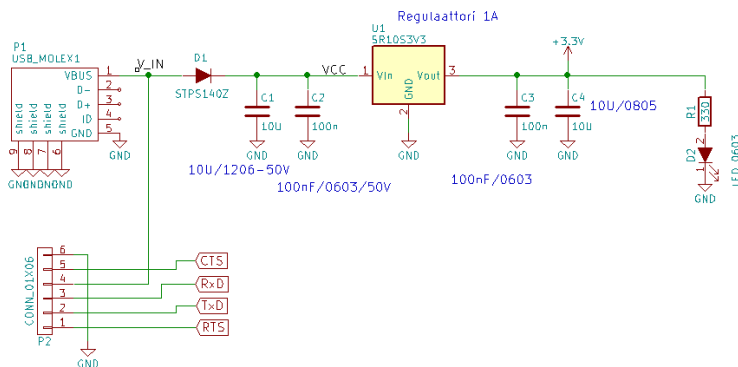
Liikkuvaan kohteeseen voidaan liittää Sparfun 9DoF IMU Breakout -kortti. IMU (Inertial Measurement Unit) liitetään mittauskorttiin I2C-väylän kautta. Väylä tarvitsee toimiakseen vain kaksi signaalilinjaa (kello ja data), käyttöjännitteen ja maan. Kuvassa 15 on moduulien kytkentäkaavio.



KUVA 15. Moduulien kytkentä

Laitteessa on virransyöttöä varten regulaattori, ESP32- ja UWB-moduulit sekä liittimet virransyöttöä ja ohjelmointia varten. Huomioitavaa layoutissa sekä ESP32:n että DWM1000:n kohdalla on, että piirikortissa ei saa olla metallisointia moduulien antennien alla. Metallisointi muuttaa moduulien antennien säteilykuvia eivätkä moduulit välttämättä toimi suunnitellulla tavalla.

Kuvassa 17 on mittauskortin jännitteenhallintayksikkö. Käyttöjännite kortille voidaan kytkeä joko rivi- tai USB-liittimen kautta. Pääasiallisesti virransyöttö tapahtuu USB-liittimen P1 kautta. Maksimisyöttöjännite laitteelle on riippuvainen regulaattorin tyypistä. Käytetyllä SR10S3V3-regulaattorilla se on 18 V. Regulaattorin antovirta on oltava vähintään 1 A. Suojadiodin D1 tarkoituksena on estää jännitteiden kytkeminen väärinpäin.



KUVA 16. Kortin jännitteenhallintayksikkö

Kortin todellista virrankulutusta ei ole mitattu. Moduulien virrankulutukset löytyvät taulukosta 2.

Kiinteästi asennettavien ankkurien virrankulutus ei ole kriittinen, koska ne kytketään verkkovirtaan. Liikkuva kohde sensijaan on yleensä akkukäyttöinen, joten siinä akun kapasiteetti on syytä ottaa huomioon.

TAULUKKO 2. Moduulien virrankulutus

Moduuli	Virrankulutus (mA)	
	Lähetys (Tx)	Vastaanotto (Rx)
DWM1000 (UWB)	140 <sup>1)</sup>	160 <sup>1)</sup>
ESP-WROOM-32	180 <sup>2)5)</sup>	95 - 100
	190 <sup>3)5)</sup>	
	240 <sup>4)5)</sup>	
IMU	4,5	

- 1) Kanava 5
- 2) Lähetysteho +14 dBm
- 3) Lähetysteho +16 dBm
- 4) Lähetysteho +19,5 dBm
- 5) Kaikki lähetinmittaukset tehty 50 %:n toimintajaksolla

Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty DW1000-moduulin virrankulutukset eri toimintamodeissa kanavilla 2 ja 5. Käytettäessä muita kanavia virrankulutus voi muuttua jonkin verran annetuista arvoista.

TAULUKKO 3. Virrankulutus lähetystilassa eri moodeissa (14, s. 31)

Mode Name	TX I <sub>AVG</sub> (mA)						Units
	Channel 2			Channel 5			
	Avg	Preamble	Data	Avg	Preamble	Data	
Mode 1	48	68	35	56	74	42	mA
Mode 2	68	68	50	69	74	57	mA
Mode 3	44	68	35	50	74	42	mA
Mode 4	60	68	51	67	74	58	mA
Mode 5	50	68	51	56	74	58	mA
Mode 6	56	68	51	62	74	58	mA
Mode 7	35	68	35	42	74	42	mA
Mode 8	38	68	35	44	74	42	mA
Mode 9	61	83	40	67	89	46	mA
Mode 10	79	83	52	85	89	59	mA
Mode 11	52	83	40	59	89	46	mA
Mode 12	75	83	52	82	89	59	mA
Mode 13	53	83	52	60	89	59	mA
Mode 14	65	83	52	72	89	59	mA
Mode 15	40	83	40	46	89	46	mA
Mode 16	43	83	40	50	89	46	mA

TAULUKKO 4 Virrankulutus vastaanottilassa eri moodeissa (14, s. 31)

Mode Name	RX I <sub>AVG</sub> (mA)						Units
	Channel 2			Channel 5			
	Avg	Preamble	Data Demod	Avg	Preamble	Data Demod	
Mode 1	86	113	59	92	118	62	mA
Mode 2	115	113	118	122	118	123	mA
Mode 3	76	113	59	81	118	62	mA
Mode 4	115	113	115	123	118	123	mA
Mode 5	118	113	118	126	118	126	mA
Mode 6	113	113	113	125	118	126	mA
Mode 7	57	113	59	65	118	62	mA
Mode 8	62	113	59	70	118	62	mA
Mode 9	90	113	72	94	118	75	mA
Mode 10	112	113	118	117	118	123	mA
Mode 11	82	113	72	85	118	75	mA
Mode 12	112	113	118	118	118	123	mA
Mode 13	114	113	118	120	118	123	mA
Mode 14	113	113	118	119	118	123	mA
Mode 15	72	113	72	76	118	75	mA
Mode 16	76	113	72	80	118	75	mA

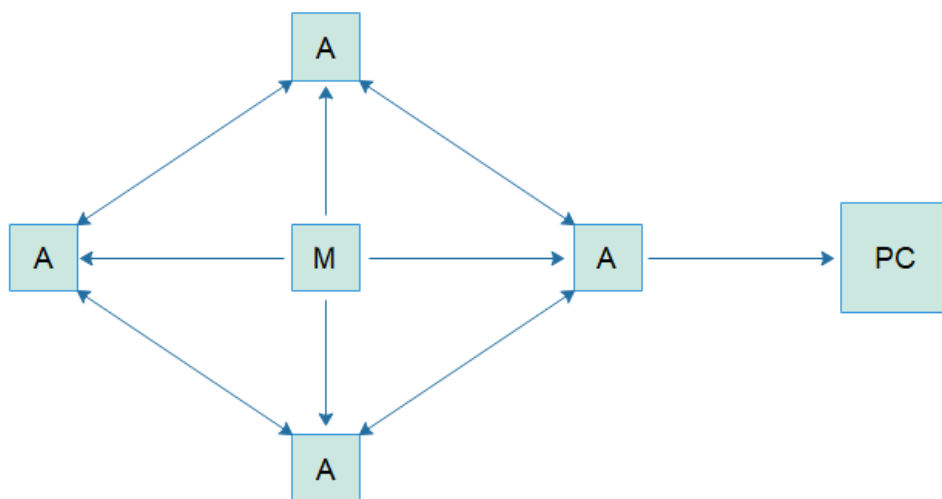
## 5 JÄRJESTELMÄ

Kohteen paikantamiseen tarkoitettu järjestelmä koostuu neljästä kiinteästi asennetusta ankkurista (A) ja yhdestä liikkuvaan kohteeseen (M) asennetusta tagista (kuva 18). Neljällä ankkurilla saadaan paikkatieto laskettua 3D-koordinaatistossa.

Ankkureilla on koordinaatit, jotka on talletettu listaan ankkurikortin muistiin. Ankkurit vaihtavat koordinaattitietoja keskenään ja tarkistavat vielä etäisyyden mittaamalla.

Ankkurit mittaavat reaaliaikaisesti etäisyyttään liikkuvaan kohteeseen ja mittaustieto, jossa on ankkurin ID ja etäisyys kohteeseen, lähetetään PC:lle jatkokäsittelyä varten.

PC:n ohjelma laskee tietojen perusteella kohteen paikan tilassa. Kohteen paikka voidaan näyttää PC:n ruudulla myös visuaalisesti.



KUVA 17. Järjestelmän toimintaperiaate

## 6 OHJELMAT

Työssä kehitetyt ohjelmat ovat Probot Oy:n omaisuutta eikä niiden lähdekoodeja näin ollen julkaista tämän työn yhteydessä.

### 6.1 Käytetyt moduulit ja Arduino IDE

Ohjelmien kehitys on tehty Arduinon kehitysympäristössä. Arduino IDE:n valinta ohjelmointiympäristöksi oli helppo, koska se on tuttu ja siihen oli saatavissa ohjelmointikirjastoja käytetyille moduleille. Hyvä puoli Arduino IDE:n käytössä on se, että kaikki Arduinolle tehdyt kirjastot toimivat myös ESP32:ssa.

Jotta ESP32:ta voidaan ohjelmoida, täytyy ladata ja asentaa sitä tukeva kirjasto. Tämä kirjasto löytyy websivulta <https://github.com/espressif/arduino-esp32>. Kirjastoa päivitetään säännöllisesti, joten uusia ominaisuuksia ja korjauksia kirjastoon tulee aika ajoin.

Kirjaston asennusohjeet eri käyttöjärjestelmille löytyvät samalla sivulla olevista linkeistä. Ohjeessa olevan Git-ohjelman käyttö ei ole pakollista, mutta sen käyttö helpottaa kirjaston ylläpitoa. Tämä on suositeltavin ja paras vaihtoehto.

Itse asensin kirjaston alunperin ilman Git-ohjelmaa, myöhemmin Git-ohjelmalla.

Asennus ilman Git-ohjelmaa tapahtuu Windows-ympäristössä seuraavasti:

1. Ladataan kirjaston zip-paketti omalle koneelle.
2. Katso kirjaston asennushakemisto Arduino IDE:n valikon File/Preferences -osiosta Sketchbook location.
3. Tähän kohdan 2 hakemistoon luodaan uusi hakemistö hardware, johon luodaan hakemisto espressif ja sen alle vielä hakemisto esp32.
4. Puretaan zip-paketti luotuun esp32-hakemistoon.
5. Suoritetaan esp32\tools -hakemistossa sijaitseva get.exe.



Käynnistettäessä Arduino IDE:tä sen menuvalikossa Tools/Board löytyy eri vaihtoehtoja ESP32-pohjaisille korteille. Mikäli käytettyä korttia ei löydy listalta, voi käyttää ESP32 Dev Modulea.

Kun ESP32-kirjaston haluaa päivittää, pitää get.exe suorittaa joka kerta uudelleen.

UWB-moduulia ohjaamaan käytetty ohjelmakirjasto on Thomas Trojerin Arduinolle tekemä kirjasto, joka löytyy websivulta <https://github.com/thotro/arduino-dw1000>. Taulukosta 5 löytyvät DW1000-kirjastosta valittavissa olevat toimintamoodit.

*TAULUKKO 5 DW1000-kirjaston toimintamoodit*

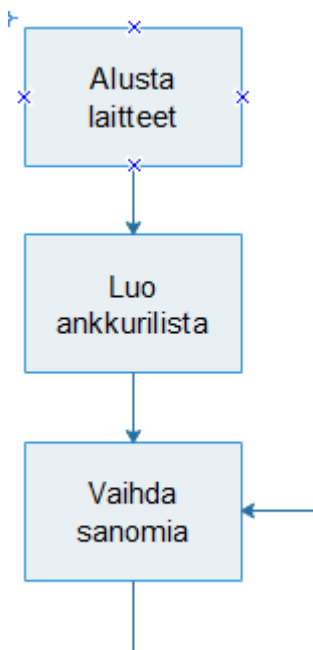
Moodi	Datanopeus (kb/s)	PRF (MHz)	Preamble pituus
MODE_LONGDATA_RANGE_LOWPOWER	110	16	L
MODE_SHORTDATA_FAST_LOWPOWER	6800	16	S
MODE_LONGDATA_FAST_LOWPOWER	6800	16	L
MODE_SHORTDATA_FAST_ACCURACY	6800	64	S
MODE_LONGDATA_FAST_ACCURACY	6800	64	L
MODE_LONGDATA_RANGE_ACCURACY	110	64	L

S = lyhyt (short), L = pitkä (long)

## 6.2 Ankkurin ja liikkuvan kohteen ohjelmat

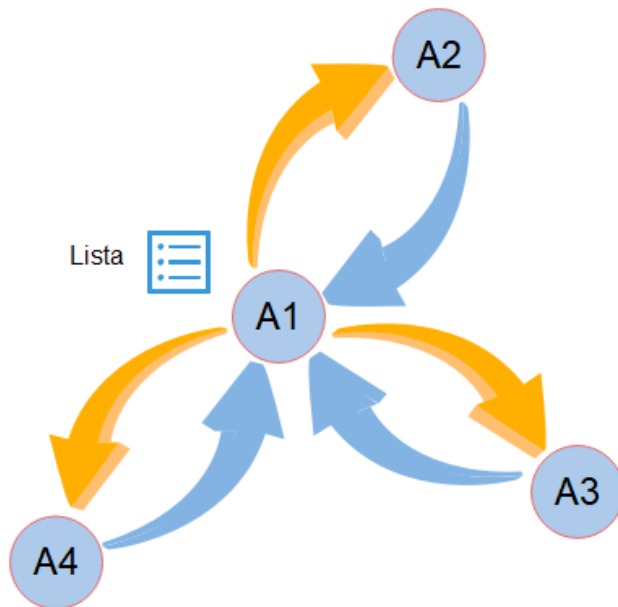
### 6.2.1 Ankkuri

Kuvassa 18 on esitetty ankkurin ohjelma. Laittealustusten jälkeen ankkuri vaihtaa sanomia muiden ankkurien kanssa luoden ankkurilistan. Tämän jälkeen vain vaihdetaan sanomia liikkuvan kohteen kanssa. Ankkurin ei tarvitse olla yhteydessä WiFi-verkkoon. Sanomat välitetään laajakaistamoduuleilla.



KUVA 18. Ankkurin ohjelmakaavio

Lista samassa verkossa olevista ankkureista saadaan siten, että referenssipisteessä  $(0,0,z)$  oleva ankkuri (A1) lähettää muille ankkureille kyselyn. Muut ankkurit vastaavat kyselyyn lähettämällä omat tietonsa (laiteID, koordinaatit  $x$ ,  $y$  ja  $z$ ). Tiedot kaikista ankkureista talletetaan taulukkoon nollassa pisteessä olevalle ankkurille (kuva 19).



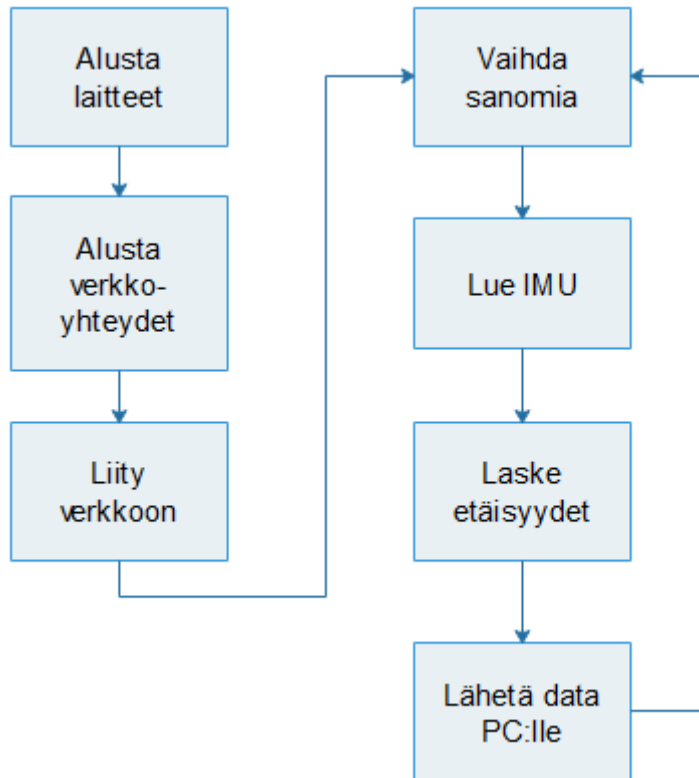
*KUVA 19. Ankkurilistan luominen*

Referenssiankkurilta tiedot lähetetään PC:lle. Tämä tehdään vain kerran listan teon jälkeen.

Ankkureille on annettu kiinteät koordinaatit, joista etäisyydet ankkurien välillä voidaan laskea. Etäisyydet voidaan tarkistaa mittaamalla signaalin kulku-aika ankkurien välillä.

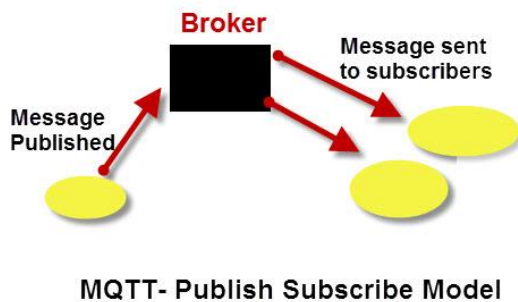
### **6.2.2 Liikkuva kohde eli tagi**

Kuvassa 20 on tagin ohjelma. Laitte- ja verkkoalustusten jälkeen tagi liittyy WiFi-verkkoon. Tämän jälkeen tagi vaihtaa sanomia jokaisen ankkurin kanssa ja laskee etäisyydet niiden välillä. Näiden etäisyyksien avulla tagi laskee sijaintinsa huonetilassa. Jos inertiamoduuli IMU on kytketty, luetaan sen data ja lasketaan sen perusteella asentotiedot: kääntyminen (yaw), nyökkääminen (pitch) ja kallistuminen (roll). Data, joka käsittää x- ja y-koordinaatit ja asentotiedot lähetetään PC:lle jatkokäsittelyä varten.



KUVA 20. Tagin ohjelman lohkokaavio

Datansiirrossa tagilta PC:lle käytettiin MQTT-protokollaa (kuva 21). Se perustuu julkaisija-tilaajaperiaatteelle. Julkaisija antaa datalle aiheen (topic) ja lähettää sen viestinvälittäjälle (Broker), joka jakaa datan tilaajille. Tilaaja kyselee dataa sen aiheen perusteella. MQTT:ssä käytettävän portin oletusnumero on 1883.



KUVA 21. MQTT-protokolla (21)

Ohjelmassa tagi antaa lähetettävälle datalle aiheen. Sen jälkeen data lähetetään MQTT-serverille serverin osoitteen ja porttinumeron perusteella. Tilaaaja ottaa yhteyden serverille ja kysyy dataa sen aiheen perusteella. Opinnäytetyössä tilaajana käytettiin yksinkertaista Python-skriptiä, joka hakee datan serveriltä ja näyttää saapuneen datan ruudulla.

## 7 MITTAUKSET

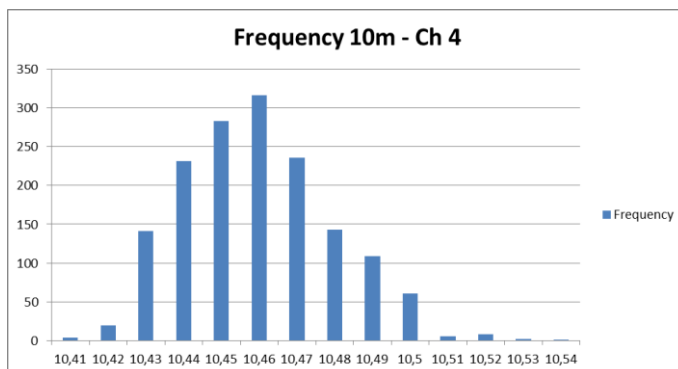
### 7.1 Etäisyysmittaus

Probot Oy:n tiloissa tehdyssä mittauksessa arvioitiin eri toimintamoodien ja kanavien vaikutusta mittaustarkkuuteen. Tässä mittauksessa käytettiin yhtä ankkuria ja yhtä liikkuvaa kohdetta, tagia.

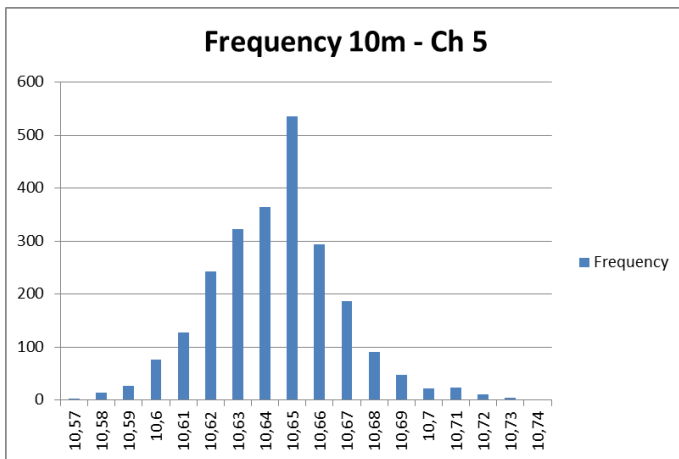
Ankkuri oli sijoitettuna kiinteästi pöydälle, tagin etäisyyttä vaihdeltiin. Etäisyys ankkurista merkittiin teipillä lattiaan rullamitalla mitatun etäisyyden kohdalle. Tässä mittauksessa on useita itse mittausjärjestelyyn liittyviä virhetekijöitä, jotka voivat vaikuttaa tulosten tarkkuuteen. Näitä ovat teippimerkinnän etäisyys, huonetilassa olevien laitteiden ja muiden tavaroiden vaikutus sekä huoneessa mahdollisesti liikkuvat henkilöt.

Mittauksissa käytetty moodi oli `MODE_LONGDATA_RANGE_ACCURACY`. Moodi löytyy kirjastosta `DW1000.h`. Moodin datanopeus on 100 kbit/s.

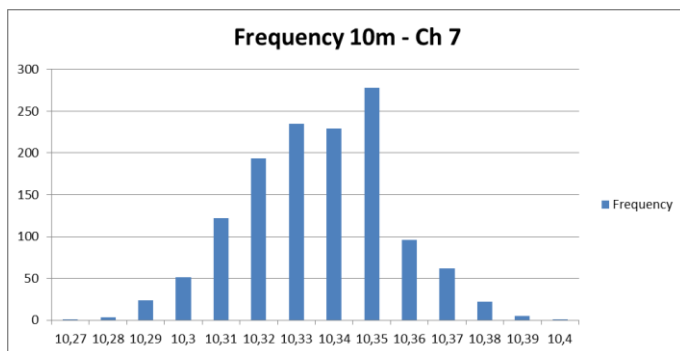
Kuvissa on mittausten hajonta suhteessa nimellismittaan. Kanavan vaikutusta tarkkuuteen on mitattu kanavilla 4, 5 ja 7.



KUVA 22. Etäisyys 10 m, käytetty kanava 4



KUVA 23. Etäisyys 10 m, käytetty kanava 5



KUVA 24. Etäisyys 10 m, käytetty kanava 7

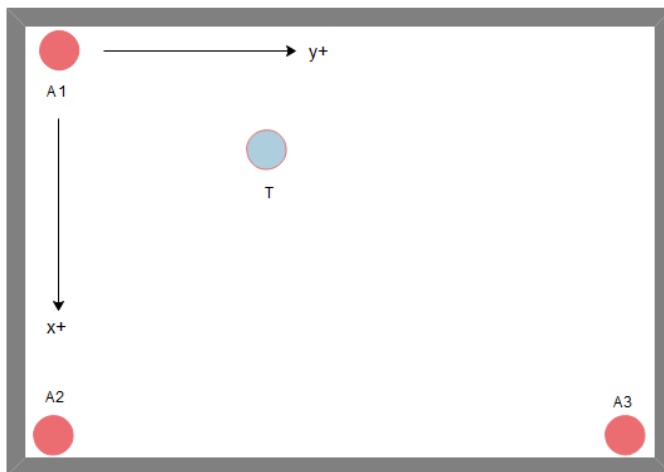
Kuten edellä olevista kuvista huomataan, on mitatuista kanavista kanava 7 tarkin. Keskihajonta on n. 34 cm.

Liitteessä 3 on kuvattu mittaustarkkuutta etäisyyksillä 2–8 m kanavien 4 ja 7 välillä. Kanava 5 jätettiin mittauksista pois, koska sen tarkkuus ei ollut niin hyvä verrattuna muihin.

Kanavien 4 ja 7 kaistanleveys on leveä muihin DWM1000-moduulin käyttämiin kanaviin, 1331,2 MHz ja 1081,6 MHz. Leveästä kaistasta johtuen signaalin heijastuksista johtuvat virheet eivät vaikuta mittaustarkkuuteen merkittävästi.

## 7.2 Paikannusmittaukset

Paikannusmittaukset tehtiin Oulun yliopiston robotiikan laboratoriossa. Ankkurit oli asennettu huoneeseen kuvan 25 mukaisesti. Tagin T paikkaa muuteltiin ja tulokset merkittiin ylös. Tagin paikka huoneessa mitattiin mittanauhalla. Mittanauhalla mitattu huoneen pituus oli 8,7 m ja leveys 5,5 m. Taulukkoon 6 on kirjattu tehtyjen mittausten tulokset.



KUVA 25. Ankkurien sijoitus huoneessa

TAULUKKO 6 Etäisyysmittaukset

Mittaus nro	Mitta					
	Rullamitta (m)		UWB-kortti (m)		Erotus (m)	
	x	y	x	y	x	y
1	1	1	0,675	0,797	-0,325	-0,203
2	2,4	4,5	2,02	4,541	-0,38	0,041
3	4,5	2,7	4,441	2,233	-0,059	-0,467
4	6,7	3	6,408	2,832	-0,292	-0,168

Mittauksissa on jonkin verran virhemarginaalia, koska rullamitalla tehdyt etäisyyden mittaukset eivät ole absoluuttisen tarkkoja. Tagi oli mittauksissa sijoitettu vaakatasoon antennien osoittaessa kattoa kohti. Tuloksiin on kirjattu 500 näytteen keskiarvo. Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että



ultralaajakaistaisella radiolla voidaan päästä hyvin lopputulokseen. Parhaisiin lopputulokseen päästään, kun ultralaajakaistarakkujen antennit osoittavat ylöspäin ja ne ovat näköyhteydessä toisiinsa. Esteet ja seinät sekä tagilaitteen asento vaikuttavat mittaustarkkuuteen. Mittauksissa havaittiin, että mikäli tagilla ei ollut suoraa näköyhteyttä kaikkiin ankkureihin, mittaustuloksissa voi olla jopa 50 %:n eroja todellisiin etäisyyksiin nähden.

## 8 LOPPUSANAT

Lopputyön tarkoituksena oli saada aikaan järjestelmä, jossa liikkuvan kohteen (robotin) paikka ja asento voidaan selvittää mahdollisimman reaaliaikaisesti.

Työhön jäi useita kehitettäviä kohteita. Piirikortti jäi prototyyppiasteelle. Työn aikana selvisi, että ESP32-moduuli on herkkä käyttöjännitteen vaihteluille. Moduuli vaatii toimiakseen kunnolla järeän virtalähteen. Kortti vaatii vielä uuden suunnittelukierroksen. Siinä pitää ottaa paremmin huomioon moduulien virranottovaatimukset sekä korjata yksi johdotus. Myös laitteen mekaniikka ja kotelointi ovat seikkoja, joihin pitää tulevaisuudessa puuttua.

Ohjelmistopuolella jatkokehittelykohteita ovat ankkurilista, käyttäjäliittymän kehitys, datan visualisointi ja datan käsittely. Myös datan siirtämisessä käytettyjen menetelmien muokkaus voi olla tarpeellista. Alkusuunnitelmissa oli tarkoitus siirtää data TCP-socketien avulla, mutta sen implementointi tuntui olevan niin hankalaa, että päätin tehdä sen käyttämällä MQTT-protokollaa. Tulevaisuudessa MQTT-protokolla on tarkoitus vaihtaa TCP-socketeiksi. Paikannuksessa käytettävissä laskentamenetelmissä riittää paljon kehitettävää, jotta järjestelmästä tulee luotettava ja riittävän tehokas.

Järjestelmän testauksessa käytettiin kolmea ankkuria ja yhtä liikkuvaan kohteeseen sijoitettavaa tagia. Jotta järjestelmällä pystyttäisiin seuraamaan robotin liikkeitä kolmiulotteisesti, pitää järjestelmää kehittää edelleen.

Myös inertiamoduulin implementointi jäi kesken. Data saadaan kyllä siirtymään tagilta PC:lle, mutta sitä ei ole käsitelty millään lailla. Aika loppui yksinkertaisesti kesken. Moduulin liittäminen järjestelmään vaatii monien asioiden huomioimista. Moduulin kalibrointi, sijoittelu, datan käsittely ja optimointi ovat aikaa vieviä tehtäviä.

Työssä vaikeinta oli ohjelmointi, koska ohjelmointitaitoni ovat vajavaiset. Lähes kaikki asiat piti opetella alusta pitäen, joka söi tehokasta aikaa. Koodien tekemiseen ja kokeiluihin meni mielestäni aivan liian kauan aikaa. Mikäli minulla

olisi ollut aikaisempaa kokemusta ohjelmoinnista, ei tästä työstä olisi tullut niin haastavaa kuin mitä se oli.

Kaiken kaikkiaan lopputyön aihe oli erittäin kiinnostava ja haastava. Työn aikana olen oppinut hyvin paljon ohjelmoinnista, mutta sen hallitseminen vaatii vielä paljon työtä.

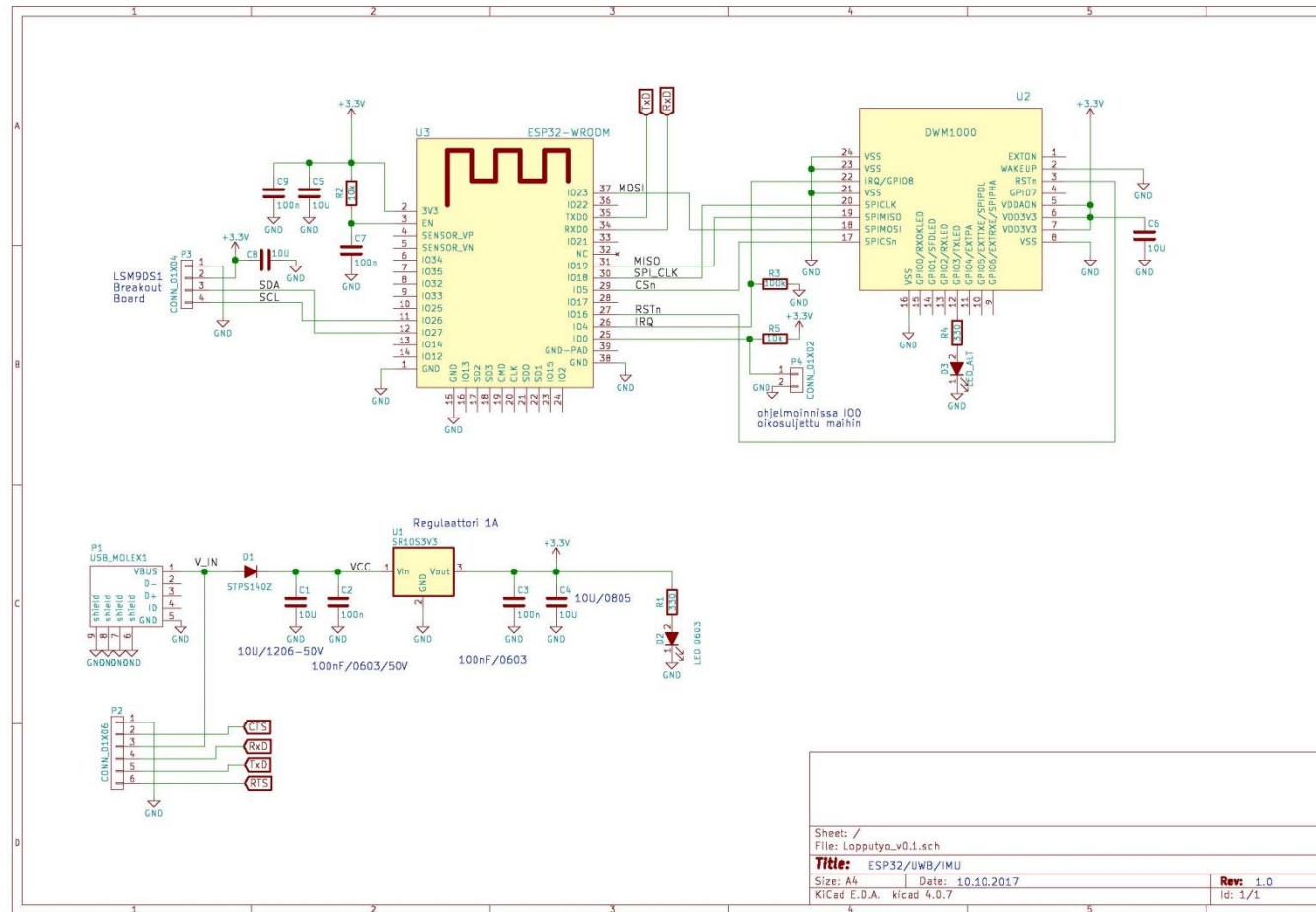
## LÄHTEET

1. Betancur, Gabriel Ortiz – Treven, Fredrik 2017. A Framework for a Relative Real-Time Tracking System Based on Ultra-Wideband Technology. Master's thesis in Embedded Electronic System Design, Chalmers University of Technology, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden. Saatavissa: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/249921/249921.pdf>.  
Hakupäivä 27.9.2017.
2. Dädeby, Sebastian – Hesselgren, Joakim 2017. A system for indoor positioning using ultra-wideband technology. Master's thesis in Embedded Electronic System Design Chalmers University of Technology University of Gothenburg, Sweden. Saatavissa: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/249898/249898.pdf>  
Hakupäivä 27.9.2017.
3. Engström, Hampus – Helander, Fredrik 2015. Evaluation and testing of techniques for indoor positioning, Department of Electrical and Information Technology, Faculty of Engineering, LTH, Lund University. Saatavissa: <http://www.eit.lth.se/srapport.php?uid=901>. Hakupäivä 27.9.2017.
4. Liu, Hui – Darabi, Houshang – Banerjee, Pat – Liu, Jing 2007. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part c: applications and reviews, VOL. 37, NO. 6. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/d22f/c46a607dbc16dfc9a32084fdd8b2558da17c.pdf> Hakupäivä 27.9.2017.
5. Trilateration 2017. Wikipedia. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>
6. Multilateration 2017. Wikipedia. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration>

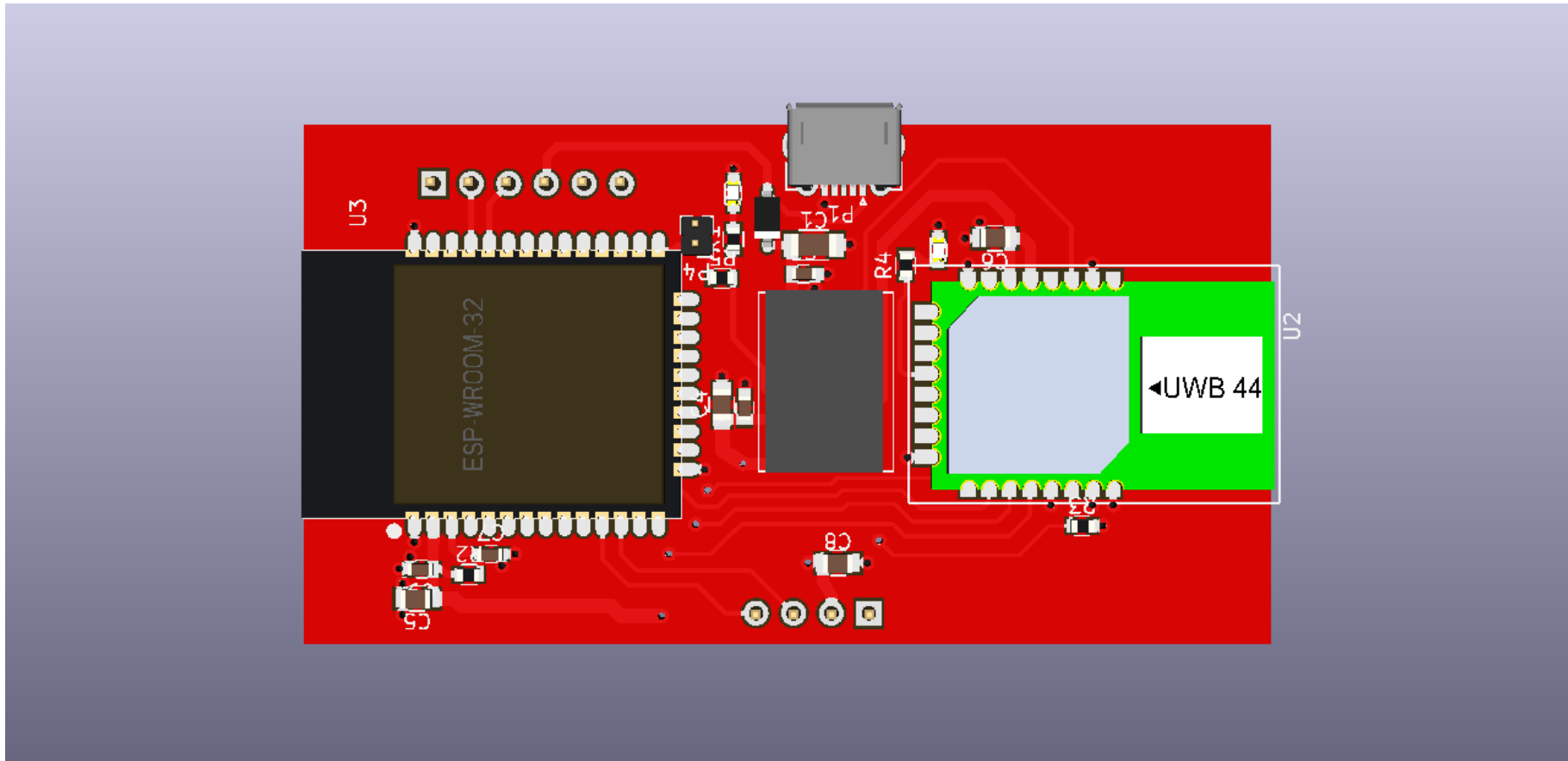
7. Decawave APS003 Introduction to Real Time Location Systems 2017. Saatavissa: <https://decawave.com/> (vaatii rekisteröitymisen). Hakupäivä 12.10.2017.
8. Patel, Kartik – Kulkarni Ramesh 2014. Ultra-Wideband (UWB) Wireless System, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), Special Issue for International Technological Conference. Saatavissa: <http://www.ijaiem.org/ITechCON-2014/EXTC-05.pdf> Hakupäivä 27.9.2017.
9. Bakhtafrouz, Ahmad 2007. SDR and UWB. Department of Electrical and Computer Engineering at Isfahan University of Technology. Saatavissa: [http://omidi.iut.ac.ir/SDR/2007/WebPages/07\\_UWB/SDR-UWB/5.html](http://omidi.iut.ac.ir/SDR/2007/WebPages/07_UWB/SDR-UWB/5.html)
10. Intel Ultra-Wideband (UWB) Technology. Whitepaper 2004. Intel Corporation. Saatavissa: <http://www.usb.org/wusb/docs/Ultra-Wideband.pdf> Hakupäivä 28.9.2017
11. Decawave APS-013 DW1000 and two-way ranging 2017. Saatavissa: <https://decawave.com/> (vaatii rekisteröitymisen). Hakupäivä 12.10.2017
12. Decawave DWM1000 Datasheet 2017. Saatavissa: <https://decawave.com/> (vaatii rekisteröitymisen). Hakupäivä 12.10.2017
13. ScenSor DWM1000 Module 2017. Saatavissa: <https://decawave.com/products/dwm1000-module> Hakupäivä 12.10.2017
14. Decawave DW1000 Datasheet 2017. Saatavissa: <https://decawave.com/> (vaatii rekisteröitymisen). Hakupäivä 12.10.2017
15. Decawave DW1000 User Manual 2017. Saatavissa: <https://decawave.com/> (vaatii rekisteröitymisen). Hakupäivä 12.10.2017
16. Espressif ESP32 datasheet 2017. Saatavissa: <http://espressif.com/en/products/hardware/esp32/resources>, linkki Documentation, ESP32 Datasheet. Hakupäivä 11.10.2017

17. Espressif ESP-WROOM-32 datasheet 2017. Saatavissa: [http://espressif.com/en/support/download/documents?keys=&field\\_type\\_tid%5B%5D=13&field\\_type\\_tid%5B%5D=54](http://espressif.com/en/support/download/documents?keys=&field_type_tid%5B%5D=13&field_type_tid%5B%5D=54), linkki ESP-WROOM-32 Datasheet. Hakupäivä 11.10.2017.
18. #Deal: ESP-WROOM-32 soldering module (ESP32). DIY Projects. Saatavissa: <https://diyprojects.io/deal-esp-wroom-32-soldering-module/> Hakupäivä 8.12.2017.
19. LSM9DS1 Breakout Hookup Guide. Sparkfun. Saatavissa: [https://learn.sparkfun.com/tutorials/lsm9ds1-breakout-hookup-guide?\\_ga=2.232029786.433980471.1511872564-1981417222.1508840494](https://learn.sparkfun.com/tutorials/lsm9ds1-breakout-hookup-guide?_ga=2.232029786.433980471.1511872564-1981417222.1508840494) Hakupäivä 8.12.2017.
20. LSM9DS1 datasheet 2015. STMicroelectronics Saatavissa: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/1e/3f/2a/d6/25/eb/48/46/DM00103319.pdf/files/DM00103319.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103319.pdf> Hakupäivä 14.4.2017
21. MQTT Protocol Overview -Beginners Guide. Saatavissa: <http://www.steves-internet-guide.com/mqtt/>. Hakupäivä 8.12.2017.

# Liite 1 UWB-kortin piirikaavio



Liite 2 UWB-kortin osasijoittelu





Liite 3 Mittaustarkkuuden vertailu etäisyyksillä 2 - 8 m kanavilla 4 ja 7

