

## Inomhuspositionering i 2D

En studie av tillgängliga tekniker

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Dataingenjör

ANTON EKBERG  
DANIEL SVENSSON



EXAMENSARBETE

# Inomhuspositionering i 2D

En studie av tillgängliga tekniker

ANTON EKBERG  
DANIEL SVENSSON

Institutionen för Signaler och System  
Avdelningen för reglerteknik, automation och mekatronik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2015

## **Inomhuspositionering i 2D**

En studie av tillgängliga tekniker

ANTON EKBERG

DANIEL SVENSSON

© ANTON EKBERG, DANIEL SVENSSON, 2015

ISSN 1652-8557

Institutionen för Signaler och System

Avdelningen för reglerteknik, automation och mekatronik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: +46 (0)31-772 1000

# Inomhuspositionering i 2D

En studie av tillgängliga tekniker

ANTON EKBERG

DANIEL SVENSSON

*Institutionen för Signaler och System, Chalmers tekniska högskola*

Examensarbete

## ABSTRACT

The goal of this report is to evaluate different techniques for developing an indoor positioning system and to propose a solution which can identify and position a control room operator with sub-meter accuracy for CGM. The report is divided into two parts, first, a literature review of state of the art technology in indoor positioning systems is presented and a technology is chosen based on the needs of CGM. The second part of the report is a proof of concept with the chosen technology ultra-wide band. The proof of concept investigates how the DW1000-module from Decawave can be used with a STM32F4-microcontroller. A device driver for STM32F4 is developed and the details of the driver is presented. This driver is then used in a ranging algorithm using a symmetrical double-sided two-way ranging algorithm. Finally the performance of the system is evaluated in experiments and the discussion includes pointers on how to turn the proof of concept to a complete indoor positioning system.

The following report is written in Swedish.

**Keywords:** Indoor positioning, IPS, RTLS, UWB, DW1000, Decawave, symmetrical double-sided two-way ranging

## SAMMANFATTNING

Målet med rapporten är att underöka olika tekniker för att realisera ett inomhuspositionerings-system och föreslå en lösning som kan indentifiera positionen på en operatör i ett kontrollrum med under meterprecision för företaget CGM. Rapporten är uppdelad i två delar, första delen är en litteraturstudie över tillgängliga tekniker utifrån vilken en teknik väljs ut för CGMs behov. Den andra delen består av ett konceptbevis med den valda tekniken ultra-wide band. Konceptbeviset utforskar hur uwb-modulen DW1000 kan användas tillsammans med en STM32F4-mikrokontroller. En drivrutin för denna enhet utvecklas och redovisas i detalj. Drivrutinen används sedan för att utföra avståndsbedömningar med en föreslagen algoritm och dess prestanda utforskas med hjälp av experiment. Slutligen presenteras vägledning för hur konceptbeviset kan användas för att utveckla ett fullskaligt inomhuspositioneringssystem.

## FÖRORD

Denna rapport är en del av ett examensarbete för högskoleingenjörsprogrammet Datateknik på Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Arbetet omfattar 15 högskolepoäng av programmets 180 högskolepoäng. Universitetslektor Manne Stenberg har agerat handledare och docent Bertil Thomas har varit examinator.

Examensarbetet är utfört åt företaget CGM som en initial vägvisare för utveckling av en ny produkt till deras kontrollrum. På företaget har Pierre Skönnegård varit handledare samt uppdragsgivare.

Författarna skulle vilja tacka handledare och examinator samt forskningsingenjör Sakib Sistik för sin hjälp och vägledning genom projektet samt under hela utbildningen.

Anton Ekberg och Daniel Svensson  
Göteborg, 2015





# INNEHÅLL

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>ii</b>
<b>Förord</b>	<b>iii</b>
<b>Innehåll</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduktion</b>	<b>3</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	3
1.2 Syfte . . . . .	3
1.3 Avgränsningar . . . . .	4
<b>2 Metod</b>	<b>5</b>
<b>3 Teknisk bakgrund</b>	<b>6</b>
3.1 Avståndsbedömning . . . . .	6
3.1.1 Time of Arrival . . . . .	6
3.1.2 Time difference of arrival . . . . .	7
3.1.3 Received signal strength . . . . .	8
3.1.4 Angle of Arrival . . . . .	8
3.2 Positionering . . . . .	9
3.2.1 Trilateration . . . . .	9
3.2.2 Multilateration . . . . .	10
3.2.3 Triangulering . . . . .	10
3.3 Positioneringssystem . . . . .	10
3.3.1 Globala positioneringssystem . . . . .	10
3.3.2 Inomhus positioneringssystem . . . . .	10
3.4 Störningar . . . . .	11
3.5 Ultra wide-Band . . . . .	12
3.6 WIFI . . . . .	12
3.7 Bluetooth . . . . .	13
3.8 Ultraljud . . . . .	13
<b>4 Litteraturstudie av tillgängliga tekniker</b>	<b>14</b>
4.1 Supportiva tekniker med aktiva taggar . . . . .	15
4.1.1 WIFI . . . . .	15
4.1.2 ZigBee . . . . .	16
4.1.3 Infraröd . . . . .	17
4.1.4 RFID . . . . .	18
4.1.5 UWB . . . . .	18
4.1.6 Bluetooth . . . . .	20
4.1.7 Ultraljud . . . . .	21

4.2	Supportiva tekniker med passiva taggar . . . . .	22
4.2.1	RFID . . . . .	22
4.2.2	Infraröd . . . . .	23
4.3	Icke-supportiva tekniker . . . . .	24
4.3.1	Kamera . . . . .	24
4.4	Sammanfattning . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Konceptbevis med UWB</b>	<b>28</b>
5.1	Drivrutin till DW1000 för STM32F4 . . . . .	29
5.1.1	Grundläggande kommunikation . . . . .	29
5.1.2	Tillståndsmaskinen . . . . .	31
5.1.3	Sändning och mottagning av UWB-signaler . . . . .	33
5.1.4	Konfigurering samt kalibrering . . . . .	36
5.2	Symmetrisk dubbelsidig tvåvägspositionering . . . . .	37
5.2.1	Implementation med DWM1000 . . . . .	39
5.3	Experiment . . . . .	40
5.3.1	Experiment 1: Linjär anpassning och gruppering av avståndsresultat . . . . .	41
5.3.2	Experiment 2: Jämförelse mellan tvåvägspositioneringsalgoritmer . . . . .	43
5.3.3	Experiment 3: Inverkan av siktlinjen för noggrannheten . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>48</b>
6.1	Fortsatt utveckling . . . . .	49
	<b>Referenser</b>	<b>49</b>

# Beteckningar

<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>UWB</b>	Ultra-wide band
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>TDOA</b>	Time Difference of Arrival
<b>TOA</b>	Time of Arrival
<b>TOF</b>	Time of Flight
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>RSS</b>	Received Signal Strength
<b>AOA</b>	Angle of Arrival
<b>PTS</b>	Post- och telestyrelsen
<b>EIRP</b>	Equivalent Isotropically Radiated Power
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IPS</b>	Inomhuspositioneringssystem
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ETH</b>	Eidgenössische Technische Hochschule
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>MISO</b>	Master In Slave Out
<b>MOSI</b>	Master Out Slave In
<b>CSn</b>	Chip Select
<b>LLC</b>	Logical Link Control
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>LDE</b>	Leading Edge
<b>GPIO</b>	General Purpose Input Output
<b>RSTn</b>	Reset
<b>PLL</b>	Phase Locked Loop

**IRQ**    Interrupt Request  
**OSI**    Open Systems Interconnection  
**EUI**    Embedded User Identifier  
**CRC**    Cyclic Redundancy Check  
**QFN**    Quad Flat No Leads

# 1 Introduktion

## 1.1 Bakgrund

Företaget CGM utvecklar och tillverkar arbetsmiljöer som är i drift dygnet runt, oftast i form av kontrollrum. CGM fokuserar på att producera miljöer som gynnar operatörernas beredskap och effektivitet genom ergonomiska arbetsstationer och en genomtänkt planlösning. För att minimera stress behöver företaget i ett initialt skede utvinna information om hur operatörerna beter sig. Bland annat är det intressant att veta var en operatör befinner sig för att till exempel kunna skicka lokaliserade larm, identifiera sig vid en viss arbetsstation eller i efterhand kunna spåra operatörens agerande vid en eventuell olycka.

För att identifiera samt positionera en operatör kan ett så kallat inomhuspositioneringssystem användas som är ett system med syftet att spåra objekt inomhus. Detta system är skilt ifrån ett *Global Navigation Satellite System*, GNSS, såsom GPS som är satellitbaserat och där signalen försvagas så mycket att den inte är pålitlig inomhus [1]. Ett inomhuspositioneringssystem kan ses som ett GNSS för inomhusbruk och har på samma sätt som GPS ett antal kända punkter (mottagare) som tar emot signaler från sändare och gör om detta till en lokal position.

Till skillnad från just GNSS finns det ingen industristandard [2] kring vilken teknologi som används för att realisera ett inomhuspositioneringssystem utan valet av teknik kan variera beroende på de krav som ställs på systemet. Inomhuspositioneringssystem har på senare år fått stor uppmärksamhet både i forskarvärlden och industrin, vilket har resulterat i många olika tekniska lösningar. Detta är konsekvensen av en ökad efterfrågan från marknaden [3].

Ett inomhuspositioneringssystem har många tillämpningar förutom de som CGM ser i dagsläget. Till exempel inom sjukvården där personliga alarm skulle kunna effektivisera verksamheten genom att inte flera personer svarar på samma alarm. Det finns även fler tillämpningar inom sjukvården där material såsom sängar och rullstolar, rör sig över hela verksamheten men gärna vill hitta tillbaka till den avdelningen där de kom ifrån. Denna spårning av material kan spara in mycket pengar för företaget.

## 1.2 Syfte

Examensarbetet syftar till att hjälpa CGM med att hitta en passande teknik för att realisera ett inomhuspositioneringssystem till deras kontrollrumslösningar genom att ge en uppdaterad överblick i hur de populäraste inomhuspositioneringssystemen ser ut idag.

Därav inleds arbetet med en litteraturstudie i Avsnitt 4 av tillgängliga tekniker vars syfte är att underlätta vid en beställning av ett inomhuspositioneringssystem. Detta genom att belysa för- och nackdelar med respektive teknik, samt att ge en inblick i varför det inte finns någon industristandard kring vilken teknik som används i dessa system. Förutom redan kommersiellt tillgängliga tekniker kommer studien även titta på tekniker som får anses vara under utveckling. Litteraturstudien kommer avslutas med att en teknik väljs ut för CGMs ändamål.

Den valda tekniken kommer studeras närmare i ett konceptbevis som presenteras i Avsnitt 5. Konceptbeviset består av en beskrivning hur tekniken kan användas samt ett antal nycklexperiment som visar att tekniken klarar av de krav som CGM har.

## 1.3 Avgränsningar

Rapporten kan ses som ett underlag för företagets framtida planer att utveckla ett inomhuspositioneringssystem och är uppdelat i två delprojekt. Det första delprojektet är en inledande litteraturstudie om ämnet där en överblick ges och läsaren får en bild över vilken teknik som passar bäst för ett givet ändamål. Därefter följer ett oberoende delprojekt som diskuterar tekniken närmare och presenterar ett konceptbevis för hur ett inomhuspositioneringssystem med vald teknik skulle kunna utvecklas i dagsläget.

Arbetet är avgränsat till att undersöka följande typer av tekniker för att bygga ett inomhuspositioneringssystem,

- Bildigenkänning från övervakningskameror.
- Aktiva/Passiva sensortaggar på operatören med ett rutnät av aktiva sensorer.

Den inledande litteraturstudien kommer väga fördelar och nackdelar för varje teknik samt ge en överblick i hur den bästa möjliga lösningen ser ut för just den tekniken.

Det konceptbevis som tas fram ska anses vara ett underlag till en färdig produkt samt en indikation till teknikens lämplighet. Den teknik som valts kommer avgränsas med avseende på följande punkter,

**Dimension** Endast position i planet kommer beräknas, vi kommer med andra ord inte bestämma positionen i höjddled.

**Noggrannhet** Positionen skall kunna bestämmas med en noggrannhet på  $\pm x$  meter så att tekniken med tillräcklig säkerhet kan bestämma om en operatör sitter framför sin arbetsstation eller ej.

**Räckvidd** Vid tester av räckvidden för vald teknik kommer endast valda avstånd att testas, dvs. att det finns inte minimumkrav som vi har på tekniken, om den klarar detta minimumkrav så testas inte längre avstånd.

**Störningar** från möbler, väggar och andra RF-dämpande material i rummet.

**Användarvänlighet** Arbetet kommer ta hänsyn till eventuell teknik som behöver bäras av operatören, vi kommer dock inte ta större hänsyn komplexiteten på tekniken.

**Tillförlitlighet** Systemets tillförlitlighet kommer testas genom att upprepade mätningar görs från bestämda punkter i rummet, det kommer dock inte kunna göras prestanda tester flertalet parallella operatörer testas samtidigt.

## 2 Metod

Arbetet består av två separata delar, att utföra en litteraturstudie av passande tekniker samt att ta fram ett konceptbevis.

Litteraturstudien består av att undersöka hur olika tekniker kan användas som ett inomhuspositioneringssystem, hitta för- och nackdelar, jämföra tekniker med avseende på olika karakteriserade områden samt att sondera vilka tillgängliga lösningar som finns i dagsläget.

Studien kommer göras genom att läsa rapporter, vetenskapliga sammanställningar av inomhuspositioneringstekniker samt genom att kolla på kommersiella lösningar. Baserat på litteraturstudien görs ett val av teknik som rapporten kommer studera mer ingående.

Med den valda tekniken kommer ett konceptbevis konstrueras, i detta ingår en prototyp där prestandan på tekniken kan testas.

Efter framtagning av en enklare prototyp kommer ett antal nycklexperiment tas fram. Experimenten skall visa på den valda teknikens prestanda inom de områden som utmärker inomhuspositioneringssystem,

- Noggrannhet
- Precision
- Skalbarhet
- Kostnad
- Räckvidd

I vilket avseende som dessa områden diskuteras finns beskrivet i Avsnitt 4.

## 3 Teknisk bakgrund

### 3.1 Avståndsbedömning

Första steget för att bestämma positionen på ett objekt är att ta fram parametrar från signalen. De vanligaste parametrarna för att bestämma avstånd mellan två noder i ett inomhuspositioneringssystem är,

- Time of arrival
- Time difference of arrival
- Received signal strength
- Angle of arrival

#### 3.1.1 Time of Arrival

Den första parametern *time of arrival* betecknas TOA och är en benämning på metoder som använder sig av mottagningstiden för att bedöma avståndet. Detta görs med hjälp av att beräkna flygtiden (TOF - *time of flight*). Avståndet  $d$  utifrån flygtiden  $t$  och ljusets hastighet  $c$  beräknas enligt,

$$d = t \cdot c$$

Den bästa möjliga noggrannheten på systemet är relaterad till den tidbas som används hos sändare och mottagare eftersom detta begränsar upplösningen på mottagartiden och sändningstiden. Ett exempel på detta är en klockfrekvens på 200 MHz som ger en maximal noggrannhet på 1,499 m enligt,

$$\frac{1}{200 \text{ MHz}} \cdot c = 1,499 \text{ m}$$

Noggrannheten på  $t$  kan förbättras genom att öka signal-brusförhållandet eller genom en ökad bandbredd på signalen [4], det sistnämnda är en viktig egenskap för till exempel UWB (Se Avsnitt 3.5).

De vanligaste metoderna för att bestämma flygtiden innefattar *Envägs TOF* och *Tvåvägs TOF*.

#### Envägs TOF

En vanlig metod för att beräkna flygtiden är *Envägs TOF* och går ut på att två synkroniserade noder kommunicerar för att bestämma avståndet. Sändaren skickar ett meddelande som innehåller sändningstiden  $t_1$ , mottagaren noterar mottagartiden  $t_2$  och beräknar flygtiden enligt,

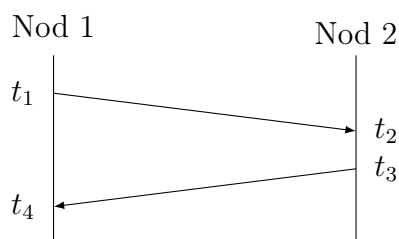


$$t = t_2 - t_1$$

*Envägs TOF* är ett effektivt sätt att bestämma avståndet mellan två noder då kommunikationen endast går åt ett håll. Detta möjliggör även för mycket energisnåla sändare som endast skickar en puls med ett givet intervall och därefter går in i ett sov-läge mellan sina sändningar utan att ta hänsyn till mottagaren. *Envägs TOF* kräver dock att tiderna på sändare och mottagare är synkroniserade och har samma frekvens.

## Tvåvägs TOF

Om synkronisering mellan sändare och mottagare är svår att åstadkomma är *Envägs TOF* ingen lämplig metod för att bestämma flygtid. Vid dessa tillfällen kan man istället använda sig av *tvåvägs TOF* som går ut på att noderna kommunicerar sina inbördes tider enligt Figur 3.1,



Figur 3.1: Tvåvägs TOF kommunikation

Nod 1 sänder ett meddelande på tiden  $t_1$ , Nod 2 noterar mottagartiden  $t_2$  och skickar ett meddelande tillbaka med sin sändningstid  $t_3$  samt mottagartiden  $t_2$  i meddelandet. Nod 1 har nu tillräckligt med information för att beräkna *round trip time* (RTT) på de första två sändningarna  $t_{rtt}$  enligt,

$$t_{rtt} = t_4 - t_1 - (t_3 - t_2)$$

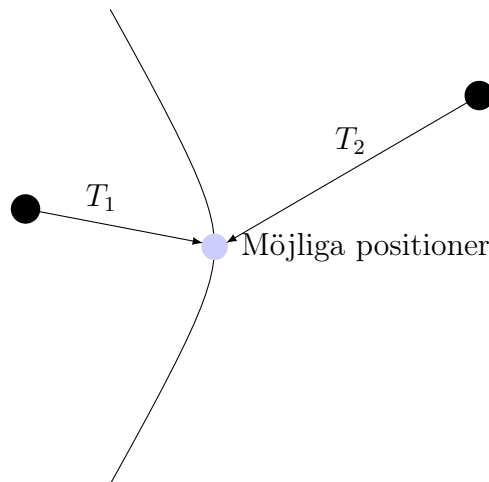
Slutligen beräknas flygtiden  $t$  enligt,

$$t = \frac{t_{rtt}}{2}$$

### 3.1.2 Time difference of arrival

En annan parameter som också baseras på tiden som signalen har färdats är TDOA (*time difference of arrival*) och går ut på att mottagartiden på signalen som skall positioneras noteras vid flertalet stationära referensnoder. Dessa tider jämförs och en skillnad i tid mellan referensnoderna beräknas. Om man vet att det är en viss skillnad i tid mellan referensnoderna och den noden som skall positioneras så har man lokaliserat möjliga positioner på en hyperbel. Detta illustreras

i Figur 3.2 där  $t_1$  är flygtiden hos den första referensnoden,  $t_2$  är flygtiden hos den andra referensnoden och den gråa noden är noden som skall positioneras,



Figur 3.2: Tidsskillnanden från två noder ger möjliga positioner på en hyperbel.

För att bestämma TDOA behöver inte referensnoderna vara synkroniserade med målnoden till skillnad från *envägs* TOA, dock så behöver fortfarande referensnoderna vara synkroniserade med varandra.

Eftersom TDOA likt TOA mäter tiden som en signal har färdats gäller här samma egenskaper som TOA, med andra ord fås bättre noggrannhet på TDOA-mätningar om signal-brusförhållandet förbättras eller bandbredden ökar.

### 3.1.3 Received signal strength

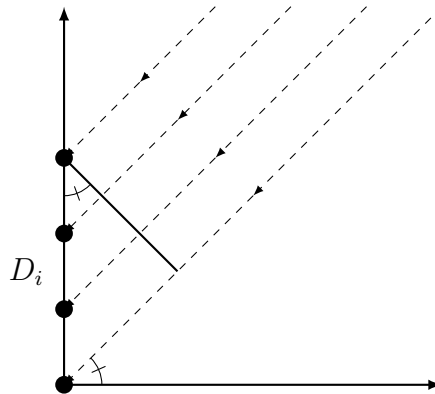
RSS (*received signal strength*) är en parameter som är ett mått på hur mycket energi som finns i signalen, detta bygger på att man vet hur energiförlusten påverkas av avståndet mellan sändare och mottagare samt vilken energi som fanns i signalen vid sändning.

#### RSS Kartläggning

En vanlig metod är att RSS kartläggs i förväg för att skapa en register över positioner och dess RSS-värden, dessa används sedan i realtid för avgöra var signalen mest troligen kommer ifrån.

### 3.1.4 Angle of Arrival

En annan parameter som man kan avläsa från signalen är riktningen, dvs vinkeln från mottagarantennen. Vanligtvis mäts denna vinkel med hjälp av ett fält av antenner där skillnaden i mottagartid mellan antennerna används för att ta reda på vilken riktning signalen kommer från, detta illustreras i Figur 3.3.



Figur 3.3: AOA beräknas med fyra antenner

Varje antenn representeras av en svart nod i Figur 3.3 med avståndet  $D_i$  mellan varje nod. Detta resulterar i att tidsskillnaden mellan antennerna går att uttrycka med den markerade vinkeln,

$$\frac{D_i \cdot \sin \phi}{c}$$

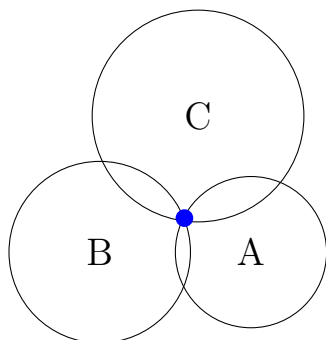
Där  $\phi$  är den markerade vinkeln i Figur 3.3. Detta ger förhållandet mellan signalvinkeln och flygtiden.

## 3.2 Positionering

De vanligaste metoderna för att bestämma positionen på signalen är **trilateration**, **multilateration** och **triangulering**. Samtliga metoder använder sig av parametrar från avståndsbedömningen i Avsnitt 3.1 för att beräkna positionen i rummet.

### 3.2.1 Trilateration

**Trilateration** använder avståndet mellan en sändare och mottagare för att bestämma position. Varje givet avstånd från en mottagare ger möjliga positioner på en cirkel kring mottagaren, detta innebär att tre avstånd behövs för att bestämma en position i två dimensioner enligt Figur 3.4. *Trilateration* är vanligt och används bland annat av **GPS** och **Galileo** [5, s2].



Figur 3.4: Trilateration av avståndsbedömningar från tre ankare ger en punkt i två dimensioner

### 3.2.2 Multilateration

Multilateration använder sig av skillnader i tid (TDOA) från flertalet referensnoder i rummet, precis som med trilateration så behöver man tre mottagare för att få en 2D-position i rummet och fyra mottagare för att få en 3D-position då man enligt Avsnitt 3.1.2 får en hyperbel av möjliga positioner från ett par av referensnoder. Detta innebär att ytterligare ett par av referensnoder behövs för att få en 2D-position.

### 3.2.3 Triangulering

Ett annat sätt att bestämma position går ut på att använda den uppmätta vinkeln för signalen vid flertalet mottagare. En vinkel ger möjliga positioner längs en linje vilket innebär att det krävs vinklar från två mottagare för att bestämma en 2D-position, och tre mottagare för 3D-position. En vanlig metod är att en rad av antenner används för att ta reda på vinkeln [6].

## 3.3 Positioneringssystem

### 3.3.1 Globala positioneringssystem

Global Positioning System (GPS) är ett globalt navigationssystem som med hjälp av 24 satelliter ser till att varje plats på jorden alltid har täckning till 4 satelliter. För att tiden som det tar för mottagaren att ta emot signalen skall kunna bestämmas så exakt som möjligt bör sändare och mottagare vara synkroniserade samt att fördröjningar i hårdvaran tas med i beräkningen [7]. När det gäller GPS så kan en klockfördröjning på 1 ms påverka resultatet med 300 km vilket innebär att klockorna kontinuerligt måste uppdateras [8, s4].

### 3.3.2 Inomhus positioneringssystem

GPS fungerar dåligt inomhus då signalerna inte har kraft nog att penetrera byggnader, det är här inte lämpligt att använda sig av satellitsystem för navigering. Inomhuspositioneringssystem är ett system för navigering inomhus som i många fall påminner om GPS.

Vanliga tekniker som används i inomhuspositioneringssystem innefattar kameror, RFID, ut-  
raljudssensorer, infraröd strålning, WIFI, Bluetooth och Ultra wide-band.

Utöver detta behöver inomhuspositioneringssystemet en server som samlar data från bestämda  
positioner i rummet, beräknar var objektet är i rummet utifrån detta samt omvandlar avstånden  
till ett lokalt koordinatsystem. I jämförelse med ett globalt positioneringssystem behöver oftast  
ett lokalt positioneringssystem bättre noggrannhet och snabbare uppdateringar av position,  
räckvidden är dock mycket lägre.

## 3.4 Störningar

Både globala och lokala positioneringssystem är utsatta för störningar, dessa ter sig dock på  
olika vis och utmaningarna för att motverka störningarna ser annorlunda ut. De viktigaste  
störningar för dessa system sammanfattas nedan,

### Flervägsfel

är ett fenomen som orsakas av till exempel reflektion från byggnader, där radiovågor har  
färdats på olika sätt mellan sändare och mottagare, det kan orsakas av diffraktion från  
små objekt som vägskyltar soptunnor och liknande, i ett GNSS kan flervägsfel i värsta fall  
ge upphov till ett fel på 100 m, men kan i det flesta fall ge ett fel i storleksordningen 1 m–  
3 m[8]. I inomhuspositioneringssystem används flera metoder för att förminska flervägsfel  
som till exempel multipath mitigation [9], i [10] används det faktum att signalvågorna  
som skickas/tas emot från UWB antenner ser olika ut beroende på vilken vinkel den har  
tagits emot, med hjälp av denna information kan dom ta reda på om signalen innehåller  
ett flervägsfel.

### Line of sight (LOS)

är en störning som går ut på att det ej är fri sikt från sändaren till mottagaren, ett  
inomhuspositioneringssystem kan vara olika påverkade av störningen beroende på den  
underliggande tekniken. Till exempel så är ett kamerasystem väldigt känslig för detta  
då den styrs visuellt. Motsatsen är UWB (Se Avsnitt 3.5) som på grund av dess stora  
bandbredd kan ta sig igenom de flesta hinder.

### Interferens

är främst ett problem för UWB som är utspritt över ett stort spektrum, den kan då  
ta emot störningar från andra smalbands tekniker. Dessutom orsakar inte UWB mycket  
interferens på andra smalbandstekniker eftersom dess effektspektrum är på såpass låga  
nivåer att övrig smalbandsteknik uppfattar signalerna som brus.

### Klock drift

Klock drift har stor betydelse för ett positioneringssystem som baseras på tidsmätningar  
då en millisekunds fördröjning kan innebära stor skillnad i position.

## 3.5 Ultra wide-Band

Termen **Ultra Wide-band** eller **UWB** myntades först 1989 i en rapport från amerikanska försvarsministeriet men tekniken har funnits sedan slutet av 60-talet [11, ss.2-3]. **UWB** är ett samlingsnamn på teknologier som skickar korta pulser ( $< 1$  ns) vilket resulterar i stort bandbreddspektrum.

### Definition

The Federal Communication Commission (**FCC**) definierar **UWB** som ett system där bandbredden är större än 1,5 GHz eller  $B_f$  (The fractional bandwidth) är större än 0.25 där  $F_h$  och  $F_l$  är övre och nedre frekvensen 10 dB från frekvensen med högst effekt [12, s12].

$$B_f = \frac{2 \cdot (F_h - F_l)}{(F_h + F_l)}$$

Post- och telestyrelsens (**PTS**) definition av **UWB** är kortdistansradiosändning som utnyttjar radiofrekvent energi spridd över ett spektrum bredare än 50 MHz [13, s3]. **PTS** har även maxvärden på **eirp** (ekvivalent isotropisk utstrålad effekt) som är ett mått på hur mycket elektromagnetisk energi som skickas ut på ett givet spektrum enligt Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Maxvärden på **EIRP** för **UWB** från [13, s5].

Frekvensband (MHz)	EIRP PTS (dB)
0–1600	-90
1600–2700	-85
2700–3400	-70
3400–3800	-80
3800–4200	-70
4200–4800	-70
4800–6000	-70
6000–8500	-41,3
8500–10600	-65
>10600	-85

Utöver detta så är **UWB** fritt att använda utan krav på licens från **PTS** detsamma gäller för **FCC** i USA.

## 3.6 WIFI

**WIFI** är ett datorkommunikationsprotokoll för att bilda nätverk mellan enheter, detta genom en radiofrekvens-teknik som använder sig av de licensfria frekvensbanden 2,4 GHz samt

5 GHz. Eftersom dessa frekvensband är fria är de utsatta för störningar från flertalet andra elektronikheter t.ex mikrovågsugnar och trådlösa telefoner [14, s7].

Då WIFI tekniken utvecklades och fler produkter tog sig in på marknaden växte behovet för en standard och 1997 tog IEEE fram en standard för denna teknik som heter 802.11. Den första versionen av standarden 802.11b opererar på 2,4 GHz-bandet med en bandbredd på 22 MHz, på senare tid standarden utökats till 3,7 GHz, 5 GHz och 60 GHz bandet. I 2,4 GHz WIFI-bandet har 802.11n upp till 40 MHz bandbredd.

## 3.7 Bluetooth

Bluetooth är ett kommunikationsprotokoll som opererar i det licensfria frekvensbandet 2,4 GHz och blev standardiserat av IEEE 2002 med namnet 802.11.1. Bluetooth togs fram dataöverföringar på korta avstånd, i dagsläget finns Bluetooth i det flesta telefoner, kameror och bärbara datorer vilket kombinerat med dess låga pris gör det till en bra kandidat för inomhuspositioneringssystem.

## 3.8 Ultraljud

Ultraljud är ljud med en frekvens som är högre än 20 kHz och är därav inte hörbart för människor. Ultraljud förknippas ofta med sonar som är en teknik som använder sig av ljudets utbredning för att ta reda på avståndet till objekt i närheten genom att lyssna på gensvar från ljudvågor, vanligtvis under vatten.

Ultraljudets hastighet påverkas av temperatur vilket kan vara ett problem i ett positioneringssystem, sambandet mellan hastighet och temperatur ges nedan, där  $v$  är hastigheten i m/s och  $T$  är temperatur i °C.

$$v = 331.3 \left( 1 + \frac{T}{273} \right)^{0.5}$$

Vilket ger en ändring på 2 mm om temperaturen ändras med en grad [15].

## 4 Litteraturstudie av tillgängliga tekniker

Ett inomhuspositioneringssystem består av ett antal sensorer vid kända punkter i rummet, så kallade *ankare*. Det finns flera metoder för att bestämma positionen på ett föremål, dessa brukar delas upp i två olika kategorier,

**Supportiva** system som kräver ytterligare teknik utöver ankare.

**Icke-supportiva** system som med endast ett nätverk av ankare kan positionera föremål.

Den teknik som kan behövas för att realisera ett supportivt system är till exempel en sändare som är fäst på föremålet som man vill positionera. Sändaren som kommunicerar med ankaret kallas för *tagg*. I denna litteraturstudie kommer tekniker med två olika typer av taggar behandlas. Dels taggar som kräver en integrerad strömkälla kallade *aktiva taggar* och taggar som inte behöver någon strömkälla kallade *passiva taggar*. Utöver ankare och eventuella taggar behövs annan stödjande elektronik för att få ett fullständigt inomhuspositioneringssystem, till exempel en uppsamlingsserver och underliggande infrastruktur för att få informationen ifrån nätverket av ankare till uppsamlingsservern. Denna studie kommer dock endast diskutera för- och nackdelar mellan tekniker på en ankare/tagg nivå.

Vanliga egenskaper att jämföra för inomhuspositioneringssystem är,

### Noggrannhet

En av de mest avgörande faktorerna är noggrannhet, ett mått på hur nära ett mätvärde är ifrån det sanna värdet. Noggrannheten beskrivs oftast som ett medelvärde av ett antal positionsmätningar. För att kunna avgöra om en teknik passar en viss tillämpning används frasen *rumsnivå*, som syftar till att positionen såpass noggrant att man vet vilket rum som mätobjektet befinner sig i. Detta brukar innebära en noggrannhet på  $\sim 1$  m.

Även om noggrannhet är en viktig faktor så är det vanligt att en hög noggrannhet medför försämringar av andra viktiga faktorer. Till exempel så minskar räckvidden och skalbarheten när man optimerar för hög noggrannhet. Exempel på detta beskrivs i Avsnitt 4.3.1.

### Precision

Likt noggrannhet är precisionen på positionsbestämningen viktig. Precision är ett mått på hur bra sekventiella mätningar överensstämmer med varandra. Det gäller även icke-sekventiella mätningar av samma objekt på samma position vid olika tillfällen/tidpunkter.

Precision inom inomhuspositionering beskrivs som en räckvidd där objektet kan finnas inom. Vanligtvis brukar denna räckvidd vara förknippad med en sannolikhet, annars kallat konfidensintervall. Till exempel kan en teknik ha en precision på 5 m med en osäkerhet på 95 %.

### Skalbarhet

Ett inomhuspositioneringssystem behöver vara skalbart på främst två sätt, täckningsyta och antal föremål som kan spåras samtidigt. Ett vanligt fenomen bland flera tekniker är att prestandan minskar när avståndet ökar mellan sändare och mottagare. Det är även vanligt att prestandan försämras när antalet föremål ökar eftersom det krävs större beräkningskraft då föremålets eventuella sändare kan störa varandra.



## Kostnad

Kostnaden för ett inomhuspositioneringssystem består av två större poster, installationskostnad och driftskostnad. Installationskostnaden beror av täckningsyta, val av hårdvara, planlösning och teknikens tillgänglighet. Driftkostnaden är mer beroende av energiåtgången samt teknikens hållbarhet.

## Räckvidd

Räckvidd avser avståndet där tekniken lyckas upprätthålla en viss noggrannhet och precision. Avståndet är baserat på hur långt bort ett föremål kan positioneras samt identifieras med tillräckligt hög tillförlitlighet. Räckvidden beskrivs därför som avståndet från en sändare till en mottagare, dock måste man ta hänsyn till att vissa tekniker kräver att ett flertal mottagare måste finnas tillgängliga för att tekniken skall fungera.

Inom litteraturen och industrin finns det dessutom flera exempel på hur dessa tekniker har prövats i inomhuspositioneringssystem, dessa försök finns redovisade för varje teknik och är underlaget till den jämförelse som redovisas i slutet av detta kapitlet.

## 4.1 Supportiva tekniker med aktiva taggar

Tekniker med aktiva sändare innefattar lösningar som kräver att föremålet som ska spåras har en sändare(tagg) som aktivt sänder ut en signal till en eller flera mottagare(ankare).

### 4.1.1 WIFI

WIFI är en populär teknik att använda inom inomhuspositioneringssystem då dess räckvidd är stor (upp till 50 m–100 m) vid fri sikt [16]. Dessutom så gör dess popularitet och tillgänglighet att man i många fall kan använda sig av befintlig infrastruktur vilket leder till att hårdvarukostnaderna går ner. Många inomhuspositioneringssystem som använder sig av *WIFI* gör detta för att det är personer som skall positioneras, och de flesta har i dagsläget mobiltelefoner som stödjer tekniken. Detta gör att installationskostnaden minskar avsevärt då *taggar* inte behöver införskaffas, utan kostnaden för taggarna blir endast den mjukvara som behöver utvecklas för telefonen. Det krävs dock att man tar hänsyn till energiåtgången i dessa tillämpningar då mobiltelefoner oftast har ett begränsat batteri som påverkas av ifall mobilen är delaktig i ett positioneringssystem eller ej.

### Tillgänglig teknik

För avståndsbedömning i WIFI används oftast signalstyrkan *RSS* som parameter [17][18]. I [17] presenteras ett inomhuspositioneringssystem som senare utvecklas till ett kommersiellt system vid namn *EkaHau*. *EkaHau* använder sig av *RSS* för att beräkna position med hjälp av trilateration och uppnår en noggrannhet på 1 m och en precision på 2 m med 50 % sannolikhet. Ett annat exempel på en kommersiell produkt som använder sig av

WIFI för ett inomhuspositioneringssystem är *AeroScout*, där en *RSS*-kartläggning görs innan användning [19].

Det finns även ett par exempel på projekt som använder sig av *TOA* [3][20]. Detta trots att *WIFI* har en liten bandbredd (upp till 40 MHz) och samplingsfrekvens vilket innebär en tidsupplösning på  $4 \cdot 10^{-7} s$  vilket ger ett maximalt fel på  $3 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^{-8} = 11.99m$ .

De senaste teknikerna inom området använder sig av **Super-resolution TOA**, som med hjälp av ett antal matrisberäkningar estimerar flygtiden, dessa beräkningar är dock väldigt resurskrävande. Ett sätt att undvika de resurskrävande beräkningarna går ut på att använda sig av ett antal förutbestämda meddelanden som kan användas för att estimeras hur den ursprungliga signalen ser ut, detta tillämpas av Chouchang Yang och Huai-rong Shao [3] och resulterar i en noggrannhet på 0,5 m med en bandbredd på 40 MHz.

## Fördelar

- Utnyttjandet av befintlig infrastruktur både till ankare och taggar. Detta tillsammans med priset och tillgänglighet gör tekniken till ett av de billigare alternativen, speciellt i de tillämpningar där telefoner kan användas som taggar.
- Räckvidden är stor vilket innebär färre ankare, ungefär 50 m mellan en tagg och ett ankare.

## Nackdelar

- Osäkerheten på position gör *WIFI* olämplig om en noggrannhet under en halvmeter är ett krav.
- Osäkerhet kring *RSS* och det faktum att det är svårt att bestämma flygtiden gör att det krävs mer avancerade algoritmer för att bedöma avstånd. Detta leder till ökade installationskostnader, i form av ökad beräkningskraft och behovet av smartare taggar.
- Inte lika energieffektivt som t.ex *Bluetooth*.

### 4.1.2 ZigBee

*ZigBee* är en standard som bygger vidare på *IEEE 802.15.4* genom att implementera nätverk- och applikationslager. *ZigBee* har bland annat stöd för mesh-nätverk, vilket innebär att en enhet inte behöver ha direktkontakt med en accesspunkt. För att vara delaktig i nätverket behöver enheten endast kunna kommunicera med en annan nod i nätverket som i sin tur kan kommunicera med accesspunkten. Detta innebär att ett *ZigBee*-nätverk har potentiellt stor yta för mindre använd infrastruktur.

## Tillgänglig teknik

Inom inomhuspositioneringssystem används inte *ZigBee* i särskilt stor utsträckning då noggrannheten är ganska låg, men tekniken har fortfarande sina tillämpningar. *ZigBee* är väldigt energieffektivt för den räckvidd som erbjuds. *Texas instruments* har lanserat ett evalueringskit för *ZigBee*-utveckling vilket kan användas för att implementera ett inomhuspositioneringssystem i ett *mesh*-nätverk [21]. Detta ger en noggrannhet på 3 m, dessutom används grannoder för att kommunicera med ankare på längre avstånd vilket resulterar i ett positioneringssystem med ungefär 50 m–75 m räckvidd. Leh Luoh visar hur *ZigBee* och ett artificiellt neuralt nätverk används för att beräkna positionen med en noggrannhet på 2,8 m [22] .

## Fördelar

- Låg energiförbrukning, vilket gör att batteritiden kan räcka i flera år.
- En mycket kostnadseffektiv lösning där det finns flertalet tillverkare av transceivers att välja bland.
- Stor räckvidd då *mesh*-nätverket hjälper till om en nod skulle hamna utanför räckvidden till tre stationära mottagare.

## Nackdelar

- En låg noggrannhet gör tekniken olämplig i många tillämpningar.
- Stödet för *ZigBee* saknas i telefoner, bärbara datorer och liknande apparater vilket innebär att den är olämplig i tillämpningar där man vill slippa extra hårdvara för t.ex. taggar.

### 4.1.3 Infraröd

Infraröd strålning (*IR*) är en elektromagnetisk strålning som är populär som inomhuspositioneringssystem i vissa tillämpningar på grund av dess speciella egenskaper. *IR* tar sig inte genom väggar, det är dessutom möjligt att variera energin som avges från strålningen på ett sådant sätt att endast området av intresse täcks, den kräver dock att fri sikt mellan sändare och mottagare finns.

## Tillgänglig teknik

Ett exempel på ett inomhuspositioneringssystem med aktiva sändare och *IR* som har en noggrannhet på 7 cm–12 cm som dessutom används i en kommersiell produkt är Mint cleaner model 4200. Det är en golvdammsugare som med hjälp av aktiva *IR*-sensorer i taket navigerar i rummet [23].

## Fördelar

- Då signalen inte färdas genom väggar kan man med hundra procents säkerhet fastställa positionen på rumsnivå.
- En mycket bra noggrannhet, 7 cm–12 cm
- IR-teknologi lider inte av elektromagnetisk interferens som många andra positioneringstekniker.

## Nackdelar

- Dyr hårdvara som dessutom behöver bytas ut.
- Kräver fri sikt mellan objektet som positioneras och mottagare.

### 4.1.4 RFID

Aktiva *RFID*-lösningar går ut på att en *RFID*-tag med ett unikt id kan skicka upprepade signaler till mottagare som med hjälp av trilateration beräknar positionen på taggen. De frekvenser som används för *RFID* är 125 kHz–134 kHz, 13,56 MHz och 860 MHz–960 MHz, *RFID*-taggar säljs vanligtvis väldigt kompakta och den stora tillgängligheten på tekniken gör att den är relativt kostnadseffektiv.

#### Tillgänglig teknik

*RFID* med aktiva taggar används av [24] för att utveckla ett inomhuspositioneringssystem i 3D. De uppnår en noggrannhet på 0,35 m med hjälp av trilateration av *RSS* vid fyra ankare.

## Fördelar

- Billig och lättillgänglig hårdvara med olika frekvensområden.
- Låg komplexitet på hårdvaran medför en minskad energiförbrukning.

## Nackdelar

- Kort räckvidd, ungefär 10 m.

### 4.1.5 UWB

UWB används i inomhuspositioneringssystem där det vanligaste är att ett ankare i rummet bedömer avståndet till en tagg med hjälp av TOA.

## Tillgänglig teknik

Det finns ett antal kommersiella inomhuspositioneringssystem på marknaden som använder sig av UWB-teknik, vi kommer här ta upp ett antal av dem.

### Decawave

Decawave säljer inomhuspositioneringssystem som lämpar sig bra för utveckling och forskning, detta då deras produkter säljs som integrerade kretsar och inte färdiga system. Företaget utlovar en precision 10 cm inomhus och en räckvidd på upp till 300 m. Deras grundprodukt är en integrerad krets vid namn DW1000 som består av UWB-transciever och kostar 12 \$. DWM1000 är en påbyggnadsmodul för att underlätta utvecklingen av nya produkter med DW1000. Den innehåller en UWB-transciever, en klockmodul och en antenn och kostar 30 \$. Ett evalueringskit bestående av tre ankare och en tagg kostar 600 \$.

### Ubisense

Ubisense utlovar en precision på 15 cm med 95 % säkerhet. Deras produkter riktar sig mer till företag som söker helhetslösningar. Taggar finns med olika formfaktorer för att variera användningsområdena, dessutom använder sig Ubisense av AOA för att beräkna distans vilket innebär mindre antal sensorer för att bestämma position vilket i sin tur innebär en mindre total kostnad för hela systemet. Priset för ett utvecklingspaket på 4 ankare och 10 taggar kostar 12 500 \$.

### Zebra

*Zebra* har lanserat en serie UWB-produkter som heter *Dart* där de utlovar en noggrannhet bättre än 30 cm med en räckvidd på 200 m vid fri sikt, systemet klarar upp till 3500 taggar med en uppdateringsfrekvens på 1 Hz. Priset för ett evalueringskit är 12 500 \$.

### Time domain

Time domain är ett annat företag som utvecklar UWB-produkter för inomhuspositionering, deras produkt P410 har en upplösning på 2 cm vid fri sikt, och är således den kommersiella produkten med bäst upplösning. Företaget har ett evalueringskit som är riktat till akademiska ändamål och kostar 9995 \$.

Ett exempel på ett färdigutvecklat inomhuspositioneringssystem som använder UWB är *OpenRT-LS* [25] som utlovar en noggrannhet på 10 cm och en räckvidd på 30 m.

### Fördelar

- Den stora bandbredden hos UWB-tekniken möjliggör en hög dataöverföringshastighet, vilket bland annat utnyttjas i videoöverföring i Gigabit-hastighet [26].

- Då relativt lite energi skickas per spektrum stör inte UWB andra radiofrekvenstekniker och är därför en bra lösning om det finns höga krav störningar. Till exempel så används UWB som bildöverföringsteknik i operationsrum då ett spektrum som inte stör annan teknik kan användas [27].
- Eftersom pulserna är såpass korta stör dessa ej andra signaler i spektrumet och undviker överlappningar i sändning mellan närliggande sändare.
- Det krävs mindre energi hos sändaren för att sända en signal jämfört med andra radiofrekvenstekniker vilket underlättar i tillämpningar där ett batteri måste användas [8, s12], detta minskar även driftkostnaden på systemet då batterier sällan behöver bytas (+10 år).
- De korta pulserna minskar också risken för flervägsfel i jämförelse med andra radiofrekvenstekniker, och då mycket låga frekvenser kan användas underlättas signaler genom hinder [28, s4]. En bandbredd på upp till 4 GHz ger en betydligt noggrannare position, ytterligare ökning ger dock ingen märkbar förbättring [29, s9].
- Tidsupplösningen är stor vilket gör att man med större upplösning kan bedöma avstånd.

## Nackdelar

- Tillgängligheten på hårdvara är dålig vilket gör att hårdvarukostnaden blir stor, en UWB-lösning har således inte den billigaste installationskostnaden.
- Metall och vätskor orsakar inferensstörningar vilket kan motverkas genom strategisk utplacering av flertalet ankare vilket dock gör lösningen dyrare.

### 4.1.6 Bluetooth

Bluetooth är ett simpelt och väletablerat kommunikationsprotokoll bland trådlösa enheter med en räckvidd på ungefär 5 m–10 m [30]. Dess relativt låga räckvidd gör att man behöver placera ankare med en högre täthet än andra tekniker. Likt WIFI är tekniken såpass väletablerad att det finns en god tillgång på färdiga taggar. Dessutom så har varje Bluetooth-enhet en unikt ID vilket kan underlätta vid utveckling av ett RFID-system.

#### Tillgänglig teknik

Ett kommersiellt inomhuspositioneringssystem baserat på Bluetooth är *Topaz positioning system*, som har en noggrannhet på 2 m–3 m, den klarar dock bara att spåra 10 enheter samtidigt [31].

#### Fördelar

- En mer lättviktig teknik som finns i det flesta trådlösa apparater vilket ger en lägre installationskostnad.

- Stödjer andra nätverksprotokoll än IP.
- Har ett inbyggt unikt ID som underlättar vid identifikation.

## Nackdelar

- Räckvidden är låg, ungefär 10 m och det behövs därför fler ankare i rummet vilket ökar priset.

### 4.1.7 Ultraljud

Ultraljud erbjuder ett antal fördelar för inomhuspositionering. Dess låga kostnad, och förmåga att undvika flervägsfel är två viktiga fördelar i inomhuspositionering. Eftersom ultraljudsvågor har kort räckvidd krävs det många ankare i rummet för att täcka en större yta (En sensor per 2 m–4 m). Dessutom är ultraljudet känsligt för temperaturförändringar något som kan motverkas med hjälp av mer avancerade sändare som kompenserar för temperaturändringen. Trots detta kan det fortfarande förekomma temperaturförändringar i luften mellan tagg och ankare vilket leder till att noggrannheten försämras. Ultraljudets korta räckvidd tillsammans med känsligheten för temperatur gör sammantaget att det är ett dåligt val om positioneringssystemet skall fungera både inomhus och utomhus, det är dessutom olämpligt i lokaler som kyllager eller lokaler där temperaturen skiftar stort.

## Tillgänglig teknik

Inomhuspositioneringssystem med ultraljud har utvecklats med både stor och liten bandbredd. Lösningen med smalare band har bättre räckvidd och lägre energiförbrukning men har problem att skilja på flertalet signaler som skickas samtidigt [32].

Ett exempel på ett inomhuspositioneringssystem med ultraljud är *sentient computing system* [33]. Där varje anställd bär en enhet som kallas för *Bat*, denna *Bat* administreras och aktiveras med en WIFI-signal, den skickar då ut en ultraljudspuls som tas emot av sändare i taket som använder sig av TDOA för att avgöra positionen. Den trådlösa signalen används också för att synkronisera sändaren med mottagaren för att få ett bättre värde på TDOA. Systemet är installerat på ett 10 000 m<sup>2</sup> stort kontor där 50 anställda har testat systemet. På denna yta finns 750 ankare i taket och dessa levererar en noggrannhet på 3 cm och en precision på 95 % och varje mottagare kan prata med upp till 3 *bats* samtidigt.

Hazaz & Hopper [34] visar en ny metod för att använda ultraljud med bredare bandbredd, systemet heter *Dolphin* och utmanar en del av de problem som finns i att använda ultraljud i inomhuspositioneringssystem som t.ex. möjligheten att kommunicera med flera enheter samtidigt. *Dolphin* klarar teoretiskt av att kommunicera med 513 enheter samtidigt, och har en noggrannhet på 5 cm.

## Fördelar

- En hög precision och en energisnål teknik medför lägre driftkostnad.
- Ultraljud påverkar inte andra radiofrekvenstekniker och kan således användas i ett stort antal tillämpningar, t.ex. sjukhus, kontrollrum och andra hårt kontrollerade miljöer.

## Nackdelar

- En kort räckvidd medför en hög installationskostnad på grund av ett högre antal sensorer.
- Specialtillverkad hårdvara medför en kostsammare lösning och högre krav på specialkunskap.
- Känslighet för temperaturändringar gör att avancerad hårdvara används vilket resulterar i en högre kostnad.

## 4.2 Supportiva tekniker med passiva taggar

Passiva tekniker för inomhuspositioneringssystem är ovanliga, främst för att dessa tekniker har en väldigt låg räckvidd vilket gör den mindre lämplig för inomhuspositioneringssystem. Dessa tekniker fungerar dock utmärkt för andra tillämpningar som att läsa av en tagg vid fixa punkter i rummet, t.ex. ett varuhuslager som scannar av varor på ett band, eller scanning av låneböcker på ett bibliotek där det sitter en tagg i bokryggen.

### 4.2.1 RFID

Passiv RFID är en benämning på system där en enhet använder sig av energin i elektromagnetiska vågor för att operera, och svarar med en radiopuls tillbaka till sändaren.

Tekniker som är baserade kring passiva sändare är snarlika de aktiva teknikerna. Skillnaden ligger i att de passiva sändarna inte har en egen strömförsörjning. För att kunna använda tekniken som ett inomhuspositioneringssystem krävs att den klarar av att leverera tillräckligt med energi för att få en någorlunda räckvidd samtidigt som de passiva sändarna får tillräckligt med energi för att svara på den elektromagnetiska vågen.

Passiva sändare har en stor fördel i att de endast har en installationskostnad och ytterst minimal kostnad för underhåll. En sändare kan placeras på det föremål man vill kunna följa utan att behöva tänka på att någonsin byta batterier. Dock har tekniken en nackdel, då strömöverföringen sker via positioneringssignalen måste signalen skickas med högre energi än om signalen endast bar information. Sändare och mottagare måste därav vara närmare varandra för att signalen inte ska allt för hög effekt.



## Tillgänglig teknik

I [35] har en passiv RFID lösning på högfrekvensbandet (902 MHz–928 MHz) utformats med hjälp av två sensorer som mäter av vinkeln på den passiva signalen. Systemet klarar av att läsa en position med 22 cm noggrannhet på en räckvidd av 180 cm.

## Fördelar

- Lägre hårdvarukostnad då de passiva taggarna har mycket enkel design.
- Låg driftkostnad då de passiva taggarna aldrig behöver bytas ut.

## Nackdelar

- Kort räckvidd, fungerar bäst i tillämpningar där endast positionen runt statiska punkter i rummet är av intresse.

## 4.2.2 Infraröd

Infraröd strålning kan även användas i ett passivt positioneringssystem där personer skall positioneras. Mottagarna i rummet mäter då den naturliga infraröda strålning som avges av människor. Detta löser dock bara första delen av ett inomhuspositioneringssystem nämligen positioneringen av ett objekt, men det finns inget sätt att unikt identifiera ett objekt och därav är det inget fullständigt inomhuspositioneringssystem.

## Tillgänglig teknik

Passiv infraröd strålning kan användas för att ta reda på om ett rum är upptaget eller ej, här utnyttjas det faktum att infraröd strålning kräver fri sikt och ej tar sig genom väggar [36].

## Fördelar

- Den stora nackdelen med aktiv infraröd strålning som positioneringsteknik är att hårdvaran är dyr, en passiv lösning minskar denna kostnad avsevärt då det endast krävs ett ankare per rum.

## Nackdelar

- Det finns inget sätt att identifiera objektet med denna metod, det är därav inte en lämplig lösning om identifikation är ett krav.
- Noggrannheten i passiv infraröd strålning påverkas mycket av solstrålning.
- Den dåliga noggrannheten gör att det endast går att bestämma position på en rumsnivå.

## 4.3 Icke-supportiva tekniker

### 4.3.1 Kamera

Övervakningskameror kan användas som ett inomhuspositioneringssystem med hjälp av moderna beräkningskrävande algoritmer. För att kunna använda tekniken behöver algoritmer tas fram för att lösa två separata problem. Dels att kunna unikt kunna identifiera det objekt som man vill spåra samt utifrån en given position i bilden kunna ange avstånd från kameran. För att identifiera personer används i regel ansiktsigenkänning. För att kunna bedöma avstånd krävs stereoskopiskt seende vilket uppnås med två eller fler identiska kameror som är separerade så att de båda synfälten överlappar varandra. På grund av kamerornas utformning är därav täckningsytan av en enskild sändare inte en cirkel som med många andra tekniker utan en cirkelsektor där medelpunkten är kameran eller kameraparet. Därav krävs det ett större antal sensorer med kameror jämfört med andra tekniker med en cirkulär täckningsyta och samma räckvidd.

### Praktiska tillämpningar

De flesta tillämpningar av positioneringssystem med kameror används inte för att positionera rörliga föremål i en bild utan att positionera ett rörligt objekt där kameran ingår. Alltså att med hjälp av en eller flera kameror positionera till exempel en robot i rörelse. Det finns flertalet forskningsprojekt som undersöker möjligheten att skapa ett större positioneringssystem med fasta kameror, dock så använder sig de flesta av kameran tillsammans med en annan positioneringsteknik för att minimera felkällor.

*CLIPS* är ett positioneringssystem som är framtaget av Sebastian Tilch och Rainer Mautz på ETH. Systemet använder sig av en kamera tillsammans med en projektor som projicerar laserpunkter av olika färger som hjälper algoritmen att identifiera kamerans position i rummet och därmed kunna hitta positionen på andra föremål i bilden. *CLIPS* kan endast hitta positionen på diverse föremål i bilden, att särskilja föremålen åt eller identifiera en person undersöks ej. Noggrannheten är mycket bra jämfört med andra tekniker, uppemot 1 cm. Dock är räckvidden mycket begränsad, endast ett fåtal meter ifrån kameran/projektorn. Detta vägs upp av dess låga kostnad samt skalbarhet i täckningsyta. Skalbarheten i antal föremål är dock inte testad eftersom systemet inte tar hänsyn till identifieringen av föremål.

För att lösa avståndsbedömningen med hjälp av kameror krävs stereoskopiskt seende vilket uppnås med två eller fler identiska kameror som är separerade så att de båda synfälten överlappar varandra. Avsaknaden av färdiga stereokameralösningar med rimligt pris gör att dessa projekt är desto kostsammare, ett alternativ är att använda två billigare kameror och själv kalibrera dessa för stereoskopiskt seende.

Playstation Eye är ett intressant val på grund av dess pris, tillgänglighet och gensvar i liknande projekt.



Figur 4.1: Bild på Playstation Eye. Från [37], CC BY-SA 3.0.

Playstation Eye klarar att leverera video med en upplösning på  $320 \times 240$  pixlar alternativt  $640 \times 480$  med en uppdateringsfrekvens på 120 Hz respektive 60 Hz. Då kameran har ett 8-bitars färgdjup krävs alltså följande bandbredd,

$$640 \cdot 480 \cdot 60 \cdot 8 = 147,5 \text{ Mbit/s}$$

Då Playstation Eye drivs av USB 2.0 som har en teoretisk max hastighet på 240 Mbit/s krävs att kamerorna drivs av separata USB bussar för att uppnå fullständig uppdateringsfrekvens, vilket är viktigt för att motverka den rörelseoskärpa som uppstår när föremål rör sig.

### Fördelar

- Billig och lättillgänglig hårdvara med alternativa tillämpningar utan extra hårdvarukostnad, så som gestigenkänning och beteendeanalys.
- Tekniken kräver inte att det spårade föremålet behöver märkas eller vara delaktig för att positioneringen ska fungera. Till exempel krävs inte att operatören kommer ihåg att ta på sig en tagg.
- Inte känslig för elektromagnetiska störningar samt påverkar inte andra känsliga system.

### Nackdelar

- Begränsad räckvidd, ungefär 5 m, med en kamera.
- Tekniken är inte välbeprövad med avseende på en stationär kamera. De flesta tillämpningar avser rörliga kameror. Dessutom är täckningsytan i form av en cirkelsektor vilket ger ännu mindre räckvidd.

## 4.4 Sammanfattning

För att välja vilken teknik som skall användas för ett inomhuspositioneringsteknik bör man ta hänsyn till flertalet faktorer. Det första frågan man bör ställa sig är om en supportiv eller icke

supportiv teknik kan användas. Man kan här tänka sig att i en arbetsmiljö där personal skall positioneras som i fallet med beställaren CGM är en supportiv teknik troligen gångbar, detta för att syftet är att öka säkerheten samt att i förlängningen erbjuda tjänster för personalen som t.ex. lokaliserade alarm för att förbättra arbetsmiljön.

Var gränsen går för om man kan anse att en supportiv teknik är gångbar är en större fråga som vi inte kommer gå in på närmare i denna rapport, men man kan tänka sig att den kommer spela en stor roll i samhället framöver då dessa tekniker möjliggör för många tillämpningar men är också i många fall en inskränkning på integriteten för den enskilde arbetaren.

Eftersom det i CGMs fall även är intressant att samla annan information från operatören så som en indikation på trötthet hos personen tillsammans med att man i vissa miljöer vill ha en icke supportiv teknik för inomhuspositionering av säkerhetsskäl så är kamera ett bra alternativ. Dock så gör kostnaden för stereokameror och svårigheten att kalibrera enklare kameror att en kameralösning väljs bort.

Det billigaste alternativet, WIFI och Bluetooth har många fördelar, och är i första anblick kanske det bästa valet i en kontorsmiljö där det oftast finns tillgänglig infrastruktur, i fallet med WIFI finns det i många fall redan trådlösa stationer att använda sig av och för båda teknikerna gäller det att de allra flesta anställda troligen har tillgång till båda teknikerna på sin telefon. WIFI är dock att föredra i detta fall då räckvidden på Bluetooth är sämre vilket kommer innebära fler mottagarstationer. Dock gör kravet på noggrannheten att både dessa tekniker inte är hållbara för säkerhetskritiska miljöer där man med stor säkerhet skall kunna avgöra om en person är bakom eller framför sin arbetsstation, detsamma gäller även ZigBee. Dessutom kan i många fall både Bluetooth och WIFI direkt vara olämpliga i vissa kontrollrum, vilket gör att dessa tekniker väljs bort. Av samma anledning väljs även aktiv RFID bort, och passiv RFID då dess räckvidd är för låg för specifikationerna.

Kvar är ultraljud, infraröd strålning och UWB, av dessa väljs infraröd strålning bort på grund av dess svårigheter i skymd sikt, dock skulle detta vara ett utmärkt val om mycket noggrann positionering kring stationära punkter i rummet var tillräckligt, då denna teknik har den bästa noggrannheten.

Med avseende på CGMs krav på att tekniken skall kunna användas i miljöer där det ofta finns krav på att vanligt förekommande radiofrekvensområden inte får störas så är UWB och Ultraljud bättre lämpade. Detta medför en högre kostnad då dessa tekniker inte är lika lättillgängliga, det har dock i UWBs fall kommit ett par hårdvarutillverkare som gör tekniken mer tillgänglig och det är således UWB som blir valet av teknik. Dessutom har UWB samma upplösning som Ultraljud men med en överlägsen räckvidd.

Tabell 4.1: Sammanställning av inomhuspositioneringstekniker

Teknik	Parametrar				Referens
	noggrannhet[m]	Skalbarhet	Kostnad	Räckvidd[m]	
Kamera	0.01	Hög	Medel	5	[38]
WIFI	0.5	Hög	Låg	50	[3]
UWB	0.1	Hög	Hög	30	[25]
Aktiv RFID	0.35	Medel	Låg	10	[24]
Passiv RFID	0.22	Låg	Låg	2	[35]
Bluetooth	2	Låg	Låg	10	[31]
Ultraljud	0.03	Medel	Hög	10	[34]
ZigBee	2.8	Hög	Låg	50 – 75	[21]
Aktiv IR	0.07	Låg	Medel	5	[23]
Passiv IR	Ej angivet	Hög	Låg	5	[36]

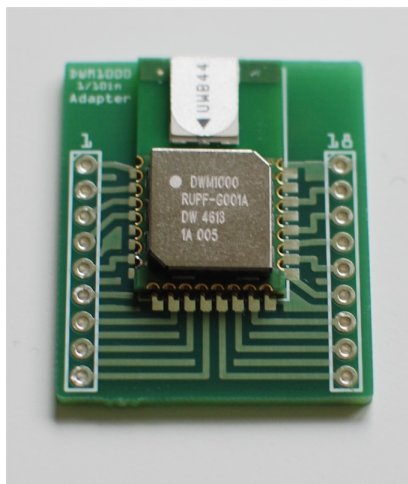
## 5 Konceptbevis med UWB

Företaget *Decawave* har tagit fram en integrerad krets kallad DW1000 som är producerad med syftet att användas i ett inomhuspositioneringssystem. Den har en utlovad noggrannhet på 10 cm och räckvidd upp till 300 m beroende på vilken antenn som används. DW1000 är en UWB transceiver som följer IEEE 802.15.4-2011-standarden för UWB. En transceiver har möjlighet att med hög precision skicka och ta emot paket samt bestämma vid vilken tid som paketen anländer, alltså går den integrerade kretsen att använda som både ankare och tagg i ett inomhuspositioneringssystem. Företaget har även tagit fram en mer fullständig modul, DWM1000, som inkluderar,

- En DW1000 transceiver
- En klockmodul
- En rundstrålande antenn
- DC/DC-omvandlare

Med DWM1000 behöver man inte några extra komponenter förutom en styrenhet. Ingen av modulerna kan självständigt skicka eller ta emot paket utan är beroende av en mikrocontroller. Eftersom DW1000 har ett integrerat SPI-gränssnitt med en maxhastighet på 20 MHz finns det inga begränsningar kring vilken mikrocontroller som kan användas.

DWM1000, vilken är avbildad i Figur 5.1, är paketerad i ett QFN-format vilket gör den enkel att integrera på ett färdigt kretskort. Dock gör detta modulen svår att arbeta med som en självständig enhet, eftersom det är svårt att löda fast kablar på modulen. Därför har en breakout-board tagits fram för att flytta ut kontaktpunkterna till en pin header.



Figur 5.1: En DWM1000-modul med den framtagna breakout-board. Författarnas egna bild.

Utifrån tidigare erfarenheter med ARM-familjen av valdes en ARM M4-processor i form av evalueringsskortet STM32F4 Discovery för att kommunicera med DWM1000.

## 5.1 Drivrutin till DW1000 för STM32F4

Det finns ingen officiell drivrutin för DW1000 till STM32F4. Dock finns det vissa dokument som beskriver kommunikation och konfiguration mellan modulen och en mikrokontroller samt ett exempelprojekt för Decawaves evalueringskit EVK1000.

### 5.1.1 Grundläggande kommunikation

Som tidigare beskrivet använder DW1000 en SPI-buss för att kommunicera med en mikrokontroller. SPI är en synkron full-duplex buss där en enhet agerar master, i detta fall en mikrokontroller, och en slav, i detta fall DW1000. DW1000 går att konfigurera för att kunna behandla olika typer av SPI-kommunikation men är inställd från fabrik att hantera följande,

#### Busshastighet

DW1000 har en maximal busshastighet på 20 MHz. Dock så är hastigheten begränsad under uppstart till 3 MHz. Detta är mer beskrivet i Avsnitt 5.1.2.

#### Storlek

Ordbredd är begränsad till 8 bitar per ord.

#### Klockans polaritet och fas

Data läses på en positiv flank och skrivs på en negativ flank.

#### Endianness

Little endian med den mest signifikanta biten först.

I Tabell 5.1 beskrivs den koppling av SPI-bussens pinnar mellan mikrokontrollern STM32F4 samt DWM1000 som användes. Dessa pinnar benämns som SPI2 på STM32F4 Discovery-kortet.

Tabell 5.1: Beskrivning av SPI-pinnar och hur de är kopplade mellan STM32F4-kortet och DWM1000 modulen.

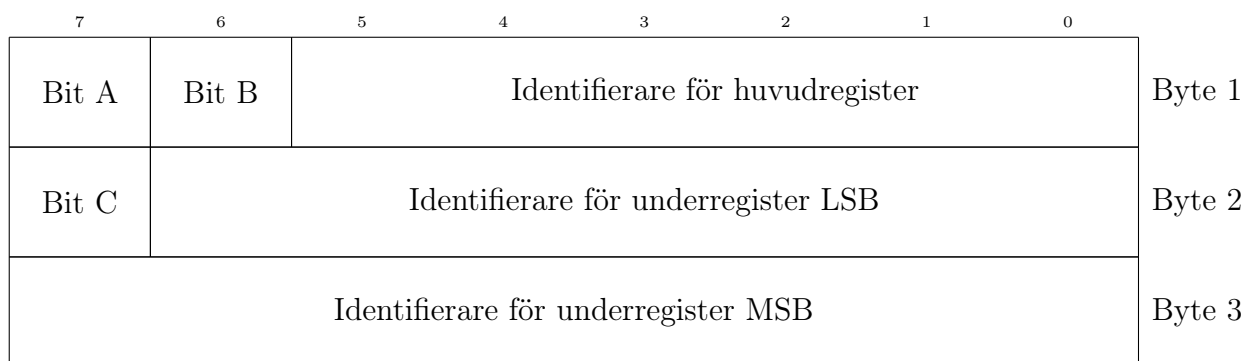
Beteckning	Beskrivning	GPIO-pinnar	
		STM32F4Discovery	DWM1000
SCLK	Serial klocka	PB10	20
MISO	Master in slave out	PB4	19
MOSI	Master out slave in	PC3	18
CSn	Chip select	PA5	17

DW1000 är styrd av ett antal register som kan läsas och skrivas via SPI-bussen. Registerna är uppdelade i 64 huvudregister och upp till 8192 underregister som är betecknade med ett identifikationsnummer respektive ett avstånd från huvudregistret. Kommunikationen inleds av en så kallad *transaction header*, där mikrokontrollern berättar vilket register som är valt samt om man vill läsa eller skriva. Transaction headern, vilken är avbildad i Figur 5.2, består av 1 B–3 B som bland annat innefattar registrets identifikationsnummer samt eventuellt underregister. Det finns även 3 kontrollbitar som har följande syfte,

**Bit A** för att välja om mikrokontrollern vill utföra en läsning eller skrivning. För läsning är denna bit 0.

**Bit B** för att välja ett underregister. Om denna bit är 1 så kommer transaction headern innehålla minst 2 bytes.

**Bit C** för att välja ett underregister vars index inte får plats i 7 bitar, alltså underregister som är mer än 127 ifrån sitt huvudregister. Om denna bit är 1 så kommer transaction headern innehålla den maximala storleken, 3 bytes.



Figur 5.2: Schema över transaction headern ser ut.

För att enkelt kunna generera en *transaction header* infördes en metod, ifrån vilket ett utdrag finns i Figur 5.3. Metoden anropas på ett objekt där de olika identifierarna för huvudregistret samt eventuellt underregister finns.

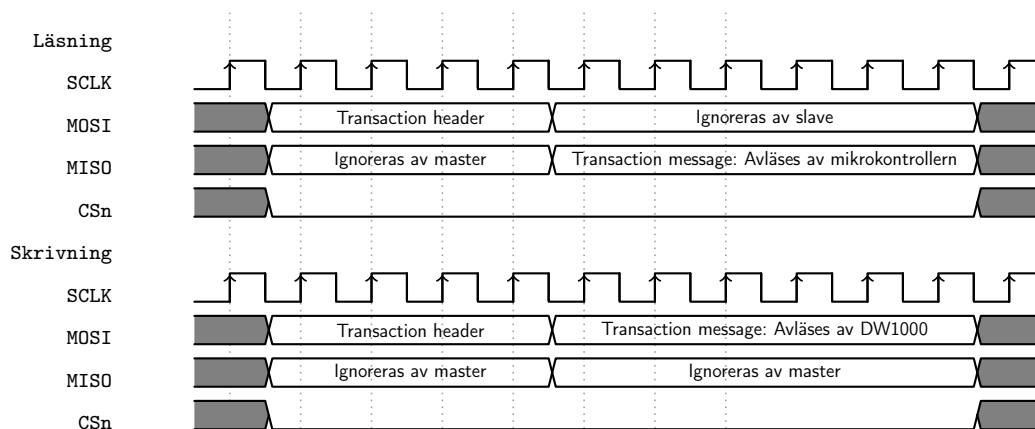
```
1 |     uint16_t generateTransactionHeader(uint8_t header[3]) {
2 |         uint16_t size = 0;
3 |         header[size++] = this->identifier;
4 |         if (this->index > 0) {
5 |             header[0] |= Register::SUBINDEX_PRESENT;
6 |             header[size++] = static_cast<uint8_t>(this->index);
7 |             if (this->index > 127) {
8 |                 header[1] |= Register::EXTENDED_ADDRESS;
9 |                 header[size++] = static_cast<uint8_t>(this->index >> 7);
10 |             }
11 |         }
12 |         return size;
13 |     }
```

Figur 5.3: Utdrag ifrån drivrutinen som hanterar skapandet av en transaction header givet ett register. Eftersom headern har en variabel storlek returneras hur många bytes som används.

SPI-kommunikationen, avbildat i Figur 5.4, inleds med att CSn sätts låg, CSn signalen styrs av masterenheten. Om ett register skall läsas skickar masterenheten en *transaction header* på MOSI-kanalen som talar om vilket register som avses läsas och hur stort detta register är. Slavenheten svarar då genom att skicka innehållet i registret på MISO-kanalen, och masterenheten sätter slutligen CSn hög och sändningen är avslutad. Vid skrivning hanteras CSn signalen på samma



sätt som vid läsning, det är dock endast masterenheten som skickar information på bussen som *DW1000* läser av och uppdaterar sedan det avsedda registret.



Figur 5.4: Beskrivning av hur SPI-pinnarna agerar vid sändning och mottagning av information på bussen.

## 5.1.2 Tillståndsmaskinen

Internt består DW1000 av en tillståndsmaskin vars tillstånd bestämmer programflödet. Denna tillståndsmaskin går att styra utifrån genom registerpåverkan eller via någon av de extra GPIO-pinnarna som finns tillgängliga. Till förfogande finns på DWM1000 bland annat **RSTn** som agerar både som ingång och utgång. Via **RSTn** kan man läsa av den initiala tillståndsövergången mellan *Init*- och *Idle*-tillstånden. Dessutom kan man framtvinga en omstart av hårdvaran genom att sätta **RSTn** låg och invänta ett svar från enheten genom att den sätter **RSTn** hög igen. Nedan beskrivs de tillstånd som DW1000 kan befinna sig i,

### Off

Enheten är avstängd. Den kan bara vara här om ingen ström tillförts. Man bör se till att inga externa enheter driver några pinnar i detta läge då detta kan göra att enheten börjar läcka ström.

### Wakeup

Detta tillstånd sker direkt efter strömtillförelse av kortet alternativt efter omstart. Det är här som XTAL-oscillatorn aktiveras som är en uppstartsklocka med lägre klockfrekvens. Detta tar ungefär 4 ms. När det är klart drivs **RSTn** pinnen låg för att visa att det nu går att kommunicera med kortet över SPI med begränsad hastighet (3 MHz).

### Init

Det är här som enheten genomgår en initiering av den slutgiltiga PLL-klockan som ska driva enheten under de funktionella tillstånden. Det går att kommunicera med enheten under detta tillstånd men med begränsad hastighet (3 MHz) eftersom enheten fortfarande drivs med uppstartsklockan. Det tar ungefär 5  $\mu$ s att övergå från *Init* till *Idle*.

### Idle

Här har PLL-klockan tagit över systemklockan och kommunikation med *DW1000* via SPI

kan utföras med en busshastighet på upp till 20 MHz, det är i detta läge som kortet kan programmeras för att övergå till sändning eller mottagning.

### **Sleep/Deepsleep**

Två energisparlägen där enheten drar mindre än 1  $\mu$ A. I *Sleep*-läget sover enheten tills dess att en räknare har räknas ner alternativt att SPI-kommunikation initieras av mikrokontrollern, i *Deepsleep*-läget kan enheten endast väckas av SPI-kommunikation. När enheten lämnar något av de två energisparlägena hamnar enheten i *Init*-läget.

### **TX**

Enheten kommer nu påbörja en sändning. Innehållet som finns i sändarbufferten kommer skickas. Vid en lyckad sändning eller ett misslyckande avges ett relevant avbrott och därefter hamnar enheten i *Idle*-läget alternativt i något av energisparlägena beroende hur enheten är konfigurerad.

### **RX**

I detta läge kommer enheten försöka ta emot ett paket. Enheten kommer här att vänta på ett nytt paket. Till skillnad från sändarläget där enheten spenderar minimal tid väntar enheten i mottagarläget tills ett meddelande är mottaget. Därefter anges precis som i sändarläget ett relevant avbrott och enheten går i sitt *Idle*-läge, alternativt något av energisparlägena.

För att veta vilket läge som enheten befinner sig i kan utöver RSTn-pinnen DW1000 konfigureras så att avbrott genereras när enheten byter tillstånd. Konfiguration av avbrott sker i SYS\_MASK-registret där avbrott kan maskas eller aktiveras. När ett avbrott sker drivs IRQ-pinnen hög samt en eller flera händelsebitar i SYS\_STATUS registret. De genererade avbrotten måste i de flesta fallen kvitteras genom att skriva en etta i status registret. Vid uppstart är inga avbrott aktiverade utan de som är intressanta måste aktiveras vid varje uppstart. Det finns totalt 28 olika avbrott att aktivera, de som är mest intressanta för grundläggande meddelandeöverföring av UWB-paket är,

**CPLOCK** Avbrott som sker när PLL-klockan låst sig till sin slutgiltiga hastighet. Drivrutinen väntar tills detta interrupt inträffar innan annan konfiguration sker.

**SLP2INIT** Enheten har lyckats vakna ifrån något av sina energisparlägen och är nu i sitt *Init*-tillstånd.

**TXFRS** En sändning har lyckats, paketet som lagts i sändningsbufferten har lämnat transceivern och dess sändningstid har noterats.

**RXFCG/RXFCE** Enheten har kontrollerat ett inkommet paket och kommit fram till att dess kontrollsumma stämmer i fallet av RXFCG och att den inte stämmer om RXFCE.

**AFFREJ** Ett paket har mottagits men nekats då det inte har passerat det konfigurerade filtret.

**RXRFSL** Ett inkommet paket har en felaktig struktur och transceivern kan inte urskilja ettor från nollor. När detta avbrott sker bör hela paketet slängas och skickas om ifrån sändarsidan.

**RXSFDTO** Den första delen av ett paket har hittats men resterande delar som är nödvändiga saknas. Detta inträffar när transceivern störs och tros ha hittat ett paket som i själva

verket inte har skickats.

**RXPHE** Ett avbrott som indikerar att ett okorrigerbart fel i den grundläggande headern har inträffat.

### 5.1.3 Sändning och mottagning av UWB-signaler

DW1000 bygger på IEEE 802.15.4-2011-standarden, vilken definerar 16 olika RF-band där DW1000 stödjer 6 av dem, alla mellan 3,5 GHz–6,5 GHz, vilka är avbildade i Tabell 5.2. DW1000 har en maximal bandbredd för mottagaren på 900 MHz [39], vilket innebär vissa kanalers fulla bandbredd inte kan utnyttjas. Det finns även fler parametrar som skiljer sig mellan DW1000 och IEEE 802.15.4-2011-standarden, till exempel specificerar IEEE att datahastigheten ska vara antingen 110 kbit/s, 850 kbit/s, 6,8 Mbit/s eller 27 Mbit/s, men DW1000 stödjer inte en datahastighet över 6,8 Mbit/s.

*Tabell 5.2: Överblick över alla tillgängliga kanaler som DW1000 kan använda sig av. Dessutom finns kanalens centerfrekvens samt bandbredd vilken är definerad enligt [39]. Den uppnådda bandbredden är den maximala bandbredd som DW1000-modulen själv klarar att ta emot paket inom.*

Kanal	Centerfrekvens (MHz)	Bandbredd (MHz)	Uppnådd bandbredd (MHz)
1	3494.4	499.2	499.2
2	3993.6	499.2	499.2
3	4492.8	499.2	499.2
4	3993.6	1331.2	900.0
5	6489.4	499.2	499.2
7	6489.4	1081.2	900.0

All radiokommunikation ifrån DW1000 bygger på standardiserade paket, i datalänkskiktet av OSI-modellen uppdelade i två delskikt, *logiska länkkontrollskiktet* (LLC) samt *mediaåtkomstskiktet* MAC. Paket på LLC-nivå består av en synkroniseringsheader kallad *preamble*. Preamblen existerar som en markör till transecivern för att identifiera ett UWB-paket. Dessutom hjälper *preamblen* transecivern att med hög noggrannhet bestämma ankomsttiden för den signal som tog den mest direkta vägen mellan ankare och tagg [40]. Eftersom längden på synkroniseringsheadern inte är konstant utan varierar innehåller LLC-paketet även en markör, *SFD*, vars syfte är att visa slutet av preamblen och början av LLC-headern. LCC-headern innehåller information om den resterande datans längd och med vilken datahastighet som används. Innehållet i *SFD* är definerad i IEEE 802.15.4-2011-standarden dock stödjer DW1000 att användaren själv specificerar innehållet i *SFD*, vilket kan förbättra noggrannheten i ett inomhuspositioneringssystem eftersom det är ankomsten av *SFD* som modulen antecknar som ankomsttid för hela paketet.



Figur 5.5: Schema över hur LLC-paketet ser ut. Informationen skickas från vänster till höger där Data-delen bör innehålla ett MAC-paket.

Förutom konfiguration sköter DW1000 konstruktionen av LLC-headern men lämnar resterande MAC-skikt åt användaren att själv konstruera. MAC-skiktet består av en header, MHR, samt användarspecifierad data. MHR innehåller metainformation om paketet så som,

### Pakettyp

IEEE 802.15.4-2011-standarden definierar 7 förbestämda pakettyper för att markera hur datadelen skall tolkas. 4 stycken av dessa pakettyper är inte namngivna utan är reserverade och paket med denna typ är upp till utvecklaren själv att tolka.

### Sekvensnummer

Vid en paketutväxling mellan två parter är detta en räknare som håller koll på vart i konversationen som det nuvarande paketet är. IEEE 802.15.4-2011-standarden rekommenderar även att man har två separata räknare en för eventuella *acknowledgement*-paket och en för resterande. Detta för att enkelt kunna identifiera vilket paket som *acknowledgement*-paketet avser.

### Adresser

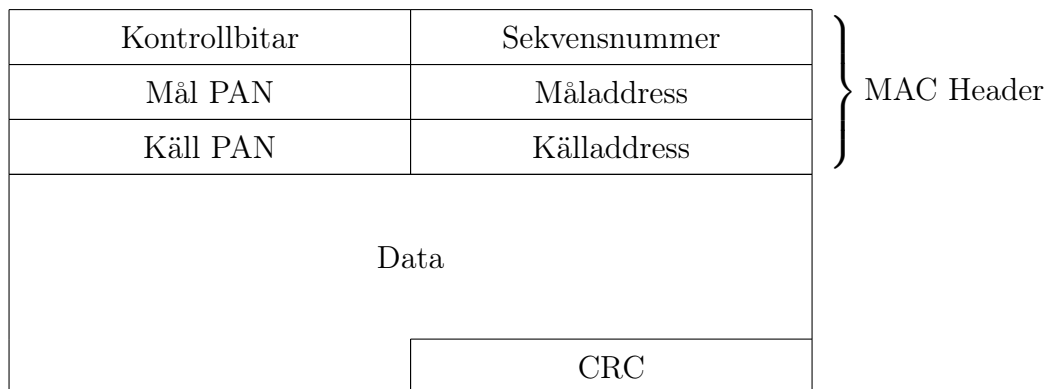
En valfri del av MAC-headern är att inkludera adressen av mottagaren och sändaren. Denna adress kan vara den unika identifieraren (EUI) som är förprogrammerad på enheten alternativt en egen definierad adress som är något kortare.

### PAN

Tillsammans med adresserna kan en grupp av enheter bilda ett så kallat, *personal area network*. Denna extra adressidentifierare tillåter flera enheter att prata över samma kanal men ändå separeras i olika nätverk.

### CRC

För att identifiera fel vid dataöverföringen implementerar DW1000 en *cyclic redundancy check*-algoritm vars resultat läggs sist i paketet. Enheten kan konfigureras så att kontrollsumman beräknas automatiskt vid sändning av ett paket. Transceivern kommer även att kontrollera att kontrollsumman stämmer när ett paket mottages.



Figur 5.6: Schema över hur MAC-paketet ser ut. Kontrollbitarna innehåller bland annat pakettyp, längd på adresserna samt huruvida paketet innehåller en eller två PAN-identifierare.

DW1000 har en inbyggd klockpulsräknare för att kunna bestämma när ett paket skickats eller sänts. Genom att tillämpa en *phase locked loop* där man matar in den externa kvartsoscillatorn på 38,4 MHz och får ut en klockfrekvens  $f$  på,

$$f = 13 \cdot 128 \cdot 38,4000 \text{ MHz} = 63,8976 \text{ GHz}$$

För varje positiv klockflank ökas en 40-bitars räknare stegvis vilket ger en tidsupplösning  $t$  för varje steg samt en total periodtid  $T$ ,

$$t = \frac{1}{f} = 15,6500 \text{ ps}$$

$$T = \frac{2^{40}}{f} = 17,2074 \text{ s}$$

Tidsupplösningen gäller för alla register som beräknar tid (SYS\_TIME, TX\_TIME, RX\_TIME) förutom det register som anger en eventuell försenad sändning eller mottagning, DX\_TIME. I detta registret ignoreras de lägsta 9-bitarna vilket ger en tidsupplösning  $t_d$ ,

$$t_d = 2^9 \cdot t = 8,0128 \text{ ns}$$

En sändning initieras med att längden av meddelandet uttryckt i bytes skrivs till registret TX\_FCTRL, dessutom behöver längden inkludera 2 extra bytes ifall DW1000 är inställd för att automatiskt generera CRC. Därefter skrivs hela paketet till registret TX\_BUFFER. Enligt IEEE 802.15.4-2011-standarden är den maximala datalängden 127 bytes exklusive LLC header samt eventuell CRC. Det finns olika lägen att skicka ett paket,

- Skicka paketet direkt med minimal fördröjning. I praktiken leds DW1000 tillståndsmaskin till sitt TX tillstånd direkt vid skrivning. När transceivern skickar SFD delen av meddelandet antecknas sändningstiden till TX\_TIME registret.
- Skicka paketet med en förbestämd fördröjning. Fördröjningen är absolut, alltså när transceiverns interna klocka når den förbestämda tiden så skickas paketet. Skulle fördröjningen vara för liten, alltså att DW1000 inte hinner skicka paketet kommer paketet att skickas om en hel klockperiod senare.

- Båda ovanstående lägen går att konfigurera så att DW1000 direkt letar efter ett svarpaket genom att gå till **RX**-läget direkt efter sändningen är klar alternativt efter en viss fördröjning, inställt via **DX\_TIME** registret.

När ett meddelande tags emot måste transceivern vara i sitt **RX**-läge, annars så kommer meddelandet att tappas bort. Om en sändning identifieras av DW1000 tänds motsvarande avbrottsvippor som tidigare beskrivits i Avsnitt 5.1.2. Längden på meddelandet inklusive eventuell CRC finns att hämta i **RX\_FINFO** registret och hela meddelandet finns lagrat i **RX\_BUFFER**. Transceivern stöder även sk. *double buffering* där transceivern sätts i ett läge där ett mottaget paket mellanlagras i en annan buffer så att ett nytt paket kan tas emot undertiden som mikrokontrollen bearbetar det första paketet. Detta är nödvändigt i en TDOA implementation med DW1000 då det annars är hög chans att transceivern missar ett meddelande.

#### 5.1.4 Konfigurering samt kalibrering

Som tidigare beskrivet konfigureras DW1000-modulen genom sitt stora antal register. Många av dessa behöver ställas in för att uppnå maximal prestanda av ett inomhuspositioneringssystem. Även om antalet register som behöver konfigureras beror de flesta av endast ett fåtal parametrar,

**Kanalen** avgör vilken centerfrekvens samt bandbredd som ska användas.

**PRF** vilken frekvens som UWB-pulserna för LLC-headern skickas ut med. DW1000 stödjer två olika frekvenser, 16 MHz och 64 MHz.

**Datahastighet** hastigheten som resterande data skickas med. DW1000 har alltså två olika hastigheter en för början av paketet och en för resterande icke nödvändig data. Modulen stödjer datahastigheterna 110 kbit/s, 850 kbit/s samt 6,8 Mbit/s.

**Preamble** inställningarna avgör hur preamble delen av LLC-headern ser ut. Det som går att ställa in innefattar, längd, innehåll samt grupperingsstorlek.

**SFD** tillåter enheten att skicka en icke standardiserad sekvens som markerar början på en ram.

**Intelligent strömtillförsel** tillåter enheten att själv avgöra hur mycket effekt som antennen kan avge. Detta är applicerbart när en hög datahastighet används. Eftersom paket vid en hög hastighet skickas fort utnyttjas inte hela den tillåtna effekten per tidsenhet.

När enheten startar upp är den i princip redo för sändning och mottagning på en standardkanal. Dock kräver enheten viss uppstartningskonfiguration för att fungera optimalt. Alla DW1000-moduler har ett icke-flyktigt minne som endast går att programmera en gång. I detta sparas några av de flesta beständiga inställningar så som kalibrering. Detta minne kan endast läsas när den lägre XTI-klockan är aktiverad på kortet, därav bör dessa inställningar läsas in vid uppstart för att lätt i efterhand kunna skrivas till ett relevant register. Dessutom lagras programkoden för enhetens LDE-algoritm. *Leading edge* algoritmen är till för att identifiera början av ett paket och därmed öka noggrannheten i tidsstämplingen av mottagna paket. Därav behöver enheten ladda över algoritmens programkod till arbetsminnet, vilket måste göras innan mottagaren slås på.

De tre stora parametrar som behöver kalibreras mellan olika DW1000-moduler är,

### Justering av kvartzoscillatorn

Enhetens alla klockhastigheter är baserade på en extern klocka som enligt specifikationen ska ha en frekvens på 38,4 MHz. Eftersom ett inomhuspositioneringssystem med realtidskrav som implementeras med DW1000 är extremt beroende av denna klockhastighet är korrekt med hög noggrannhet. En lösning på detta problem vore att använda sig av kvartzoscillatorer som är kompenserande för eventuella störningar så som temperatur. Dock är dessa dyra och genom en enkel kalibrering kan liknande resultat uppnås.

### Sändarens maximala effekt

Enligt IEEE 802.15.4-2011 standarden tillsammans med respektive regions egna föreskrifter finns det begränsningar kring hur mycket effekt som en UWB antenn får sända. Decawave erbjuder en produkt som ska fungera i alla regioner i världen och därav går det att justera hur mycket effekt som antennen kan mata ut.

### Antennfördröjning

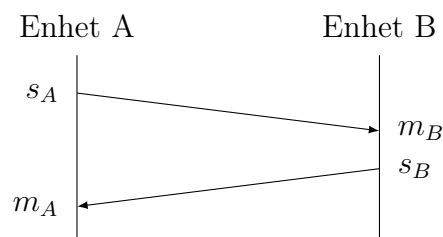
I ett tidskritiskt system är även de minimala tider som det tar för signalen att ta sig ifrån den digitala delen till den analoga antennen signifikant. Modulen erbjuder därav ett sätt att beroende på vilken antenn och signalväg som finns att justera hur mycket tid som behöver dras av ifrån den slutgiltiga flygtid som beräknas.

I denna rapport har ingen kalibrering gjorts i brist på den utrustning som krävs för att genomföra detta.

## 5.2 Symmetrisk dubbelsidig tvåvägspositionering

Det finns flera metoder att utifrån olika signal parametrar bestämma avstånd mellan två noder i ett positioneringssystem. I denna del föreslås en metod som inte kräver extern synkronisering mellan noderna men ändå uppnår en godtagbar prestanda i form av noggrannhet och precision som bygger på tvåvägs TOA beskrivet i Avsnitt 3.1.1.

Antag att två enheter  $A$  och  $B$  med egna klockor skickar meddelanden där sändartiden och mottagningstiden kan noteras, enligt Figur 5.7.



Figur 5.7: Tidsdiagram över hur två enheter kommunicerar för att genomföra en tvåvägspositionering. Pilarna beskriver två paket och  $s_A$ ,  $s_B$ ,  $m_A$ ,  $m_B$  är de tidsstämplar som enheterna registrerar vid sändning respektive mottagning av paketen.

Där sändningstiden för de båda meddelanden uppmättes till  $s_A$  respektive  $s_B$  samt mottag-

ningstiderna uppmättes till  $m_A$  och  $m_B$ . I ett scenario där vi antar att de båda enheterna har perfekta klockor skulle signalens flygtid  $t$  kunna beräknas enligt,

$$2 \cdot t = (m_B - s_A) + (m_A - s_B) = (m_A - s_A) + (m_B - s_B) \quad (5.1)$$

Om man med samma princip nu tar i beräkning att de båda enheternas klockor har ett fel beroende av frekvensdrift uttryckt i antal mikrosekunder det kan skilja sig per uppmätt sekund. Dessa fel betecknas som  $e_A$  respektive  $e_B$  kan en approximativ flygtid  $\hat{t}$  bestämmas enligt,

$$2 \cdot \hat{t} = (m_A - s_A)(1 + e_A) + (m_B - s_B)(1 + e_B) \quad (5.2)$$

Med Ekvation 5.1 och Ekvation 5.2 kan man bilda ett uttryck för skillnaden mellan den ideala flygtiden  $t$  samt den approximativa tiden  $\hat{t}$  enligt,

$$\begin{aligned} 2\hat{t} - 2t &= (m_A - s_A)(1 + e_A) + (m_B - s_B)(1 + e_B) - (m_A - s_A) - (m_B - s_B) \\ 2(\hat{t} - t) &= (m_A - s_A)(1 + e_A - 1) + (m_B - s_B)(1 + e_B - 1) \\ \hat{t} - t &= \frac{(m_A - s_A) \cdot e_A + (m_B - s_B) \cdot e_B}{2} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Om enhet  $B$  skickar sitt meddelande med en fördröjning  $d$  vilket är skillnaden mellan det andra paketets sändningstid och det första paketets mottagningspaket. Tillsammans med faktumet att skillnaden mellan sändning och mottagning på den andra sidan går att skriva som två ideala flygtider plus fördröjningen kan Ekvation 5.3 förenklas,

$$\begin{aligned} \hat{t} - t &= \frac{(2 \cdot t + d) \cdot e_A - d \cdot e_B}{2} \\ &= \frac{2 \cdot t \cdot e_A - d \cdot (e_B - e_A)}{2} \\ &= t \cdot e_A + \frac{d \cdot (e_A - e_B)}{2} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Det är ett vedertaget antagande att fördröjningen  $d$  som innefattar bearbetning av det mottagna paketet samt konstruktionen av ett nytt tar flertalet millisekunder även på en snabb mikrokontroller. Detta tillsammans med att flygtiden för en signal i samma storleksordning skulle sätta enheterna flera hundra kilometer ifrån varandra. Därav kan Ekvation 5.4 förenklas till,

$$(d \gg t) \quad \implies \quad \hat{t} - t \approx \frac{d \cdot (e_A - e_B)}{2} \quad (5.5)$$

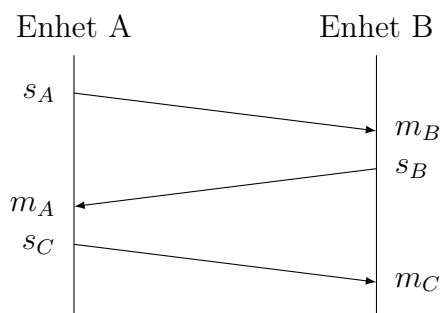
Felet i flygtid  $\hat{t} - t$  är utifrån Ekvation 5.5 beroende av klockfelet tillsammans med den förbestämda fördröjning som paketen skickas med. Antag att inomhuspositioneringssystemet som konstrueras har krav på en noggrannhet på decimeter nivå. Utifrån ljusets hastighet  $c$  kan felet av flygtiden behöva vara,

$$\begin{aligned} (\hat{t} - t) \cdot c &\leq 0,1 \text{ m} \\ \hat{t} - t &\leq \frac{0,1 \text{ m}}{c} \\ \hat{t} - t &\leq 334 \text{ ps} \end{aligned}$$



En högkvalitativ kvartsoscillator med ett frekvensdrift fel med  $2\ \mu\text{s}/\text{s}$  ger ett fel i flygtid på  $5\ \text{ns}$  [40]. Det är alltså inte gångbart med en enkel tvåvägspositionering för att uppnå det krav på en decimeters noggrannhet som existerar.

En alternativ metod för att minimera den inverkan som klockfelet har på flygtiden föreslogs av Hach [41]. Hachs metod utgick ifrån den tidigare beskrivna tvåvägspositionering fast utväxlingen av meddelanden mellan de båda enheterna fördubblas genom att två omgångar av tvåvägspositioneringen genomförs med jämförbar fördröjning i de båda omgångarna. Detta med endast ett extra paket, då ankaret kan initiera en ny omgång samtidigt som den svarar på den första omgången. Metoden kallas för *symmetrisk dubbelsidig tvåvägspositionering* och beskrivs i Figur 5.8.



Figur 5.8: Tidsdiagram över hur två enheter kommunicerar för att genomföra en symmetrisk dubbelsidig tvåvägspositionering. Pilarna beskriver tre paket och  $s_A$ ,  $s_B$ ,  $s_C$ ,  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $m_C$  är de tidsstämplat som enheterna registrerar vid sändning respektive mottagning av paketen.

Med samma resonemang samt beteckningar som i tidigare förklaring av tvåvägspositionering förutom de båda fördröjningarna  $d_A$  respektive  $d_B$  kan motsvarande Ekvation 5.4 tecknas för den nya metoden,

$$\hat{t} - t = \frac{t \cdot (e_A + e_B)}{2} + \frac{(d_B - d_A)(e_A - e_B)}{4}$$

Samma antagande att skillnaden mellan fördröjningarna är betydligt mindre än flygtiden gäller även här vilket förenklar flygfelet till,

$$\hat{t} - t \approx \frac{(d_B - d_A)(e_A - e_B)}{4} \quad (5.6)$$

Med samma kvartsoscillator som i förra jämförelsen skulle den nya metoden förbättra felet i flygtid till bättre än  $5\ \text{ps}$ . Det skulle till och med kunna existera ett klockfel uppemot  $80\ \mu\text{s}/\text{s}$  och fortfarande skulle kravet på en noggrannhet på decimeter nivå kunna hållas [40]. Den kvartsoscillator som finns tillgänglig på DWM1000-modulen har ett klockfel på under  $20\ \mu\text{s}/\text{s}$  vilket är tillräckligt.

## 5.2.1 Implementation med DWM1000

En symmetrisk dubbelsidig tvåvägspositionering implementerades med hjälp av två STM32F4-kort och två DWM1000 moduler. Den ena uppsättningen, Enhet A, agerar tagg och den andra uppsättningen, Enhet B, agerar ankare. Meddelandeutväxlingen som är illustrerad i Figur 5.8 realiserades som tre olika typer av paket,

## Ping

Taggen sänder ut ett *Ping*-paket för att initiera en avståndsmätning. Paketet skickas till alla ankare inom räckhåll.

## Acknowledgment

Det ankare som tar emot Ping-paketet bekräftar detta med ett *Acknowledgement*-paket.

## Ranging

Taggen svarar på bekräftelsen för att ge ankaret alla tidstämplrar som behövs för avståndsmätningen.

Taggen initierar mätningen genom att skicka ett *Ping*-paket till alla ankare genom så kallad *broadcast*. Ett *broadcast* meddelandet har adressen 0xFFFF. Det ankare som mottar Ping-paketet antecknar mottagningstiden och förbereder en försenad sändning utan innehåll, Acknowledgment-paket, till taggen. Enligt Ekvation 5.6 är förseningstiden inte relevant för noggrannheten utan endast att förseningarna på båda sidor är så lika som möjligt. När taggen tar emot Acknowledgment-paket sker samma process som för taggen fast med detta paket bifogas även alla tider som taggen har uppmätt ( $s_A, m_A, s_C$ ). Med detta paket tillsammans med mottagningstiden kan nu ankaret utföra beräkningar för att ta fram flygtiden mellan de båda enheterna.

Som beskrivet i Avsnitt 5.1.3 beräknar DW1000 sina tidstämplrar med en 40-bitars räknare och har därav en period på  $\sim 17$ s innan den räknar om ifrån noll igen. Därav kan man behöva ta detta i beräkning innan någon avståndsalgoritm tillämpas. Genom att leta efter följande tillstånd kan alla dessa fall korrigeras,

- $s_A > m_A$ , Enhet A har räknat om. Addera en period till  $m_A$  och  $s_C$ .
- $m_A > s_C$ , Enhet A har räknat om. Addera en period till  $s_C$ .
- $m_B > s_B$ , Enhet B har räknat om. Addera en period till  $s_B$  och  $m_C$ .
- $s_B > m_C$ , Enhet B har räknat om. Addera en period till  $m_C$ .

## 5.3 Experiment

I denna del av rapporten har ett antal experiment utformas för att testa prestandan i det konceptbevisystem som har tagits fram för UWB. Till detta användes två kompletta uppsättningar av DWM1000-moduler och STM32F4-kort. De båda uppsättningarna är konfigurerade på samma sätt förutom att den ena agerar tagg medans den andra agerar ankare. Konfigurationens huvudparametrar, som tidigare beskrivits i Avsnitt 5.1.4, är inställda enligt Figur 5.3.

Tabell 5.3: Beskrivning av hur DW1000-enheten är inställd för de huvudparametrar som är beskrivna i Avsnitt 5.1.4. Inställningarna är hämtade ifrån [39]

Kanal	PRF	Datahastighet	Preamble			SFD	SFD Timeout
			Innehåll	Längd	Gruppstl		
2	16 MHz	110 kbit/s	3	1024	32	Standard	1057

De båda enheterna är även inställda att sända alla paket med en fördröjning på  $6000\ \mu\text{s}$ .

### 5.3.1 Experiment 1: Linjär anpassning och gruppering av avståndsresultat

Initiala tester med experimentuppställningen visade större fel än vad som uppskattades i Avsnitt 5.2. Därav gjordes försök att efterbehandla mätningarna för att förbättra mätfelen. Avståndet mellan två DW1000-moduler uppmättes, med dubbelsidig tvåvägspositionering, på 5 olika platser med 1 m mellan enheterna. Varje avstånd mättes 50 gånger med någon sekunds mellanrum. Dessutom var enheterna riktade emot varandra utan några hinder emellan. Resultatet av dessa mätningar anpassades i `Matlab` till en linjär ekvation av typ,

$$\hat{l} = p_1 \cdot l + p_2$$

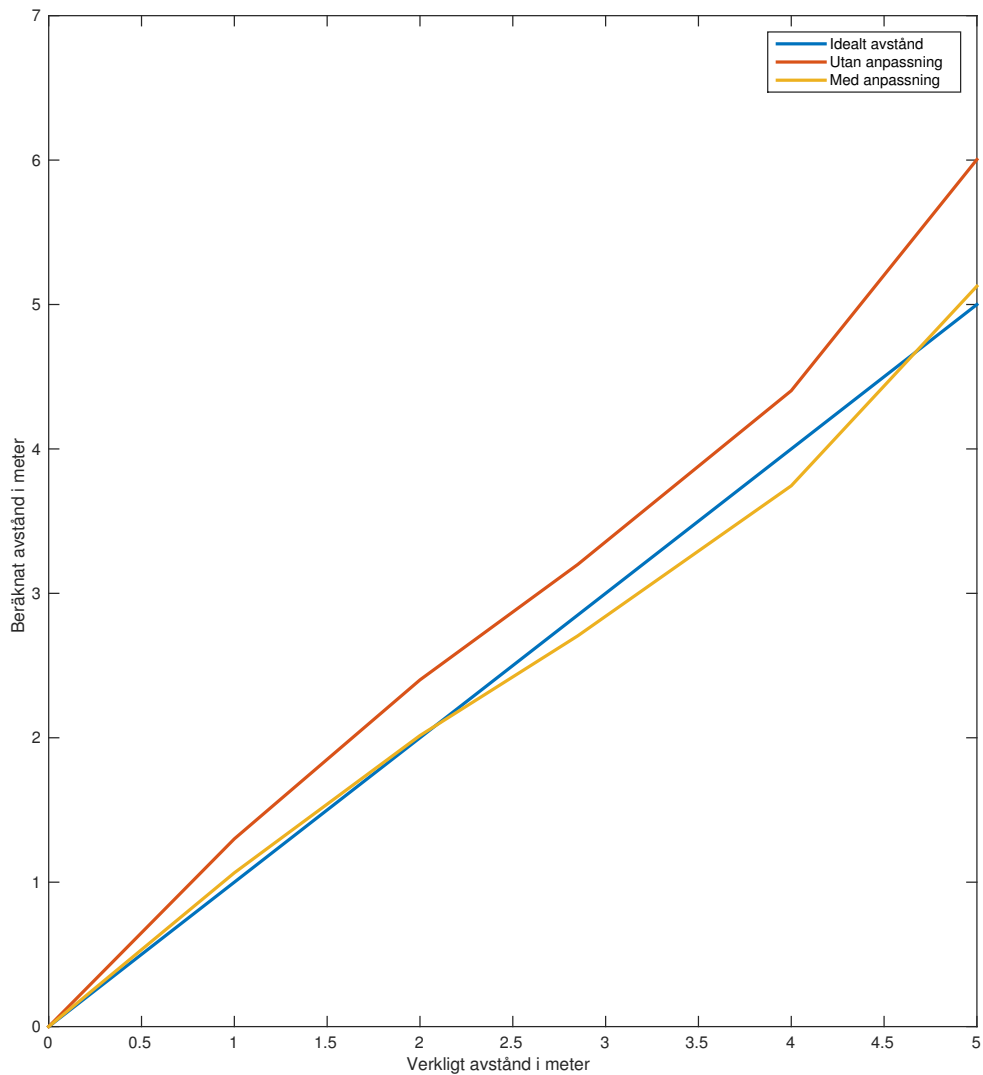
där  $\hat{l}$  och  $l$  betecknar det uppskattade avståndet av positioneringsalgoritmen respektive det verkliga avståndet. Koefficienterna  $p_1$  och  $p_2$  kan efter anpassningen användas för att förbättra det uppskattade avståndet genom att,

$$\hat{l} = p_1 \cdot l + p_2 \quad \implies \quad l = \frac{\hat{l} - p_2}{p_1}$$

Anpassningen resulterade i följande koefficienter,

$$p_1 = 1.1580 \quad p_2 = 0.0670$$

Dessutom grupperades resultaten ihop så att medelvärdet av 5 mätningar blev ett enskilt mätvärde. Detta tillsammans med den linjära anpassningen har gjorts för alla följande experiment. En jämförelse av vilken inverkan dessa efterbehandlingar kan ses i Figur 5.9.



Figur 5.9: Jämförelse mellan mätfelet där en linjär anpassning är tillämpad och en där ingen anpassning är gjord. En perfekt mätserie bör följa det ideala avståndet.

Utifrån Figur 5.9 noteras att utan anpassning är medelfelet över alla mätningar  $\sim 0,4$  m, medan medelfelet är  $\sim 0,15$  m med anpassning och gruppering. Orsaken till mätfelet utan anpassning är med högst sannolikhet bristen på kalibrering av DWM1000-modulen. Ytterligare experiment borde göras för att undersöka inverkan av grupperingsstorleken samt undersökning av andra kalibrering/konfigurations parametrar som kan förbättra mätfelet.

### 5.3.2 Experiment 2: Jämförelse mellan tvåvägspositioneringsalgoritmer

För att validera de teoretiska påståendena i Avsnitt 5.2 att den symmetriska dubbelsidiga tvåvägspositioneringen skulle ge stora förbättringar över en enkel tvåvägspositionering uppsattes följande experiment. Två enheter placerades med ett avstånd på 1 m respektive 5 m avstånd med fri siktlinje. 50 mätningar utfördes och grupperades vid de båda avstånden och därefter analyserades tiderna i `Matlab`.

Skillnaden mellan algoritmens uppskattade avstånd  $\hat{l}$  och det verkliga avståndet  $l$  här nedan betecknat  $\Delta l$  beräknades för den enkla tvåvägspositioneringen till,

$$\Delta l = \hat{l} - l = \frac{c \cdot (m_A - s_A - (s_B - m_B))}{2} - l$$

där  $c$  är ljusets hastighet och  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $s_A$  samt  $s_B$  beskriver sändnings- och mottagningstider enligt Figur 5.8. Skillnaden  $\Delta l$  för den dubbla tvåvägspositioneringen kan enligt samma princip beräknas enligt,

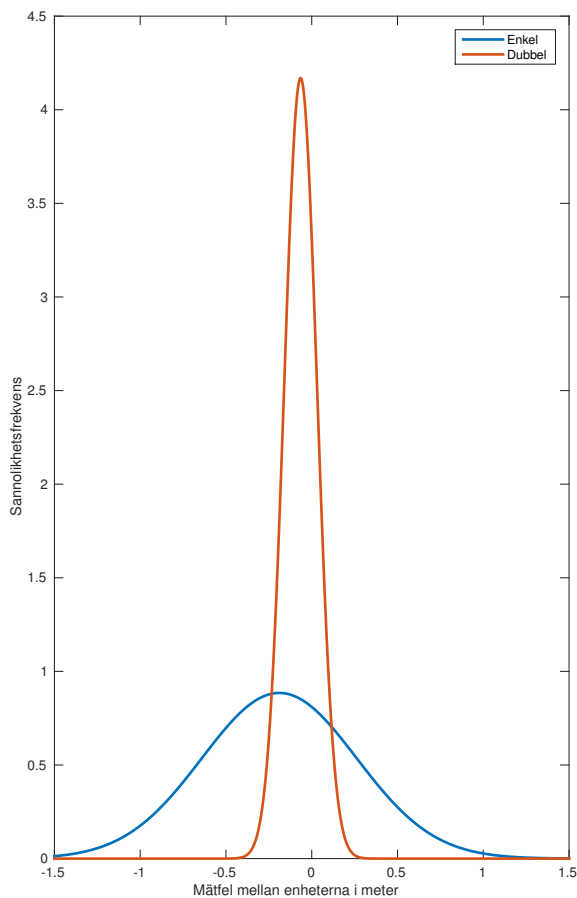
$$\Delta l = \hat{l} - l = c \cdot \left( \frac{m_A - s_A - (s_B - m_B)}{4} + \frac{m_C - s_B - (s_C - m_A)}{4} \right) - l$$

där  $m_C$  och  $s_C$  är sändnings- och mottagningstiden för det extra paket som den dubbelsidiga tvåvägspositioneringen använder sig av.

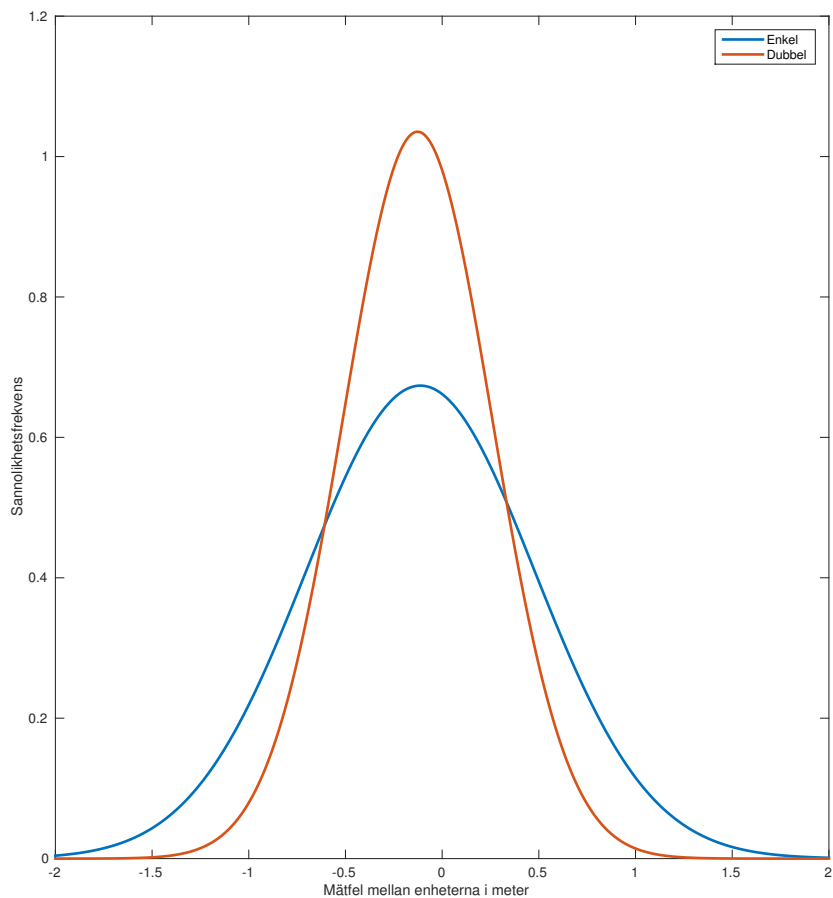
Dessa skillnader anpassades till en normalfördelning för varje avstånd enligt Figur 5.10. Den anpassade fördelningen är illustrerad i Figur 5.11, där skillnaden mellan den *enkla* tvåvägspositionering och den *dubbla* tvåvägspositioneringen jämförs. Y-axeln i figurerna beskriver med hur stor frekvens som mätfelet kommer förekomma, arean under denna kurva beskriver sannolikheten att en mätning kommer existera i areans intervall.

```
1 | x = -1.5:0.001:1.5;
2 | simple_pd = fitdist(simple_1m.DistanceError, 'Normal');
3 | simple_y = pdf(simple_pd, x);
4 | double_pd = fitdist(double_1m.DistanceError, 'Normal');
5 | double_y = pdf(double_pd, x);
6 |
7 | plot(x, simple_y, x, double_y, 'LineWidth', 2);
```

Figur 5.10: Utdrag av den `Matlab` kod som användes för att anpassa mätfelet till en normalfördelning.



(a) 1 meter.



(b) 5 meter.

Figur 5.11: Mätfelen normalfördelade i ett frekvensdiagram. En bättre noggrannhet/precision representeras av en smalare spik.

I Figur 5.11a syns en tydlig ökning av noggrannheten och precisionen av avståndsmätningarna vid användning av den dubbla tvåvägspositioneringsalgoritmen. Denna förbättring syns även i Figur 5.11b, där samma sekvens har utförts fast med ett längre avstånd. Förbättringen i Figur 5.11b är dock inte lika tydlig men beror troligen på en försämrad noggrannhet vid längre avstånd. Det som är tydligt i båda figurerna är att algoritmen har en positiv inverkan på resultatet oavsett avstånd även om dess effekt har mindre betydelse.

### 5.3.3 Experiment 3: Inverkan av siktlinjen för noggrannheten

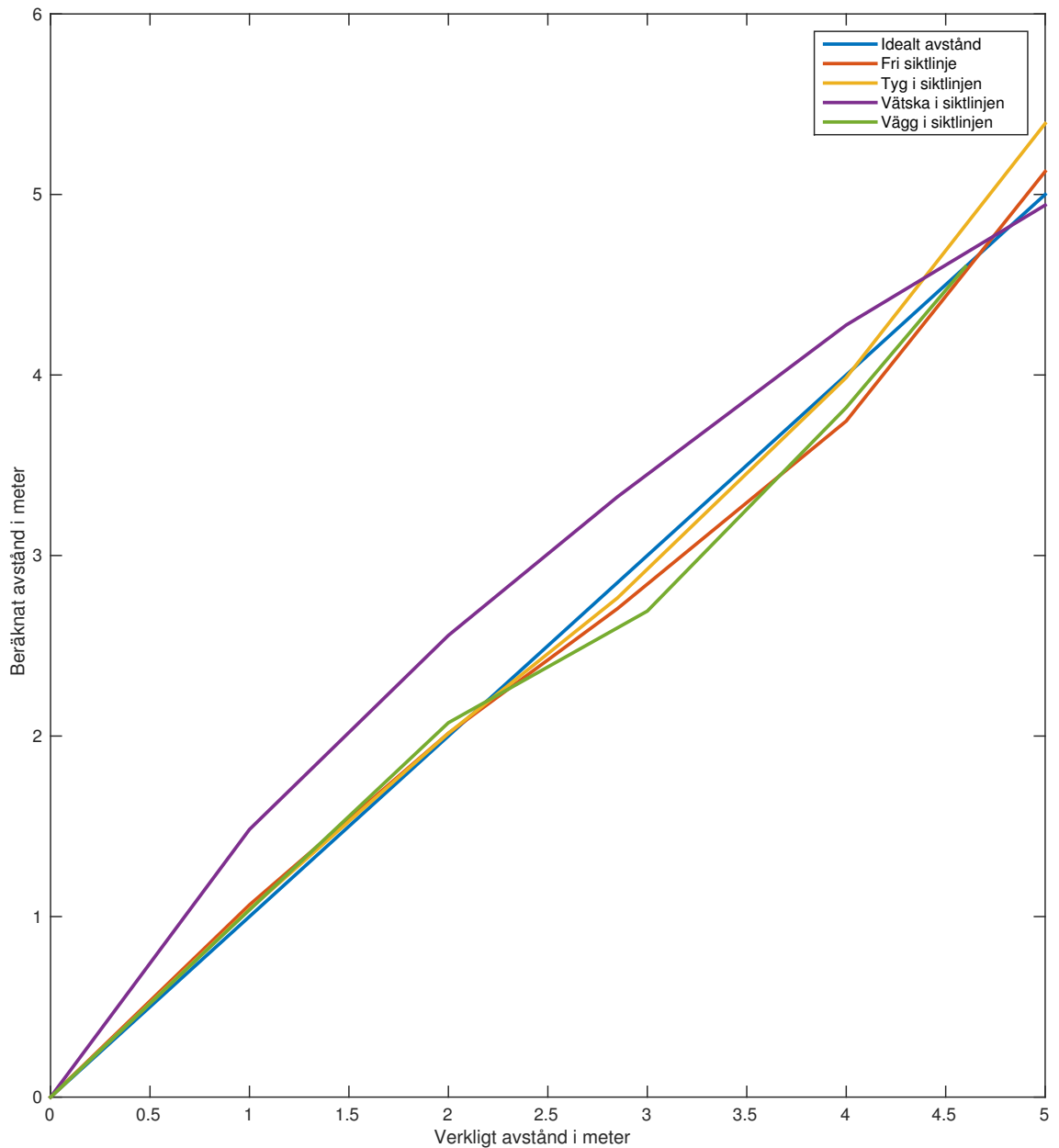
Som beskrivet i Avsnitt 3.5 och Avsnitt 4.1.5 har UWB bra egenskaper för att kunna penetrera de flesta hinder som kan finnas i en kontorsmiljö. Detta är en viktig egenskap för ett inomhuspositioneringssystem för att kunna minimera kostnader. Målet med detta experiment är därför att visa hur olika föremål stör noggrannheten. Därav sattes fyra olika scenarion upp,

- Helt fri siktlinje mellan de båda enheterna.
- Enheterna kläddes in i två tjocka tröjor för att undersöka teknikens gångbarhet som en kroppsnära teknik.
- I litteraturstudien framkom teknikens svårighet att penetrera vätskor och metaller, därav ställdes ett antal fyllda aluminiumburkar upp mellan enheterna.
- Enheterna placerades i två rum där möbler, kakel samt en tjockare gipsvägg fanns mellan de båda enheterna.

Alla mätningar gjordes med den symmetriska dubbelsidiga tvåvägspositioneringsalgoritmen tillsammans med de förbättringar som föreslogs i Avsnitt 5.3.1.

*Tabell 5.4: Tabell över medelvärdet av alla mätfel vid ett visst avstånd. Inga mätvärden togs genom en vägg för 1 meter eftersom USB-kabeln inte räckte ända fram.*

Avstånd mellan enheterna	Medelvärde av mätfel i meter			
	Fri siktlinje	Tyg	Vätska	Vägg
1 m	-0,0649	-0,0404	-0,4825	
2 m	-0,0154	-0,0150	-0,5574	-0,0736
3 m	0,1442	0,0849	-0,4752	0,3079
4 m	0,2552	0,0143	-0,2769	0,1802
5 m	-0,1271	-0,3928	0,0592	0,0006



Figur 5.12: Jämförelse mellan mätfelen för olika hinder i siktlinjen. En perfekt mätserie bör följa det ideala avståndet.

Mätningarna i Figur 5.12 och Figur 5.4 visar att noggrannheten minskar då siktlinjen blockeras av diverse föremål. Det är dock tydligt att inverkan av de fyllda aluminiumburkarna är störst vilket kan förklaras genom att teknikens RF-signaler inte kan penetrera vätskor så bra. Resterande mätningar visar att en relativ noggrannhet på  $\sim 0,3$  m går att upprätthålla för de övriga hindren som ställdes framför enheten, vilket validerar tekniken. En högre noggrannhet



skulle kunna uppnås med bättre kalibrering av enheterna, vilket diskuteras i Avsnitt 6.1.

## 6 Diskussion

I resultatet av litteraturstudien i Avsnitt 4 sammanställdes tillgängliga tekniker som visar att det finns många olika lösningar till ursprungsproblemet att identifiera och positionera en föremål inomhus. Detta bekräftar det initiala påståendet att det inte finns någon industristandard inom området. Det huvudsakliga syftet med studien var att välja ut den mest lovande tekniken till ett konceptbevis vilket i sin tur skulle ge företaget CGM en överblick på hur dagens marknad ser ut. Vilket skulle kunna hjälpa företaget lägga fram ett beställningsunderlag för en vald hårdvara. Valet av teknik till konceptbeviset är inte uppenbart och ultra-wide band är inte helt utforskat, det är dock en attraktiv teknik där mycket pekar på att inomhuspositioneringssystem i framtiden kommer använda tekniken i större utsträckning. Svagheten med studien är att det är inte djupgående utan relativt bred där olika tekniker är mer och mindre utforskade och där en del av forskningen inte är uppdaterad.

Utifrån företagets kravbild, där ett inomhuspositioneringssystem med en noggrannhet som är bättre än en meter, tillsammans med resultatet av litteraturstudien togs ett beslut att utveckla konceptbeviset med hjälp av UWB. Eftersom de flesta kommersiella leverantörer av ett inomhuspositioneringssystem med UWB baserade sina lösningar kring företaget *Decawaves* UWB-transceiver DW1000 valde även vi att gå denna väg. Decawave säljer färdiga integrerade kretsar samt evalueringskit, i brist på finansiering inhandlades en mer grundläggande plattform DWM1000 vilken kräver mer arbete att komma igång med. Därav har stora delar av arbetet med konceptbeviset bestått av utvecklingen av drivrutinen och inte fokuserat på hur man kan förbättra tekniken. Vilket i sin tur har givit oss en bättre inblick i hur tekniken fungerar samt dess fördelar och nackdelar men givit resultat över teknikens prestanda som definitivt går att förbättra.

Resultatet av konceptbeviset med UWB resulterade i olika experiment för att framhäva val av algoritmer samt teknikens fördelar. Utifrån dessa experiment så presterar tekniken överlag som utlovat av tillverkaren Decawave dock med sämre prestanda genom väggar samt vätskor, vilket vi kunde se i Avsnitt 5.3.3. På grund av tidsbrist har inte mer undersökningar gjorts i hur dessa fel ska minimeras. Det är dock med hög säkerhet troligt att en genomgående kalibrering av enheterna samt ytterligare optimering av positioneringsalgoritmerna skulle bidra till betydligt mindre fel. Arbetet med DW1000-modulen har försvårats kraftigt i bristande dokumentation ifrån Decawave där till exempel den programkod som medföljde evalueringskitet utför sekvenser som dokumentationen beskriver som skadliga för hårdvaran. Detta har gjort att utvecklingen av drivrutinen har stått stilla för att hitta minimala kodändringar vilket har gjort modulen ostabil. Vilket i sin tur har gjort vissa av experimentens mätningar opålitliga eftersom enheterna har ställt sig i ett dödsläge som kräver att enheten startas om.

Överlag har resultaten av båda de stora delarna potential att underlätta för CGM att göra ett medvetet beslut över vilken teknik som skulle kunna användas i vilket var huvudsyftet för detta arbete.

## 6.1 Fortsatt utveckling

Litteraturstudien kan utvecklas till att ta mer hänsyn till teknikernas komplexitet, tillgängligheten på experthjälp, och allmänt i vilken utsträckning som tekniken används i inomhuspositioneringssyfte. Dessutom tar studien inte hänsyn till lokala föreskrifter dels för att göra den mer generell men framförallt på grund av nödvändiga avgränsningar.

Konceptbevis utför i dagsläget avståndsbedömningen med hjälp av Matlab efter att alla tider har noterats av UWB-modulerna, nästa steg i ett positioneringssystem är att beräkna detta avstånd direkt på ankarnoderna och därefter samla avstånden i en resursserver med hjälp av t.ex. WIFI-kommunikation för att slutligen beräkna en position i rummet. För att få en bättre noggrannhet på avståndsbedömningen kan DW1000-modulen kan en rad åtgärder utföras,

- Kristalloscillatorn kan justeras med  $\pm 20 \mu\text{s/s}$  vilket direkt har en inverkan på avståndsbedömningen beskriven i Avsnitt 5.2. Utöver detta så kan kristalloscillatorn bytas ut på DW1000 så att en extern oscillator används istället, t.ex. så kan en temperaturkänslig oscillator användas om tillämpningen innehåller varierande temperatur.
- Spektrum och energinivåer kan justeras till gällande lokala regler och maximera den energi som får skickas ut på givet spektrum för att öka räckvidden.
- Antenfördröjningen kan justeras för att få en bättre tidsstämpel vid fördröjd sändning av paket.

För att ytterligare förbättra noggrannheten på systemet skulle även UWB kunna kombineras med t.ex. kameror eller IMU-sensorer. Det har under projektets gång påbörjats flertalet företag med huvudsyftet att göra *decawaves* produkter mer tillgängliga. Ett exempel är *Pozyx* som kombinerar en DW1000 med en IMU-sensor på 9-frihetsgrader samt en *STM32F4*-processor [42].

# Referenser

- [1] F. v. Diggelen och C. Abraham, *Indoor gps*, 2001.
- [2] J. Sommer, S. Lüders, S. Schmitt och W. Rosenstiel, “System-level power-accuracy trade-off in bluetooth low energy networks”. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, vol. 6905, s. 379–392, ISBN: 0302-9743.
- [3] C. Yang och H.-r. Shao, Wifi-based indoor positioning, *IEEE Communications Magazine* vol. **53**, nr 3 2015, 150–157, 2015.
- [4] Z. Şahinoğlu, S. Gezici och I. Güvenç, *Ultra-wideband positioning systems: Theoretical limits, ranging algorithms, and protocols*. New York; Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2008.
- [5] W. C. Susk, “A study of environment noise in ultra-wideband indoor position tracking”, diss., Clemson University, maj 2012.
- [6] J. Xu, M. Ma och C. L. Law, Cooperative angle-of-arrival position localization, *Measurement* vol. **59** 2015, 302–313, 2015, ISSN: 0263-2241. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114004035>.
- [7] NewsRx, *Patent application titled "time of arrival delay cancellations" published online*, 2015.
- [8] S. P. Banerjee, “Improving accuracy in ultra-wideband indoor position tracking through noise modeling and augmentation”, diss., Clemson University, dec. 2012.
- [9] B. D. Rigling, Urban rf multipath mitigation, *IET Radar, Sonar & Navigation* vol. **2**, nr 6 2008, 419–425, 2008.
- [10] A. H. Muqaibel, M. G. Amin och F. Ahmad, Target localization with a single antenna via directional multipath exploitation, *International Journal of Antennas and Propagation* vol. **2015** 2015, 2015.
- [11] T. W. Barrett, *History of ultrawideband (uwb) radar & communications: Pioneers and innovators*, 2000. URL: [http://www.ntia.doc.gov/legacy/osmhome/uwbtestplan/barret\\_history\\_\(piersw-figs\).pdf](http://www.ntia.doc.gov/legacy/osmhome/uwbtestplan/barret_history_(piersw-figs).pdf).
- [12] F. C. Commission, *Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems*, 2002. URL: [http://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering\\_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf](http://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf).
- [13] P.-. och telestyrelsen, *Post- och telestyrelsens föreskrifter om undantag från tillståndsplikt för användning av vissa radiosändare*, 2014. URL: [http://www.pts.se/upload/Foreskrifter/Radio/PTSFS-2014\\_5-undantag-tillstandsplikt-rattad.pdf](http://www.pts.se/upload/Foreskrifter/Radio/PTSFS-2014_5-undantag-tillstandsplikt-rattad.pdf).
- [14] —, *Trådlösa lan en teknisk marknadsbeskrivning*, 2015. URL: [https://www.pts.se/upload/Documents/SE/WLAN\\_tekn\\_marknbeskrivning\\_2004\\_12.pdf](https://www.pts.se/upload/Documents/SE/WLAN_tekn_marknbeskrivning_2004_12.pdf).
- [15] L. Mainetti, L. Patrono och I. Sergi, “A survey on indoor positioning systems”, FESB, University of Split, 2014, s. 111–120.
- [16] Wikipedia, *Wi-fi - wikipedia, the free encyclopedia*, 2015. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>.
- [17] P. Kontkanen, P. Myllymaki, T. Roos, H. Tirri, K. Valtonen och H. Wettig, “Topics in probabilistic location estimation in wireless networks”, vol. 2, 2004, 1052–1056 Vol.2, ISBN: 0780385233; 9780780385238.

- [18] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee och J. Liu, Survey of wireless indoor positioning techniques and systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* vol. **37**, nr 6 2007, 1067–1080, 2007.
- [19] AeroScout, *Rfid enabled engine for accurate location determination | aeroscout*, 2015. URL: <http://www.aeroscout.com/aeroscout-engine>.
- [20] X. Li och K. Pahlavan, Super-resolution toa estimation with diversity for indoor geolocation, *IEEE Transactions on Wireless Communications* vol. **3**, nr 1 2004, 224–234, 2004.
- [21] S. C. Oziel Hernandez Varun Jain och P. Bhargava, *Position location monitoring using ieeer 802.15.4/zigbee technology*, 2015. URL: <https://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/brochure/PositionLocationMonitoring.pdf>.
- [22] L. Luoh, Zigbee-based intelligent indoor positioning system soft computing, *Soft Computing* vol. **18**, nr 3 2014, 443–456, 2014.
- [23] J.-S. Gutmann, P. Fong, L. Chiu och M. E. Munich, “Challenges of designing a low-cost indoor localization system using active beacons”, IEEE, 2013, s. 1–6, ISBN: 2325-0526.
- [24] F. Tlili, N. Hamdi och A. Belghith, “Accurate 3d localization scheme based on active rfid tags for indoor environment”, IEEE, 2012, s. 378–382.
- [25] OpenRTLS, *Homepage | openrtls*, 2015. URL: <https://openrtls.com>.
- [26] S. Lee, Y. Jeon, S. Choi, M. S. Han och K. Cho, Gigabit uwb video transmission system for wireless video area network, *IEEE Transactions on Consumer Electronics* vol. **57**, nr 2 2011, 395–402, 2011.
- [27] E. Ayar, “Uwb wireless video transmission technology in medical applications”, NDSsi White Paper, tekn. rapport, aug. 2010.
- [28] M. Yavari och B. G. Nickerson, “Ultra wideband wireless positioning systems”, Faculty of Computer Science, tekn. rapport, mars 2014.
- [29] C. Gentile och A. Kik, A comprehensive evaluation of indoor ranging using ultra-wideband technology, English, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* vol. **2007** 2007, 2007. URL: <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/pdf/1687-1499-2007-086031.pdf>.
- [30] B. SIG, Basics | bluetooth technology website, URL: <http://www.bluetooth.com/Pages/Basics.aspx>.
- [31] Z. Weissman, *Indoor location, white paper*, 2004. URL: [http://www.tadlys.co.il/media/downloads/Indoors\\_Location\\_Systems.pdf](http://www.tadlys.co.il/media/downloads/Indoors_Location_Systems.pdf).
- [32] F. Ijaz, H. K. Yang, A. W. Ahmad och C. Lee, “Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems”, IEEE, 2013, s. 1146–1150, ISBN: 1738-9445.
- [33] M. Addlesee, R. Curwen, S. Hodges, J. Newman, P. Steggles, A. Ward och A. Hopper, Implementing a sentient computing system, *Computer* vol. **34**, nr 8 2001, 50–56, 2001.
- [34] M. Hazas och A. Hopper, Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning, *IEEE Transactions on Mobile Computing* vol. **5**, nr 5 2006, 536–547, 2006.
- [35] X. Liu, J. Peng och T. Liu, “A novel indoor localization system based on passive rfid technology”, vol. 1, IEEE, 2011, s. 4285–4288.
- [36] G. Monaci och A. Pandharipande, “Indoor user zoning and tracking in passive infrared sensing systems”, IEEE, 2012, s. 1089–1093, ISBN: 2219-5491.
- [37] E. Amos, *The playstation eye*, [Elektronisk bild], 2012. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/PlayStation\\_Eye#/media/File:PlayStation-Eye.png](http://en.wikipedia.org/wiki/PlayStation_Eye#/media/File:PlayStation-Eye.png).

- [38] S. Tilch och R. Mautz, Clips - a camera and laser-based indoor positioning system, *Journal of Location Based Services* vol. **7**, nr 1 2013, 3, 2013.
- [39] *Dw1000 user manual*, 2.04, Decawave Ltd, 2015.
- [40] *Ieee standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans)*, 2011.
- [41] R. Hach, "Symetric double sided -two way ranging", *Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2005.
- [42] Pozyx, *Pozyx - centimeter positioning for arduino*, 2015. URL: <http://www.pozyx.io/>.
- [43] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor och Z. Sahinoglu, Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks, *IEEE Signal Processing Magazine* vol. **22**, nr 4 2005, 70–84, 2005.
- [44] M. Ferreira, J. Bagaric, J. M. Lanza-Gutierrez, S. Priem-Mendes, J. S. Pereira och J. A. Gomez-Pulido, On the use of perfect sequences and genetic algorithms for estimating the indoor location of wireless sensors, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2015, 2015.