



Inomhuspositionering UWB

Examensarbete inom Högskoleingenjörprogrammen data- och elektroteknik

Henrik Johansson
Jonatan Kornhill

EXAMENSARBETE HÖGSKOLEINGENJÖR 2015

Inomhuspositionering UWB

Henrik Johansson
Jonatan Kornhill



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för data- och informationsteknik.
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

© Henrik Johansson, Jonatan Kornhill, 2015.

Handledare: Jan Jonsson, Institutionen för data- och informationsteknik
Examinator: Lars Svensson, Institutionen för data- och informationsteknik

Examensarbete Högskoleingenjör 2015
Institutionen för data- och informationsteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Institutionen för data- och informationsteknik Göteborg, 2015

Bilden på framsidan visar från höger en Iteaduino Uno, en shield med DWM1000 chip och en sammansatt modul med en Nokia 5110 display.

Abstract

In today's connected world, we have grown accustomed to the possibility to determine our own location on the globe by utilizing the GPS-system through various portable electronic devices such as cellphones, laptops, and tablets. Indoor positioning, however, is an area where GPS falls short, which is why already commercially established technologies like Bluetooth and Wi-Fi are normally used instead.

While there is widespread access to these technologies, their ability to pinpoint an exact location of a given unit is limited. Because the technique used is based on measuring signal strength, they merely indicate of which room the device currently occupies, rather than give an actual distance to a point of reference.

This report will center around a less well-known and not yet widespread technology: Ultra Wideband. The precision of distance measuring when using the technique *Symmetric double-sided two-way ranging* with two Ultra Wideband transceivers will be tested and evaluated. This technique will then be applied in a trilateration scheme for indoor positioning purposes.

Sammanfattning

I dagens ständigt uppkopplade samhälle är vi vana vid att med portabla elektroniska verktyg som mobiltelefoner, bärbara datorer eller surfplattor, snabbt och enkelt kunna ta reda på vår position på jorden med hjälp av GPS-systemet. Inomhuspositionering är dock ett område där GPS-tekniken är otillräcklig och därför är Bluetooth och Wi-Fi, som redan kommersiellt etablerade tekniker, de som vanligen används.

Medan tillgången till dessa tekniker är stor är deras förmåga att bestämma en exakt position för en given enhet begränsad. Eftersom konceptet bygger på att mäta signalstyrkan erhålles endast en indikation i vilket rum ett objekt befinner sig, snarare än ett avstånd till en referensposition.

I denna rapport undersöks en mindre känd och ännu inte kommersiellt etablerad teknik: Ultra Wideband. Precisionen vid tillämpning av *Symmetric double-sided two-way ranging* med moduler för sändning och mottagning av Ultra Wideband-signaler testas och utvärderas. Eftersom avståndsmätning är endast en del av positioneringen testas även integration av flera UWB-enheter som noder i ett trilaterationsarrangemang.

Förord

Denna rapport är examensarbetet för Data- och Elektroingenjörprogrammen vid Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg under vårterminen 2015. Arbetet utfördes hos Cybercom i Göteborg.

Vi vill ge ett stort tack till vår handledare Hans Forsberg på Cybercom för vägledning, nya infallsvinklar och intressanta diskussioner. Vi vill även tacka Professor Jan Jonsson, vår handledare från Chalmers, för hjälp med utformning av rapporten samt stöd och tips i arbetet.

Henrik Johansson och Jonatan Kornhill, Göteborg, juni 2015

Innehåll

Figurer	xi
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Mål	1
1.3.1 Avståndsmätning	1
1.3.2 Adressering	2
1.3.3 Fördjupning i mån av tid	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Metod	3
2.1 Symmetric double-sided two-way ranging	3
2.2 Adressering	3
2.3 Grafisk presentation	3
2.4 Förbättrad noggrannhet	3
3 Teknisk Bakgrund	5
3.1 Ultra Wideband	5
3.1.1 Beskrivning	5
3.1.2 Karaktäristik och fördelar	6
3.2 Identifikation	6
3.2.1 MAC	6
3.2.2 PAN	7
3.3 Arduino	7
3.3.1 Shields	8
3.4 SPI	8
3.5 DWM1000	8
3.5.1 DW1000	9
4 Genomförande	11
4.1 Avståndsmätning	11
4.1.1 Two-way ranging	11
4.1.2 Symmetric double-sided two-way ranging	12
4.1.3 Fördröjd transmission	14
4.2 Antennfördröjning	15
4.3 Meddelandeformat	15

4.4	Dynamisk adressering	16
4.5	Trilateration	17
4.6	Stativ	20
5	Resultat	21
5.1	Punkt till punkt	21
5.2	Trilateration	24
5.3	Adressering	24
6	Slutsats	27
6.1	Kritisk diskussion	27
6.2	Teknikens roll	27
6.3	Fortsatt utveckling	28
	Litteraturförteckning	29
A	Beteckningar	I
B	Tidsplanering	III
C	Flödesschema Tag	V
D	Flödesschema Anchor	VII

Figurer

3.1	Maximal räckvidd och datahastighet för WLAN- och WPAN-standarder. Från [15], Återgiven med tillstånd.	6
3.2	Låg sändeffekt låter UWB verka över ett brett spektrum utan att störa signaler på de band som överlappas. Från [15], Återgiven med tillstånd.	7
3.3	PAN-adress.	7
3.4	SPI Master Slave kommunikation	8
3.5	DWM1000 modul monterad på en Arduino shield	9
4.1	Time of flight	11
4.2	Two-way ranging	12
4.3	Graf över hur klockdrift hos olika oscillatorer ger upphov till avvikelser sinsemellan respektive räknare	13
4.4	Symmetric double-sided two-way ranging	13
4.5	Antenna delay	15
4.6	Meddelandeformatet som paketeras i DW1000	16
4.7	MAC-adress format enligt IEEE 802.15.4-2011	16
4.8	Frame Control fältet i MAC-ramen enligt IEEE 802.15.4-2011	16
4.9	En okänd position i förhållande till en känd position	17
4.10	Två kända positioner	17
4.11	Tre kända positioner	18
4.12	Stativ för montering av noder	20
5.1	Felet uppmätt i cm vid början av projektet	22
5.2	Felet uppmätt i cm efter implementeringen av <i>Symmetric double-sided two-way ranging</i>	22
5.3	Verkligt värde jämfört med det uppmätta värdet vid början i projektet	23
5.4	Verkligt värde jämfört med det uppmätta värdet efter implementeringen av <i>Symmetric double-sided two-way ranging</i>	23
5.5	Grafiska fönstret som visar vart noderna befinner sig. Den svarta är Tag-noden och dem röda är noder med fix position	24
B.1	Tidsplan	III
C.1	Flödeshema för Tag-noden	V
D.1	Flödeshema för Anchor-noden	VII

1

Inledning

1.1 Bakgrund

Examensarbetet är inom området inomhuspositionering och kommer att utföras på konsultföretaget Cybercom group. Cybercom group är ett konsultföretag med över 1200 anställda i sju olika länder med fokus i Norden. Företaget specialiserar sig i första hand på teknik som avser digital kommunikation och uppkoppling. Kontoret i Göteborgsregionen utgör, tillsammans med de i Huskvarna och Linköping, Mittregionen i Sverige, vilket är den näst största efter Nordöstregionen. Huvudfokus ligger här i verksamheten "Connected Engineering", där Cybercom hjälper produktutvecklingsföretag att förbättra sin verksamhet i en numera uppkopplad omvärld. Nyckelkunder är Ericsson, Volvo AB och Volvo Cars. Cybercom är upptagna med konsultverksamhet och flera pågående in-house projekt och vill därför ha hjälp av examensarbetare för att utveckla ett av dessa projekt inom området inomhuspositionering. Mer specifikt vill de undersöka potentialen för inomhuspositionering med hjälp av Ultra Wideband-teknik som ännu inte haft samma genomslag på marknaden som till exempel Bluetooth och Wi-Fi, även om tekniken har flera fördelar gentemot dessa.

1.2 Syfte

Det primära syftet med projektet är att undersöka Ultra Wideband (UWB) vid inomhuspositionering och hur avståndsprecisionen mellan två punkter kan förbättras.

1.3 Mål

1.3.1 Avståndsmätning

Det som kommer ha högst prioritet under arbetet är att etablera punkt till punkt avståndsmätning med en noggrannhet $< \pm 10$ centimeter. UWB-chiptillverkaren DecaWave hävdar själva att de lyckats åstadkomma den här noggrannheten med ett av sina utvecklingskit och därför eftersträvas detta även i det här projektet. Cybercom tillhandahåller en kod som genererar redan fungerande, punkt till punkt mätning, dock med stor felmarginal. Alltså har korten redan initierats med setup-rutin för DWM1000 modulen, SPI och LCD-skärm.

1.3.2 Adressering

För att möjliggöra kommunikation mellan flera noder är ett andra mål att etablera en handskakningsprocess och adresseringsmetodik. En sådan implementation skall göra det möjligt att räkna ut nodernas positioner relativt varandra.

1.3.3 Fördjupning i mån av tid

Vid lyckad implementation av ett kommunikationsprotokoll skall detta utnyttjas för att producera en grafisk representation av Tag-nodens position relativt tre noder. De tre noderna placeras ut på kända positioner och kommer fungera som radiofyrar till en rörlig enhet.

1.4 Avgränsningar

Från företaget erhålles en Iteduino Uno och passande sköld med ett UWB-chip från DecaWave. Det kommer inte att läggas någon tid på att hitta andra lämpliga kort. Det kommer inte heller fokuseras på andra tekniker inom positionering så som Bluetooth eller Wi-Fi.

2

Metod

Vid arbetets början tillhandahålls kod för avståndsmätning mellan två noder, så kallad *two-way ranging*, som skall utvecklas och optimeras. De första arbetet som görs kommer bestå av granskning av den existerande koden och undersökning av funktionaliteten hos modulen DWM1000 och chippet DW1000. Därefter följer även informationssökning om Ultra Wideband och trilateration.

2.1 Symmetric double-sided two-way ranging

För att erhålla högre noggrannhet och stabilare värden över tid kommer tekniken *symmetric double-sided two-way ranging* att användas. Tekniken är en utökning av *two-way ranging* med ytterligare en meddelandetransaktion vilket ger möjlighet att minimera de fel som uppstår på grund av skillnader mellan respektive nods faktiska klockfrekvens och den nominella klockfrekvensen. På så vis förväntas precisionen i avståndsmätningen öka.

2.2 Adressering

För att kunna kommunicera mellan flera olika noder kommer enheterna att ges specifika adresser och filtrera bort meddelanden som inte är avsedda för dem. Det skall gå att dynamiskt hitta noder i omgivningen för att sedan spara deras adresser och rita en karta där positionerna markeras.

2.3 Grafisk presentation

För att representera nodernas positioner relativt varandra kommer möjligheter i form av redan existerande verktyg/program att undersökas. Om det visar sig att det inte finns några program som passar ändamålet kommer ett eget enklare program att skrivas med hjälpbibliotek i Java.

2.4 Förbättrad noggrannhet

I mån av tid kommer andra faktorer undersökas som kan tänkas påverka mätresultatet. Några exempel på sådana källor är NLOS, störningar från andra elektriska apparater, eller användning av annan typ av klockoscillator.

3

Teknisk Bakgrund

3.1 Ultra Wideband

3.1.1 Beskrivning

Ultra Wideband är en teknik för trådlös dataöverföring som anses vara relativt ny men har en historia av utveckling som sträcker sig tillbaka till 60-talet [18][15]. Faktum är att den allra första trådlösa kommunikationen på tidigt 1890-tal var en, om än primitiv, UWB-signalöverföring. Dåtidens UWB-teknik kunde ej möta de viktigaste kraven på trådlös kommunikation: en metod för att återvinna data från en överföring och låta alla användare dela på resurserna i frekvensspektrumet på ett effektivt sätt. Teknikutvecklingen för kommersiell trådlös kommunikation gick mot så kallade smalbandsbaserade teknologier. UWB har fram till år 2002 mestadels använts för bland annat radar, militära applikationer för lokalisering och kommunikation, samt trådlösa nätverk.

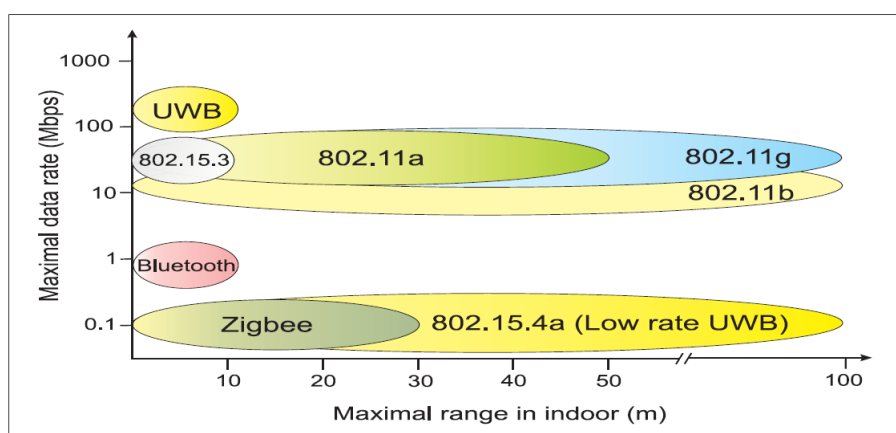
Från 2002 har tekniken tilldragit sig ett nytt intresse från industrier och akademiker efter att *Federal Communication Commission* (FCC) tillät kommersiellt och olicensierat bruk av UWB i USA, givet en spektralmask för att begränsa spektraleffekttätheten i transmissionen (defineras som dBm/MHz) till regelrätta nivåer. Detta gör att redan existerande teknologier vars spektrum överlappas inte störs. På senare år har UWB-teknikens utveckling riktats mot trådlös kommunikation och elektronik för konsumentbruk.

Som nämnt kallas de vanligare teknikerna för smalband. Signaler av den här typen moduleras till en bärvåg, typiskt med mycket högre frekvens än själva meddelandesignalen, som bär meddelandet från sändare till mottagare. Energin i signalen sprids ut över bandbredden men är koncentrerad kring bärvågsfrekvensen, även kallad centerfrekvensen, och avtar ju längre från denna frekvens vi förflyttar oss. Den form av UWB som används i arbetet som ligger till grund för den här rapporten, Impulse-UWB (I-UWB), har ingen bärvåg. Signalen skickas genom extremt korta pulser, typiskt i en storleksordning mindre än en nanosekund. Fourier-transformen för en sådan kort puls innehåller en mängd sinuskomponenter och har följaktligen en stor bandbredd, i storleksordningen gigahertz. Energin i signalen är alltså inte koncentrerad till någon specifik frekvens, utan utspridd över hela bandbredden. Enligt beslutet som FCC tog 2002 har ett 7.5 GHz brett spektrum från 3.1 GHz till 10.6 GHz allokerats till olicensierade UWB-applikationer. Den officiella definitionen för att en överföring skall klassas som UWB är att den har en bandbredd på minst

500 MHz eller att bandbredden är minst 20 procent av dess centerfrekvens [19],[15].

3.1.2 Karaktäristik och fördelar

Det finns flera anledningar till varför UWB väcker intresse hos utvecklare och forskare. Den möjliga dataöverföringshastigheten är högre jämfört konventionella tekniker. På avstånd kortare än 10 meter kan den överstiga 200 Mbit/s [16] vilket är en attraktiv egenskap för tillverkare av enheter avsedda för stora dataöverföringar, till exempel trådlös video-streaming. Det finns också möjlighet att offra överföringshastighet i utbyte mot en längre räckvidd upp mot 100 m. Figur 3.1 illustrerar olika standarders datahastighet och räckvidd.



Figur 3.1: Maximal räckvidd och datahastighet för WLAN- och WPAN-standarder. Från [15], Återgiven med tillstånd.

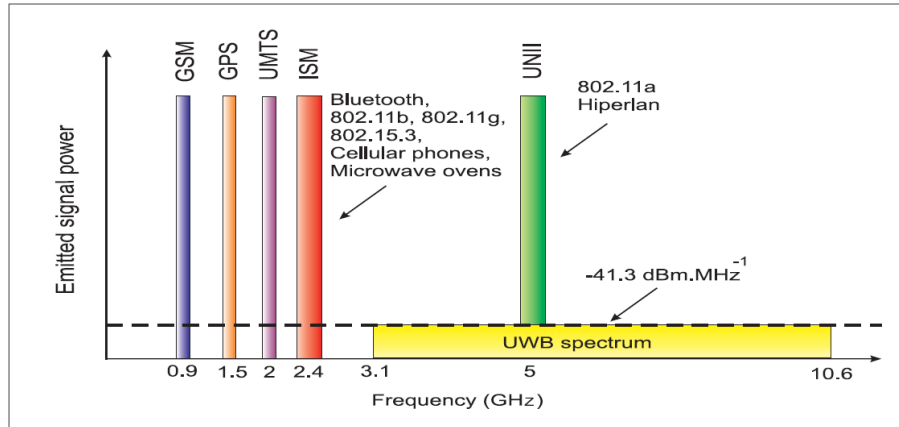
En stor bandbredd gör signalen motståndskraftig mot så kallad flervägsutbredning [18],[15],[20]. När signalen reflekteras mot väggar och andra ytor tar den olika vägar fram till mottagaren, vilket resulterar i destruktiv interferens och försämrad signalstyrka. Signalerna har hög upplösning i tidsdomänen [17] vilket utnyttjas i lokalisering och precisions applikationer.

Det spektrum som allokerats för UWB-applikationer överlappar redan existerande allokeringar, men effekttätheten är låg och uppfattas endast som brus av andra tjänster som sänder trådlöst på samma frekvenser [19],[15]. Det behövs alltså inget eget frekvensband för UWB-applikationer eftersom tekniken tillåter dessa att dela band med redan etablerade teknologier. Se figur 3.2.

3.2 Identifikation

3.2.1 MAC

Media Access Control (MAC) är ett koncept för att adressera och kontrollera vilka noder som skall få tillgång till ett gemensamt medium och är gränssnittet mellan de



Figur 3.2: Låg sändeffekt låter UWB verka över ett brett spektrum utan att störa signaler på de band som överlappas. Från [15], Återgiven med tillstånd.

logiska och fysiska lagren. MAC-adressen identifierar olika nätverksanslutna komponenter med en fix adress som till skillnad från exempelvis IP-adresser inte får ändras efter produktion [12]. För att göra detta möjligt så ansöker tillverkare om lediga adresser hos "IEEE Registration Authority" där dessa delas ut för att sedan registreras som upptagna [11].

3.2.2 PAN

Personal Area Network (PAN) är ett nätverk med kort räckvidd, ofta endast några få meter, som kan används för kommunikation direkt mellan enheter som till exempel en telefon och en skrivare eller för att koppla upp enheterna till ett större nätverk [13].

I standarden IEEE 802.15.4 är PAN-adressen är på 32 bitar där de 16 mest signifikanta bitarna identifierar nätverket och de resterande identifierar enskilda enheters adresser [3]. Se figur 3.3.

PAN																															
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
PAN ID																Short Address															

Figur 3.3: PAN-adress.

3.3 Arduino

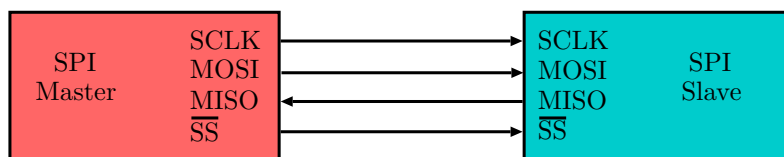
Arduino är en utvecklingsmiljö med både öppen hård- och mjukvara som skall vara ett enkelt verktyg för att läsa och styra hårdvara. Majoriteten av korten tillhör Mega-serien, vilka är baserade på Atmel AVR, men det finns även andra Arduino-kort exempelvis Arduino Due med en Atmel ARM cortex-M3 processor [6],[4]. I projektet används en Iteduino UNO vilket är en krets baserad på en Arduino Uno men med valbar driftspänning på 3 eller 5 volt [5].

3.3.1 Shields

Arduino Shields, eller sköldar, är kretskort som monterars på mikro datorerna för att utöka användningsområdena, exempelvis för att styra motorer, GPS-mottagning eller läsa och skriva till minneskort [7],[8]. Kommunikationen mellan värdenheten och skölden kan ske på olika sätt, exempelvis med SPI, I2C eller seriellt. Eftersom kommunikationen kan ske med bussar är det möjligt att stapla flera sköldar ovanpå varandra [9].

3.4 SPI

Serial Peripheral Interface (SPI) är ett vanligt använt kommunikationsprotokoll i inbyggda system som använder sig av synkron seriell överföring. De komponenter som skall användas kopplas alla in på samma buss med en av dem som master och resterande som slaves. För att upprätta kommunikation används 4 ledningar: Serial-Clock (SCLK), Master-Out Slave-In (MOSI), Master-In Slave-Out (MISO) och Slave-Select (SS).

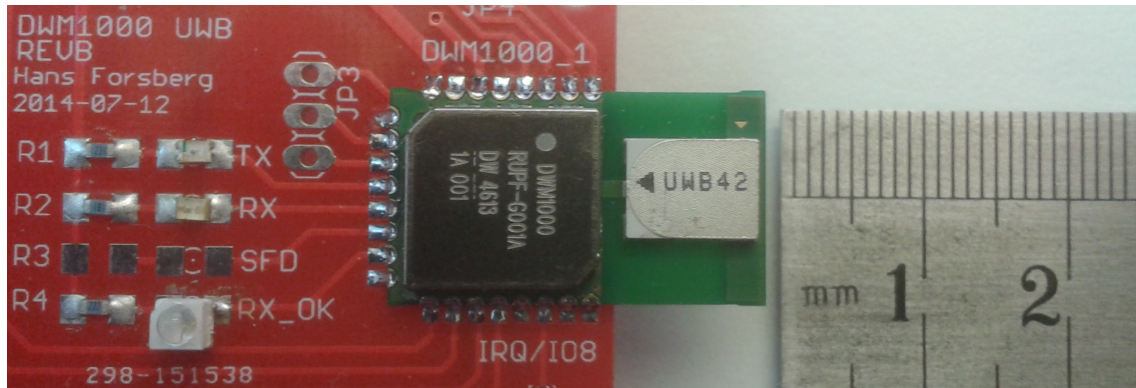


Figur 3.4: SPI Master Slave kommunikation

Mastern använder Serial-Clock ledningen för att ge alla enheter en gemensam klocka att synkronisera mot. Sedan väljs vilken slavenhet som skall få tillträde till bussen genom att Mastern sätter en låg signal på dess Slave-Select och en hög på samtliga andra. För att få data så läser Mastern värden från MISO och för att skicka skriver den till MOSI. Likadant sker på slavsidan men där läses istället värdena från MOSI och skrivs till MISO. På det här sättet är det möjligt att kommunicera i båda riktningarna samtidigt [10].

3.5 DWM1000

DWM1000 är en modul byggd kring DecaWaves DW1000 krets. Utöver denna ingår en klocka, en antenn och dess kringhörande logik. Modulen behöver en matningsspänning mellan 2.8 och 3.6 volt för att fungera och protokollet SPI används för att läsa och skriva till kretsen. Den trådlösa kommunikationen använder sig av Ultra Wideband och har fyra tillgängliga frekvensband mellan 3.5 och 6.5 GHz. Hastigheter upp till 6.8 Mbit/s kan nås och vid avståndsmätning kan en precision på ± 10 centimeter uppnås [1].



Figur 3.5: DWM1000 modul monterad på en Arduino shield

3.5.1 DW1000

DW1000 är ett integrerat chip för trådlös kommunikation med Ultra Wideband. Chippet har en analog och en digital del där den digitala används för att kommunicera med en extern värd. Den analoga delen utgörs av en transceiver, som både kan sända och ta emot RF-signaler. För att undvika sändning och mottagning samtidigt används en brytare som kopplar sändaren eller mottagaren till antennen.

Chippet kan sättas i olika strömsparlägen, bland andra SLEEP och DEEP SLEEP, där strömåtgången är $2 \mu\text{A}$ respektive 100 nA . På chippet finns även temperatur- och spänningsmätare [2].

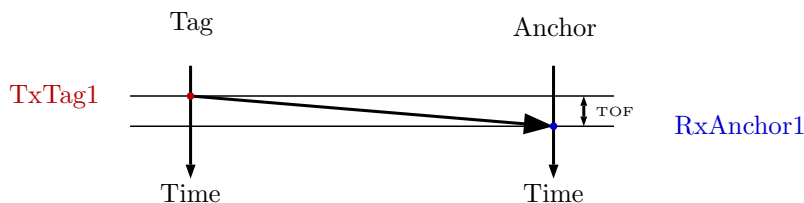
4

Genomförande

4.1 Avståndsmätning

DWM1000-modulen har flera funktioner för att göra det möjligt att beräkna avståndet mellan två noder. Med hjälp av en integrerad klockoscillator är det möjligt att registrera tidsstämplar när meddelanden sänds och tas emot. Nedan följande arrangemang är alla beroende av denna funktionalitet.

För att mäta avståndet mellan två punkter kan två noder användas, Tag och Anchor, som har varsin räknare vars klockor är synkroniserade. När Tag-noden skickar ett meddelande sparas tidsstämpelein, $TxTag1$, och när Anchor-noden tar emot ett meddelande sparas tiden, $RxAnchor1$. Se figur 4.1.

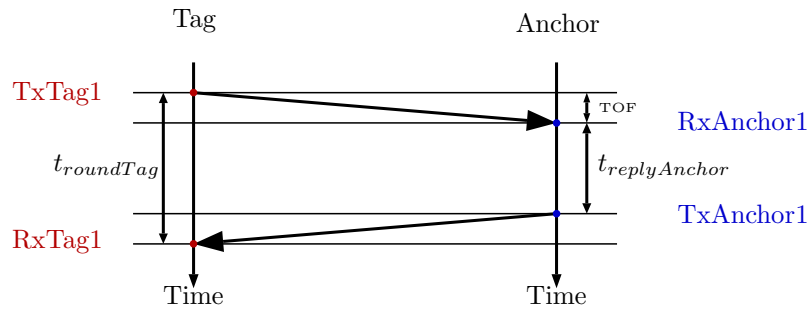


Figur 4.1: Time of flight

Tiden det tar för meddelandet att komma fram, *time of flight* (TOF), blir då $TOF = RxAnchor1 - TxTag1$ och avståndet, d , mellan noderna blir $d = TOF \cdot c \cdot f_{clk}$ där c är ljusets hastighet i vakuum och f_{clk} är klockfrekvensen.

4.1.1 Two-way ranging

Problemet med föregående exempel är att utan en metod för synkronisering av de båda enheternas klockor erhålles tidstämplar på respektive sida som inte stämmer överens. Istället går det att med två separata klockor, en för Tag-noden och en för Anchor-noden, beräkna TOF genom att Anchor-noden svarar Tag-noden med ett meddelande. Se figur 4.2.



Figur 4.2: Two-way ranging

Det första meddelandet skickas från Tag-noden vid tiden $TxTag1$. Anchor-noden tar emot meddelandet vid $RxAnchor1$ och sänder det andra meddelandet vid $TxAnchor1$ som tas emot av Tag-noden vid $RxTag1$. Med dessa värden kan tiden räknas ut som åtgick från att Tag-noden sände sitt meddelande och fick tillbaka ett svar från Anchor-noden, $t_{roundTag}$, samt den tid det tog för Anchor-noden att svara, $t_{replyAnchor}$. TOF kan då beräknas enligt

$$2 \cdot TOF = t_{roundtripTag} - t_{replyAnchor}$$

\Rightarrow

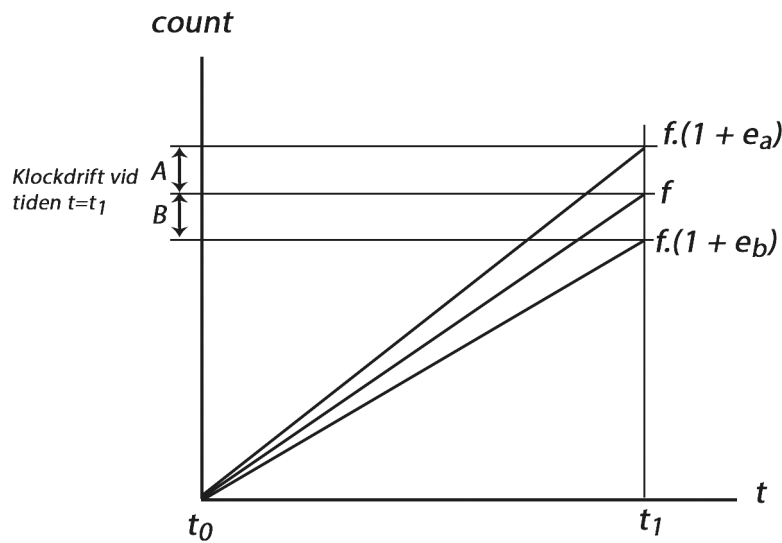
$$TOF = \frac{t_{roundTag} - t_{replyAnchor}}{2}$$

4.1.2 Symmetric double-sided two-way ranging

I teorin fungerar ovanstående arrangemang för att klocka tiden det tar för signalen att propagera mellan två enheter. I praktiken uppstår avvikelser i mätresultatet på grund av så kallad klockdrift. Klockdrift är ett resultat av att kristalloscillatorerna är icke-ideala och att deras faktiska klockfrekvens skiljer sig från den nominella klockfrekvensen [22]. Det mest signifikanta felet ges av

$$Error = \frac{1}{2} t_{replyAnchor} (E_{tag} - E_{anchor})$$

där E_{tag} och E_{anchor} är räknarnas avvikelse hos respektive enhet. Figur 4.3 illustrerar hur två enheters räknare, A och B, i ett *two-way ranging* arrangemang avviker från en räknare med nominell frekvens f .

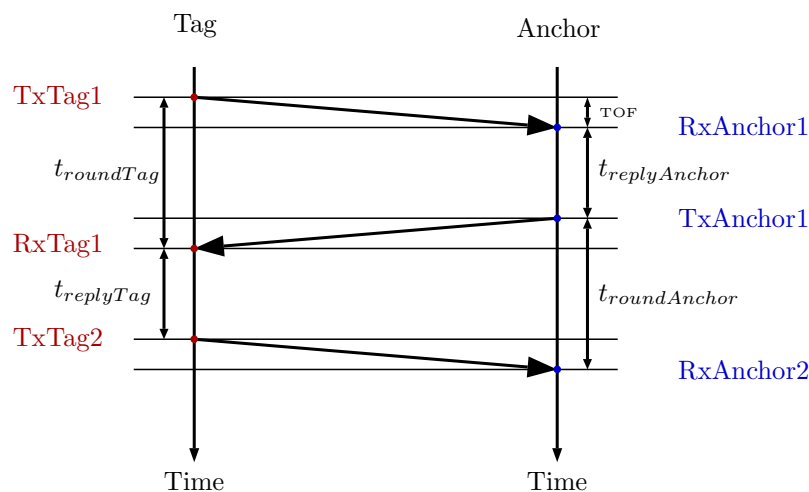


Figur 4.3: Graf över hur klockdrift hos olika oscillatorer ger upphov till avvikelser sinsemellan respektive räknare

Genom att introducera ytterligare ett meddelande, i så kallad *symmetric double-sided two-way ranging*, vars arrangemang visas i figur 4.4 kan felet minskas. Felet kommer då istället ges av

$$Error = \frac{1}{4} \Delta t_{reply} (E_{tag} - E_{anchor})$$

Här har skillnaden i svarstid Δt_{reply} stor inverkan på felet, till skillnad från tidigare då felet hade ett beroende av $t_{replyAnchor}$. Det eftersträvas därför att ha svarstiden hos båda enheterna så lika som möjligt, samt att de är så korta som möjligt.



Figur 4.4: Symmetric double-sided two-way ranging

Avståndet mellan noderna, d , i meter beräknas nu enligt

$$d = TOF \cdot c \cdot f_{clk}$$

där c är ljusets hastighet i vakuum och f_{clk} är klockfrekvensen.

$$4 \cdot TOF = t_{roundTag} - t_{replyTag} + t_{roundAnchor} - t_{replyAnchor}$$

$$t_{roundTag} = RxTag1 - TxTag1$$

$$t_{replyTag} = TxTag2 - RxTag1$$

$$t_{replyAnchor} = TxAnchor1 - RxAnchor1$$

$$t_{roundAnchor} = RxAnchor2 - TxAnchor1$$

\Rightarrow

$$d = \frac{(RxTag1 - TxTag1) - (TxTag2 - RxTag1) + (RxAnchor2 - TxAnchor1) - (TxAnchor1 - RxAnchor1)}{4} \cdot c \cdot f_{clk}$$

$$d = \frac{(2 \cdot RxTag1 + RxAnchor1 + RxAnchor2) - (TxTag1 + TxTag2 + 2 \cdot TxAnchor1)}{4} \cdot c \cdot f_{clk}$$

4.1.3 Fördröjd transmission

Det gäller att svarstiderna, t_{reply} , är så lika som möjligt för att minimera felberäkningar. När ett meddelande anländer till en enhet görs läsningar och skrivningar till register samt beräkningar och allmän datahantering. Tiden som då går åt skiljer sig mellan Tag-noden respektive Anchor-noden. För att ha lika svarstider måste längden på t_{reply} styras. DW1000 har en funktion som fördröjer sändtiden då den i förväg kan bestämma en exakt tidpunkt när ett meddelande skall skickas. Detta gör det möjligt att inte bara kontrollera längden på t_{reply} utan även att data som behövs vid beräkningen kan skickas med i meddelandet så att den enhet som skall utföra beräkningen, i det här fallet Tag-noden, har tillgång till tidsstämplarna från Anchor-sidan. Vid icke-fördröjd sändning uppstår inte tidsstämpeln förrän meddelandet har lämnat chippet och man kan därför inte paketera in tidsstämpeln i samma meddelande.

På Anchor-sidan sätts fördröjningen till

$$t_{sendAnchor} = RxAnchor1 + constant$$

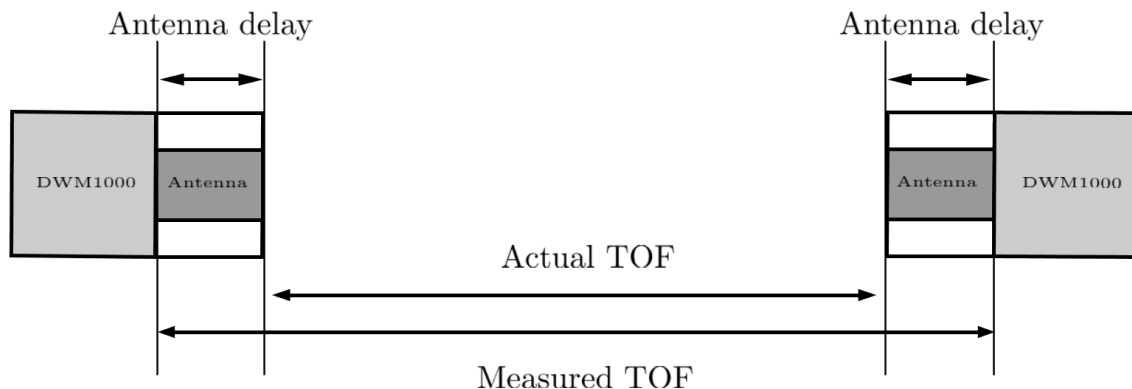
där *constant* är en godtycklig konstant, tillräckligt stor för att täcka det tidsintervall som Anchor-noden behöver för att utföra nödvändiga dataoperationer. På samma sätt beräknas fördröjningen på Tag-sidan

$$t_{sendTag} = RxTag1 + constant$$

På så vis erhålles homogena svarstider på båda sidor i meddelandetransaktionen.

4.2 Antennfördröjning

Sändtiden som DWM1000 registrerar, alltså tidsstämpeln, är tiden då meddelandet lämnar chippet (DW1000). Innan signalen är i luften måste den dock passera annan logik samt antennen, där utbredningshastigheten är långsammare än i luften. DW1000 adderar denna fördröjning automatisk till tidsstämpeln vid varje sändning, dock måste ett värde på fördröjningen anges i ett av modulens register. Omvänt gäller vid mottagning av ett meddelande, där denna fördröjning istället subtraheras från tidsstämpeln. På så vis kan den faktiska flygtiden, *TOF*, beräknas med hjälp av tidsstämplarna. Se figur 4.5. Ett adekvat värde för antennfördröjningen togs fram



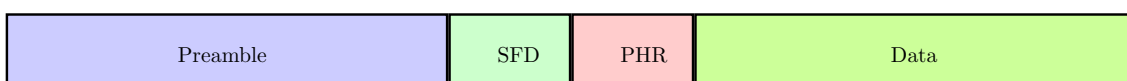
Figur 4.5: Antenna delay

genom att placera två enheter på ett känt avstånd ifrån varandra och justera värdet tills dess att rapporterat avstånd stämde överens med verkligt avstånd. Vid fördröjd sändning (delayed transmission) adderas denna konstanten till tidsstämpeln som skickades ifrån Anchor-noden.

4.3 Meddelandeformat

För att Tag-noden skall kunna mäta avstånd till flera olika noder samtidigt implementerades en adresseringsmetodik. DW1000 paketerar in data i formatet enligt figur 4.6. Synchronisation Header, SHR, utgörs av Preamble, SFD (Start of Frame Delimiter) och PHR. Preamble sekvensen kan vara av variabel längd beroende på initieringen av DW1000 och är här satt till 128 symboler. Detta är en standardkonfiguration som är avsedd för *real time location system* (RTLS) på korta avstånd [1]. SFD är satt enligt standarden IEEE802.15.4-2011. PHR fältet utgörs av 21 bitar och

innehåller information om payload för mottagarsidan. I datafältet görs adressering med MAC-frame format enligt IEEE802.15.4-2011. Se figur 4.7. Ett annat format hade kunnat användas, då flera av fälten inte används i den här tillämpningen, men det finns två skäl till att välja ett redan standardiserat format. Det ena är att underlätta för vidareutveckling och undvika onödiga problem som eventuellt kan uppstå vid användandet av ett mindre genomtänkt format än en redan beprövad standard. Det andra skälet är att DW1000 tillhandahåller funktioner för filtrering av data-frames med avseende på bland annat source- och destination-adress. Skall den funktionen användas måste datadelen formateras enligt nämnd standard. En mer ingående illustration av de två första byten, fältet "Frame Control", går att finna i figur 4.8. Beroende vilken funktionalitet man vill åstadkomma skall bitarna i respektive fält sättas därefter då detta är nödvändigt för att frame-filtreringen skall fungera.



Figur 4.6: Meddelandeformatet som paketeras i DW1000

MAC Header (MHR)							MAC Payload	MAC Footer (MFR)
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Aux Security Header	Frame Payload	FCS

Figur 4.7: MAC-adress format enligt IEEE 802.15.4-2011

Bits 0 to 2	Bit 3	Bit 4	Bit 5	Bit 6	Bits 7 to 9	Bits 10 & 11	Bits 12 & 13	Bits 14 & 15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	ACK Request	PAN ID Compress	Reserved	Dest. Address Mode	Frame Version	Source Address Mode

Figur 4.8: Frame Control fältet i MAC-ramen enligt IEEE 802.15.4-2011

4.4 Dynamisk adressering

När Tag-noden startar upp börjar den söka efter noder att para ihop sig med genom att skicka broadcast-frames. Varje nod kommer efter uppstart lyssna efter endast broadcast-frames. När en broadcast-frame tagits emot hos en nod kommer den att svara med sin egen adress som Tag-noden tar emot och sparar. Samtidigt aktiveras frame-filtrering så att endast meddelande med destinationsadress som stämmer överens med nodens egna kommer att behandlas.

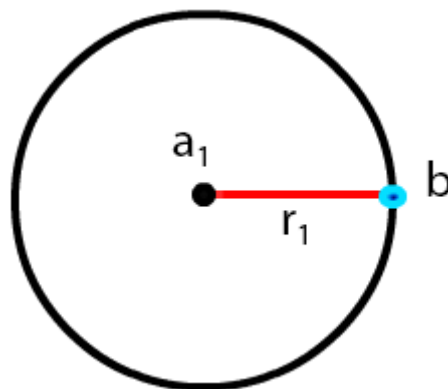
Efter att Tag-noden har samlat in tre adresser och sparat dessa skickas ett meddelande till respektive nod som en indikator på att Tag-noden är redo för avståndsmätning. För att undvika att alla noder svarar samtidigt på det broadcast-meddelande

som inleder handskakningen så väntar de i en slumpmässig tid innan ett svar skickas till Tag-noden. Om en nod inte får något svar från Tag-noden kommer den återgå till att vänta på broadcast-meddelande. Se appendix C och D för flödesschema.

4.5 Trilateration

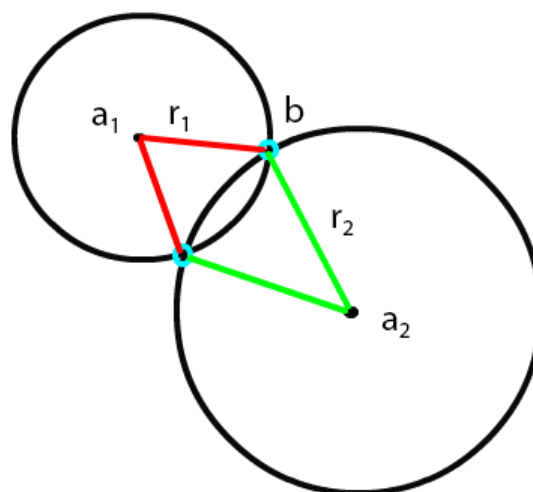
Trilateration är en matematisk teknik som tillämpas vid GPS-navigering [21]. Den bygger på att tre noder med kända positioner kan användas för att positionera en fjärde, om avstånden till de tre andra noderna är kända.

Antag att vi har en punkt i ett plan a_1 med koordinaterna (x_1, y_1) som är på ett känt avstånd r_1 till en annan punkt b med koordinaterna (x, y) . De möjliga positioner för punkten b är då på en cirkel med radien r_1 runt a_1 . Se figur 4.9.



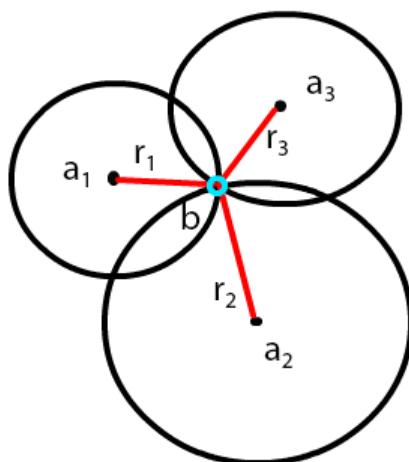
Figur 4.9: En okänd position i förhållande till en känd position

Om man känner två positioner, a_1 , a_2 , kan man begränsa möjliga positioner b till två, precis där cirklarna med radier r_1 , r_2 , skär varandra. Se figur 4.10.



Figur 4.10: Två kända positioner

Har man minst tre punkter a_1 , a_2 , a_3 , vars positioner är kända kan man med hjälp av dess radier r_1 , r_2 respektive r_3 bestämma en exakt position för b . Se figur 4.11.



Figur 4.11: Tre kända positioner

Nedan följer en härledning för uträkning av koordinaterna (x, y) för b .

För de tre positionerna och deras avstånd till b gäller att

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2$$

Vi expanderar:

$$x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 = r_1^2$$

$$x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 = r_2^2$$

$$x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 = r_3^2$$

Vi subtraherar den andra ekvationen från den första och får då

$$(-2x_1 + 2x_2)x + (-2y_1 + 2y_2)y = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2$$

Subtrahera den tredje ekvationen från den andra och erhåll på samma sätt

$$(-2x_2 + 2x_3)x + (-2y_2 + 2y_3)y = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2$$

För (ekvation 1) sätt koefficienterna framför x och y , samt högerledet, enligt

$$A = (2x_2 - 2x_1)$$

$$B = (2y_2 - 2y_1)$$
$$C = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2$$

För (ekvation 2) sätt

$$D = (2x_3 - 2x_2)$$
$$E = (2y_3 - 2y_2)$$
$$F = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2$$

Vi erhåller då två ekvationer med två okända:

$$Ax + By = C$$
$$Dx + Ey = F$$

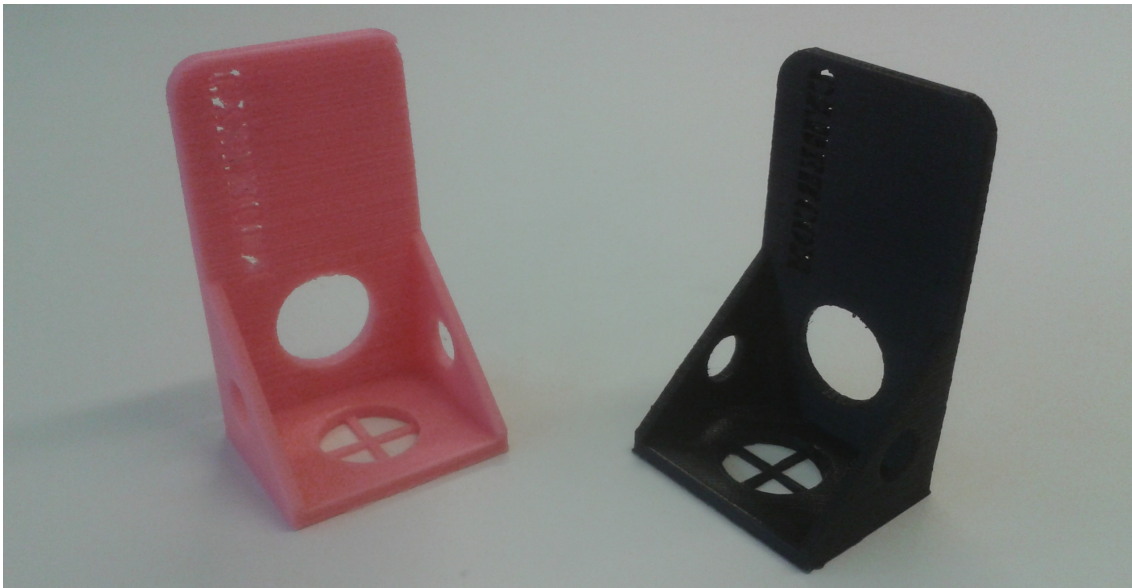
Lösningarna för koordinaterna (x, y) till punkten b blir således

$$x = \frac{CD - FA}{BD - EA}$$
$$y = \frac{AE - DB}{CE - FB}$$

Informationen om avstånd från Tag-noden till respektive Anchor skickas seriellt via USB eller Bluetooth till en dator. Ett program skrivet i Java läser meddelandena och behandlar datamängden enligt trilaterationsalgoritmen vars härledning följer nedan. Samtliga noder plottas sedan upp och Tag-nodens position kan följas i realtid.

4.6 Stativ

Om antennerna inte har tillräckligt med fritt område kring sig, t.ex. om de befinner sig för nära golv eller väggar, kan mätresultatet påverkas. För att undvika detta och göra det enklare att placera ut noderna så monteras enheterna på stativ som skrivits ut med en 3D skrivare. Se figur 4.12.



Figur 4.12: Stativ för montering av noder

5

Resultat

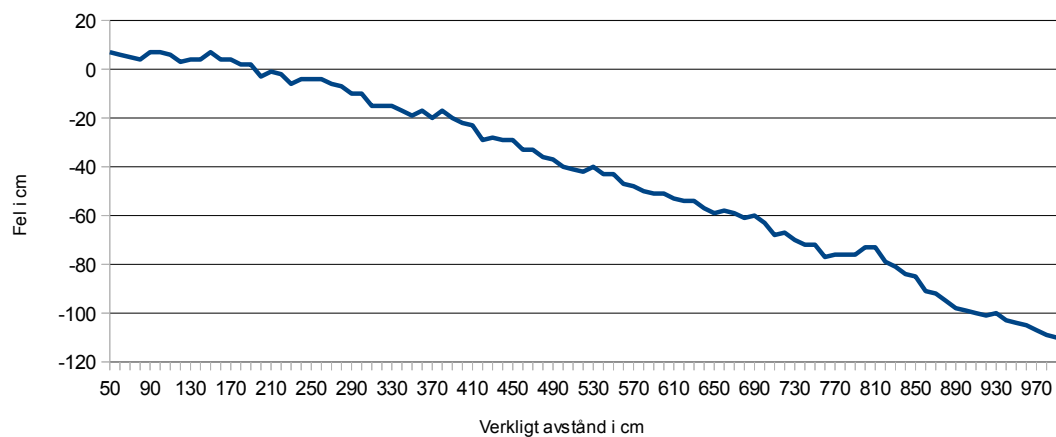
5.1 Punkt till punkt

Huvudmålet med projektet var att förbättra precisionen i avståndsmätning mellan två enheter. Detta gjordes med tekniken ??.

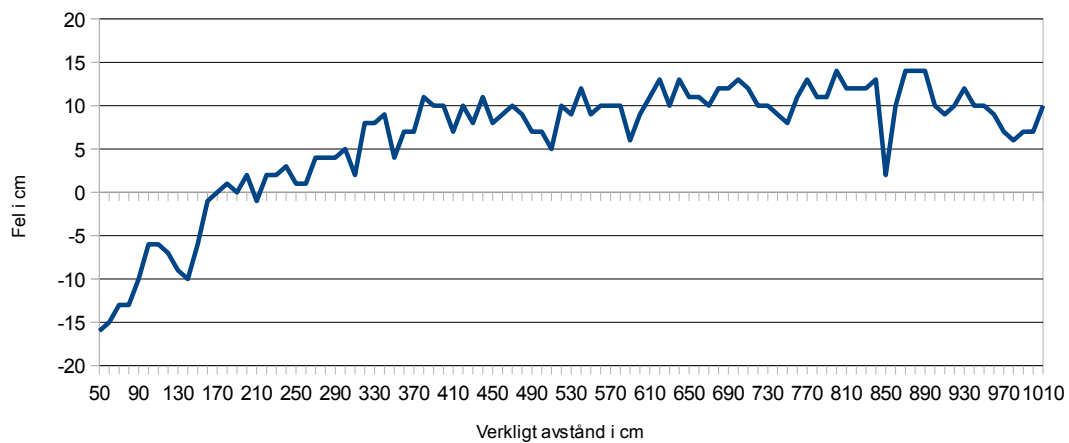
Resultatet av mätningarna kan observeras i figur 5.1, 5.2, 5.3 och 5.4. Mätningarna gjordes från avstånden 50 cm till 10 meter med enheterna fästa på stativ och placerade på stolar, mätningarna gjordes med 10 cm mellan varje mätpunkt.

Innan implementationen av ?? observerades att på avstånd 50 - 280 cm har mätresultatet en avvikelse på < 10 cm. På avstånd över 280 cm ökar avvikelsen och landar på > 100 cm på avståndet 10 m. Se figur 5.1. Efter implementationen observerades en avvikelse på ± 15 cm över hela mätserien.

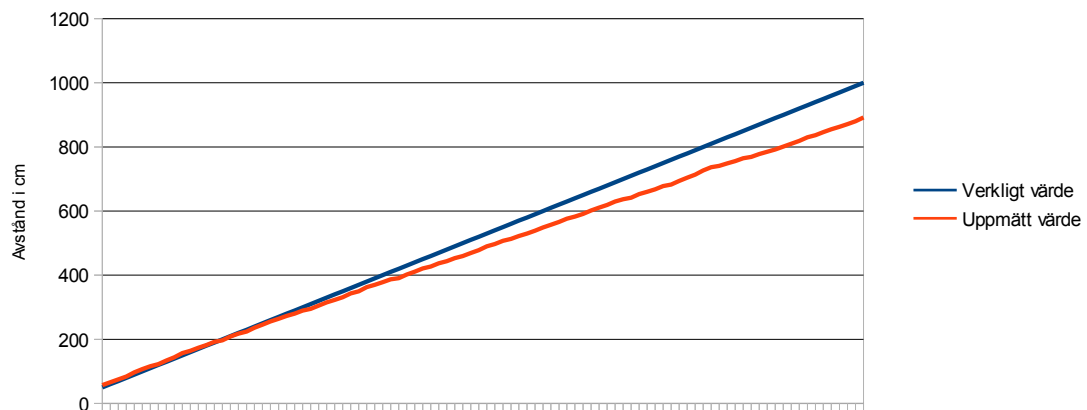
Det uppsatta målet om att nå en precision på ± 10 cm har inte uppfyllts men jämfört med före implementationen är det överlag betydligt bättre precision. Se figur 5.2.



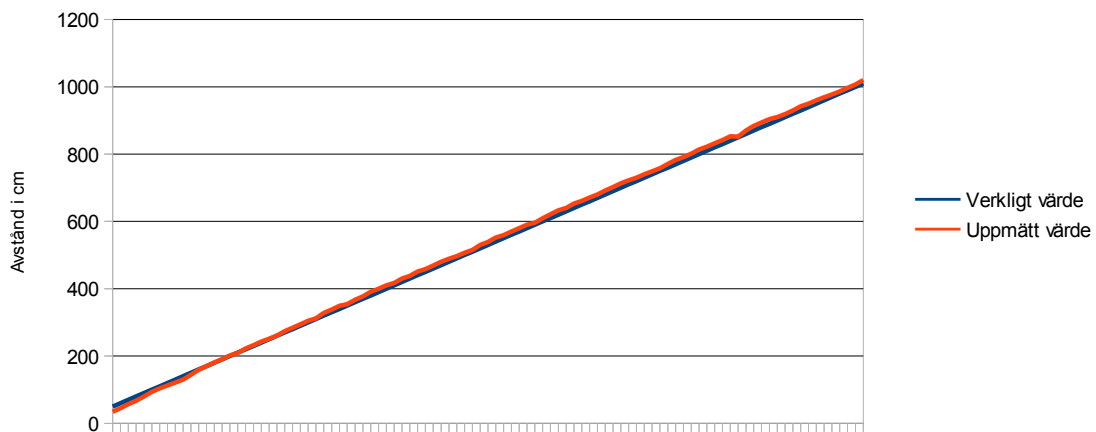
Figur 5.1: Felet uppmätt i cm vid början av projektet



Figur 5.2: Felet uppmätt i cm efter implementeringen av *Symmetric double-sided two-way ranging*



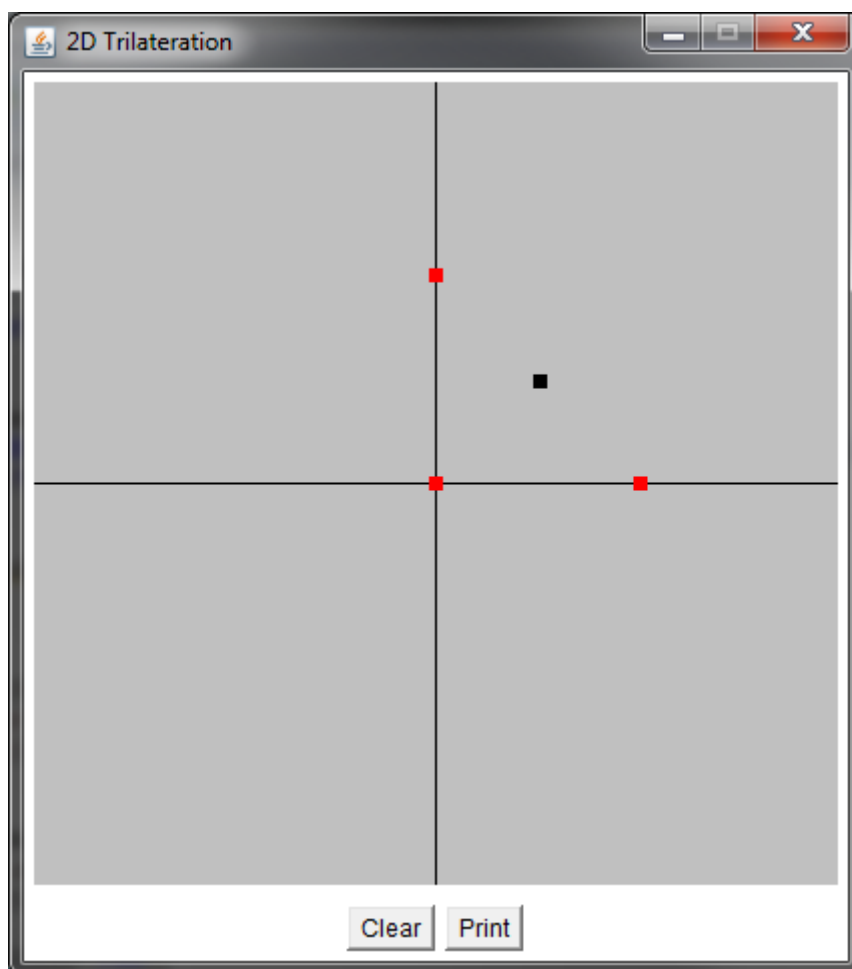
Figur 5.3: Verkligt värde jämfört med det uppmätta värdet vid början i projektet



Figur 5.4: Verkligt värde jämfört med det uppmätta värdet efter implementeringen av *Symmetric double-sided two-way ranging*

5.2 Trilateration

För att visuellt representera var Tag-noden befinner sig relativt de andra noderna så är det önskvärt att visa detta på en större bildskärm, därför görs trilaterationen inte lokalt hos Tag-noden utan istället skickas de uppmätta avstånden över till en dator som gör beräkningarna och ritar upp positionerna för noderna. Programmet är skrivet i Java med hjälpbibliotek för att rita ut punkterna och är i stort sett uppdelat i två delar som exekveras parallellt: en del som kontinuerligt läser och sparar värden och en annan del som använder nämnda värden för att beräkna x- och y-koordinater för Tag-noden och plottar dessa i ett fönster. Figur 5.5 visar den grafiska representationen av trilaterationen.



Figur 5.5: Grafiska fönstret som visar vart noderna befinner sig. Den svarta är Tag-noden och dem röda är noder med fix position

5.3 Adressering

Adresseringen sker via fälten Destination address, Source address samt PAN ID, i MAC-adress strukturen enligt standarden IEEE 802.15.4 - 2011 [3]. Denna standard

är kompatibel med flera av DW1000-kretsens interna funktioner för bland annat frame-filtrering.

Det är möjligt att ändra hur många noder som Tag-noden skall adressera, men för trilaterationen är minimikravet 3 noder.

6

Slutsats

6.1 Kritisk diskussion

Vid arbetets slut har vi en programkod för avståndsmätning med överlag bättre precision än den ursprungliga koden som var basen för arbetet. Vi har också konstruerat ett dynamiskt adresseringssystem där ett standardiserat MAC-frame-format används, vilket gör att arbetet är en bra grund för skalning och fortsatt utveckling.

Systemet har uppvisat fenomen där mottagaren stängs av vid till synes slumpmässiga tillfällen. Problemet löstes genom att ändra räknare som används för att fördröja vissa skeden i processen vilket leder oss till att tro att det är ett timing relaterat problem. Det hade varit önskvärt att hitta den faktiska orsaken och ha mer kontroll över problemet, snarare än att justera räknare för att lösa det, då det hade gett ett mer robust intryck.

När mätningar gjordes hade vi endast det rapporterade avståndet från LCD-skärmen som data att arbeta med, vilket jämfördes med verkligt avstånd. Mer data i realtid, exempelvis signalstyrka eller innehållet i register, hade underlättat programutvecklingen.

I det stora hela har tidsplanen som gjordes i planeringsrapporten (se Tidsplanering i Appendix) följts. Ett kontinuerligt skrivande på rapporten har gjorts varje vecka med ökat fokus i arbetets slutskede. Däremot så har litteraturstudierna inom kategorin inomhuspositionering inte blivit lika omfattande som beräknat och nästintill helt utbytt mot fördjupning i databladen för DWM1000 modulen och DW1000 chippet. Tiden som behövdes för att gå igenom och förstå originalkoden visade sig inte vara så tidskrävande som vi först trott. Redan första veckan började vi att strukturera om och bygga på med mer kod; dock tog det några veckor innan vi var bekanta med kodens alla ingående delar.

6.2 Teknikens roll

Innan GPS blev tillgängligt för allmänheten fanns det få som insåg vilka möjligheter tekniken skulle föra med sig. Förutom möjligheten att hitta sin egen position och enkelt hitta på platser man aldrig besökt, finns det en mängd användningsområden där GPS tillämpas för positionering. Därför kan man bara spekulera i vilka områden som kommer dra nytta av att positionera med centimeter-precision inomhus

där GPS inte är lösningen. Det finns dock några exempel på tillämpningsområden där hög precision är åtråvärt. Ett intuitivt exempel är autonoma inomhus-robotar som går i trånga korridorer och behöver pålitlig information om var de befinner sig i realtid. Spårning av räddningspersonal i en brinnande byggnad, eller annan miljö med mycket objekt som en signal kan propagera mot, är ett annat exempel på tillämpningsområde där krävs en teknik med robusthet mot flervägsutbredning och interferens.

I takt med allting blir uppkopplat i *Internet of Things* ställs allt fler krav på tillgänglighet och information. Allt fler apparater blir uppkopplade vilket också medför ökad signaltrafik i luften. UWB arbetar inte i det högpopulerade 2.4 GHz bandet och har låg energitäthet i frekvensspektrumet och skalar på så vis med den utvecklingen. Kanske kan vi om några år se en utveckling där UWB-transceivers implementeras i smartphones som standard funktion, och kanske är det just DecaWave som tillhandahåller tekniken som en av dess pionjärer.

6.3 Fortsatt utveckling

Vid fortsatt utveckling av inomhuspositioneringen skulle ett naturligt nästa steg vara att lägga till fler noder som kan placeras ut i en byggnad och då implementera "SLEEP" samt "DEEPSLEEP" och andra strömsparande funktioner kombinerat med en solcell för att få helt passiva noder. På grund av en påverkan på mätresultatet med avseende på mottagen signalstyrka hos mottagarenheten är ytterligare optimering möjligt om man kompenserar för denna påverkan.

En annan förbättring hade varit en funktion för att enklare kalibrera enheterna för att kompensera för antennfördröjning, snarare än att som i dagsläget justera enheterna parvis. Oavsett vilket område som sätts i fokus är bättre debug-möjligheter och tillgång till mer data i realtid önskvärt. Exempelvis en grafisk plot över hur signalstyrkan ändras i realtid skulle kunna ge insikt om orsaker till några av de fenomen som har observerats under arbetets gång.

Litteraturförteckning

- [1] DecaWave, DWM1000 IEEE 802.15.4-2011 UWB Transceiver Module, DWM1000 datasheet, 2014, Available: <http://www.decawave.com/support>, [Hämtad Apr, 2015]
- [2] DecaWave, DW1000 IEEE802.15.4-2011 UWB Transceiver, DW1000 datasheet, 2014, Available: <http://www.decawave.com/support>, [Hämtad Apr, 2015]
- [3] DecaWave, DW1000 USER MANUAL, 2014, Available: <http://www.decawave.com/support>, [Hämtad Apr, 2015]
- [4] Arduino.cc, 'Arduino - Introduction', 2015. Available: <http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [Hämtad Apr, 2015]
- [5] Imall.iteadstudio.com, 'Iteaduno UNO', 2015. [Online]. Available: <http://imall.iteadstudio.com/im130312001.html>. [Hämtad: Apr, 2015].
- [6] Atmel.com, 'Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers', 2015. [Online]. Available: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/>, [Hämtad: Apr, 2015].
- [7] Arduino.cc, 'Arduino - ArduinoShields', 2015. [Online]. Available: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoShields>. [Hämtad: Apr, 2015].
- [8] Shieldlist.org, 'Arduino Shield List', 2015. [Online]. Available: <http://shieldlist.org/>. [Hämtad: Apr, 2015].
- [9] Learn.sparkfun.com, 'Arduino Shields - learn.sparkfun.com', 2015. [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/arduino-shields>. [Hämtad: Apr, 2015].
- [10] Byteparadigm.com, 'Introduction to I²C and SPI protocols « Byte Paradigm – Speed up embedded system verification', 2015. [Online]. Available: <http://www.byteparadigm.com/applications/introduction-to-i2c-and-spi-protocols/?/article/AA-00255/22/Introduction-to-SPI-and-IC-protocols.html>. [Hämtad: Apr, 2015].
- [11] Standards.ieee.org, 'IEEE-SA - FAQs: Registration Authority', 2015. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/faqs/regauth.html>17. [Hämtad: Apr, 2015].

- [12] Whatismyipaddress.com, 'What is a MAC Address?', 2015. [Online]. Available: <http://whatismyipaddress.com/mac-address>. [Hämtad: Apr, 2015].
- [13] Rfidc.com, 'Introduction to Wireless - Wireless Standards', 2015. [Online]. Available: http://www.rfidc.com/docs/introductiontowireless_standards.htm. [Hämtad: Apr, 2015].
- [14] Intel.com, 'Intel Wi-Fi Products — What Is a Preamble?', 2015. [Online]. Available: <http://www.intel.com/support/wireless/wlan/sb/CS-025317.htm>. [Hämtad Maj, 2015].
- [15] S.M. Sadough, 'A Tutorial on Ultra Wideband Modulation and Detection Schemes', Shahid Beheshti Univ., Teheran, Iran, 2009.
- [16] A.F. Molisch, 'Ultra Wideband Communications - An Overview', Mitsubishi Elec. Res. Lab., Cambridge, MA, USA.
- [17] J. Foerster et al, 'Ultra-Wideband Technology for Short- or Medium-Range Wireless Communications', Inten Arch. Lab., Intel Corp.
- [18] J.H. Reed, 'Introduction to Ultra Wideband Communication Systems', Jun, 2005. [Online]. Available: <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=384461>, [Hämtad Apr, 2015]
- [19] Radio-electronics.com, 'Ultra Wideband Tehchnology Tutorial', [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/uwb/ultra-wideband-technology.php>. [Hämtad Apr, 2015]
- [20] J. Romme, B. Kull, 'On the relation between bandwidth and robustness of indoor UWB communication', IMST GmbH, Germany. http://www.whyles.org/files/public/WP5_uwbst03_romme.pdf. [Hämtad Apr, 2015].
- [21] electronics.howstuffworks.com, 'How GPS Receivers Work', <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/travel/gps2.htm> [Hämtad Maj, 2015]
- [22] DecaWave, 'Sources of error in DW1000 based two way ranging (TWR) schemes', Available: <http://www.decawave.com/support>, [Hämtad Apr, 2015]

A

Beteckningar

A. Beteckningar

Anchor:		De stationära noderna.
COM:	Communication port	Kommunikations port för seriell överföring.
dBm:	Decibel milliwatt	$dBm = 10 \cdot \log_{10} \frac{\text{Effekt i milliwatt}}{1 mW}$
DW1000:		Decawave chippet som används i DWM1000 modulen.
DWM1000:		Decawave modulen
FCC:	Federal Communications Commission	
Frekvensspektrum:		Ett avgränsat frekvensområde.
GPS:	Global Position System	Användning av satelliter för positionering.
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
LCD:	Liquid Crystal Display	En typ av bildskärm
MAC:	Media Access Control	Ett nätverksprotokoll
Narrowband:		En kanal med smalt frekvensband.
(N)LOS:	(Non) Line Of Sight	
PHR:	Physical Header	
Preamble:		Första delen av en signal.
RTLS:	Real Time Location System	
SFD:	Start of Frame Delimiter	
SHR:	Sync header	
SPI:	Serial Peripheral Interface	Buss för synkron seriell kommunikation.
Tag:		Den rörliga noden.
TOF:	Time of Flight	Flygtiden för ett meddelande.
Trilateration		Matematisk teknik som används vid positionering.
Tx/Rx:	Transmit/Receive	
UWB:	Ultra Wideband	
WLAN:	Wireless Local Area Network	
(W)PAN:	(Wireless) Personal Area Network	Nätverk med begränsad räckvidd.

B

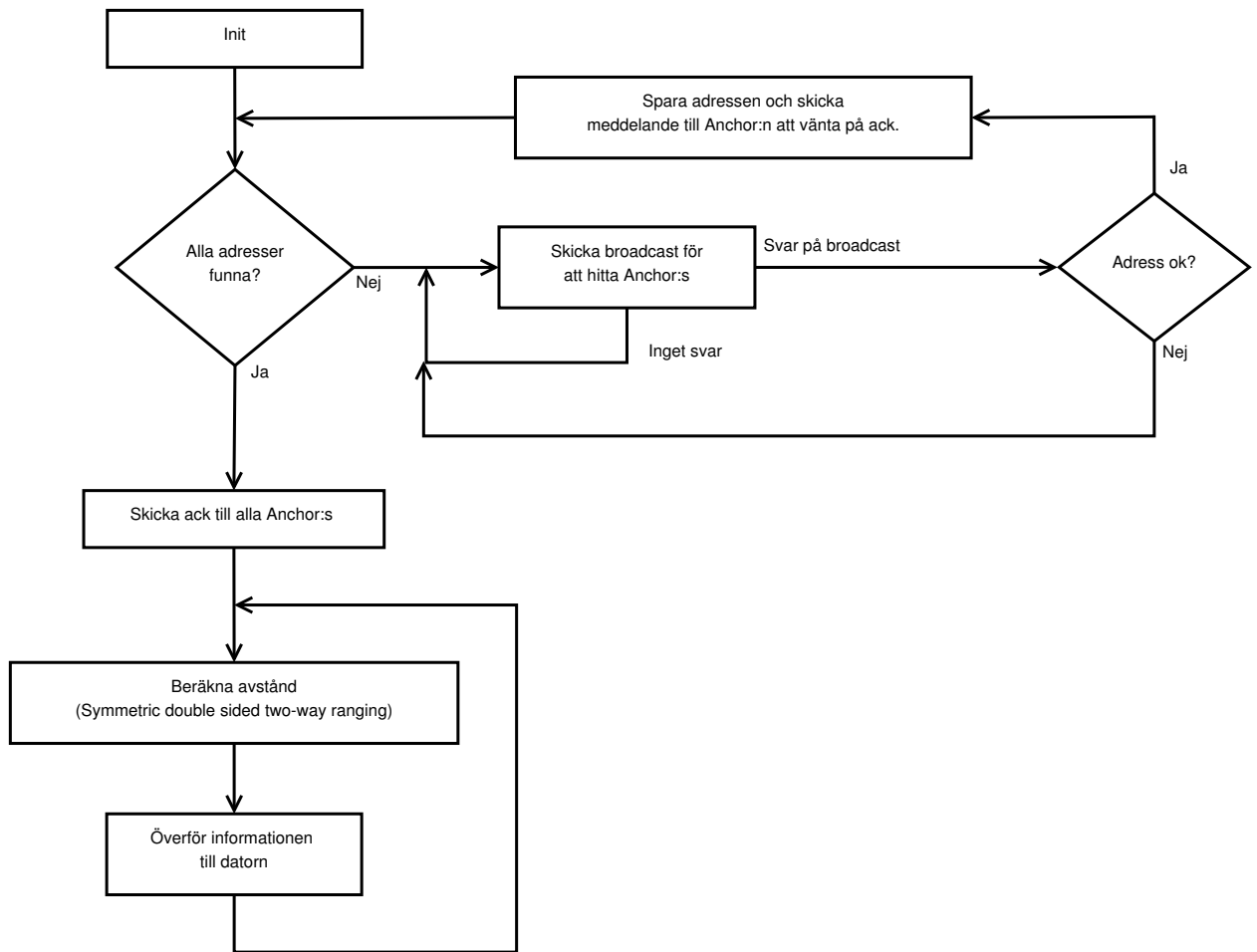
Tidsplanering

	Tidsplan											
Aktivitet / Vecka	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Ta fram planeringsrapport	■											
Studier												
Exempelkod		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Teknik inomhuspositionering		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Teknik UWB		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Skriva kod			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Rapportskrivning			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Slutrapport										■	■	■
Muntligt redovisning											■	■
Öponering/Närvara muntlig projekt presentation											■	■
Förberedelse inför redovisning/öponering										■	■	■

Figur B.1: Tidsplan

C

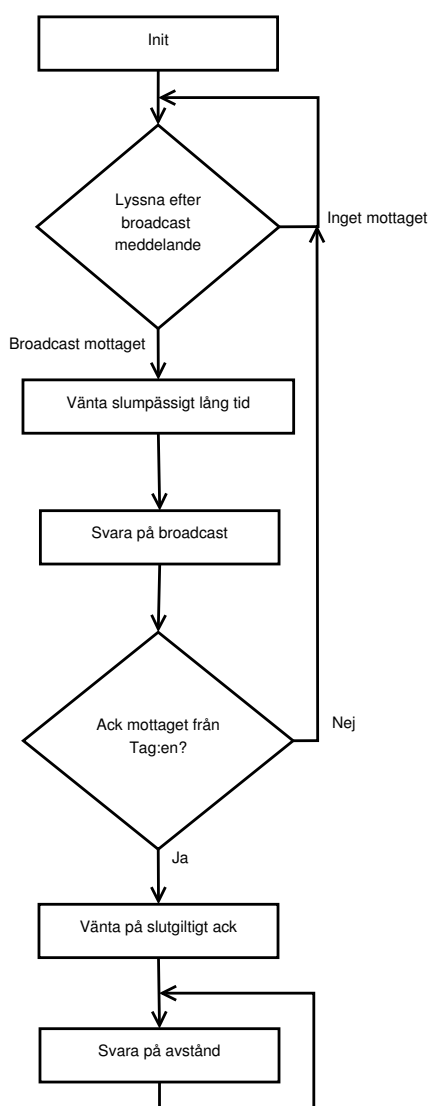
Flödesschema Tag



Figur C.1: Flödesschema för Tag-noden

D

Flödesschema Anchor



Figur D.1: Flödesschema för Anchor-noden