

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e
dell'Informazione "*Guglielmo Marconi*"

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica per l'energia e
l'informazione

POSIZIONAMENTO RELATIVO
TRAMITE TECNOLOGIA UWB
DI UN BRACCIO AUTOMATICO

Elaborato in
Comunicazioni Digitali e Internet

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing.
DAVIDE DARDARI

Correlatore:

Dott. Ing.
ANNA GUERRA

Presentata da:

REBECCA
COWMEADOW

SESSIONE II
ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Indice

Introduzione	1
Sistemi di posizionamento radio	3
1.1 Posizionamento radio	3
1.1.1 Sistemi di posizionamento satellitare.....	4
1.1.2 Sistemi di posizionamento terrestre.....	6
1.2 Metodi di posizionamento	7
1.2.1 RSS.....	7
1.2.2 TOA	7
1.2.3 TDOA	9
1.2.4 AOA.....	10
1.3 Tecnologie per posizionamento indoor	11
1.3.1 WLAN	11
1.3.2 Bluetooth	12
1.3.3 RFID.....	13
1.4 UWB	14
1.4.1 Regolamentazione e standard	14
1.4.2 IR-UWB	15
1.4.3 Limiti dei metodi di posizionamento UWB.....	17
1.4.4 Soluzione ibrida RFID-UWB.....	19
Figure di merito prestazionali	22
2.1 GDOP	22
2.1.1 HDOP e VDOP.....	25
2.2 PEB	26
2.3 RMSE.....	28
2.4 Analisi delle prestazioni teoriche	29
Misure effettuate in laboratorio.....	33
3.1 Sistema di misura UWB.....	34
3.2 Acquisizione misure	35
3.2.1 Hardware	35
3.2.2 Software	37
3.3 Risultati sperimentali.....	39
3.3.1 Quattro antenne con parametri di default	39
3.3.2 Quattro antenne con mobility model 3 (MM3)	42

3.3.3	Quattro ancore con mobility model 1 (MM1)	46
3.3.4	Quattro ancore con MM1 e con offset	49
3.3.5	Cinque ancore con MM1 e con offset	52
Conclusioni.....		56
Appendice		57
Bibliografia & Sitografia.....		62

Introduzione

L'obiettivo che si pone la presente tesi è di studiare le prestazioni della tecnologia a banda ultra-larga nel contesto del posizionamento radio affinché un braccio automatico riesca ad individuare degli oggetti a brevi distanze con la più elevata accuratezza possibile (pochi centimetri di errore). Nella figura sottostante è possibile osservare una schematizzazione del braccio automatico e della localizzazione di un oggetto generico. Sul braccio sono installati dei nodi di riferimento che localizzano il nodo fissato sull'oggetto che il braccio deve afferrare. Per simulare il braccio in laboratorio è stata creata una struttura che supporti i dispositivi per la localizzazione.

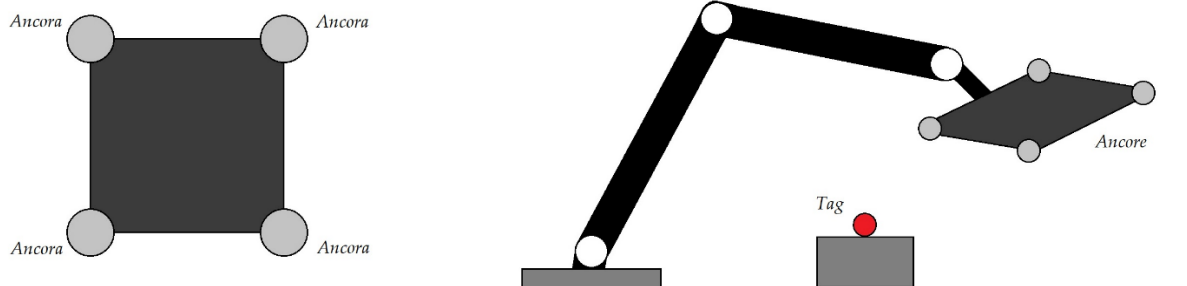


Figura 0.1 – Visione da sopra delle ancore (sx) e visione d'insieme del braccio automatico (dx)

Nel primo capitolo sarà fatta una panoramica dei sistemi di posizionamento radio al fine di inquadrare più chiaramente la soluzione adottata in questa applicazione. Verranno distinti i diversi campi di impiego, i metodi per effettuare una corretta localizzazione, le tecnologie rilevanti nell'ambito indoor, dopodiché verrà descritta più nel dettaglio la tecnologia UWB.

Una volta introdotto il mondo dei sistemi di localizzazione radio verranno analizzate le figure di merito impiegate per valutare le prestazioni degli stessi, facendo particolare attenzione a quei parametri che permettono di valutare l'accuratezza di posizionamento. Sarà effettuata anche un'analisi teorica delle prestazioni del sistema tenendo conto solo della geometria.

In ultima istanza, dopo aver esposto le nozioni teoriche necessarie per una comprensione a tutto tondo dei sistemi di posizionamento UWB, verrà descritto il sistema adottato per acquisire le misure ed il modo in cui sono state eseguite le stesse. Successivamente quindi saranno riportati i risultati ottenuti sperimentalmente in laboratorio e ne verrà fatta un'opportuna analisi.

Capitolo 1

Sistemi di posizionamento radio

1.1 Posizionamento radio

Un sistema di posizionamento è un meccanismo atto a determinare la posizione di un oggetto nello spazio [1]. Negli ultimi decenni, grazie all'avanzamento della tecnologia, la necessità di localizzare è divenuta sempre più rilevante e le prestazioni dei sistemi sono diventate sempre più precise. I servizi legati alle informazioni geografiche di un dispositivo, noti come LBS (*Location Based Services*), vengono infatti impiegati in un ampio range di campi, dalla medicina all'ambito militare, dalla comunicazione alla sicurezza, dalla pubblicità ai servizi d'emergenza [2].

Nei sistemi di localizzazione wireless i segnali inviati dai dispositivi appartengono perlopiù allo spettro delle frequenze radio. Il funzionamento di tali sistemi è relativamente semplice e si basa proprio sullo scambio di segnali radio tra nodi fissi chiamati *ancore*, la cui posizione è nota rispetto al sistema di riferimento, e uno o più nodi chiamati *tag* (o *agent*) la cui posizione va determinata [3].

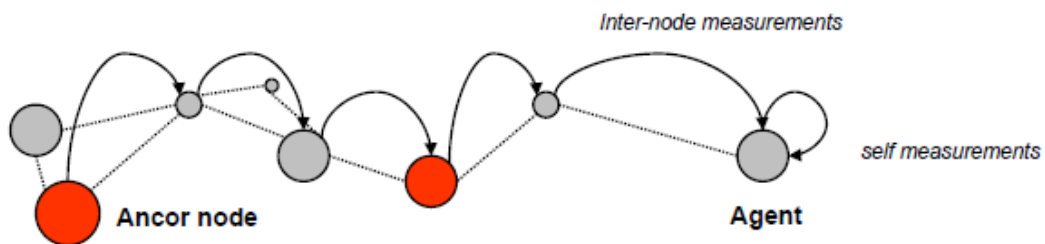


Figura 1.1 – Sistema di posizionamento generico [3]

La posizione del tag viene poi ricavata misurando delle caratteristiche dei segnali radio, le quali verranno approfondite in seguito.

Una prima classificazione fondamentale per i sistemi di posizionamento riguarda l'area di copertura; infatti, si distinguono sostanzialmente i sistemi di posizionamento satellitare e i sistemi di posizionamento terrestre.

1.1.1 Sistemi di posizionamento satellitare

Un sistema satellitare globale di navigazione (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) è un sistema di geolocalizzazione radio che sfrutta una rete di satelliti che percorrono orbite note per determinare la posizione tridimensionale di un dispositivo con un'accuratezza di 2-20 metri [1].



Figura 1. 2 – Costellazione di satelliti [4]

Il sistema satellitare per eccellenza è il GPS (*Global Positioning System*), creato negli anni '70 negli USA, ma essendo i GNSS strategicamente importanti per lo sviluppo militare e civile, sono molti i paesi che hanno iniziato a sviluppare i propri sistemi di localizzazione satellitare: il sistema GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) della Russia, il sistema Galileo dell'Unione Europea ed il sistema BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*) della Cina, mentre altri paesi

come il Giappone e l'India puntano a convertire i loro sistemi di localizzazione regionale in sistemi di localizzazione globale.

Nonostante la crescente competitività del settore, il GPS viene tuttora considerato lo standard di riferimento. Questo noto sistema è composto principalmente da tre segmenti: il segmento spaziale (*SS*) costituito da 31 satelliti che inviano segnali per confermare le loro posizioni ed il tempo; il segmento di controllo (*CS*), il cui compito è quello di mantenere i satelliti in orbita e di monitorarne il comportamento, è composto da una stazione di controllo principale (*Master Control Station*), una stazione di controllo principale alternativa, quattro antenne dedicate e sei stazioni di controllo dedicate; il segmento utente (*US*) costituito dalle decine di milioni di ricevitori GPS degli utenti che sfruttano il servizio calcolando la propria posizione attraverso le informazioni geografiche e temporali trasmesse dai satelliti [5].

Il principio di funzionamento consiste nella misura del tempo impiegato dal segnale radio trasmesso dal satellite a raggiungere il ricevitore GPS (anche noto come *Time-of-Flight*) e il conseguente calcolo della distanza relativa tra i due. Per calcolare le tre coordinate spaziali del ricevitore (latitudine, longitudine, altitudine) è necessario avere un sistema di tre equazioni, il che farebbe pensare che siano sufficienti tre satelliti per individuare il ricevitore; tuttavia, essendo il metodo di posizionamento basato sul tempo e non essendo i clock dei vari dispositivi sincronizzati, si avrà una quarta incognita, la differenza tra il clock del ricevitore e quello del satellite, portando alla conclusione che per localizzare correttamente un ricevitore è necessario avere almeno quattro satelliti [6]. È importante specificare anche che essi devono essere visibili o, per meglio dire, in LOS (*Line-of-Sight*), poiché solamente così il sistema GPS riesce ad essere accurato, minimizzando gli errori e riducendo l'effetto del multipath. Quest'ultimo infatti è un fenomeno che si verifica quando un segnale viene riflesso sul terreno o su un oggetto, frammentandosi in diverse repliche distorte ed attenuate del segnale originale [3],[7].

1.1.2 Sistemi di posizionamento terrestre

I sistemi di posizionamento terrestre si basano su reti di stazioni di riferimento terrestri e sono implementate perlopiù grazie a sistemi di comunicazione wireless. Essi nascono in principio con l'obiettivo di garantire la comunicazione tra più utenti, ma recentemente diversi sistemi terrestri sono stati impiegati opportunamente nell'ambito della localizzazione, poiché numerose ricerche hanno dimostrato come il loro utilizzo in situazioni critiche, ad esempio in ambienti indoor, offre buone prospettive future.

A differenza del posizionamento outdoor, che negli anni ha raggiunto notevoli risultati ed un'elevata accuratezza, il posizionamento indoor resta infatti ancora una sfida a causa delle numerose non idealità di cui risente la propagazione radio. Quando un ricevitore è posizionato all'interno di un edificio, i materiali di costruzione e la geometria di quest'ultimo attenuano enormemente il segnale e causano il fenomeno del multipath, rendendo difficile la localizzazione corretta del dispositivo e rendendo, inoltre, inefficace l'utilizzo di tecnologie satellitari come il GPS. L'attenuazione subita dal segnale sul DP (*Direct Path*) può variare tra i 10 e i 25 dB e comporta una sensibile diminuzione dell'energia ricevuta, con rapporti segnale-rumore (SNR, *Signal to Noise Ratio*) spesso bassi. L'altro aspetto problematico del posizionamento indoor, per paradosso, consiste nella necessità di avere una precisione ed un'accuratezza ancora maggiori rispetto a quelle garantite dai servizi GNSS [3],[8].

Con il crescente interesse per servizi LBS e la massiccia diffusione dei dispositivi mobili si sta investendo sempre più nei sistemi di posizionamento indoor e risulta ormai evidente la necessità di sviluppare tecnologie adeguate. Basti pensare che *Google* ha sviluppato qualche anno fa il servizio *Indoor Google Maps*, contenuto all'interno della preesistente applicazione, per consentire agli utenti di orientarsi all'interno di grandi edifici come aeroporti, centri commerciali, musei etc., garantendo una buona navigazione indoor negli edifici

affiliati alla multinazionale [9].

Allo stato attuale dell'arte, numerose sono le tecnologie wireless terrestri in via di sviluppo che garantiscono, a seconda dell'applicazione e delle caratteristiche dell'ambiente, prestazioni più o meno buone in ambienti indoor; esse verranno approfondite nei seguenti paragrafi al fine di confrontarle e spiegare, infine, perché per l'applicazione specifica di questo elaborato sia stata impiegata la tecnologia UWB.

1.2 Metodi di posizionamento

Prima di andare ad analizzare le diverse proposte tecnologiche per il posizionamento indoor, è opportuno analizzare meglio i parametri dei segnali radio dipendenti dalla posizione che permettono di delineare i metodi di posizionamento e che vengono scelti a seconda delle capacità hardware dei nodi e della tecnologia impiegata [3].

1.2.1 RSS

Il metodo RSS (*Received Signal Strength*) si basa sul calcolo della potenza ricevuta, poiché si presuppone che più è lontano un nodo e più il segnale trasmesso si attenua. Tale metodo è applicabile nella maggior parte dei sistemi; tuttavia, il difetto del metodo basato sul RSS è l'elevata incertezza sulla stima della distanza dovuta al rischio di riflessione, rifrazione, multipath e altri fenomeni che rendono il livello di potenza ricevuto poco correlato alla distanza [3].

1.2.2 TOA

Il metodo TOA (*Time-of-Arrival*) calcola la distanza tra i nodi tenendo conto del tempo trascorso tra l'emissione e la ricezione di un segnale. Sapendo infatti che le onde elettromagnetiche si propagano nell'aria con velocità -circa- uguale alla velocità della luce nel vuoto ($\sim 3 \cdot 10^8$ m/s), la distanza può essere semplicemente

e accuratamente calcolata grazie al ritardo (o *time-of-flight*) di propagazione

$$\tau_f = \frac{d}{c} \tag{1.1}$$

dove τ_f è il TOF, c è la velocità della luce e d è la distanza tra i due nodi [3].

Una volta ricavata la distanza, è possibile tracciare un cerchio di raggio d centrato nell'ancora; l'intersezione delle circonferenze di più nodi ancora indica l'area all'interno del quale si trova il tag. Per una corretta misura in due dimensioni sono necessarie almeno tre ancore, in tre dimensioni ne servono almeno quattro [10].

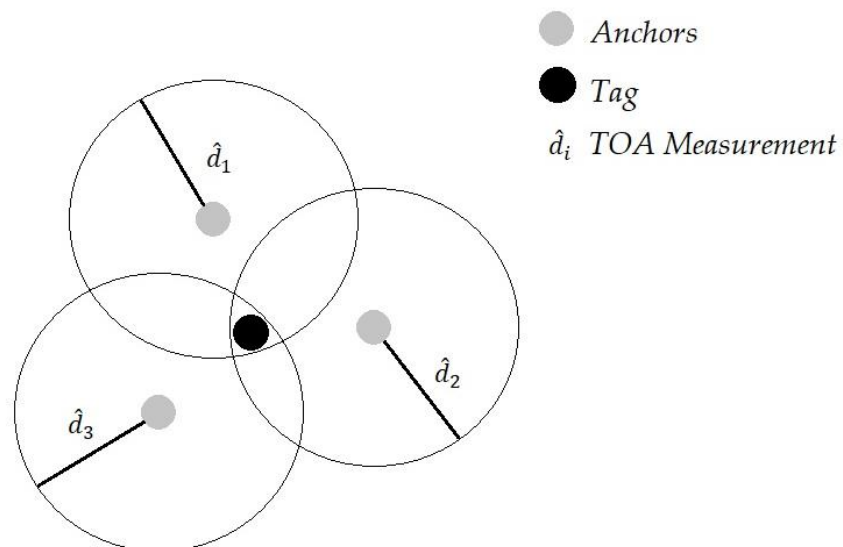


Figura 1.3 – Metodo TOA

Ci sono due modi per implementare questo metodo. Nel caso del *one-way ranging*, l'ancora invia un segnale al tag contenente anche il tempo t_1 , ovvero il momento in cui è iniziata la trasmissione. Il tag riceve il segnale ad un tempo t_2 , perciò durante una successiva elaborazione dei dati il TOF può essere calcolato come differenza tra i due tempi

$$\tau_f = t_2 - t_1 \tag{1.2}$$

È evidente come questo modo sia intrinsecamente soggetto ad errore, poiché nella realtà gli orologi dei dispositivi coinvolti non saranno mai

sincronizzati con precisione, comportando un conseguente errore sulla stima della distanza. La seconda implementazione va sotto il nome di TWR (*Two-Way Ranging*) e prevede il trascorrere di un tempo complessivo noto come RTT (*Round Trip Time*), il che significa che il nodo ancora invia un segnale al nodo ricevitore che risponderà inviando un altro segnale di risposta dopo un tempo fissato τ_d

$$RTT = 2\tau_f + \tau_d \tag{1.3}$$

Si ricava perciò senza troppa difficoltà il TOF e, da esso, si deriva la distanza con la (1.1). Quest'ultima non sarà altro che una stima, dal momento che, sebbene con questa modalità venga eliminata la necessità di avere nodi sincronizzati, è impossibile garantire un clock perfettamente accurato, perciò il tempo conosciuto τ_d sarà soggetto ad un errore definibile come variabile aleatoria gaussiana a valor medio nullo e con varianza dipendente dalla tecnologia [3]

$$\hat{d} = d + \varepsilon \tag{1.4}$$

con $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$

1.2.3 TDOA

Il metodo TDOA (*Time-Difference-of-Arrival*) è simile al metodo TOA appena descritto, l'unica diversità è che la qui presente tecnica misura la differenza dei tempi di arrivo anziché il loro valore assoluto. Il TOA, infatti, sfrutta il tempo assoluto di trasmissione di un segnale, mentre il TDOA si basa sul calcolo della differenziale dei TOF dei segnali emessi dalle varie antenne verso il singolo tag. Viene presa un'antenna come riferimento, poi vengono calcolati i singoli TOF di ogni antenna rispetto al tag e, infine, si ricavano le coordinate di quest'ultimo in base alla differenza tra i TOF delle singole antenne rispetto al TOF dell'antenna di riferimento.

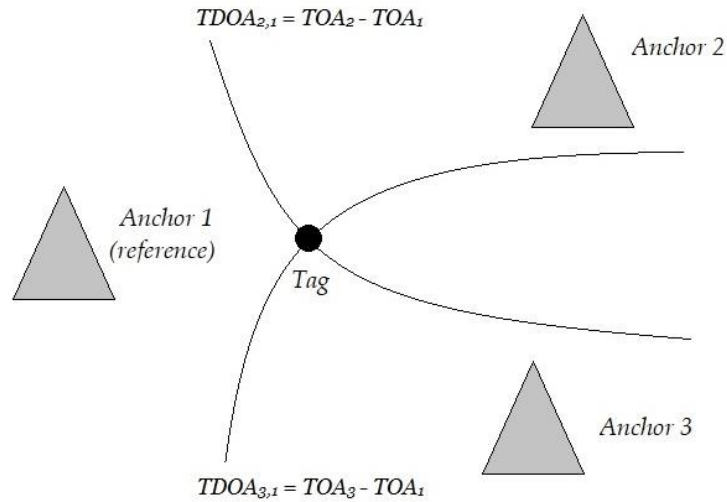


Figura 1. 4 – Metodo TDOA in 2D

Nel caso in due dimensioni, ogni misura TDOA viene interpretata geometricamente come un'iperbole formata da una schiera di punti la cui differenza delle distanze è costante [3],[9]. Il metodo TDOA è generalmente impiegato nei sistemi GPS.

1.2.4 AOA

Il metodo AOA (*Angle-of-Arrival*), contrariamente agli altri metodi illustrati in questo paragrafo basati sul calcolo della distanza, permette di stimare la posizione di un nodo calcolando l'intersezione degli angoli con cui il segnale incidente giunge a due o più ancore.

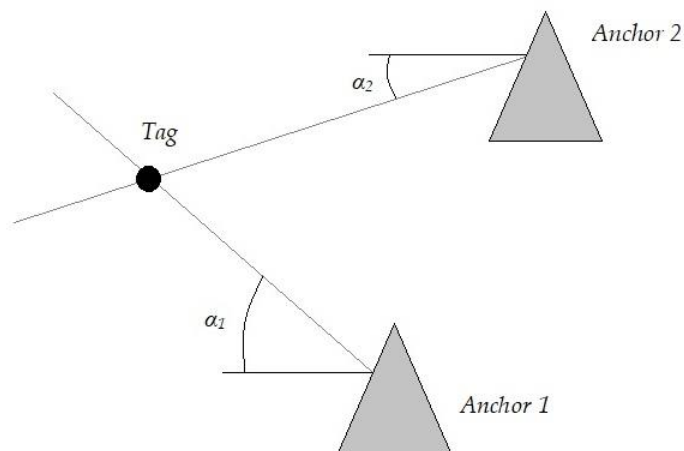


Figura 1. 5 – Metodo AOA

In teoria sono sufficienti due angoli per stimare la posizione in due dimensioni e tre per le misure in tre dimensioni, ma a causa delle interferenze sono necessarie più antenne per individuare correttamente un tag. Tale metodo risulta vantaggioso poiché, per sua stessa definizione, non richiede informazioni riguardanti i tempi di trasmissione del segnale, d'altro canto però l'AOA è un metodo costoso poiché per essere adeguatamente sfruttato richiede l'adozione di sistemi multi-antenna [10].

1.3 Tecnologie per posizionamento indoor

Oggigiorno una delle soluzioni più promettenti nell'ambito del posizionamento indoor risulta essere la tecnologia a banda ultra-larga. Essa, infatti, garantisce un'ottima accuratezza con un consumo energetico limitato a discapito, però, di un corto raggio (< 20 m in ambiente indoor) e di problematiche nel caso NLOS (*Non-Line-of-Sight*). Vi sono però numerose alternative in commercio, è utile accennarne qualcuna al fine di avere una visione d'insieme più chiara. Nella tabella 1.1 sono riassunte le caratteristiche delle tecnologie analizzate nel presente paragrafo.

<i>Tecnologia</i>	<i>Metodo di posizionamento</i>	<i>Accuratezza</i>	<i>Consumi</i>	<i>Costi</i>
WLAN	RSS	1-5m	Alti	Bassi
Bluetooth	RSS, TDOA	2-5m	Medi	Bassi
RFID	Prossimità, RSS	1-3m *	Bassi	Bassi
UWB	TOA, TDOA, AOA	0.1-1m	Bassi	Medi

Tabella 1.1

* Dipende fortemente dal range di connessione

1.3.1 WLAN

Una rete WLAN (*Wireless Local Area Networks*) è una rete wireless locale che può

essere impiegata outdoor in aree limitate o, sempre più frequentemente, indoor in ambienti come scuole, laboratori, campus e uffici. Ci si riferisce comunemente alle WLAN basate su standard IEEE 802.11. Esse, infatti, vanno sotto il noto nome di Wi-Fi. Solitamente le WLAN vengono impiegate per far collegare e comunicare tra loro i dispositivi presenti sulla rete, tuttavia vengono efficacemente impiegate anche nell'ambito del posizionamento indoor [11].

Le reti WLAN sfruttano tipicamente il metodo di posizionamento RSS, basandosi perciò sulla valutazione della potenza del segnale. Questa soluzione sembra allettante poiché le infrastrutture Wi-Fi sono già largamente impiegate e offrono a qualsiasi dispositivo mobile compatibile con questo standard la possibilità di essere localizzato. Inoltre, le reti WLAN non richiedono la visibilità dei tag e ciò costituisce un ulteriore vantaggio. Tuttavia, le problematiche che l'impiego di questa tecnologia comporta non sono trascurabili; i dispositivi mobili solitamente impiegati nelle reti WLAN hanno infatti consumi energetici rilevanti e l'attenuazione causata dall'interno degli edifici intacca molto l'accuratezza, tant'è che se non venissero impiegati numerosi router Wi-Fi o se non ci fosse un'integrazione con altre tecnologie essa si aggirerebbe attorno ai 20m [9].

1.3.2 Bluetooth

Il Bluetooth è uno standard tecnologico per reti wireless a corto raggio. Esso garantisce ai dispositivi mobili di comunicare sfruttando le onde radio nella banda ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) dai 2.402 GHz ai 2.48 GHz e permette la creazione di reti wireless personali (WPAN, *Wireless Personal Area Network*). Essendo la maggior parte delle applicazioni Bluetooth concepite per operare in condizioni indoor, è stato immediato passare dal concetto di comunicazione in prossimità dei dispositivi alla loro localizzazione a corto raggio [12].

Nella maggior parte dei casi i sistemi Bluetooth impiegano il metodo RSS

e offrono interessanti caratteristiche nel posizionamento indoor. I vantaggi infatti sono il basso consumo, il basso costo e le dimensioni ridotte dei tag impiegati e, nonostante rispetto alle WLAN il raggio di azione della tecnologia Bluetooth sia molto ridotto (tipicamente 10-15 m), quest'ultimo impiega meno energia e ha tempi di latenza (10-30 s) più bassi [9].

1.3.3 RFID

La tecnologia RFID (*Radio-Frequency IDentification*) rappresenta una delle proposte più interessanti nel panorama odierno poiché molto versatile. Un sistema RFID è composto dai tag e dai reader, questi ultimi interrogano i primi, i quali possono essere attivi o passivi a seconda dell'esigenza. I dati che il tag invia consistono principalmente in un ID univoco, ma il dispositivo può anche comunicare informazioni preventivamente memorizzate ed intrinsecamente legate alla sua posizione; la quantità di informazioni rese disponibile da un tag dipende dalle dimensioni della sua memoria.

Il metodo di posizionamento principale di una tecnologia RFID è la prossimità, il che significa che la posizione di un utente con addosso un tag viene individuata facilmente da un reader. È una tecnica molto semplice ed efficace con una precisione dello stesso ordine di grandezza del range operativo (tipicamente 4-5 metri con tag passivi), ma in questo caso l'accuratezza è fortemente dipendente dalla densità di tag in un ambiente e dal massimo raggio di copertura. Alternativamente, un altro metodo adatto a questa tecnologia è il RSS.

È opportuno sottolineare come l'RFID non abbia problemi di visibilità dal momento che le onde radio penetrano senza difficoltà materiali solidi, ma va ricordato che ciò comporta una notevole attenuazione del segnale e che, di conseguenza, la tecnica di posizionamento RSS non garantisce una buona accuratezza in questo caso. Resta il fatto che i vantaggi offerti da questa

tecnologia sono numerosi, dal costo basso alle diverse implementazioni possibili, dalla sicurezza garantita alla compattezza dei dispositivi [8],[9].

1.4 UWB

Secondo la FCC (*Federal Communication Commission*), un sistema a banda ultra-larga (UWB, *Ultra-Wide Bandwidth*) è definito come un sistema la cui larghezza di banda supera i 500 MHz o la cui banda relativa (definita nella 1.5) sia maggiore del 20%

$$B_f = \frac{B}{f_c} \tag{1.5}$$

dove B_f è la banda relativa, B è la banda assoluta, f_c è la frequenza di centro banda [13].

1.4.1 Regolamentazione e standard

La tecnologia UWB rappresenta un'innovazione che ha attirato sempre più interesse negli ultimi anni, ma come tutte le comunicazioni wireless, essa è stata soggetta a limitazioni sulla banda e a regolamentazioni, poiché essendo questo un mercato in fermento e sempre più in crescita, è necessario stabilire regole sull'utilizzo delle frequenze affinché non vi siano conflitti tra diverse tecnologie. La FCC ha imposto limiti sulla potenza dei sistemi UWB in modo tale da non interferire con altri sistemi operativi nello stesso spettro di frequenze. La banda concessa ai dispositivi UWB va dai 3.1 GHz ai 10.6 GHz con una densità spettrale di potenza media (PSD, *Power Spectral Density*) che non può superare i -41.3 dBm/MHz. Per il posizionamento indoor in tempo reale la banda più interessante che rispetta il vincolo imposto sulla potenza è la banda 6-8.5 GHz [3].

Anche in Europa sono state imposte delle limitazioni sulla banda per uniformare le condizioni di utilizzo della tecnologia UWB. Nello specifico, le frequenze sono state divise in base al massimo valor medio della densità di

potenza isotropica irradiata equivalente (EIRP, *Equivalent Isotropic Radiated Power*) e, sotto questi termini, sono due le bande a suscitare interesse: la banda 3.1-4.8 GHz che, a meno di specifiche tecniche di limitazione delle interferenze note come LDC (*Low Duty Cycle*), è limitata ad un massimo EIRP di 70 dBm/MHz, e la banda 6-8.5 GHz che, come imposto negli USA, non può andare oltre i -41.3 dBm/MHz e sembra offrire una buone prospettive nel lungo termine [14].

Le limitazioni sulla banda UWB ha comportato anche una spinta verso la standardizzazione della tecnologia. Nel 2007 è stato pubblicato lo standard IEEE 802.15.4a che, diversamente dallo standard precedente per reti wireless (IEEE 802.15.4), regola il livello fisico di reti locali sulla base delle caratteristiche UWB, ponendosi come obiettivi costi bassi, consumi bassi e un'accuratezza elevata [3]. Il metodo di posizionamento principale adottato da questo standard è il TWR, difatti, nonostante siano stati realizzati ulteriori standard per la tecnologia a banda ultra-larga, l'IEEE 802.15.4a è quello adoperato nella presente applicazione.

1.4.2 IR-UWB

La tecnica più comune per implementare un sistema banda ultra-larga è l'IR-UWB (*Impulse Radio*), un metodo di comunicazione dove un numero di impulsi di breve durata T_p viene trasmesso per simbolo e l'informazione viene espressa per mezzo della modulazione BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), ovvero in base alla polarizzazione degli impulsi UWB. Fondamentalmente ogni simbolo di durata T_s viene diviso in N_s trame di durata T_f , le quali sono ulteriormente scomposte in N_c frazioni di tempo più piccole chiamate chips di durata T_c .

Come si può vedere dalla figura 1.6, ogni impulso dura il tempo di un chip e ogni simbolo richiede la trasmissione di N_s impulsi. La polarità dell'intero treno di brevi impulsi è influenzata dal bit di informazione, questa

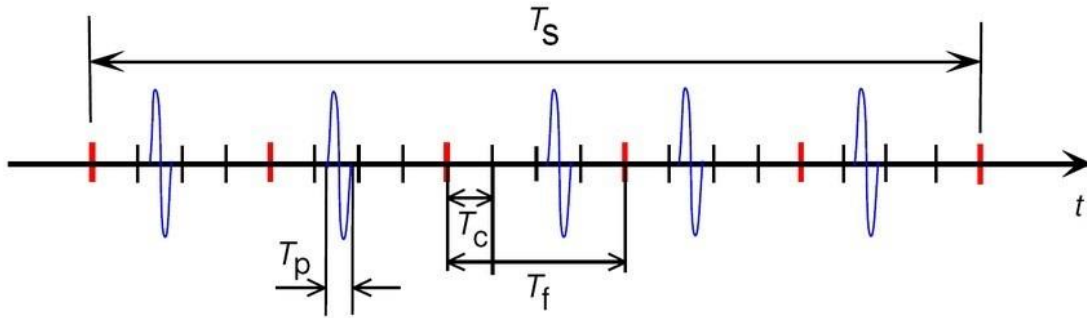


Figura 1.6 – IR-UWB [15]

tecniche garantisce così la possibilità di effettuare l'accesso multiplo da parte di più utenti contemporaneamente, poiché ciascun impulso viene modulato in modo diverso per ogni sequenza -più o meno- casuale di simboli trasmessi; inoltre, l'IR-UWB offre un elevato rapporto segnale-rumore, essendo associati numerosi impulsi ad un singolo bit il SNR aumenta di N_s volte, mentre, se venisse trasmesso un singolo impulso, il SNR risulterebbe inadeguato a causa delle normative imposte sul PSD. L'accesso multi-user può essere ottenuto anche modulando la posizione relativa (*time-hopping*) degli impulsi all'interno di ogni trama con una sequenza nuovamente pseudo-casuale [3],[13].

L'utilizzo di una banda larga nelle frequenze e, di conseguenza, di impulsi brevissimi nel tempo (tipicamente dell'ordine dei nanosecondi) fa del metodo IR-UWB una delle proposte più promettenti del panorama contemporaneo del posizionamento indoor. Tali sistemi infatti sono molto semplici, perciò non richiedono molti componenti hardware, comportando un costo contenuto. Inoltre, l'alta risoluzione nel tempo e la piccola lunghezza d'onda dei segnali UWB li rendono più robusti rispetto a fenomeni indesiderati come il multipath e consentono una misura del TOF molto precisa (qualche centimetro). Di conseguenza, la trasmissione richiede un consumo di energia relativamente basso. Ciò si evince anche dal teorema di Shannon-Hartley che definisce la capacità di canale in funzione di una relazione inversa tra larghezza di banda e consumo di potenza

$$C = B \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1.6)$$

dove C è la capacità di canale tenendo conto del rumore e della codifica, B è la banda e S/N è il SNR. Tale relazione evidenzia fondamentalmente che, a parità di massima quantità di informazione trasmissibile sul canale, si consuma meno potenza aumentando la banda. Anzi, essendo SNR nel logaritmo, è più facile aumentare la capacità di canale aumentando la banda piuttosto che aumentando SNR [13].

Ad un livello più alto, ogni pacchetto dati dello standard IEEE 802.15.4a consta di un preambolo di sincronizzazione (SHR, *Synchronization Header*), un header dello strato fisico (PHR, *Physical layer Header*) e il campo dei dati. Il SHR è composto a sua volta da un preambolo di ranging, usato per l'acquisizione dei dati, per il channel sounding e per il rilevamento del primo percorso oltre che per stimare la distanza, e da un delimitatore di inizio della trama (SFD, *Start of Frame Delimiter*), utilizzato per comunicare il termine del preambolo. Il PHR contiene la lunghezza delle trame e la velocità di trasmissione, mentre il campo dei dati contiene, ovviamente, l'informazione [3].

SYNCH Preamble [16,64,1024,4096] symbols	Start of frame delimiter, SFD [8,64] symbols	PHY header (PHR)	Data field (PSDU)
---------------------------------------------	-------------------------------------------------	---------------------	-------------------

Figura 1.7 – Struttura pacchetto IEEE 802.15.4a [3]

1.4.3 Limiti dei metodi di posizionamento UWB

Il metodo IR-UWB offre un'ottima risoluzione per i metodi di posizionamento temporali (TOA, TDOA), difatti nei casi migliori si ha un'accuratezza del centimetro. Nello specifico, nell'applicazione trattata in questa tesi viene implementata un'architettura TWR. La localizzazione attraverso certe tecniche è fortemente dipendente dalla qualità delle misure delle distanze e in ambienti reali le sorgenti d'errore sull'accuratezza delle misure sono consistenti e vanno

attentamente analizzate in sede di progettazione per essere poi opportunamente compensate.

Come già accennato svariate volte, il multipath è uno dei fenomeni che va a creare più problemi in contesti di localizzazione. Esso è causato dalle interferenze costruttive e distruttive di segnali che arrivano al ricevitore da diverse vie di propagazione, rendendo così difficoltosa la misura del DP tra due nodi. Difatti i segnali UWB riescono a vincere le componenti spurie del multipath, ma in ambienti critici tali componenti sono numerose, al punto da limitare la risoluzione temporale dei metodi TOA/TDOA.

Altre importanti cause d'errore sono dovute alle condizioni NLOS, ovvero quando il DP è ostruito e il ricevitore osserva il segnale riflesso o rifratto. In primo luogo si distingue il caso in cui il DP sia soltanto parzialmente ostruito, facendo arrivare la componente diretta del segnale con un certo ritardo dipendente dai materiali incontrati. Ciò comporta un bias positivo nella stima della distanza, poiché nei materiali presenti in ambienti indoor la propagazione di onde elettromagnetiche risulta più lenta rispetto alla propagazione in aria. Il ritardo può essere caratterizzato come segue, assumendo che i materiali considerati siano omogenei

$$\Delta\tau = (\sqrt{\epsilon_r} - 1) \frac{d_w}{c} \tag{1.7}$$

dove $\Delta\tau$ è il ritardo, ϵ_r è la permittività elettrica relativa del materiale, d_w è lo spessore di materiale e c è la velocità della luce [16].

Ulteriormente, un altro caso NLOS simile a quello appena detto tiene conto dell'ostruzione totale del percorso diretto del segnale, implicando sempre un bias positivo.

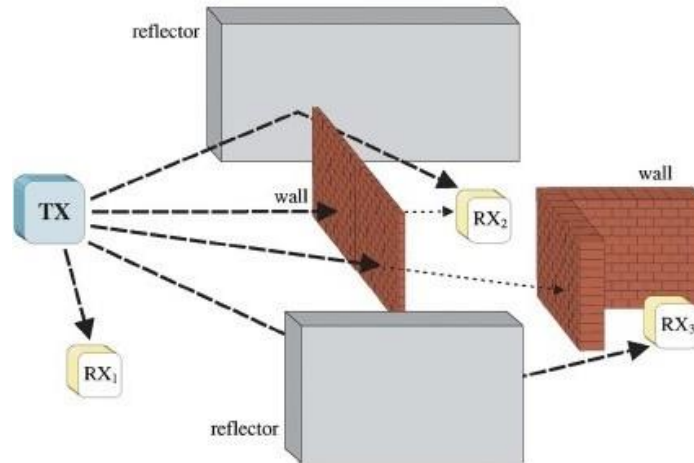


Figura 1. 8 – Configurazioni LOS e NLOS. RX1: LOS; RX2: NLOS, DP non ostacolato; RX3: NLOS, DP ostacolato [16]

I problemi provenienti dal multipath e dalla propagazione NLOS vanno a costituire le sorgenti d'errore maggiori, in aggiunta però, per una corretta analisi di un sistema UWB, vanno tenuti in considerazione anche l'incertezza sul clock degli oscillatori dei vari nodi e interferenze causate da altri sistemi operanti sulla stessa banda [16].

1.4.4 Soluzione ibrida RFID-UWB

Per far fronte ai limiti delle varie tecnologie adoperate oggi in ambienti indoor spesso sono state create soluzioni ibride. Una proposta interessante riguarda l'unione dell'UWB alla tecnologia RFID passiva, al fine di sfruttare gli enormi vantaggi offerti da entrambe e ottenere infine dei sensori accurati ed energeticamente autonomi.

I tag RFID passivi trasmettono informazioni mediante segnali retrodiffusi (*backscattered*), ovvero segnali riflessi che hanno la stessa direzione del segnale diretto ma verso opposto. La modulazione backscatter si basa sull'idea che le proprietà di riflessione dell'antenna del tag cambiano a seconda delle informazioni trasmesse.

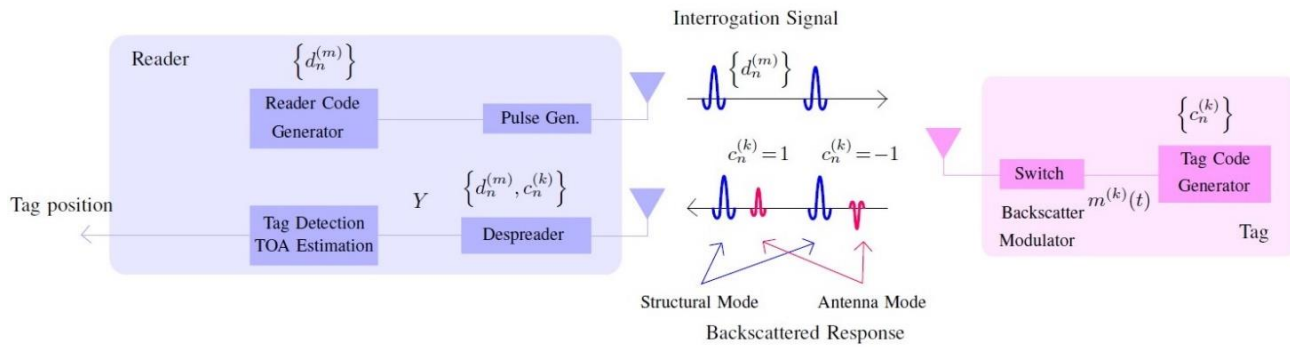


Figura 1.9 – UWB-RFID backscattering [17]

In riferimento alla figura 1.8, il principio dell'UWB backscattering prevede che quando un treno di impulsi UWB viene trasmesso e incontra l'antenna di un tag, esso viene parzialmente riflesso in base alla configurazione dell'antenna stessa. Tale risposta riflessa è formata da un modo strutturale e da un modo dell'antenna [17]. Il primo dipende dalla forma e dal materiale dell'antenna, mentre il secondo dipende dal carico collegato all'antenna. Ciò significa che quando l'antenna è cortocircuitata, l'impulso di backscatter è caratterizzato da un'inversione di segno rispetto alle condizioni di circuito aperto sul carico. Tale proprietà viene sfruttata per stabilire una comunicazione tra il tag e il reader; tuttavia, in ambienti impegnativi i segnali riflessi da altre superfici (*clutter*) e il modo strutturale predominano, rendendo difficoltoso l'impiego accurato della tecnologia UWB-RFID. Questa problematica può essere superata attraverso un opportuno design dello schema di segnalazione come proposto in [17]. Sfruttando una sequenza di impulsi UWB codificati emessi dai vari reader e facendo comunicare ai tag il carico sulla loro antenna secondo una codifica bipolare si può assicurare la creazione di un segnale di backscatter univoco che permetta di discriminare i vari tag.

Rispetto alla soluzione attiva già in commercio, questa tecnologia passiva presenta ancora molteplici limiti. Essendo la comunicazione bidirezionale, l'attenuazione a distanze brevi può essere elevata e, a causa delle regolamentazioni sull'UWB, può essere solo in parte compensata

dall'incremento di potenza di trasmissione. Come già accennato nel sottoparagrafo 1.4.2, si può migliorare il SNR aumentando il numero di impulsi associati ad un singolo bit di informazione. Ulteriormente, essendo i tag passivi, essi sono completamente asincroni, la mancanza di front-end al loro interno non permette di estrarre informazioni sulla sincronizzazione; fortunatamente tale problematica è risolvibile attraverso opportune tecniche. In ultima istanza, sebbene l'UWB backscattering sia caratterizzato da un basso consumo di potenza, la circuiteria all'interno del tag deve essere alimentata correttamente, comportando la necessità di risorse di energia limitate; inoltre, la maggior parte dell'energia emessa da un reader per interrogare un tag viene sprecata nell'ambiente circostante, perciò l'UWB-RFID risulta essere anche energeticamente inefficiente.

Per contro, ci sono buoni margini di miglioramento in prospettiva di questa tecnologia ibrida e sono molteplici le ricerche nel campo. Alcuni esempi sono il progetto europeo *SELECT*, che sfrutta un ricevitore parzialmente coerente come trade-off tra complessità e rendimento e che viene impiegato per smistare i bagagli in aeroporto, e il progetto italiano *GRETA*, che indaga l'efficienza energetica e l'ecocompatibilità dei sistemi UWB-RFID [17].

Capitolo 2

Figure di merito prestazionali

Le prestazioni di un sistema di posizionamento a banda ultra-larga basato su misure TOA dipendono dall'accuratezza delle misure effettuate, dalla geometria del sistema e dagli algoritmi impiegati per localizzare. La tecnologia adoperata e l'ambiente influenzano a loro volta l'accuratezza delle misure, ma non solo, anche il multipath, la presenza di nodi NLOS e il rumore condizionano la precisione della stima della distanza [3].

In questa applicazione specifica viene impiegata una tecnologia nota con misure di tipo TWR e un algoritmo di localizzazione e tracking già implementato basato su filtri Bayesiani in un ambiente la cui geometria risulta essere anomala. Con lo scopo di identificare le prestazioni di un sistema di posizionamento UWB svincolandosi dallo specifico algoritmo di localizzazione, in questo capitolo sono effettuate analisi legate ai limiti teorici fondamentali in funzione degli errori di ranging legati alla tecnologia UWB.

2.1 GDOP

La diluizione geometrica della precisione (*GDOP, Geometric Dilution Of Precision*) è un parametro adimensionale unicamente dipendente dalla configurazione geometrica dei nodi e completamente indipendente dalle caratteristiche della propagazione radio e dall'accuratezza delle misure. Esso rappresenta un limite teorico sull'accuratezza di posizionamento molto importante che permette di fare considerazioni a priori sul sistema di localizzazione, restituendo la confidenza

che si ha nel fare una possibile stima della posizione. È nato nel contesto del sistema GPS, ma è ugualmente adatto per valutare sistemi indoor [18].

Per ricavare la formula generale del GDOP è necessario considerare le coordinate dei diversi dispositivi in un sistema di riferimento. Lo pseudorange è la distanza misurata tra le singole ancore e il tag e, essendo una stima, è sicuramente soggetto ad errore

$$\hat{d}_i = d_i + \varepsilon \quad (2.1)$$

dove \hat{d}_i è lo pseudorange stimato, ε è l'errore dovuto ai fenomeni di non idealità (rumore, multipath, etc.) e d_i è la distanza reale tra il tag e l' i -esima ancora la cui formula in tre dimensioni è la seguente

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (2.2)$$

dove x_i, y_i, z_i sono le coordinate dell' i -esima ancora e x, y, z sono le coordinate del tag.

Si può vedere chiaramente che il modello per lo pseudorange consta di un altro componente oltre lo pseudorange effettivo. Si ha infatti un errore commesso durante la misura della distanza, il quale comporta una stima sbagliata delle coordinate del tag. Ipotizzando gli errori siano relativamente piccoli, è possibile linearizzare l'equazione attraverso la serie di Taylor, ottenendo così un nuovo modello

$$\Delta d_i = d_i - \hat{d}_i = \frac{\partial r_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_i}{\partial z} \Delta z = \frac{x_i - x}{r_i} \Delta x + \frac{y_i - y}{r_i} \Delta y + \frac{z_i - z}{r_i} \Delta z \quad (2.3)$$

L'equazione precedente rappresenta l'errore sullo pseudorange per l' i -esima ancora, essendo il termine Δd_i la differenza tra lo pseudorange corretto e lo pseudorange stimato. Le n equazioni del sistema possono essere raggruppate in una forma più compatta attraverso l'impiego di matrici

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{p} \quad (2.4)$$

dove $\Delta \mathbf{d}$ è il vettore di lunghezza n delle differenze tra gli pseudorange rispetto tutte le ancore, \mathbf{A} è la matrice $n \times 3$ contenente le derivate parziali degli pseudorange rispetto alle coordinate e $\Delta \mathbf{p}$ è il vettore delle 3 coordinate sconosciute, ovvero le coordinate spaziali del tag

$$\Delta \mathbf{p} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T \quad (2.5)$$

Il sistema di equazioni riassunto in forma matriciale può essere risolto col metodo dei minimi quadrati; tale tecnica iterativa permette di individuare una funzione che si avvicini il più possibile ad un insieme di dati di interesse – in questo caso le coordinate vere del tag. Essendo il sistema linearizzato non è necessario reiterare la tecnica, si assume che gli errori sulle misure e sul modello siano uguali per ogni osservazione così da ottenere la soluzione

$$\Delta \mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} \quad (2.6)$$

Per ricavare l'accuratezza di questa soluzione è sufficiente ricorrere alla matrice delle covarianze, la quale dà una stima statistica della propagazione dell'errore. Dal momento che la covarianza è un indice della dipendenza tra due variabili aleatorie, se gli errori sugli pseudorange sono incorrelati e sono identici per ogni osservazione si può riscrivere la matrice delle covarianze di $\Delta \mathbf{d}$ come prodotto tra la matrice identità e la deviazione standard della misura di ranging, ottenendo infine la matrice delle covarianze di $\Delta \mathbf{p}$ in una forma semplificata

$$\mathbf{C}_{\Delta \mathbf{p}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{C}_{\Delta \mathbf{d}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{I} \sigma^2 \quad (2.7)$$

dove $\mathbf{C}_{\Delta \mathbf{p}}$ e $\mathbf{C}_{\Delta \mathbf{d}}$ sono rispettivamente le matrici delle covarianze del vettore $\Delta \mathbf{p}$ e del vettore $\Delta \mathbf{d}$, \mathbf{I} è la matrice identità e σ^2 è la varianza comune a tutte le osservazioni.

Ogni elemento sulla diagonale della matrice delle covarianze delle

coordinate sconosciute corrisponde alle varianze delle singole coordinate, mentre gli altri elementi della matrice corrispondono alle covarianze. Poiché l'interesse verte intorno alla "diluizione" dell'errore di misura delle distanze rispetto all'errore di stima della posizione si vanno a considerare le varianze della diagonale della matrice \mathbf{Q} data dall'inversa del prodotto tra la trasposta della matrice \mathbf{A} e la matrice \mathbf{A} stessa

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz}^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Gli elementi della matrice \mathbf{Q} sono solamente funzione della geometria del sistema di localizzazione, sono privati della deviazione standard degli errori degli pseudorange. Si può definire a questo punto il GDOP come radice quadrata della traccia della matrice \mathbf{Q}

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{Q})} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (2.9)$$

Esso è un indice che "diluisce" l'accuratezza della determinazione della posizione del tag in base alla configurazione dei nodi [18],[19].

2.1.1 HDOP e VDOP

Spesso e volentieri più che analizzare il GDOP complessivo interessa considerare componenti specifici rispetto le coordinate. Si può separare ad esempio la componente spaziale orizzontale dalla componente spaziale verticale; la prima va sotto il nome di HDOP (*Horizontal Dilution Of Precision*), la seconda va sotto il nome di VDOP (*Vertical Dilution Of Precision*) [19].

$$HDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22}} \quad (2.10)$$

$$VDOP = \sigma_z = \sqrt{Q_{33}} \quad (2.11)$$

Verranno fatte delle considerazioni pratiche nel paragrafo 2.4 sull'andamento dei vari DOP.

2.2 PEB

Il PEB (*Position Error Bound*) è un limite teorico fondamentale per l'accuratezza di un sistema di posizionamento. Esso è una generalizzazione della (2.7) in quanto può tenere conto di diverse varianze sulle misure dei nodi ancora.

Il PEB si basa sul limite inferiore di Cramér-Rao (CRLB, *Cramér-Rao Lower Bound*), che rappresenta il limite inferiore alla covarianza di uno stimatore di posizione non soggetto a bias. Il CRLB è l'inverso della matrice informazione di Fisher e rappresenta il limite ultimo del RMSE di stima della posizione [20]

$$CLRB(\boldsymbol{\alpha}) = J^{-1}(\boldsymbol{\alpha}) = [\mathbb{E}\{\nabla_{\boldsymbol{\alpha}}^T \log f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\alpha}) \nabla_{\boldsymbol{\alpha}} \log f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\alpha})\}]^{-1} \quad (2.12)$$

dove $\boldsymbol{\alpha}$ corrisponde alle coordinate sconosciute x, y, z del tag, $\nabla_{\boldsymbol{\alpha}}$ è il gradiente rispetto le coordinate del tag, f è la funzione di densità di probabilità del vettore \mathbf{r} condizionato dalle coordinate e \mathbf{r} è il vettore delle misure di ranging delle n ancore tenendo conto di un errore modellato come rumore gaussiano

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_n] \quad (2.13)$$

$$r_i = d_i(\boldsymbol{\alpha}) + v_i \quad (2.14)$$

dove d_i è l' i -esima distanza vera rispetto il tag e v_i è l' i -esimo termine che rappresenta il rumore gaussiano a valor medio nullo.

Per quanto riguarda la pdf nella (2.12), nel caso di misure indipendenti degli pseudorange, essa può essere scritta come una gaussiana avente valor medio μ pari alla distanza reale d_i e varianza σ^2 pari alla varianza σ_i^2 dell' i -esima misura della distanza

$$f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\alpha}) = \prod_{i=1}^n f_i(r_i|\alpha) \quad (2.15)$$

$$f_i(r_i|\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{(r_i-d_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (2.16)$$

Il CRLB, nel contesto del posizionamento, può essere scritto anche in forma matriciale

$$\mathbf{CRLB}(\boldsymbol{\alpha}) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

dove gli elementi sulla diagonale sono le varianze delle coordinate stimate, similmente a quanto già visto nel paragrafo precedente.

Si può definire, a questo punto, il PEB come radice quadrata della traccia del CRLB, esso è un limite sull'accuratezza dei sistemi di localizzazione, dipende dalla distanza tra le varie ancore ed il tag

$$PEB = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{CRLB}(x, y, z))} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} \quad (2.18)$$

Per capire meglio il suo significato è opportuno approfondire brevemente la matrice informazione di Fisher; essa, infatti, non è altro che una somma pesata delle informazioni geometriche delle posizioni relative del tag rispetto le varie ancore. I vari pesi dipendono dall'importanza delle informazioni derivanti dall'*i*-esima ancora; si verifica ad esempio che ancore lontane o molto vicine tra loro non contribuiscono molto alla matrice di Fisher e, quindi, alla determinazione della posizione del tag. Com'è facile intuire, le ancore NLOS non hanno un peso rilevante, le prestazioni del sistema dipendono perlopiù dalle ancore visibili.

Ipotizzando di avere una deviazione standard uguale per ogni misura della distanza, si può esprimere il PEB anche in funzione degli angoli tra le ancore

ed il tag (per semplicità in 2D)

$$PEB = \sigma \sqrt{\frac{n}{(\sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i) (\sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i) - (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i)^2}} \quad (2.19)$$

dove σ è la deviazione standard della misura di ranging, n è il numero di ancore e θ_i è l' i -esimo angolo tra l' i -esima ancora ed il tag [21].

È interessante sottolineare che le derivate parziali degli pseudorange rispetto le coordinate contenuti nella matrice A del paragrafo precedente del GDOP corrispondono ai seni e coseni degli angoli presenti nella formula appena riscritta del PEB. Risulta semplice a questo punto creare un collegamento tra GDOP e PEB, poiché difatti entrambi esprimono lo stesso limite sull'accuratezza di ranging, con la differenza che il PEB tiene conto anche della deviazione standard della misura di ranging e delle varianze dipendenti dalle distanze mentre il GDOP dipende unicamente dalla geometria e dalle coordinate del tag

$$GDOP = \frac{PEB}{\sigma} = \frac{\sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2}}{\sigma} \quad (2.20)$$

2.3 RMSE

Nel valutare le performance di uno specifico algoritmo di posizionamento, si fa spesso riferimento alla radice quadrata dell'errore quadratico medio (RMSE, *Root-Mean-Square Error*) di cui il PEB rappresenta il limite fondamentale. Il RMSE è la radice quadrata del valor medio dell'errore sulla stima della posizione considerando tutte le possibili sorgenti d'errore

$$RMSE = \sqrt{\mathbb{E}\{\varepsilon^2(x)\}} = \sqrt{\frac{1}{n} \mathbb{E}\left\{\sum_{i=1}^n (\hat{p}_i - p)^2\right\}} = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} \quad (2.21)$$

dove ε è l'errore sulla stima, n è il numero di osservazioni, \hat{p}_i è l' i -esima posizione stimata, p_i è l' i -esima posizione vera, μ è il valor medio e σ^2 la varianza.

Il RMSE viene sovente considerato l'equivalente dell'accuratezza dal momento che esso rappresenta quanto la posizione misurata si discosti dalla posizione effettiva, più è basso e maggiore è l'accuratezza. Tale parametro, infatti, può anche essere calcolato come radice quadrata della somma del valor medio al quadrato e la varianza, dove il primo rappresenta errori sistematici sulle misure (incertezza degli strumenti o errori umani), mentre la seconda rappresenta la dispersione dovuta a tali errori e al rumore [22].

È possibile dare un'ulteriore interpretazione dell'errore quadratico medio sulla base del CRLB definito nel paragrafo precedente. Essendo il CRLB un limite inferiore della varianza di stimatori di posizione privi di bias, esso rappresenta il limite inferiore del RMSE. Ciò significa che non esiste stimatore di posizione le cui prestazioni possano essere migliori di quelle previste dal CRLB, l'accuratezza in termini di RMSE sarà sempre limitata inferiormente.

Nel capitolo successivo, il RMSE verrà utilizzato per caratterizzare la prestazione del sistema analizzato in laboratorio. PEB e GDOP vengono quindi impiegati per capire quanto è lontana la prestazione del sistema dal limite teorico.

2.4 Analisi delle prestazioni teoriche

Come appena accennato, per analizzare correttamente le prestazioni reali del sistema preso in esame in questo elaborato è utile prima fare delle considerazioni sulle prestazioni teoriche dello stesso attraverso le figure di merito analizzate sino ad ora.

Tenendo a mente che l'architettura considerata è di tipo TWR, le seguenti considerazioni sono state fatte sotto l'ipotesi di ancore posizionate sulle estremità di una croce il cui centro è l'origine del sistema di riferimento; per le ancore viene supposta $Z=0.16$ m e X e Y variabili a seconda della larghezza del braccio della croce, mentre la posizione del tag è supposta essere variabile lungo l'asse Z con X e Y fissati a 0 m (figura 2.1). Assumendo inizialmente la posizione del tag molto

vicina al riferimento, si fa aumentare la distanza tra il tag e le ancore coprendo un range di 6 m circa.

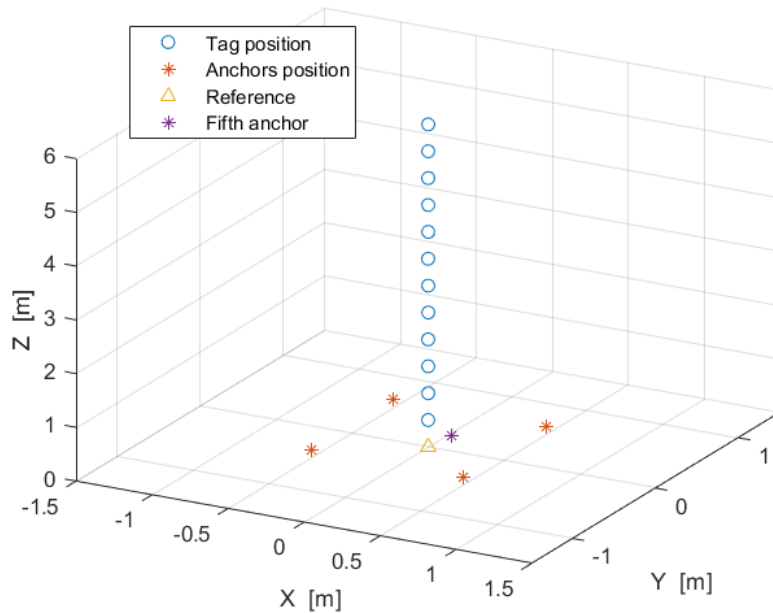


Figura 2.1 – Possibile geometria del sistema

Supponendo le ancore siano 4 e la larghezza del braccio sia pari a 1 m, si può notare in figura 2.2 che in generale l'HDOP degrada molto rapidamente al crescere della distanza mentre il VDOP resta indicativamente basso e costante per tutto l'andamento, eccezion fatta per un lieve peggioramento dell'accuratezza per distanze molto piccole.

Considerando che teoricamente il GDOP migliora avendo più nodi di riferimento, si possono fare ulteriori considerazioni incrementando il numero di ancore: rispetto alla classica configurazione a quattro ancore ne viene aggiunta una quinta -quasi- al centro del sistema di riferimento sempre con $Z=0.16$ m e $X=Y=0.1$ m (in figura 2.1 è contrassegnata in viola). Si vede in figura 2.3 che ciò non comporta grandi variazioni sul piano orizzontale ma sembra migliorare leggermente il VDOP per piccole distanze.

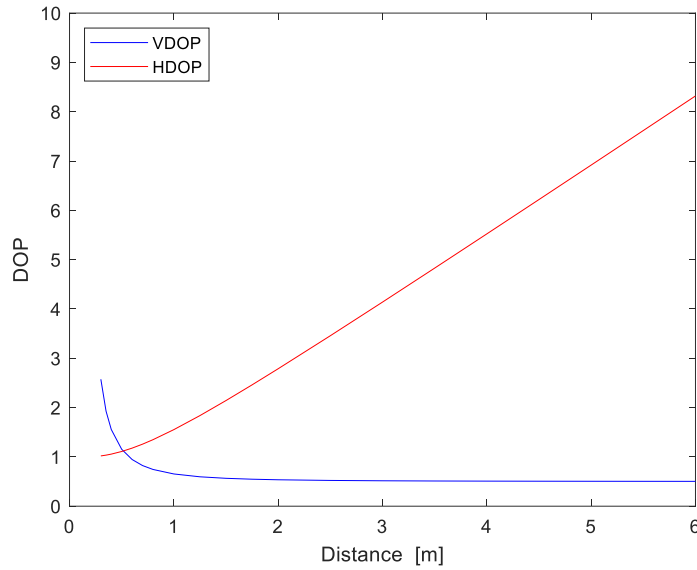


Figura 2. 2 – HDOP e VDOP per 4 ancore poste su un braccio di 1 m e tag avente coordinate (0,0,z=distanza)

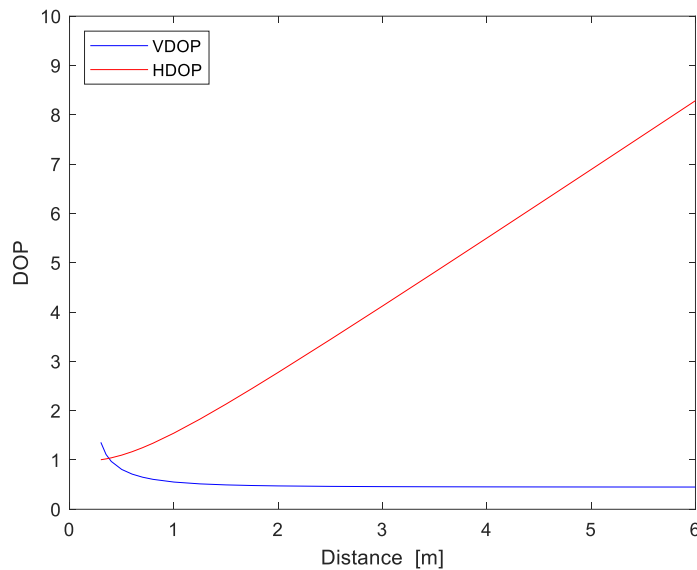


Figura 2. 3 – HDOP e VDOP per 5 ancore poste su un braccio di 1 m con la quinta posta vicino al riferimento in (0.1,0.1,0.16) e tag avente coordinate (0,0,z=distanza)

Anche il modo in cui le ancore sono disposte influenza fortemente il GDOP, l'accuratezza migliora infatti se le ancore sono sparpagliate e distanti tra loro. Mentre l'HDOP rispecchia questa tendenza e può essere sensibilmente migliorato distanziando le ancore tra loro, il VDOP, al contrario, migliora leggermente per piccole distanze considerando le ancore più vicine e peggiora drasticamente per ancore via via sempre più distanti. Lo si può vedere

chiaramente confrontando le figure 2.2, 2.4 e 2.5, dove la larghezza del braccio su cui sono posizionate le quattro ancore è pari a 1 m, 0.5 m e 2 m rispettivamente.

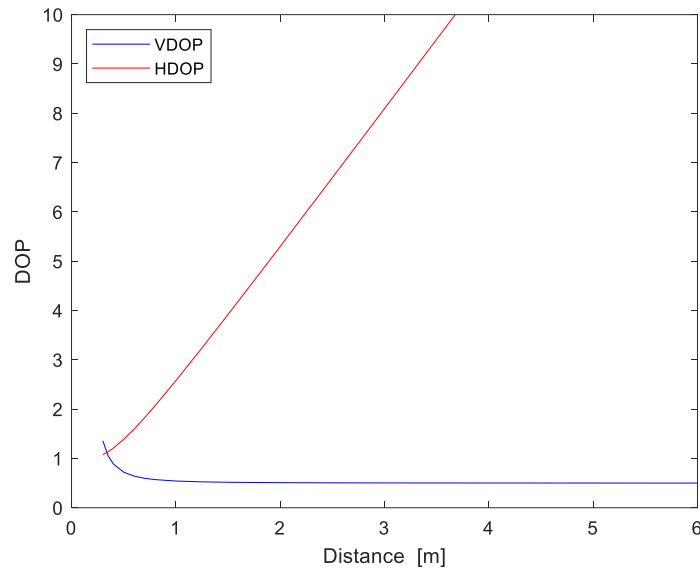


Figura 2. 4 – HDOP e VDOP per 4 ancore poste su un braccio di 0.5 m e tag avente coordinate (0,0,z=distanza)

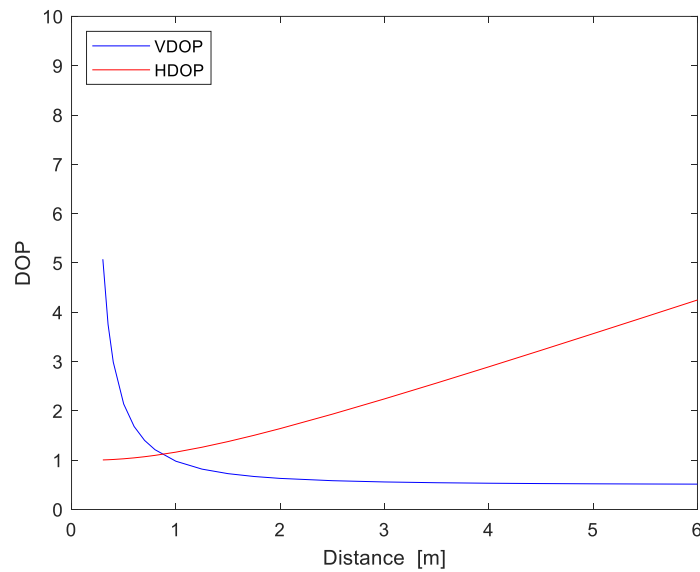


Figura 2. 5 – HDOP e VDOP per 4 ancore poste su un braccio di 2 m e tag avente coordinate (0,0,z=distanza)

Capitolo 3

Misure effettuate in laboratorio

Per verificare l'effettiva accuratezza di un sistema UWB e le prestazioni di quest'ultimo in ambiente indoor sono state effettuate delle misure in laboratorio, così da avere un riscontro pratico rispetto alle aspettative teoriche. Il braccio automatico è stato simulato installando le ancore su una croce di legno sorretta da un treppiedi come mostrato in figura 3.1, mentre il tag è stato installato a sua volta su un'altra struttura ed è stato spostato in precise posizioni prestabilite al fine di confrontare le posizioni stimate dalle ancore con le posizioni reali e studiare la performance del sistema.



Figura 3.1 – Disposizione generica di ancore e tag

3.1 Sistema di misura UWB

Per la campagna di misura è stato utilizzato il sistema *Sequitur*, una soluzione RTLS per un'accurata localizzazione indoor e outdoor che fa uso sia di elementi hardware che software, originariamente sviluppata dall'Università di Bologna e successivamente commercializzata da *Uniset S.R.L.* Il sistema *Sequitur* è basato su tecnologia a banda ultra-larga ed offre la possibilità di effettuare misure di tipo TWR o TDOA. Insieme ai dispositivi fisici, di cui un esempio in figura 3.2, viene fornito il software *Sequitur Core* che permette di installare, configurare, monitorare e utilizzare il sistema; dei due moduli che compongono il software è stato usato solamente *Sequitur Manager* nella presente applicazione [23].



Figura 3. 2 – Hardware per il posizionamento indoor e identificazione delle parti [23]

Il sistema *Sequitur* non richiede alcun master oltre alle ancore utilizzate per localizzare, ciò lo rende user-friendly e semplice da gestire, tuttavia è cruciale impostare correttamente il sistema di riferimento, poiché la posizione del tag di interesse viene calcolata e stimata a livello software rispetto alle coordinate delle ancore [23].

Una guida per l'installazione e la configurazione dei nodi è consultabile nell'appendice.

3.2 Acquisizione misure

In questo paragrafo verrà descritto brevemente com'è stato impostato il sistema e come sono state effettuate le misure, sia da un punto di vista hardware, ovvero come sono stati disposti i nodi, sia da un punto di vista software, ovvero quali parametri sono stati modificati.

3.2.1 Hardware

Le quattro ancore sono state posizionate a 90° tra loro sulla croce e a 45° rispetto l'asse X, poiché tale inclinazione rispecchia le condizioni realistiche del braccio. Gli agganci presenti sulla croce permettono diverse possibili configurazioni delle ancore; in figura 3.3 ad esempio si hanno quattro ancore poste su bracci lunghi 1 m. Come origine del sistema di riferimento è stata scelta la vite centrale della croce in legno, la quale è supposta essere equidistante dalle quattro ancore.

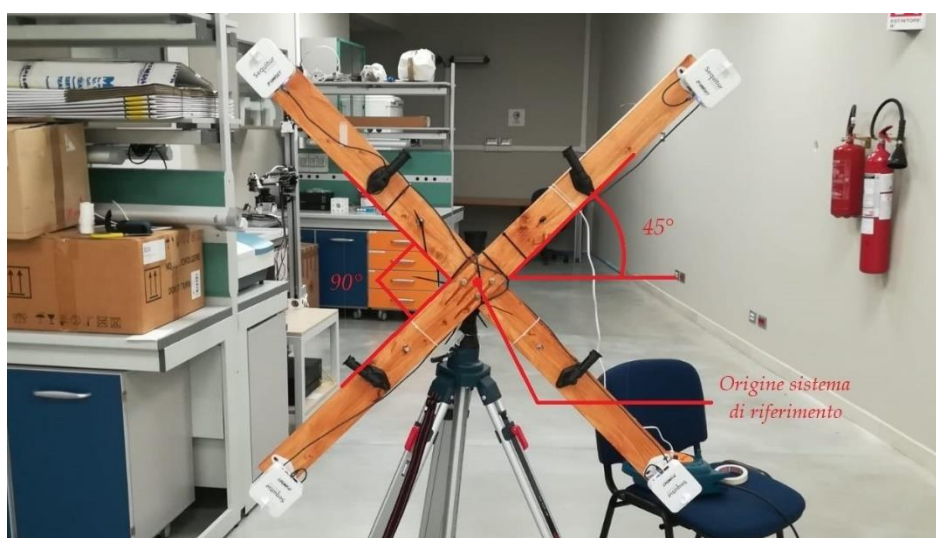


Figura 3.3 – Struttura fissa delle ancore

La struttura è stata posta perpendicolarmente ad un muro, non troppo vicino però per evitare le interferenze dovute al cemento armato. Avendo a disposizione un'area limitata di circa 30 m^2 in una stanza con una geometria non simmetrica, il muro in cemento armato è stato utilizzato come riferimento per acquisire le distanze delle ancore e delle varie posizioni del tag. Per queste ultime

è stata creata una griglia di 26 punti distanziati 1 metro l'uno dell'altro e, dal momento che nel caso reale il braccio si abbasserebbe verticalmente su di un oggetto lungo l'asse Z, il sistema di coordinate è stato preso considerando la X come direzione orizzontale, la Z uscente dal piano e la Y come direzione verticale – nello specifico, il tag è stato considerato sempre alla stessa altezza del riferimento, quindi con $Y=0$ m. Come si può vedere in figura 3.4, viene creato un quadrato 4×6 di punti cui vengono aggiunti 2 punti nelle ultime file perché la stanza si allarga in quella parte e la performance in quelle posizioni possono essere di interesse. Le misure delle distanze sono state effettuate attraverso un distanziometro laser.

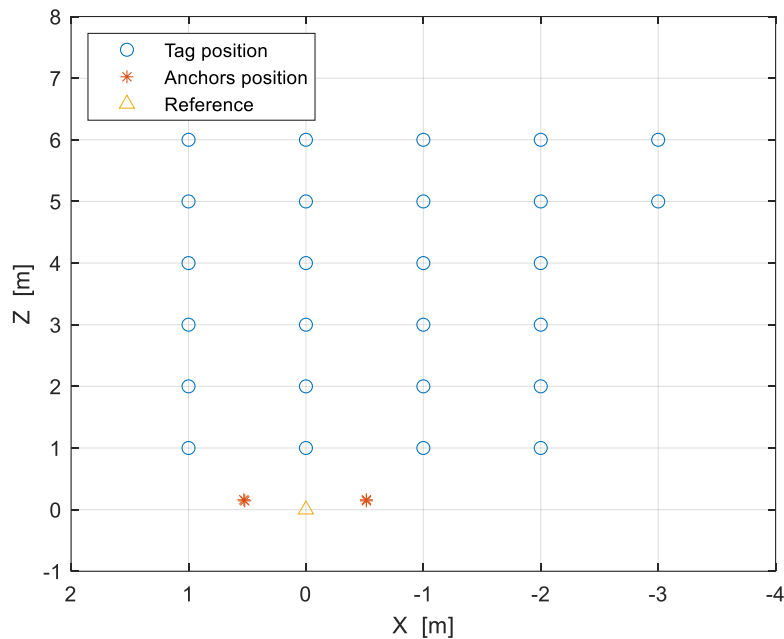


Figura 3.4 – Griglia di punti

L'antenna vera e propria è confinata in una precisa area all'interno del nodo *Sequitur* visibile in figura 3.2 e dista 9.8 mm dalla superficie esterna, perciò sono stati affissi dei fogliettini su tutti i dispositivi in corrispondenza della zona dell'antenna al fine di garantire un'accuratezza maggiore nella stima delle posizioni reali delle ancore durante le misure con il puntatore laser.

3.2.2 Software

Nel sistema *Sequitur* è di fondamentale importanza anche una corretta impostazione dei parametri del *Manager*, poiché quest'ultimo acquisisce a tutti gli effetti le misure, elabora i dati e stima la posizione. Verranno elencati quindi i parametri dei tag o delle ancore che hanno giocato un ruolo chiave nelle misure effettuate ed analizzate nel paragrafo successivo.

- **2dpositioning** – parametro che controlla il modo in cui viene computata la posizione del tag. La stima della posizione può essere effettuata in modalità 3D (2dpositioning=0), in modalità 2D (2dpositioning=1) o in modalità mista (2dpositioning=2). Quest'ultima ammette movimenti del tag sul piano XY ma fissa l'asse Z ad un range di valori specificati dai parametri **tagheightmax** e **tagheightmin**. Il valore di default è 1 [24].
- **locationparticles** – parametro che permette di impostare il numero di particelle usate dal sistema di localizzazione. Il range dei valori va da 500 a 6000, il valore di default è 2000 [24].

Tale parametro si riferisce al "particle filtering", un algoritmo di tracking adatto a sistemi non lineari e non gaussiani che, tuttavia, non verrà analizzato nel dettaglio in questo lavoro [25].

- **mobilitymodel** – parametro che consente di impostare l'algoritmo per il tracking interno dei dispositivi. Il valore di default è impostato a 1 (MM1), tale modello è randomico e assume equiprobabili i movimenti in tutte le direzioni con possibilità di inserire specifiche sulla velocità attraverso i parametri **mobilitystdx**, **mobilitystdy** e **mobilitystdz**. Il mobility model 3 (MM3) prevede un algoritmo one-shot per cui il tracking risulta disabilitato, la stima della posizione viene fatta unicamente sulla base delle ultime misure acquisite [24].
- **mobilitystdx/mobilitystdy/mobilitystdz** – parametri che specificano la velocità prevista dal tag sotto forma di deviazione standard per ogni

coordinata quando il **mobility model** è 1. Il valore di default è 1 m/s su un range che va da 0 a 100 [24].

- **positioningperiod** – parametro che controlla il periodo di raccolta delle misure del firmware, aggiornando poi la posizione ogni volta. Il range di valori, espresso in millisecondi, va da 10 a 30000, con valore di default pari a 50 ms [24].
- **radiorxoffset/radiotxoffset** – parametro che regola l’offset del ricevitore o del trasmettitore radio per compensare possibili errori. Il valore di default è 0 m, il range di valori va da -50 a 50 [24].
- **tagheightmax/tagheightmin** – parametri che controllano l’altezza massima e minima rispettivamente al quale può essere posizionato il tag rispetto l’asse Z, valido solo se il parametro **2dpositioning** è impostato nella modalità mista [24].
- **toaestimationstd** – parametro che indica all’algoritmo di localizzazione qual è la deviazione standard attesa per le misure UWB effettuate con metodi TOA. Il valore di default è pari a 0.7 m, il range di valori va da 0 a 50 [24].

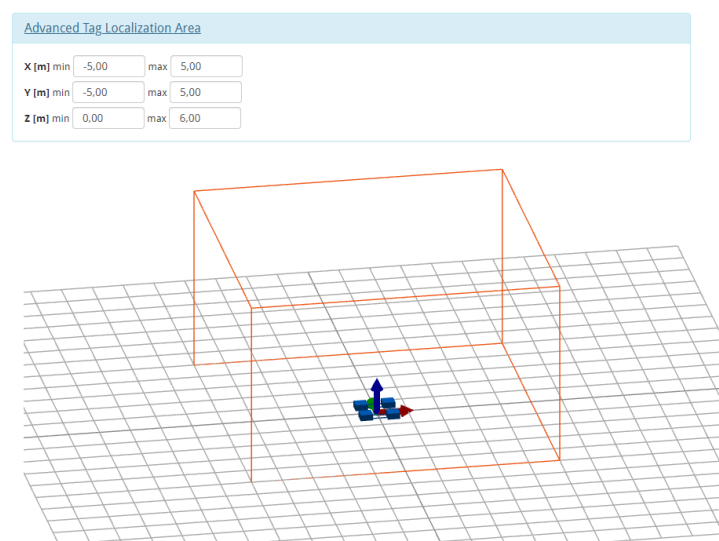


Figura 3.5 – Bounding box

Oltre ai parametri elencati, modificabili nella sezione delle proprietà dei devices, è di fondamentale importanza l'impostazione della localization area (o bounding box), l'area di localizzazione del tag delimitata dalle coordinate inserite, di cui un esempio in figura 3.5. È stato verificato sperimentalmente che una bounding box troppo grande comporta misure imprecise, poiché le particelle per localizzare si distribuiscono in un volume più esteso, mentre una bounding box eccessivamente piccola impone limiti troppo stringenti sulla localizzazione, la stima della posizione risente degli effetti di bordo del box.

3.3 Risultati sperimentali

Tutte le misure sono state effettuate nello stesso laboratorio variando la posizione delle ancore e i parametri elencati nel paragrafo precedente, per ogni configurazione delle ancore il tag è stato posizionato in tutti i 26 punti della griglia e per ogni posizione sono state acquisite circa un migliaio di misure. Per valutare le prestazioni del sistema è stato confrontato il RMSE calcolato attraverso le misure e i RMSE teorici ottenuti con l'analisi effettuata nel capitolo precedente e calcolati come prodotto tra i vari DOP e diversi valori della deviazione standard; il primo è rappresentato nei grafici sempre in rosso, mentre i RMSE teorici sono graficati con altri colori a seconda del valore considerato della deviazione standard.

3.3.1 Quattro ancore con parametri di default

Un primo round di misure è stato effettuato lasciando tutti i parametri principali del sistema ai valori di default, eccezion fatta per il $2dpositioning$, che è stato posto a 0 (modalità 3D). La larghezza del braccio è 1 m e la struttura con le ancore è stata posizionata vicino al muro, in corrispondenza della prima fila di punti, la bounding box è stata impostata con limiti larghi sulle coordinate, formando un parallelepipedo $8 \times 8 \times 10$ m³. Essendo il $positioningperiod$ pari a 50 ms, per ogni

posizione del tag l'acquisizione delle misure è durata circa un minuto, consentendo di raccogliere più di mille misure per punto. I dati raccolti sono stati poi elaborati in Matlab, calcolando gli indici statistici d'interesse, ma i risultati ottenuti sono stati insoddisfacenti.

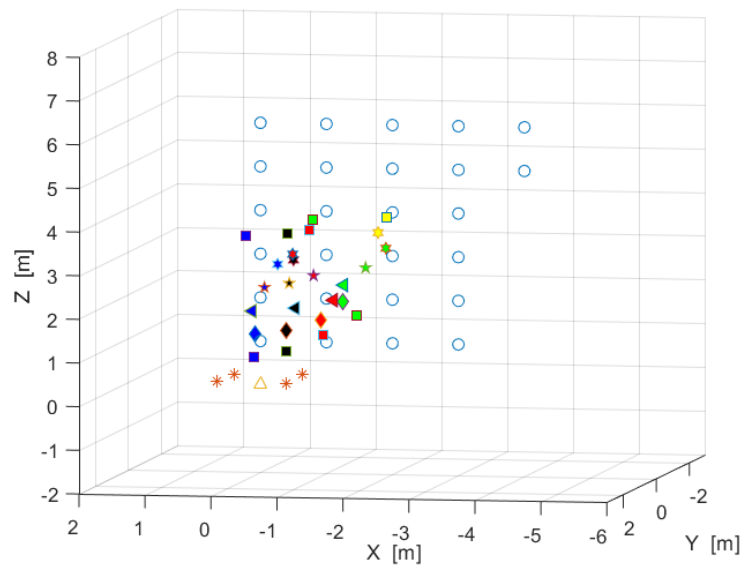


Figura 3.6 – Valori medi

Osservando i valori medi di ogni posizione riportati in figura 3.6, si evince con facilità che le posizioni del tag sono state enormemente sottostimate “affollandosi” al centro della griglia.

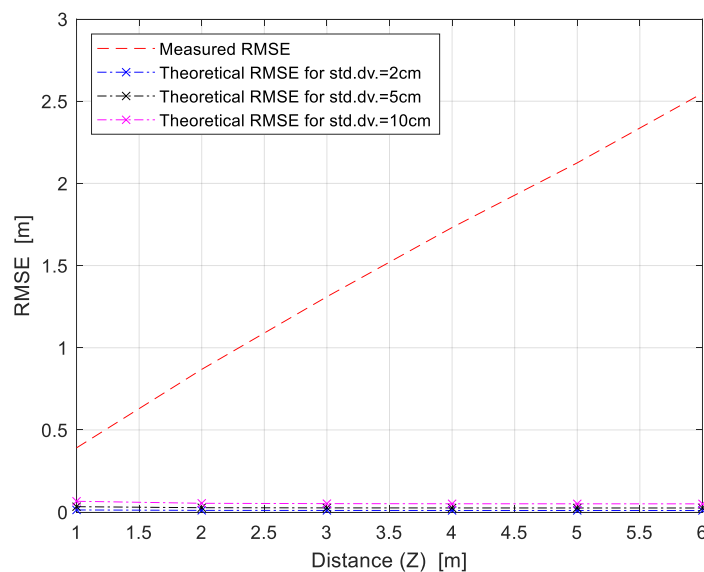


Figura 3.7 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(0,0)$

L'errore sulle posizioni stimate delle ultime due file di punti supera i due

metri sull'asse Z, contrariamente alle aspettative teoriche secondo cui la stima della posizione sull'asse Z dovrebbe migliorare all'aumentare della distanza. Nella figura 3.7 sono graficati l'errore quadratico medio reale su Z, basato sulle misure effettuate, e i RMSE teorici su Z per diversi valori della deviazione standard, dove si suppone che il tag si sposti lungo l'asse Z per $X=Y=0$ m. Anche sul piano orizzontale si ottengono risultati inaspettati, poiché il RMSE su XY per le stesse posizioni del tag considerate nel grafico precedente è più basso rispetto a quello ottenuto per l'asse Z. Sembra essere più in linea con le aspettative teoriche (almeno quello per $X=Y=0$ m, poiché invece l'errore XY sui punti laterali è enorme), difatti guardando la figura 3.8 il RMSE su XY misurato assomiglia in linea di massima a quello stimato con una deviazione standard di 10 cm.

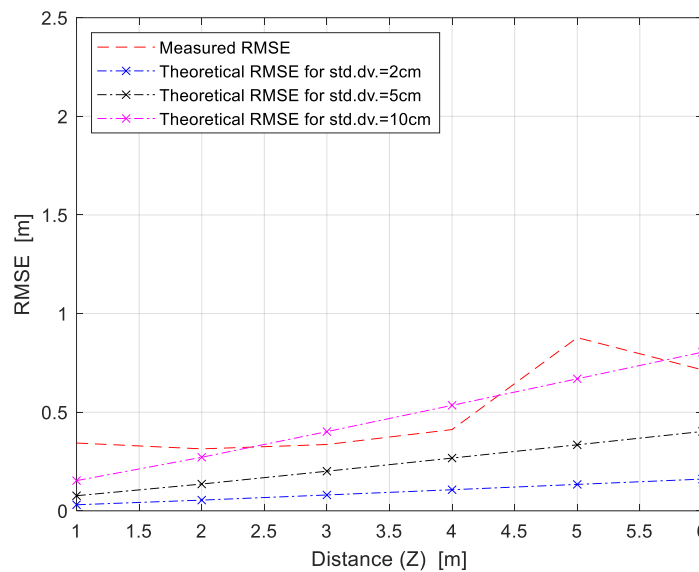


Figura 3. 8 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(0,0)$

Ciononostante, i risultati sul piano XY sono ugualmente deludenti, poiché discostandosi dalla fila di punti in linea con il riferimento si ottengono grandi errori sulla posizione stimata, ad esempio in figura 3.9 è graficato il confronto tra RMSE per le posizioni corrispondenti a $X=-3$ m e l'errore quadratico misurato è molto maggiore dei RMSE stimati attraverso l'HDOP.

Apparentemente sembra esserci un offset crescente che porta a sottostimare le posizioni. Si è ipotizzato che la vicinanza delle ancore al muro

abbia condizionato le prestazioni, perciò le misure successive sono tutte state effettuate spostando la struttura delle ancore più lontano, in corrispondenza della seconda fila di punti. Sono stati variati anche diversi parametri del sistema *Manager* nelle misure analizzate nei prossimi sottoparagrafi.

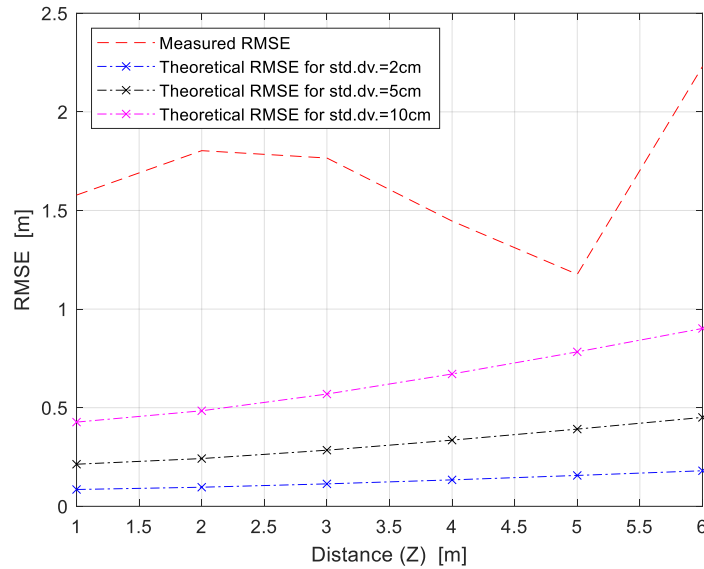


Figura 3.9 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(-3,0)$

3.3.2 Quattro ancore con mobility model 3 (MM3)

In questa campagna di misure, oltre ad essere cambiata la posizione del supporto delle ancore, sono state apportate diverse modifiche ai parametri nominati precedentemente: è stato adottato il mobility model 3 per svincolare le misure dall'algoritmo di tracking ed effettuare, quindi, una localizzazione senza memoria; *locationparticles* è stato impostato al massimo (6000 particelle) per garantire la maggior densità possibile di particelle nell'area di localizzazione; *positioningperiod* è stato raddoppiato (100 ms) per dare al processore il tempo di elaborare 6000 particelle ad ogni acquisizione – anche se ciò ha raddoppiato anche il tempo di acquisizione per ogni posizione; *toaestimationstd* è stato impostato a 0.3 m, indicando all'algoritmo una maggiore confidenza nella validità delle misure; *2dpositioning* è stato impostato a 2, con conseguente modifica dei parametri *tagheightmax* e *tagheightmin* che sono stati posti pari ai

valori limite impostati sulla coordinata Z nella localization area. Quest'ultima è stata generalmente impostata a $8 \times 6 \times 8 \text{ m}^3$, ma è stata variata per le diverse posizioni affinché fosse sufficientemente stretta ma non troppo da causare effetti di bordo.

In figura 3.10 sono rappresentati i valori medi dove è evidente come la stima della posizione del tag sia molto più accurata rispetto alle misure precedentemente effettuate, tuttavia i nodi sembrano ancora sottostimare tutte le distanze.

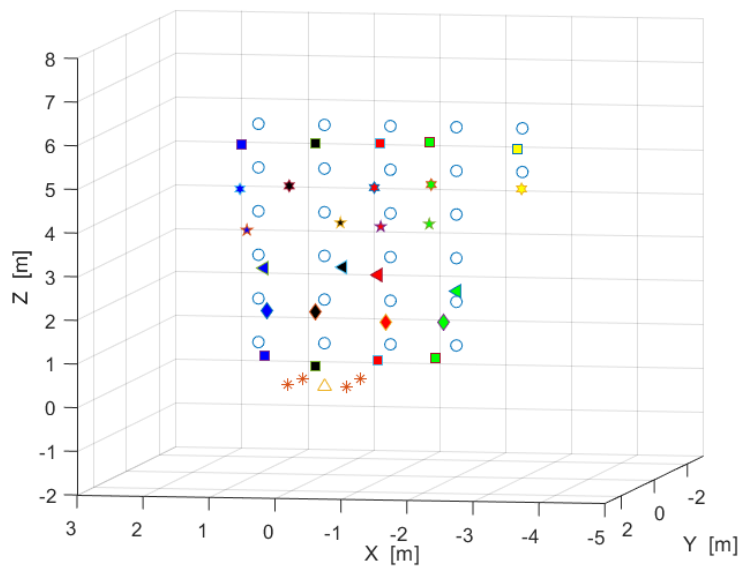


Figura 3.10 – Valori medi

Inoltre, osservando la figura 3.11 dove è rappresentata la distribuzione di tutti i campioni acquisiti, si può vedere che le stime della posizione si disperdono molto, specie sul piano XY, tant'è che la posizione di coordinate $(-1,0,2)$ ha una deviazione standard di 0.5 m. Questo risultato probabilmente è dovuto alla bounding box larga e al mobility model adottato, il quale dà luogo ad una minore risoluzione nella localizzazione rispetto al mobility model 1.

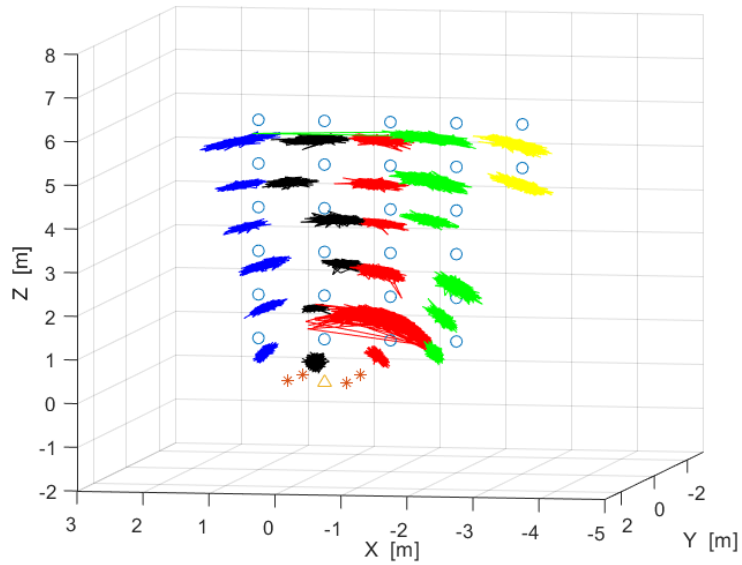


Figura 3.11 – Distribuzione campioni

Nonostante il miglioramento della stima, l'errore sulle misure è comunque dell'ordine dei 20 cm in media, incidendo più sull'asse Z che sul piano orizzontale – contrariamente a quanto atteso dall'indagine teorica basata sul GDOP. Resta critica la fila di punti dirimpetto al riferimento ($X=0$ m), difatti l'errore misurato è di 30-50 cm, sia per posizioni vicine sia per posizioni lontane (figura 3.12).

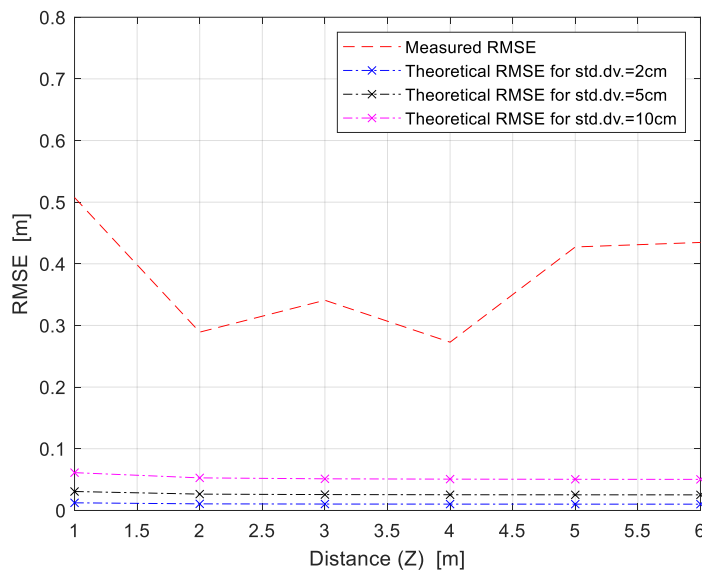


Figura 3.12 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(0,0)$

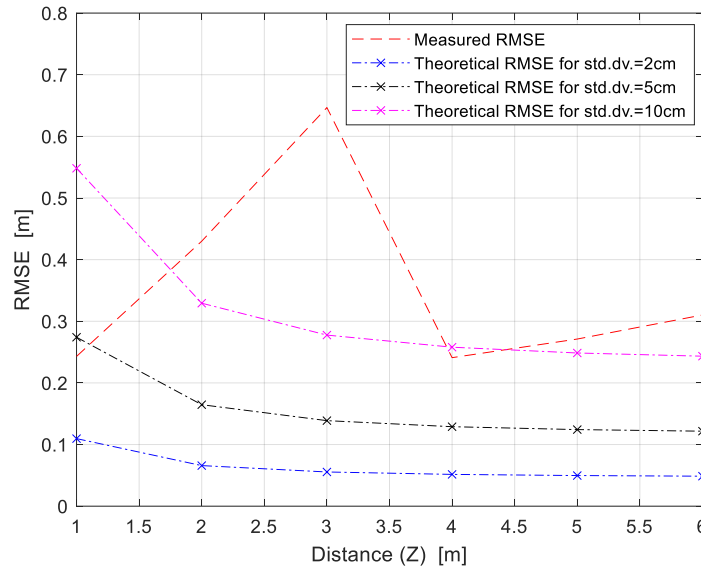


Figura 3.13 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(-2,0)$

La situazione lungo l'asse Z sembra migliorare discostandosi dalla fila centrale, dove le prestazioni peggiorerebbero inevitabilmente anche secondo l'aspettativa teorica. Ad esempio, si può vedere in figura 3.13 che per la fila di punti corrispondente a $X=-2$ m il RMSE su Z segue l'andamento del RMSE teorico calcolato per una deviazione standard di 10 cm fatta eccezione per un errore anomalo sulla stima della posizione in corrispondenza di $Z=3$ m.

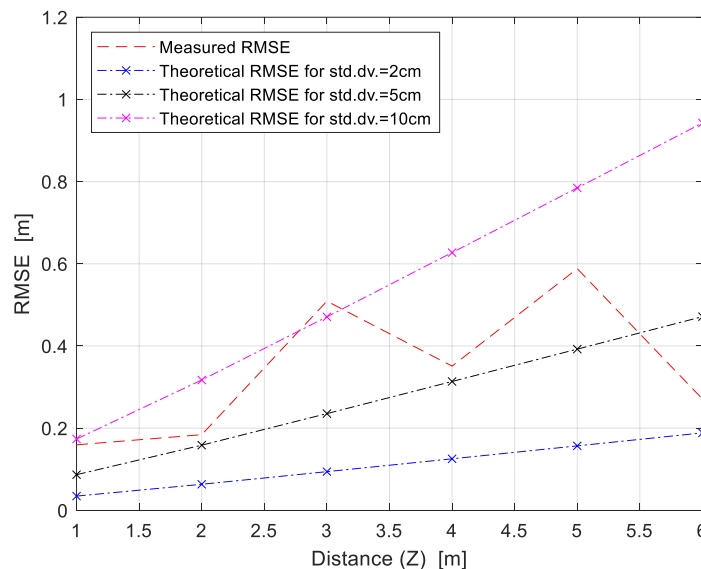


Figura 3.14 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(0,0)$

Sul piano XY si ottiene un RMSE discreto, per tutte le file sembra restare indicativamente al di sotto del RMSE teorico calcolato per una deviazione

standard di 10 cm, lo si può vedere nelle figure 3.14 e 3.15 riferite rispettivamente a $X=0$ m e $X=-2$ m. Entrambi i grafici hanno un picco in corrispondenza di $Z=3$ m e sembrano, per paradosso, migliorare per $Z=6$ m.

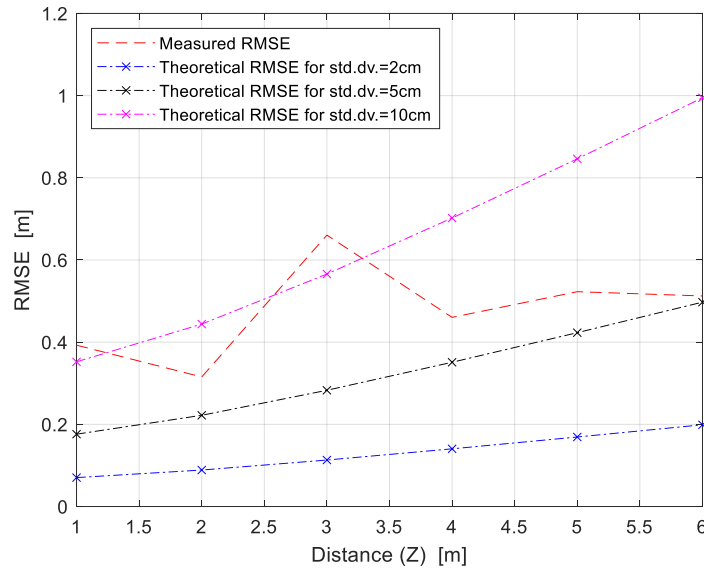


Figura 3. 15 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(-2,0)$

3.3.3 Quattro ancore con mobility model 1 (MM1)

Parallelamente alle misure effettuate con mobility model 3 è stato effettuato un giro di misure con mobility model 1, per constatare se l'impiego da parte dell'algoritmo di tracking di un modello di mobilità che comporta un uso più intelligente delle particelle aiuti o meno a stimare più correttamente la posizione in un ambiente indoor. I parametri sono impostati come nel sottoparagrafo precedente, è stato cambiato solamente il *toaestimationstd* (posto al valore di default). Per MM1 è necessario anche impostare i valori delle velocità prevista del tag, ma poiché esso è fermo, i parametri *mobilitystdx/mobilitystdy/mobilitystdz* sono impostati a 0.5 m/s.

La stima delle posizioni calcolata dal *Manager* è migliorata ulteriormente (figura 3.16), ma se in alcuni punti l'errore è di pochi centimetri, in altri purtroppo si hanno errori di decine di centimetri su tutte le coordinate.

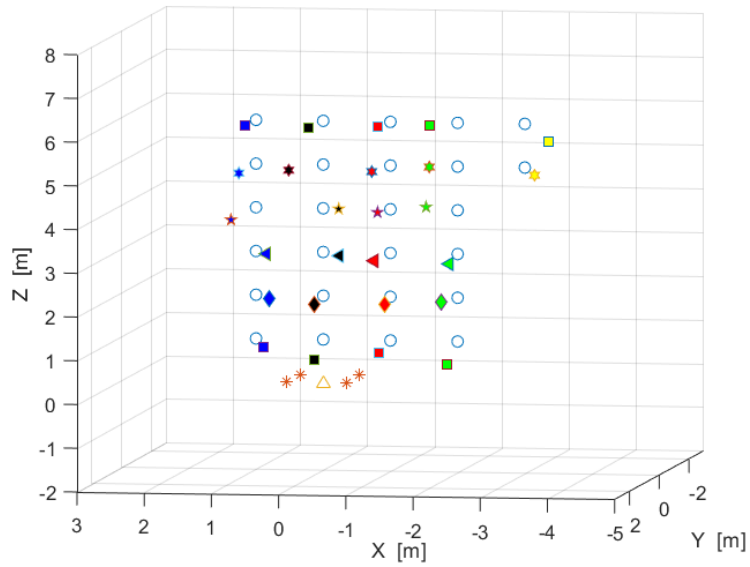


Figura 3.16 – Valori medi

Il miglioramento principale rispetto al MM3 si ha in termini di varianza, i campioni acquisiti sembrano disperdersi meno attorno al valor medio, questo modello garantisce una precisione maggiore. Anche in questo caso, come si può osservare nella figura 3.17, in corrispondenza del punto di coordinate (-1,0,2) si ha una “nuvoletta” meno densa. Spesso nelle varie campagne di misura sono state individuate delle eccezioni del genere nelle stime, non sono sembrate essere correlate tra loro.

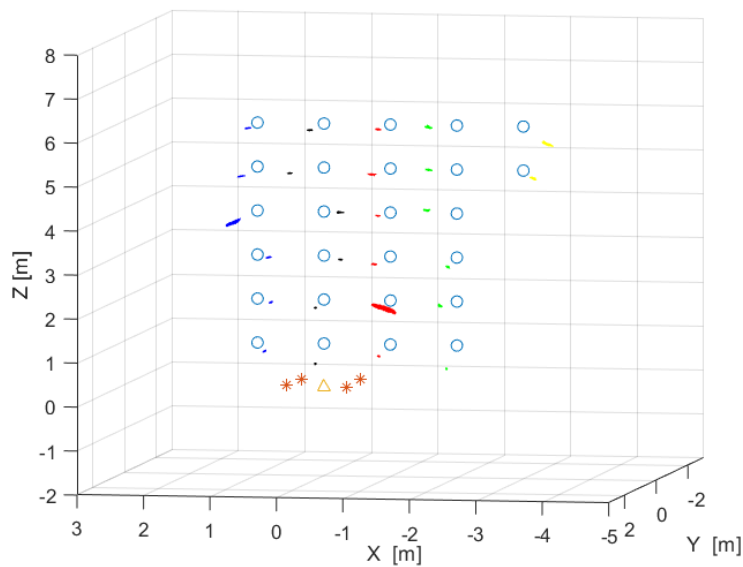


Figura 3.17 – Distribuzione campioni

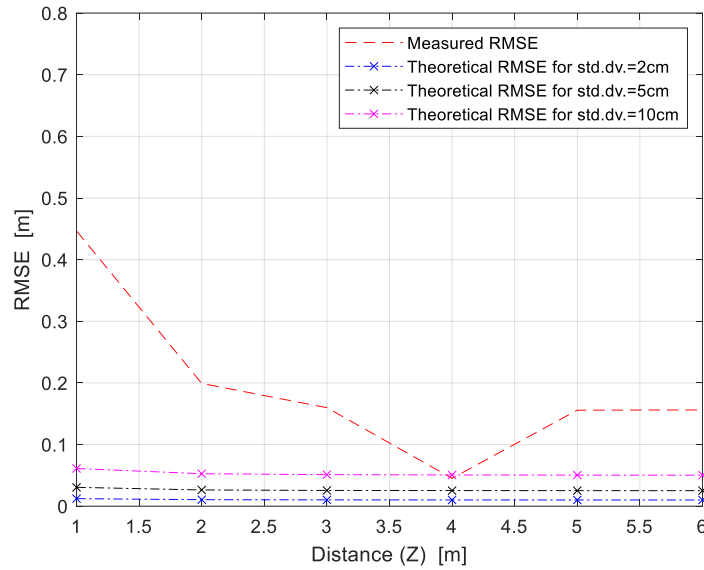


Figura 3.18 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(0,0)$

In termini di RMSE c'è stato un netto miglioramento sull'asse Z, in media l'errore si aggira intorno ai 15 cm, anche nella fila per $X=0$ m si ha un RMSE misurato più basso rispetto a quanto visto in figura 3.12, ma in questo caso, come si vede in figura 3.18, l'errore resta molto maggiore rispetto alle aspettative teoriche, soprattutto la posizione avente coordinate $(0,0,1)$, che viene stimata a mezzo metro di distanza dalla posizione vera. Per le restanti file è stato osservato un andamento in linea con l'analisi teorica ma con un errore pur sempre più alto del previsto.

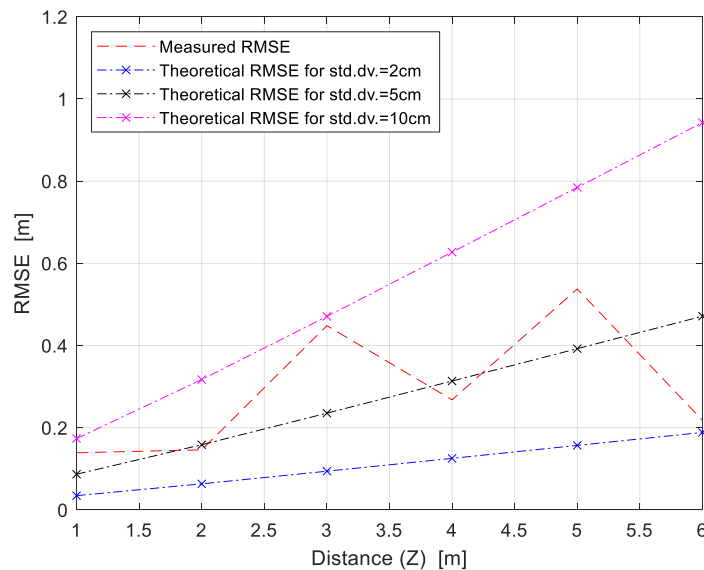


Figura 3.19 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(0,0)$

Non sono stati osservati particolari miglioramenti sul piano XY, in generale l'errore cala di qualche centimetro per ogni fila, ma l'andamento è simile a quello osservato per MM3 e il RMSE resta relativamente alto, sempre intorno ai 30 cm (figura 3.19).

3.3.4 Quattro ancore con MM1 e con offset

Nonostante i miglioramenti, i risultati ottenuti sino ad ora sono stati mediocri, soprattutto rispetto l'asse Z che, anzi, secondo l'andamento teorico del VDOP, dovrebbe avere prestazioni migliori rispetto al piano XY; difatti, per l'applicazione del braccio automatico si vuole un'accuratezza maggiore sull'asse verticale. Nelle ultime campagne di misure l'obiettivo è stato migliorare le prestazioni lungo l'asse Z. Avendo constatato che le distanze vengono sottostimate, è stato aggiunto un offset di -0.3 m (che corrisponde a sommare 30 cm a tutte le stime delle distanze) attraverso il parametro *radiotxoffset*. La bounding box è stata mantenuta abbastanza larga, è stata impostata a 12×8×10 m³ ed il parametro *2dpositioning* è stato reimpostato a 0 (modalità 3D), mentre gli altri parametri sono gli stessi del sottoparagrafo 3.3.4.

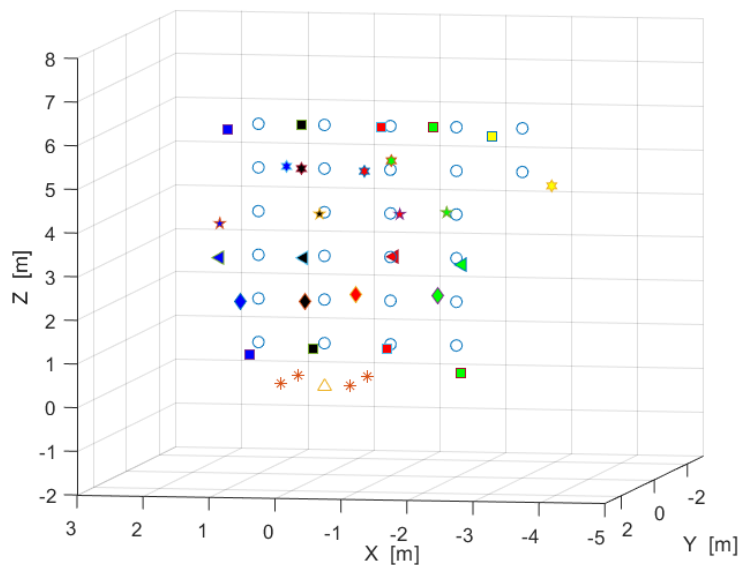


Figura 3. 20 – Valori medi

Già a partire dall'analisi dei valori medi in figura 3.20 si può notare il miglioramento generale delle stime del sistema. Nella prima riga di punti corrispondenti a $Z=1$ m si ha una discreta accuratezza sul piano XY ma scarse prestazioni rispetto Z – l'errore sulla posizione del punto avente coordinate $(-2,0,1)$ è di circa 60 cm. Man mano che ci si allontana dal riferimento aumenta l'accuratezza su Z mentre peggiorano le prestazioni sul piano orizzontale, ad esempio le stime degli ultimi due punti nella fila $X=-3$ m hanno un errore di quasi un metro.

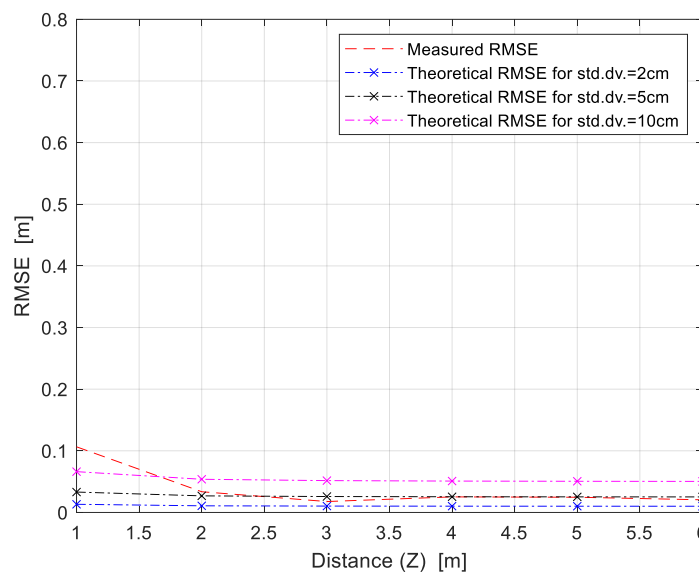


Figura 3. 21 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(0,0)$

Analizzando le performance in termini di RMSE si conferma quanto appena detto, si ottengono risultati buoni e paragonabili all'analisi teorica. L'errore sulla fila di punti centrale per $X=0$ m è basso, dell'ordine di qualche centimetro, infatti, come si può vedere in figura 3.21, il RMSE è alto per il primo punto ma va migliorando all'aumentare della distanza, tanto da seguire l'andamento teorico per una deviazione standard di 5 cm. Nelle altre file di punti l'errore cresce ma sempre secondo le analisi teoriche basate sulla configurazione dei nodi, infatti in figura 3.22 si può vedere che per $X=-2$ m l'errore è di circa 10 cm in media, ma segue sempre l'andamento del RMSE teorico calcolato per una deviazione standard di 5 cm – c'è un picco per $Z=5$ m, ma, come già accennato

precedentemente, capita di avere sporadicamente degli errori del genere.

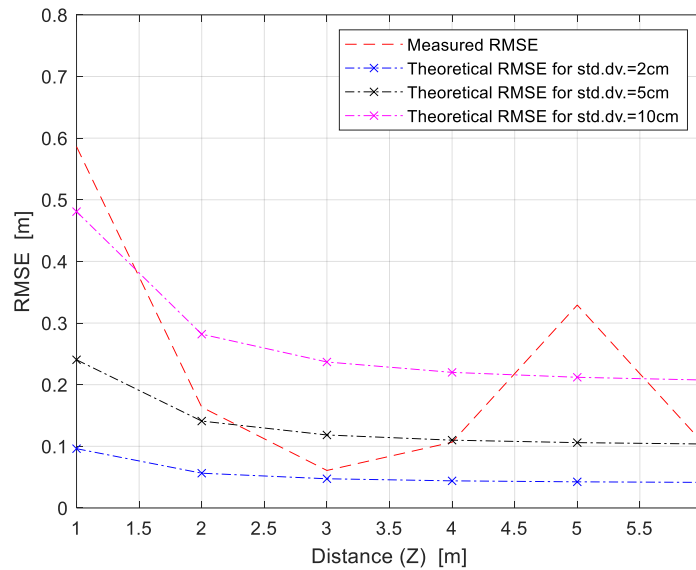


Figura 3. 22 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(-2,0)$

In entrambi i grafici si può notare tuttavia che il primo punto ($Z=1$ m) di ogni fila ha un errore molto maggiore rispetto al resto dei RMSE misurati.

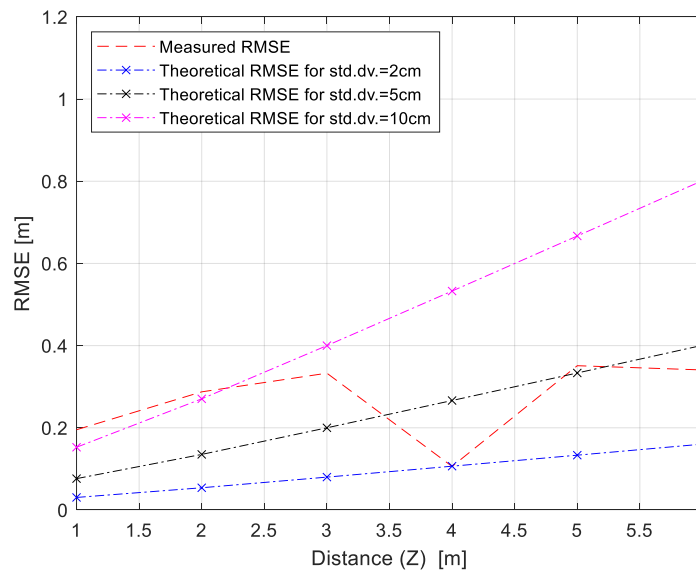


Figura 3. 23 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(0,0)$

Per quanto concerne il piano XY, non si hanno notevoli miglioramenti, il RMSE sembra aggirarsi attorno ai 30 cm per la maggior parte delle posizioni con eventuali picchi di decine di centimetri in alcuni punti, ma in generale non sembra aumentare al crescere della distanza come ci si aspetterebbe; lo si può vedere in figura 3.23 dove sono rappresentati il RMSE misurato e quelli stimati

per $X=0$ m. Per quanto riguarda la fila corrispondente a $X=-2$ m il comportamento del RMSE rispecchia indicativamente l'errore quadratico medio teorico calcolato per una deviazione standard di 10 cm (figura 3.24).

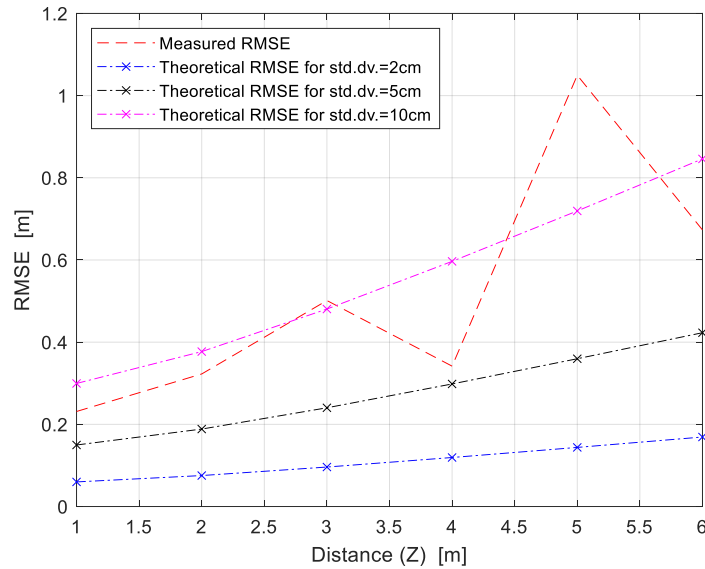


Figura 3. 24 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(-2,0)$

3.3.5 Cinque ancore con MM1 e con offset

Un ultimo round di misure è stato effettuato aggiungendo una quinta ancora su di un aggancio interno della croce di legno; per la precisione, in riferimento alla figura 3.3, corrisponde al supporto nero in basso a sinistra. I parametri sono gli stessi del sottoparagrafo precedente, è stato cambiato solamente l'offset, *radiotxoffset* è stato posto pari a -0.2 m ed il limite su Y nella bounding box è stato ristretto a 6 m.

Osservando i valori medi nella figura sottostante e confrontandoli con la figura 3.20, si può notare che la presenza della quinta ancora e l'abbassamento del valore di offset migliorano leggermente la stima delle posizioni sul piano XY, ma non aiutano molto sull'asse Z. Considerando che, secondo le aspettative teoriche, la presenza di più ancore dovrebbe migliorare il VDOP, si può supporre che in questo scenario l'aggiunta dell'offset sia cruciale.

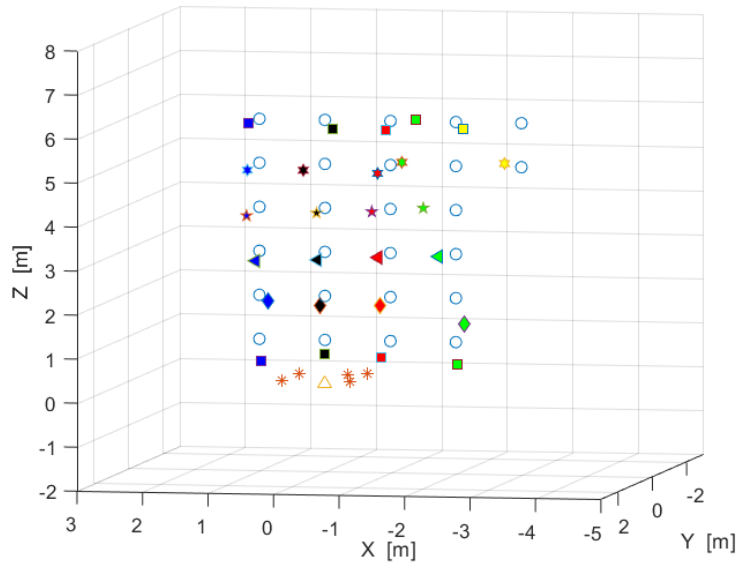


Figura 3. 25 – Valori medi

Tali deduzioni si rispecchiano nei grafici dei RMSE. In figura 3.26, come di consueto, è rappresentato l'errore quadratico medio misurato e teorico per la fila di punti corrispondente a $X=0$ m e, se i RMSE stimati sulla base della geometria si abbassano grazie alla quinta ancora, il RMSE misurato è elevato, si ha un errore di 20 cm in media. La situazione sembrerebbe migliorare per le file adiacenti, ma per posizioni relativamente vicine si hanno anche errori di mezzo metro, come visibile in figura 3.27, la quale rappresenta, come nelle misure precedenti, i RMSE per $X=-2$ m.

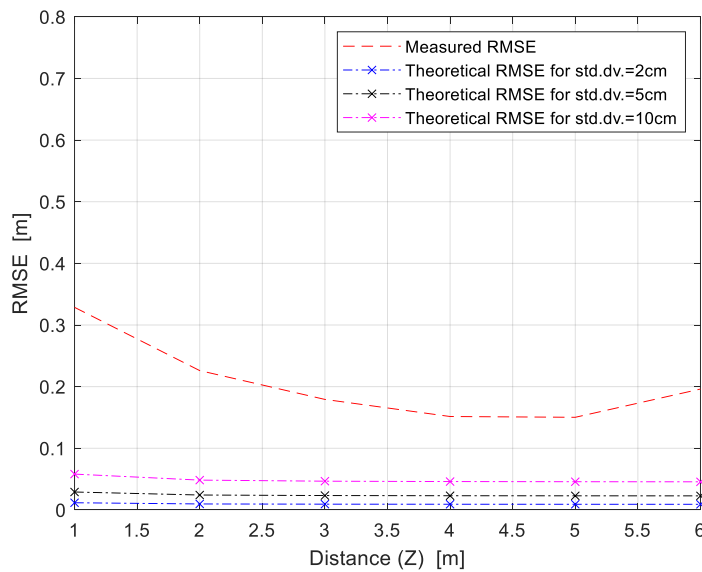


Figura 3. 26 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(0,0)$

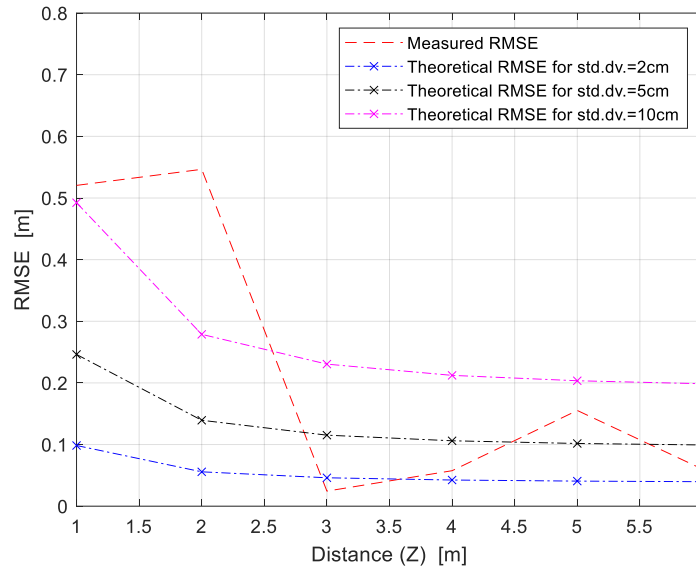


Figura 3. 27 – Confronto tra $RMSE_z$ per $(x,y)=(-2,0)$

Sul piano orizzontale si assiste, come già accennato, ad un lieve miglioramento nella stima, in figura 3.28 si può vedere che l'errore ha un andamento simile al RMSE stimato per una deviazione standard di 5 cm e cresce all'aumentare della distanza.

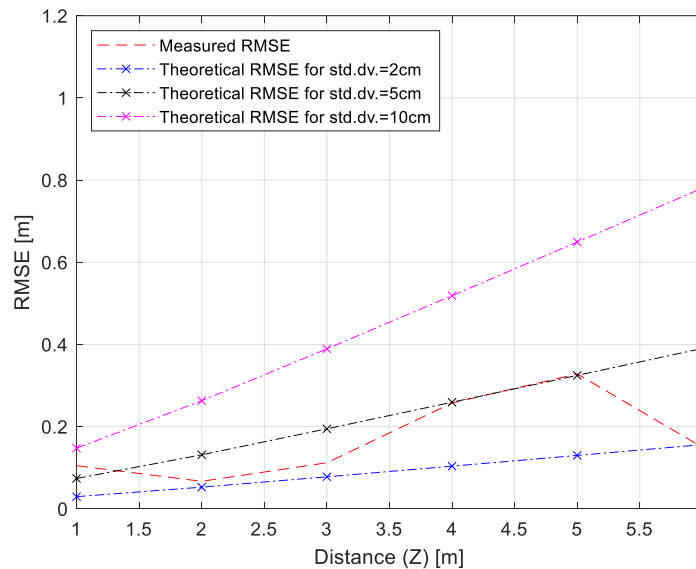


Figura 3. 28 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(0,0)$

L'andamento del RMSE per la fila di $X=-2$ m rappresentato in figura 3.29 è simile a quello rappresentato in figura 3.24, ma quest'ennesimo confronto permette di confermare che l'errore è minore, così come da valutazioni teoriche.

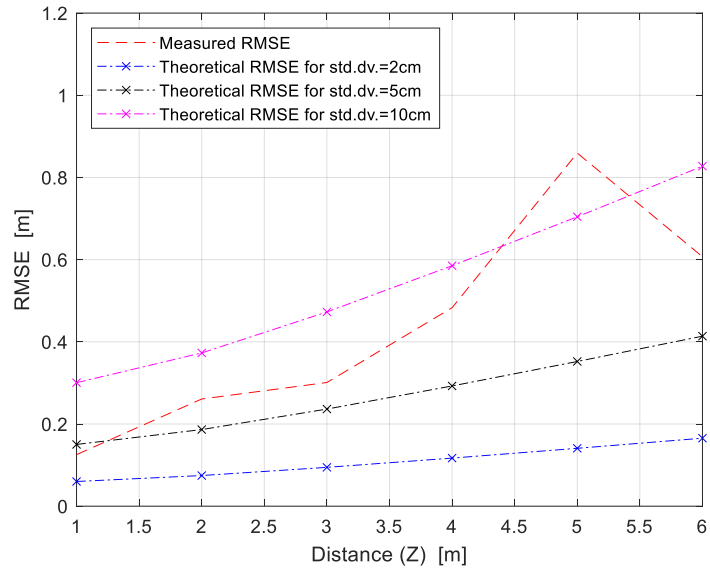


Figura 3. 29 – Confronto tra $RMSE_{xy}$ per $(x,y)=(-2,0)$

Conclusioni

Al termine di questo elaborato possono essere fatte delle considerazioni sulle misure effettuate e sui risultati ottenuti, sulla base delle premesse teoriche fatte. Il sistema utilizzato nella presente applicazione risente indubbiamente della calibrazione del sistema, soprattutto per quanto riguarda l'offset di stima della distanza. Sono stati ottenuti risultati promettenti ma ancora insoddisfacenti per distanze piccole e, anche se l'accuratezza della stima delle posizioni è migliorata modificando diversi parametri software, non è ancora prossima ai livelli teorici auspicati. È interessante sottolineare che sull'asse Z le prestazioni sono migliorate più per un'adeguata compensazione dell'offset che per l'aggiunta di un'altra ancora, mentre sul piano XY l'aggiunta dell'offset comporta qualche centimetro di errore in più.

In conclusione, la tecnologia a banda ultra-larga appare promettente anche per applicazioni di automazione, come quella investigata in questa tesi, anche se sulle piccole distanze errori di calibrazione e di misura hanno portato a risultati ancora non del tutto soddisfacenti dato l'obiettivo di raggiungere precisioni di pochi centimetri. Possibili sviluppi futuri potrebbero riguardare una migliore caratterizzazione dell'effetto delle antenne in funzione del punto di vista e l'utilizzo di un sistema di misura delle posizioni effettive più preciso rispetto a quello manuale utilizzato in questa tesi che ha sicuramente contribuito all'errore complessivo di validazione.

Appendice

Di seguito una breve spiegazione di come è stato installato il sistema di posizionamento.

- ↳ Posizionamento e connessione della rete di nodi ancora.
- ↳ Aggiornamento firmware dei nodi ancora.
- ↳ Collegamento all'indirizzo IP dei singoli nodi per gestire il tipo di connettività, con possibilità di assegnare indirizzi IP statici a ciascun device.
Es. In laboratorio sono stati utilizzati gli indirizzi privati da 192.168.10.2 a 192.168.10.11 con default gateway avente indirizzo 192.168.10.1.
N.B. Il PC utilizzato e le antenne devono essere connessi alla stessa rete.
- ↳ Accesso ai singoli nodi tramite software, è stato inserito l'indirizzo IP nella barra degli indirizzi del browser ed è stata eseguita l'autenticazione con le credenziali fornite.
- ↳ Configurazione del Manager, è stato lanciato sequitur_manager.bat dal percorso `C:\Users\Shannon1\Desktop\SequiturCore-full-2021-06-07-1.16.8-ui-1.107`, cliccando poi sul tasto "Open Client".
- ↳ Apertura Control Panel e serie di istruzioni del Sequitur Manager.

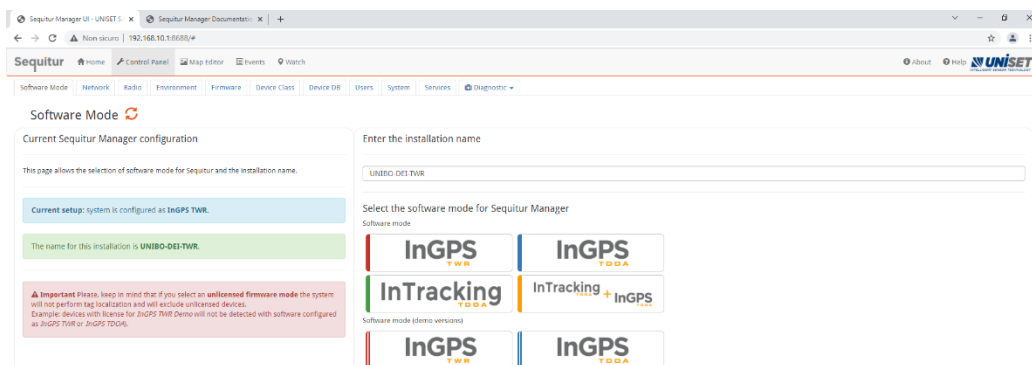


Figura 4.1 – Schermata Software Mode

- **Software Mode** ⇒ Nome installazione e selezione della modalità software desiderata.
- **Network Configuration** ⇒ Add network specification.
 Ciò permette di specificare la configurazione di rete, che può essere di tipo fisico o virtuale (per ancore/tag e per mini-tag rispettivamente). Completare operazione con “Send to server”.
- **Radio** ⇒ LT1.
 Ciò permette di impostare la configurazione indoor. Per sbloccare ulteriori parametri sull’interfaccia aggiungere all’indirizzo IP del default gateway `/?x-role=developer#` (es. `192.168.10.1:8688/?x-role=developer#`)
- **Environment** ⇒ World Defintion ⇒ Add world.
 Ciò permette di aggiungere il mondo e selezionare la mappa in base al sistema di riferimento desiderato.
 Nel caso in cui non sia già stata creata una mappa:
- Aprire **Map Editor** ⇒ Upload (importare la planimetria come file .png o .jpg) ⇒ Map Tools ⇒ Set scale (è consigliato inserire la misura svolta tra i due punti più distanti) ⇒ Set origin position (per posizionare il riferimento). Infine, salvare.

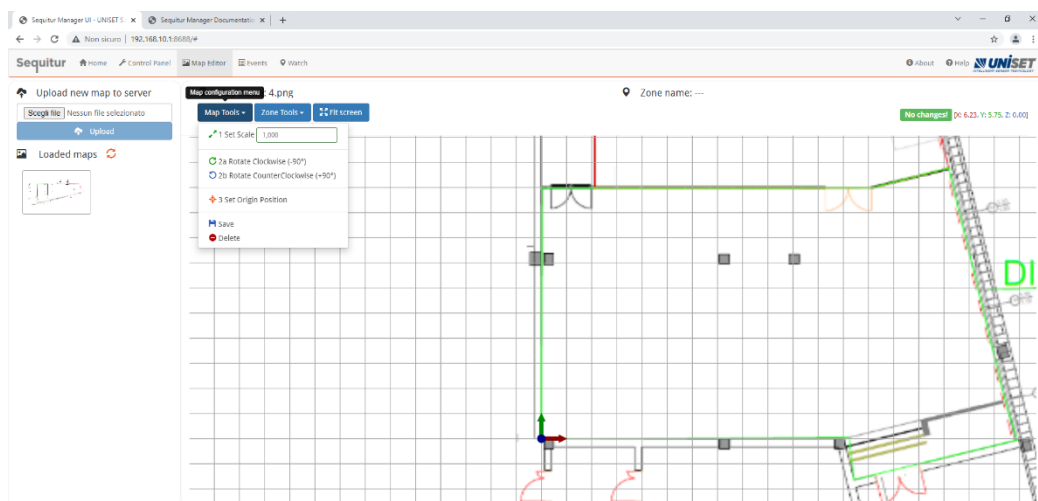


Figura 4. 2 – Schermata Map Editor

- **System** ⇒ Maintenance ON

Ciò permette di individuare e registrare dispositivi sul server. Non appena vengono individuati i nodi, si può disattivare Maintenance.

- **Device class** ⇒ Selezionare se il device è un'ancora o un tag.

Nel caso in cui venga richiesta una chiave di attivazione, accedere al file All-uid_key.txt dal percorso `C:\Users\Shannon1\Desktop\SequiturData` e individuare la chiave in corrispondenza dell'ancora selezionata.

- **Environment** ⇒ Anchor position and Tag localization.

Si può impostare la posizione delle ancore rispetto al mondo di appartenenza e l'area di localizzazione dei tag (o bounding box). Per cambiare la localization area va prima selezionato il mondo cui si riferisce la modifica, poi la configurazione scelta può essere salvata premendo "Done".

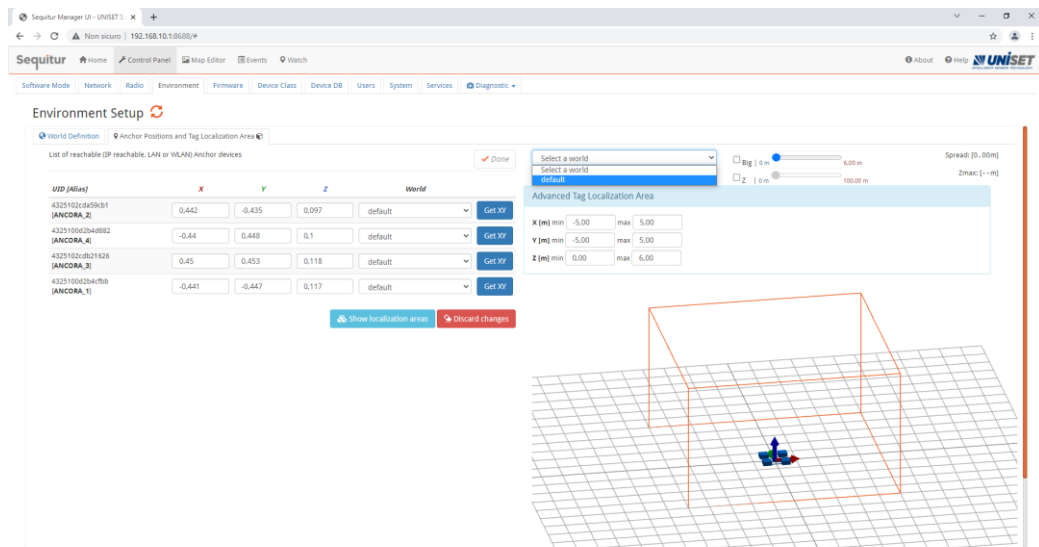


Figura 4.3 – Schermata Environment per la creazione della localization area

- **Device DB** ⇒ Database di ancore e nodi con diverse azioni eseguibili per ogni device.

Es. per cambiare nome ad un nodo si può modificare il parametro *alias*, per distinguere un dispositivo si può premere *USERLED ON/OFF*, dalle "Properties" del Tag si può deselegionare la modalità 2D impostando il

parametro *2dpositioning* a 0, etc.

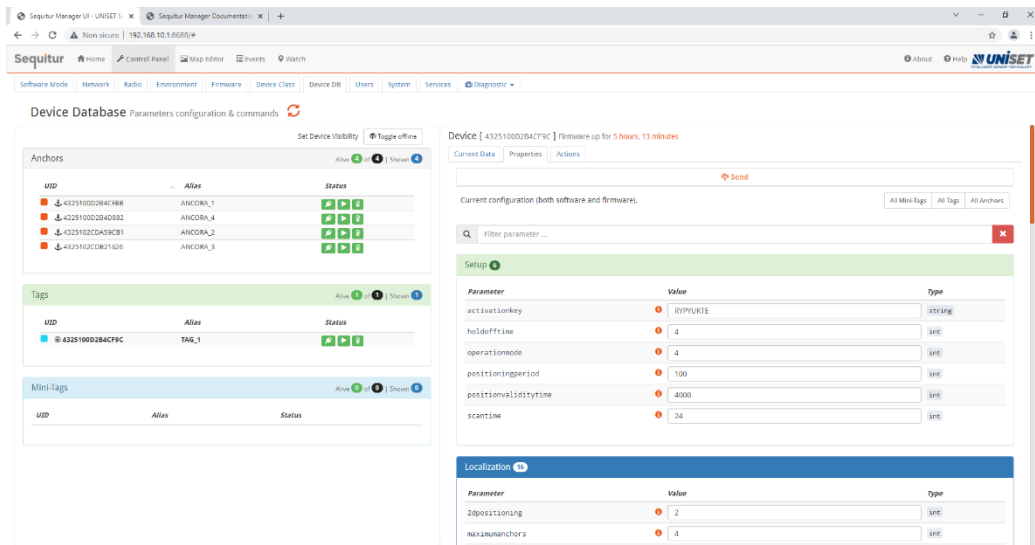


Figura 4. 4 – Schermata Device DB con info sulle proprietà del tag

Per la documentazione completa aggiungere all'indirizzo IP del default gateway *apidoc* e selezionare "Parameters" (es. 192.168.10.1:8688/apidoc).

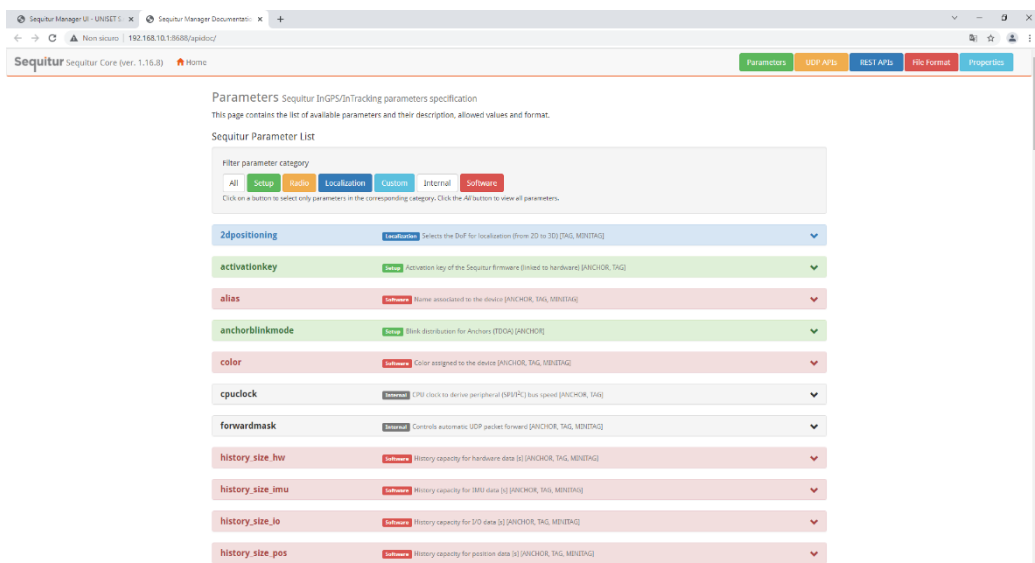


Figura 4. 5 – Schermata documentazione

- **Firmware** ⇒ il firmware selezionato viene contrassegnato da una stella arancione.
 - **System** ⇒ Configuration Management ⇒ Save to file
- Ciò permette di salvare la configurazione creando un file .json . È consigliato salvare una copia di backup della cartella Sequitur presente nel

percorso *C:\Users\Shannon1\.uniset*.

- **Services** ⇒ Logger ⇒ Start service.

Ciò permette di iniziare ad acquisire i dati di una misura. Per interrompere l'acquisizione, selezionare Stop Service.

I dati acquisiti vengono salvati nella cartella dump con percorso *C:\Users\Shannon1\.uniset\Sequitur\dump*.

N.B. Nel caso in cui la modalità del software sia *"InTracking"*, oltre a *sequitur_manager.bat* è necessario avviare anche *sequitur_intracking.bat* nella cartella *C:\Users\Shannon1\Desktop\SequiturCore-full-2021-06-07-1.16.8-ui-1.107*

Di seguito un video esemplificativo del procedimento per effettuare correttamente l'installazione:

<https://www.youtube.com/watch?v=s1pS38CrS2E>

Bibliografia & Sitografia

- [1] «Positioning system», *Wikipedia*. ott. 10, 2021. [Online]. Disponibile su: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Positioning_system&oldid=1049181329
- [2] J. Schiller e A. Voisard, *Location-Based Services*. Elsevier, 2004.
- [3] D. Dardari, E. Falletti, e M. Luise, *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A Signal Processing Perspective*. Elsevier Ltd, London, 2011.
- [4] SpaceChallenges, *Global Navigation Satellite Systems (GNSS) - Part 1*, (2016). [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=cIIAr07kpyY>
- [5] «Global Positioning System», *Wikipedia*. ott. 23, 2021. [Online]. Disponibile su: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_Positioning_System&oldid=1051445763
- [6] A. Waadt, G. H. Bruck, e P. Jung, «An overview of positioning systems and technologies», in *2009 2nd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, nov. 2009, pagg. 1–5. doi: 10.1109/ISABEL.2009.5373694.
- [7] «Multipath fading», *Wikipedia*. giu. 20, 2019. [Online]. Disponibile su: https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Multipath_fading&oldid=105839943
- [8] R. Mautz, *Indoor positioning technologies*, 2012.
- [9] L. Mainetti, L. Patrono, e I. Sergi, «A survey on indoor positioning systems», in *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, set. 2014, pagg. 111–120. doi: 10.1109/SOFTCOM.2014.7039067.
- [10] F. Stivani, *Studio e valutazione sperimentale di tecniche di radio fingerprinting per navigazione indoor con dispositivi mobili Android* [Thesis], Università di Bologna, 2013/2014.
- [11] «Wireless LAN», *Wikipedia*. ott. 06, 2021. [Online]. Disponibile su: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wireless_LAN&oldid=1048587034
- [12] «Bluetooth», *Wikipedia*. ott. 22, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bluetooth&oldid=1051323076>
- [13] M. Yavari e B. G. Nickerson, «Ultra wideband wireless positioning systems», *Dept Fac. Comput Sci Univ N. B. Frederict. NB Can. Tech Rep TR14-230*, vol. 40, 2014.
- [14] European Commission, Commission decision of 21 February 2007 on allowing the use of the radio spectrum for equipment using ultra-wideband technology in a harmonized manner in the community. Official Journal of

- the European Union, vol. C (2007) 522, Feb. 2007. European Commission, Amendment to ECC decision to include daa: Ecc/dec/(06)12 amended, October 2008.
- [15] «Figure 2.7: Time domain representation of (a) TH-UWB and (b) DS-UWB...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Time-domain-representation-of-a-TH-UWB-and-b-DS-UWB-spreading-techniques_fig4_277245348
- [16] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, e M. Z. Win, «Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments», *Proc. IEEE*, vol. 97, n. 2, pagg. 404–426, feb. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2008.2008846.
- [17] D. Dardari, N. Decarli, A. Guerra, e F. Guidi, «The future of ultra-wideband localization in RFID», in *2016 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, mag. 2016, pagg. 1–7. doi: 10.1109/RFID.2016.7487998.
- [18] I. Sharp, K. Yu, e M. Hedley, «On the GDOP and Accuracy for Indoor Positioning», *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48, n. 3, pagg. 2032–2051, lug. 2012, doi: 10.1109/TAES.2012.6237577.
- [19] R. B. Langley, «Dilution of precision», *GPS World*, vol. 10, n. 5, pagg. 52–59, 1999.
- [20] «Cramér–Rao bound», *Wikipedia*. ott. 07, 2021. [Online]. Disponibile su: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cram%C3%A9r%E2%80%93Rao_bound&oldid=1048656374
- [21] D. B. Jourdan, D. Dardari, e M. Z. Win, «Position error bound for UWB localization in dense cluttered environments», *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, n. 2, pagg. 613–628, 2008.
- [22] J. Moody, «What does RMSE really mean?», *Medium*, set. 06, 2019. <https://towardsdatascience.com/what-does-rmse-really-mean-806b65f2e48e>
- [23] *Sequitur User Manual*.
- [24] *Sequitur Manager Documentation*.
- [25] D. Dardari, P. Closas, e P. M. Djurić, «Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, n. 4, pagg. 1263–1278, apr. 2015, doi: 10.1109/TVT.2015.2403868.