



UNIVERSITA' DI PISA

Dipartimento di Ingegneria dell' Informazione

Tesi specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni

# Radiolocalizzazione, sistemi, segnali, algoritmi

**Autore:**

Santi Russo

**Relatori:**

Prof. Filippo Giannetti  
Prof. Antonio D'Amico  
Ing. Fabio Principe



---

INTRODUZIONE .....	5
CAPITOLO I – Introduzione alla multilateralizzazione .....	7
1.1 Concetto di multilateralizzazione.....	7
1.2 Errore di sincronizzazione.....	8
1.3 Utilizzo avionico della multilateralizzazione.....	10
CAPITOLO II – Tecnologie per RTLS .....	12
2.1 Tracking indoor: una panoramica delle tecnologie disponibili .....	12
2.2 Algoritmi di misura e prodotti in commercio .....	13
2.2.1 ZEBRA TECHNOLOGY.....	16
2.2.2 UBISENSE TECHNOLOGY.....	17
2.2.3 TIME DOMAIN TECHNOLOGY .....	18
2.2.4 DECAWAVE TECHNOLOGY.....	20
2.2.5 NANOTRON TECHNOLOGY.....	22
2.3 Criteri di scelta.....	26
2.4 Overview trek1000 evaluation board.....	27
2.5 Analisi protocollo 802.15.4 physical layer .....	28
<b>2.6</b> Frequenza centrale, banda, data rate .....	29
2.7 Sequenza trasmissione di base.....	31
2.8 Two way ranging .....	35
2.8.1 DW1000 Twr .....	36
2.9 Tecniche di stima della posizione e di sincronizzazione.....	38
2.9.1 Time of flight – trasmettitore e ricevitore sincronizzati .....	38
2.9.2 Time of flight – trasmettitore e ricevitore non sincronizzati.....	38
2.9.3 Time Difference of arrival (TDOA).....	39
2.9.4 Misura delle grandezze nel TOA.....	40
2.9.5 Misura delle grandezze nel TDOA .....	42
CAPITOLO III - Modelli per la multilateralizzazione.....	43
3.1 TOA .....	44
3.2 TDOA.....	46
3.3 Metriche .....	49
3.4 Costruzione dell'algoritmo .....	50
3.4 Algoritmo implementato.....	54
3.5 Schema a blocchi algoritmo .....	55
CAPITOLO IV - Misure .....	56
4.1 DWM1000 .....	56

---

4.2 Allestimento setup e sistema di riferimento .....	58
4.3 Modalità di trasmissione e Misure di ranging .....	62
4.4 Statistiche .....	64
4.5 Istogrammi misure ranging .....	66
4.6 Triangolazione e Setup .....	74
4.6.1 Acquisizione I .....	76
4.6.2 Acquisizione II .....	77
4.6.3 Acquisizione III .....	78
4.6.4 Acquisizione IV .....	79
Conclusioni e analisi dei dati .....	81
Bibliografia .....	82
APPENDICE A – Mappa del registro .....	83
APPENDICE B – Dilution of precision .....	84

---

## INTRODUZIONE

Recentemente con l'avvento della domotica e il sempre maggiore utilizzo di velivoli senza pilota assume grande importanza il concetto di radiolocalizzazione.

Per applicazioni complesse è indispensabile l'utilizzo di segnali elettronici, che permettono di computare la posizione esatta dell' *user* e in alcuni sistemi la velocità di spostamento.

Per **Real Time Location System (RTLS)** si intende un insieme di sottosistemi che fornisce in tempo reale informazioni sulla localizzazione di oggetti, animali, persone. Il più immediato esempio di rete RTLS è il **GPS** (Global Position System) che si va a collocare nel **GNSS** (Global Navigation Satellite System).

Obiettivo della tesi è quello di scegliere, tra un ventaglio di prodotti in commercio, un evaluation kit per creare e caratterizzare una RTLS. Attraverso un algoritmo di multilateralizzazione, si intende elaborare i dati acquisiti implementando un *Central Location Engine*.

---

Ringrazio la IDS Ingegneria dei Sistemi Corporation per la messa a disposizione dei dispositivi, degli strumenti di misura e dei locali dove sono stati svolti i test; gli ingegneri Fabio Principe e Vincenzo Pellegrini, per il loro contributo nell'allestimento dell'area di test e per l'elaborazione dell' algoritmo di calcolo. Un sentito ringraziamento va anche al Prof. Giannetti, che ha seguito il mio lavoro con molta cura e scrupolo aiutandomi, oltre che dal punto di vista tecnico, a pensare come un ingegnere, così come mi ha insegnato nei suoi corsi. Un grazie va altresì al Prof. D'Amico per i suoi preziosissimi consigli e le sue osservazioni di carattere tecnico e statistico. Ringrazio mia madre Anna, la nostra colonna, che sa darci forza in qualsiasi momento nonostante tutto, mio padre Nicola che mi ha insegnato la tenacia, mia sorella Cristina per il suo essermi vicino nonostante la lontananza. Ringrazio Stefano, un fratello ritrovato, la sua amicizia indissolubile, gli altri pochi ma invidiabili amici, Marco, Roberto, Concetto, Michele, Salvo, Lorenzo.

---

# CAPITOLO I – Introduzione alla multilaterizzazione

## 1.1 Concetto di multilaterizzazione

Di seguito viene proposto un esempio di TOA in uno scenario bidimensionale:

Consideriamo il caso di un marinaio che vuole calcolare la posizione della sua nave attraverso il segnale acustico di una sirena da nebbia; si assuma che la nave disponga di un clock preciso, che il marinaio sappia approssimativamente dove si trovi e che il clock della sirena e della nave sia perfettamente sincronizzato. Supposto inoltre che la sirena emetta il suono in un preciso istante prefisso.

In base al tempo che intercorre tra l'istante prefissato e quello in cui il marinaio percepisce il fischio della sirena, facilmente si ricava la distanza tra nave e sirena: chiamiamo tale distanza  $R_1$ .

Ipoteticamente, il marinaio effettua una seconda misurazione su una seconda sirena sincronizzata e misura una distanza  $R_2$ . Tale situazione è rappresentata nella figura sottostante.

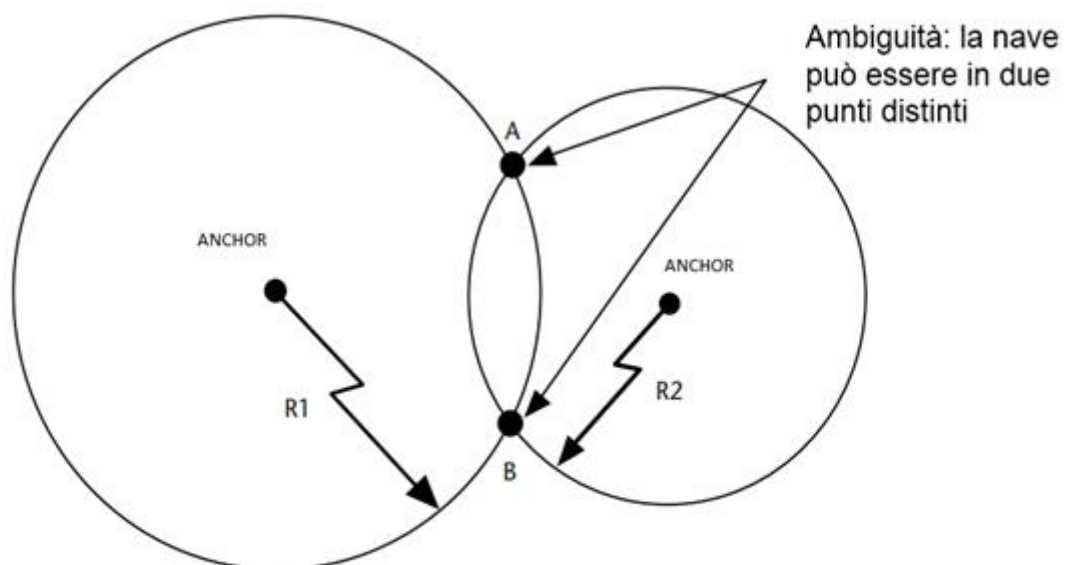


Figura 1) Ambiguità risultante dalle misure su due sorgenti - [Kaplan, Understanding GPS and principles]

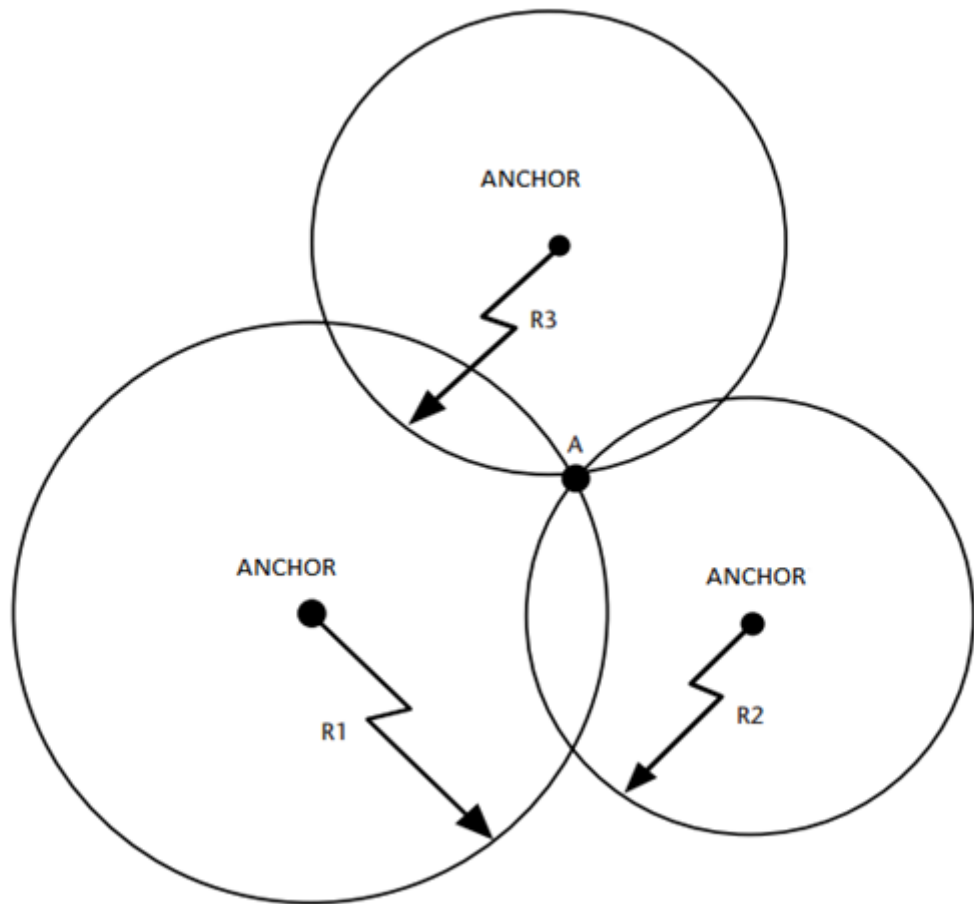


Figura 2) Eliminazione dell'ambiguità con l'introduzione di una terza ancora - [Kaplan, Understanding GPS and principles]

Lo scenario finora descritto, rappresenta una situazione ideale di perfetta sincronizzazione, che fornisce una localizzazione esatta. Nella realtà è inevitabile imbattersi in situazioni in cui i clock non sono allineati, per cause che variano a seconda degli scenari di utilizzo.

## 1.2 Errore di sincronizzazione

Limitiamoci adesso ad analizzare gli effetti di utiva sincronizzazione; se il marinaio per qualche motivo effettua una misura errata di 1 secondo rispetto al valore vero, si crea un'incertezza di 355 metri. Applicando l'incertezza a tutte le misurazioni, si delinea uno scenario descritto in figura (3)



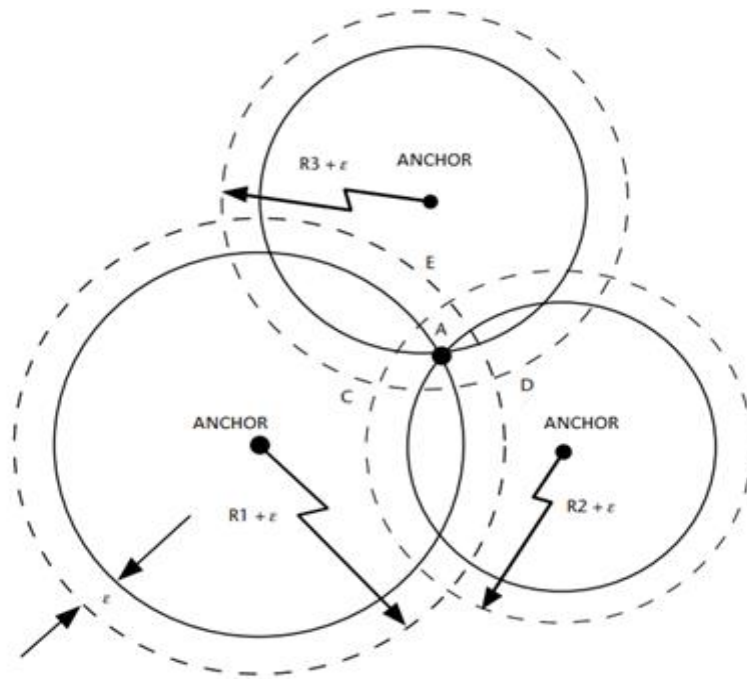


Figura 3) Effetto dell'offset di clock nelle misure di TOA - [Kaplan, Understanding GPS and principles]

Per rendere ancor più realistico lo scenario, consideriamo distinti gli errori e in un primo momento indipendenti; indichiamo quindi  $\epsilon_1$   $\epsilon_2$   $\epsilon_3$  gli errori delle rispettive misurazioni.

Dalla presenza di tale errori nasce l'incertezza del calcolo della posizione e la necessità di una sua stima, che ci si aspetta ricada all'interno di una certa porzione di piano o regione di spazio.

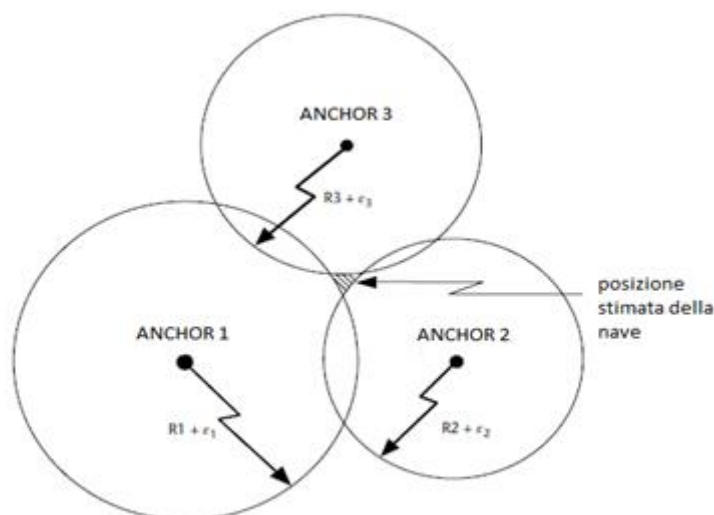


Figura 4) Effetto di errori indipendenti su misure sull'accuratezza della posizione - [Kaplan, Understanding GPS and principles]

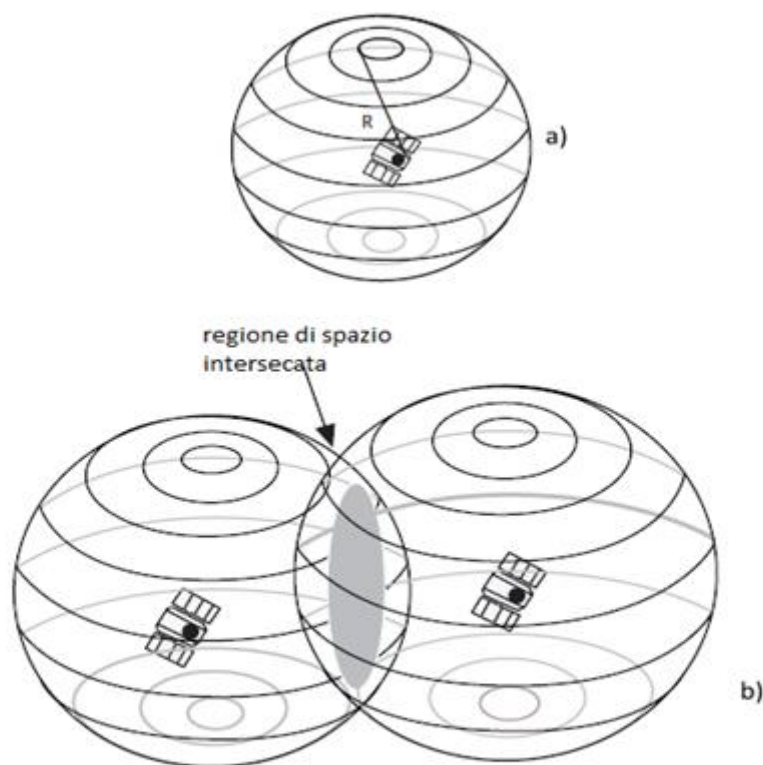


Figura 5a) Utente localizzato su una superficie sferica 5b) Utente localizzato nell'intersezione tra sfere - [Kaplan, Understanding GPS and principles]

### 1.3 Utilizzo avionico della multilaterizzazione

Questo tipo di approccio può essere esteso anche in ambito di aeronavigazione;

Nel secolo scorso il Dipartimento della Difesa americano avviò il progetto GPS, e da subito si intuirono le grosse potenzialità, tuttavia alcune organizzazioni giunsero alla conclusione che per un suo utilizzo nel tracking di aerei erano necessarie alcune migliorie.

Tramite test e studi congiunti la CAASD (Center for Advanced Aviation System Development) e la FAA (Federal Aviation Administration) stabilirono che al fine di rendere usabile il GPS per uso aeronautico era indispensabile avere migliorie per l'integrità del segnale, ottenibili con più frequenti notifiche di segnali corrotti; maggiore accuratezza del segnale, ottenibile con le tecniche differenziali e una maggiore copertura, ottenibile con una ridondanza di satelliti.

In linea del tutto generale per adattare il sistema si usa implementare nel ricevitore un RAIM (Receiver autonomous integrity monitor) che usa i segnali dei satelliti

ridondanti per verificare l'accuratezza; mentre per l'integrità del segnale si usa una rete di stazioni base sulla Terra che verificano i segnali Gps e trasmettono un broadcast di integrità del segnale attraverso i satelliti geostazionari. Per mitigare gli effetti del ritardo dovuto alla ionosfera è stata messa a punto una rete denominata WAAS (Wide area augmentation system), composta da una serie di stazioni base dislocate su tutto il nord America.

Essenzialmente il WAAS nasce per permettere agli aerei di affidarsi al GPS per tutte le fasi di volo, compreso l'approccio di precisione a un qualunque aeroporto all'interno dell'area di copertura. Il WAAS usa una rete di stazione di riferimento, per misurare minime variazioni nel

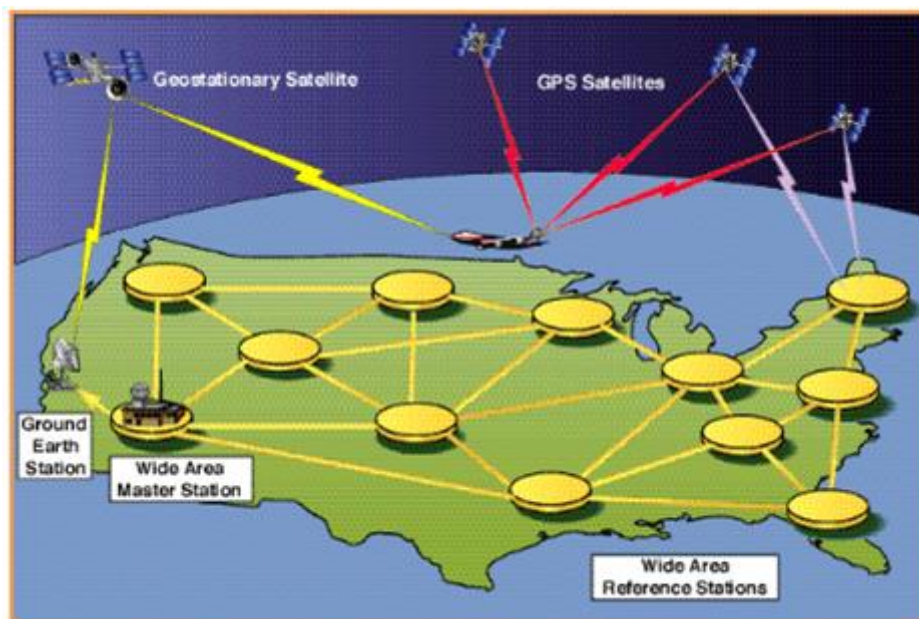


Figura 6) Architettura WAAS - source [<http://pages.infinet.net/zorglob/navigation.htm>]

segnale proveniente dai satelliti GPS. Le misure raccolte dalle stazioni di riferimento sono inviate a stazioni di controllo che accodano le correzioni e le inviano tempestivamente (ogni 5 secondi o meno) ai satelliti WAAS geostazionari. Questi satelliti a loro volta ritrasmettono i messaggi verso terra, dove i ricevitori abilitati alla ricezione delle correzioni WAAS applicano le correzioni durante la computazione della posizione per migliorarne l'accuratezza.

Quanto visto finora si può ben collocare in una categoria di sistemi che prende il nome di sistemi outdoor, ovvero quei sistemi che permettono la radiolocalizzazione in ambienti aperti; in alcuni casi si è provato ad utilizzare i segnali GPS in ambienti chiusi ma senza ottenere buone accuratze.

Da qui nasce l'esigenza di progettare una rete di anchors, ovvero nodi fissi, che vanno ad interagire con un user in maniera molto più efficace di quanto farebbe un satellite esterno.

## CAPITOLO II – Tecnologie per RTLS

### 2.1 Tracking indoor: una panoramica delle tecnologie disponibili

Vi sono svariate soluzioni per il tracking indoor, che ben si adattano alle specifiche esigenze del progettista.

Si riporta di seguito una breve panoramica sui più comuni di questi sistemi che includono tecnologie come IR, ultra-sound, RFID, WLAN, UWB.

Ognuna di queste tecnologie ha delle ben determinate caratteristiche, ad esempio una RTLS basata su WLAN non ha bisogno di infrastrutture perché si appoggia a dispositivi che supportano la connettività WLAN, ampiamente diffusi; tuttavia le prestazioni in termini di accuratezza non sono di spicco.

Di seguito una tabella che differenzia i vari tipi di tecnologia disponibile per la radiolocalizzazione.

### Tagging Options, Capabilities & Applications

Technology	Implementation	Capabilities						Applications
<b>IEEE802.15.4a</b>	Based on time of flight and triangulation	2000 per 20m radius	27 Mbps	±10 cm	10 km/hr			Precision Asset Location + Mobility
<b>WiFi Based</b>	Uses WiFi channel. Based on RSSI and triangulation		2 Mbps	±10 m				Asset Location
<b>Active RFID</b>	Transmits in MHz range		Kbps					Asset Tracking
<b>Passive RFID</b>	"Take me to your Reader"							Inventory
<b>Barcode</b>	"Scan me with your laser"							Check Out

Notes:  
RSSI: Receive Signal Strength Indication




Figura 7) Principali tecnologie, caratteristiche, applicazioni - Source [Decawave website]

La principale caratteristica di una RTLS è che implica la presenza di un utente

"attivo", la cui posizione va determinata. E' sostanzialmente differente dalla radiolocalizzazione nella quale si vuole individuare un oggetto passivo (ad esempio i radar implementano una procedura di radiolocalizzazione). Al contrario un terminale attivo contribuisce al calcolo della sua posizione, ricevendo e scambiando informazioni con stazioni di riferimento (anchors).

## 2.2 Algoritmi di misura e prodotti in commercio

Delle metodologie accomunano gli approcci sopracitati, in particolare per quanto riguarda i segnali RF: si parla di RSS (Recieved signal Strenght), AOA (Angle of Arrival), TOA (time of arrival), TDOA (Time difference of arrival). Esse si basano sul concetto di triangolazione, secondo cui se le coordinate di almeno 3 punti A,B,C sono note la posizione E1 puo essere calcolata usando la lunghezza o la direzione di R1,R2,R3. In base a queste informazioni raccolte nell'area di copertura, una RTLS puo fornire informazioni di posizione assolute, relative e di prossimita. Ogni metodo ha dei vantaggi e svantaggi: Il TOA ad esempio e la tecnica puu accurata e molto robusta contro il multipath tipico degli ambienti indoor. L'AOA ha bisogno di almeno due anchors per effettuare una stima, a differenza di TOA e RSS per le quali ne bisognano tre. L'AOA perde di efficacia quando l'utente e lontano e ha bisogno di antenne grandi sui dispositivi. Di seguito una tabella comparativa

QUANTITA' MISURATA	SCHEMA POSIZIONAMENTO	ASPETTI CARATTERISTICI
Angle of Arrival (AOA)	Angle based	Caratterizza la direzione di propagazione;tipicamente associato ad array di antenne
Received signal strength	Range based Fingerprinting Interferometric	Si basa sulla misura della potenza ricevuta
Time of Arrival (TOA)	Range difference based	Si basa sulla misura del ritardo di propagazione del segnale
Near field ranging	Range based	Relaziona la distanza con l'angolo tra campo elettrico e magnetico in condizioni di campo vicino.

---

## **Angle of Arrival (AOA)**

Tale tecnica prevede una stima della posizione misurando l'angolo di arrivo dei segnali nella stazione di misurazione. La sorgente del segnale è localizzata lungo la linea formata dalla stazione di misura e l'angolo stimato (chiamata anche LOB, line of bearing). Quando sono disponibili più di una misura AOA, l'intersezione di due LOBs fornisce la posizione stimata. Nella pratica rumore, e propagazione multipath forzano l'utilizzo di più angoli di arrivo. Le antenne devono essere dotate di array di antenne.

## **Received Signal Strength (RSS)**

È un tipo di procedura power-based. La misura più semplice è quella della potenza del segnale, più lontano è il nodo più debole sarà il segnale ricevuto; è quindi possibile ottenere la stima della distanza tra due nodi misurando l'RSS. Vi sono modelli teorici ed empirici per convertire i db di differenza in distanza, inoltre non c'è bisogno di sincronizzazione tra i nodi. Tuttavia questa versatilità si paga in termini di accuratezza, in quanto il segnale si degrada pesantemente con la distanza, multipath, rifrazione, riflessione e shadowing.

## **Time of Arrival (TOA)**

È un tipo di procedura time-based. Essendo nota la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica nel vuoto, la distanza tra due coppie di nodi può essere calcolata attraverso la misura del ritardo di propagazione, o TOF (time of flight). Tale procedura è particolarmente efficace quando abbinata a tecnologie UWB (ultra wide band), fornendo alti livelli di accuratezza. Tuttavia la criticità è rappresentata dalla necessità di sincronizzazione e dagli errori di misura.

## **Time difference of arrival (TDOA)**

Questo approccio consiste nel misurare la differenza in range tra trasmettitore e ricevitore. Una misura TDOA definisce un'iperboloide.

---

In particolare l'Ultra wide band technology è la promessa per l'indoor positioning: alti rate di trasmissione, bassa complessità, basso costo, basso consumo. L'approccio tradizionale per un sistema UWB usa degli impulsi a banda stretta nel dominio del tempo , tipicamente nell'ordine dei nanosecondi, così da espandere l'energia del segnale abbastanza uniformemente su un'ampia gamma di frequenze. Questo metodo prende il nome di Impulse radio UWB, che permette di stimare il TOA con una risoluzione molto fine, che si traduce con un'accuratezza inferiore al metro.

Di seguito una comparativa tra dispositivi UWB attualmente in commercio, con un ampia gamma di costi e accuratezze.

## 2.2.1 ZEBRA TECHNOLOGY



Figura 8) Set di dispositivi Dart UWB a) Dart HUB b) Durt ATEX compatible c) Sensor d) Tag e) Vision Reader

La famiglia di prodotti DART UWB consiste di Durt Hub, Durt Sensors, Durt Sensors, Durt Vision reader.

Sul Durt Hub è implementato il software di localizzazione real time della Zebra Technologies. L'Hub fornisce potenza, dati e clock ai sensori su cavo Ethernet, consentendo una estrema facilità di installazione

I Dart Sensors (anchor) vengono installati nell'area da coprire.

Il Dart vision reader è invece un rilevatore di presenza. Il sistema DART UWB, prodotto dalla Zebra Company, fornisce una stima di posizione con accuratezza di 30 cm. La sua più importante caratteristica è la durata della batteria integrata nei tag (fino a 7 anni a seconda del duty-cycle); compatibile con gli standard 802.15.4a e 802.15.4f, un'estensione di quest'ultimo che permette l'utilizzo dell'RFID. Il range è fino a 200m.

Source - [<https://www.zebra.com/us/en/products/location-solutions/dart-uw.html>]



---

## 2.2.2 UBISENSE TECHNOLOGY



Figura 9) a) Sensor (Anchor) b) Tag

Il sensore 9000 IP della Ubisense company utilizza la tecnologia UWB per la determinazione della posizione in real time di uno o più target. La principale caratteristica è la presenza sul dispositivo di un array di antenne che lo rende adatto all'utilizzo dell' approccio AOA, che permette un impiego di un minor numero di sensori (il numero minimo passa da tre del TOA a due). Questa peculiarità rende adatto in termini di costi l'impiego di questo dispositivo in RTLS di grandi dimensioni. L'accuratezza dichiarata dalla compagnia costruttrice è di 15 cm, e la frequenza di aggiornamento della posizione arriva fino a 134 Hz.

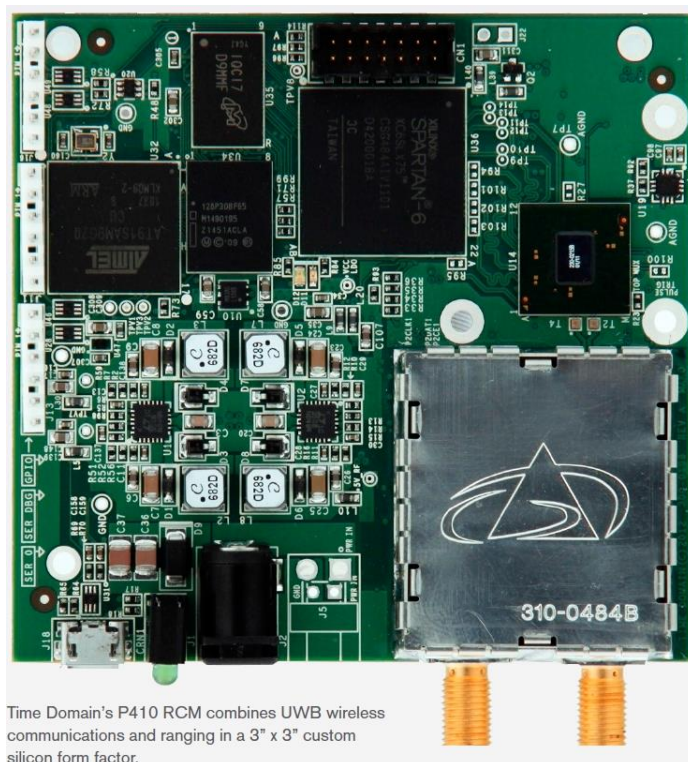
Sources -

[[http://www.directindustry.com/prod/ubisense-124957.html#product-item\\_1453653](http://www.directindustry.com/prod/ubisense-124957.html#product-item_1453653)][[http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/uwb\\_wireless\\_positioning\\_systems\\_technical\\_report.pdf](http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/uwb_wireless_positioning_systems_technical_report.pdf)]

## 2.2.3 TIME DOMAIN TECHNOLOGY

**TIME DOMAIN**<sup>®</sup>  
GLOBAL LEADER IN ULTRA WIDEBAND PRODUCTS

**PULSON**<sup>®</sup> 410  
A TIME DOMAIN PRODUCT



Time Domain's P410 RCM combines UWB wireless communications and ranging in a 3" x 3" custom silicon form factor.

Figura 10) Timedomain P410

Il P410 è un trasceiver prodotto dalla Timedomain per la realizzazione di RTLS. Questo dispositivo può utilizzare due metodi di ranging: il TW-TOF (two way time of fly, di cui si trovano approfondimenti più in là) e la CRE (coarse rang estimation), tecnica basata sulla misura della forza del segnale ed è calibrata attraverso il TW-TOF in specifici intervalli; l'accuratezza del CRE è inferiore rispetto il TW-TOF ma la frequenza di aggiornamento è maggiore. Sul P410 possono essere installate due antenne, in modo che possa funzionare anche come radar. L'accuratezza dichiarata è di 10 cm in NLOS/LOS combinata e di 2 cm in LOS.

---

## FEATURES

- Accurate ranging measurement and/or determination of position
- Two distance measurement techniques supported:
  - Two-Way Time-of-Flight (TW-TOF)
  - Coarse Range Estimation (CRE)
- TW-TOF provided with estimate of measurement accuracy
- Integratable with supplemental technologies (e.g., GPS, Inertial)
- High precision in high multi-path environments
- Fused wireless communication
- Operable in all weather and lighting conditions
- Fixed wired infrastructure not required
- Cost effective, easy to use and integrate
- Additional software allows operation as radar

## APPLICATIONS

- Personnel safety and situational awareness around large vehicles
- Dynamic truthing test systems
- Automated person and vehicle convoy following
- Indoor robot navigation and mapping
- Auto-survey of distributed sensors and localization systems

*Figura 11) Caratteristiche ed applicazioni*

Sources -

[<http://www.timedomain.com/p400.php>]

## 2.2.4 DECAWAVE TECHNOLOGY

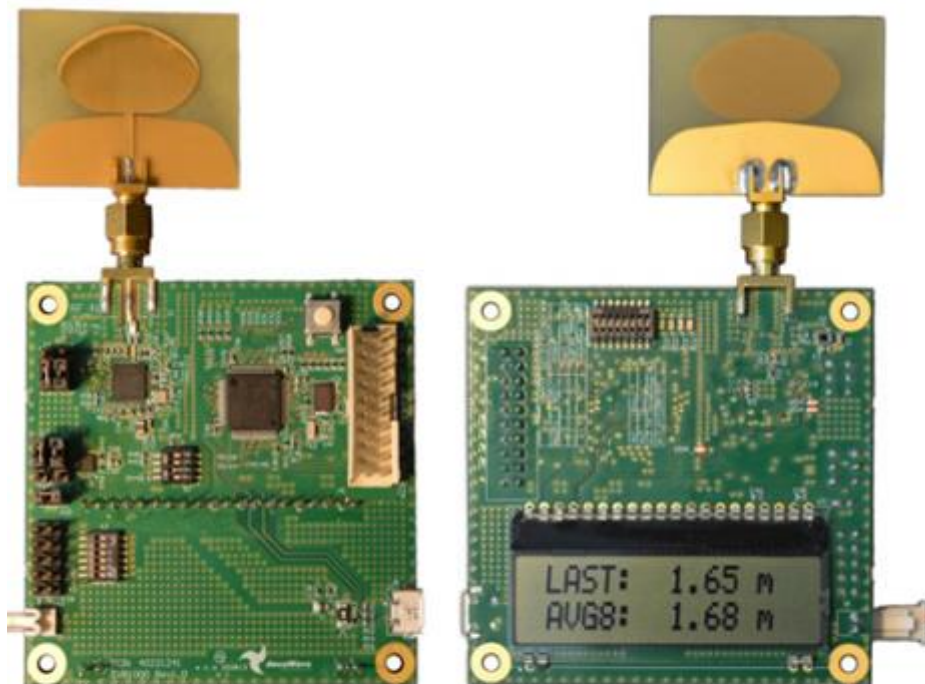


Figura 12) Dettagli di un componente del Trek1000, parte anteriore con display e parte posteriore

---

Decawave ha sviluppato un sensore compatibile con lo standard 802.15.4a capace di utilizzare il l'algoritmo del TOA o il TDOA. Il produttore dichiara un'accuratezza di circa 10 cm con una banda di funzionamento di 1.3 Ghz; garantisce una copertura fino a 190 m, un elevato data rate (fino a 6.8Mbit/s) e profili di basso consumo. Il sensore è montato su una evaluation board EVB1000, che comprende il DW1000 IC, ARM processor, LCD, connessione USB e un antenna.

### Technical Data

- Supports all features of the DW1000 IC including: -
  - 6 frequency bands supported with centre frequencies from 3.5 GHz to 6.5 GHz
  - Tx power -14 dBm / -10 dBm
  - Tx power density -41.3 dBm / MHz
  - Preamble Length 64  $\mu$ s to 4 ms
  - Packet Sizes up to 1023 bytes
  - SPI interface
- Power Supply Options
  - 5 V from USB
  - 3.3 V via 2-pin header
- DW1000 sub-system power consumption can be measured independently
- STM32F105 ARM Cortex M3 processor
  - 12 MHz external crystal
  - 32.768 kHz RTC crystal
  - On-chip USB interface / SPI interface to DW1000
- 70 mm x 70 mm PCB

Figura 13) Caratteristiche tecniche DW1000 IC, montato sulle schede Decawave

Source -

[[http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/evb1000-product-brief\\_3.pdf](http://www.decawave.com/sites/default/files/resources/evb1000-product-brief_3.pdf)]

---

## 2.2.5 NANOTRON TECHNOLOGY



*Figura 14) Nanotron evaluation kit*

### **NANOPAN 5375**

Altra compagnia che fornisce dispositivi UWB per RTLS. Le due migliori features sono una batteria integrata sui tags LiPo e una funzione di regolazione potenza del segnale; il punto debole è invece che viene utilizzato una chirp spread spectrum physical layer technology invece dell' impulse radio. Ciò comporta un crollo dell' accuratezza rispetto agli altri sistemi, che va da 1 a 3 metri. L'approccio utilizzato è il TDOA.



Product Specification <i>nanoPAN 5375 Development Kit</i>	
RF Module	nanoPAN 5375 RF Module
Modulation technique	Chirp Spread Spectrum
Operates worldwide	2.4 GHz ISM band
Output power (programmable)	-15 dBm to +20 dBm
Data rates (programmable)	250 kbps to 1 Mbps
Receiver sensitivity (FEC on)	up to -97 dBm
Ranging accuracy	2 m indoors / 1 m outdoors
Supply voltage	5.0 V USB
Battery operation (optional)	Rechargeable Li-Ion
Microcontroller	ATMega 1284P
Flash memory	128 KByte
SRAM memory	16 KByte
Data interface	Serial via USB
Flash interface	SPI
Debug interface	JTAG
Programmable LEDs	6
Programmable keys	3
Current consumption (max)	500 mA

*Figura 15) Caratteristiche tecniche*

Source -  
[\[http://nanotron.com/EN/PR\\_ic\\_modules.php\]](http://nanotron.com/EN/PR_ic_modules.php)

	Algoritmo	UWB channel	Accuratezza	Dimensioni (cm) Peso (g)	Portata	Costo contenuti	Note
UBISENSE 9000 IP series	AOA - TDOA	8.5 - 9.5 Ghz	15 cm	(20x14x6.5) 580	N.D.	12500 \$ 4 sensori 10 tag	L'utilizzo del AOA permette di risparmiare sul numero dei sensori, il che può portare vantaggi economici in caso di large system indoor positioning. Buono per scopi industriali in quanto è rivestito da una solida cover.
TIMEDOMAIN P410	TW-TOF CRE	4.3 Ghz  Banda (2.2 Ghz)	10 cm NLOS  2cm LOS	(7.6x8x1.6) 58	Fino a 384 m	9995 \$\ 4 moduli	Possibilità di installazione di due antenne, che permette al dispositivo di essere utilizzato come radar. Ridotti i consumi (4.2W)
DECAWAVE EVB1000/ TRACK 1000	TOA TDOA	3.5\6.5 Ghz  Banda (1.3 Ghz)	10 cm	7x7	Fino a 300 m	606 \$ 2 boards	Ottimo compromesso costi\accuratezza. Possibilità di acquisto del DW1000 IC a costi ancora più contenuti. Compatibile con il protocollo 802.15.4a
ZEBRA TECH. DART SENSOR - [DART HUB]	TDOA	6.35 a 6.7 Ghz	30 cm	15.5x6.4x7.1  [35.6x21.9x8.9]	Fino a 200 m	12000 \$ 3+1 tag 1 hub	Nel prezzo sono inclusi sensori, tag e hub, che fornisce potenza e clock. I sensori ricevono i dati UWB dal Dart tag che è attaccato all'oggetto in movimento.
NANOTRON NANOPAN 5375	TDOA TOA	N.D.	1 - 3 m	119 x 98 x 18  53 x 35 x 15	50 m	3833.5eur 8 anchors 5 tags	Il dispositivo usa una modulazione di tipo chirp spread spectrum che degrada l'accuratezza della IR-UWB utilizzata



### RTLS technology comparison: price, position accuracy and indoor ranging distance [m](=size of bubble)

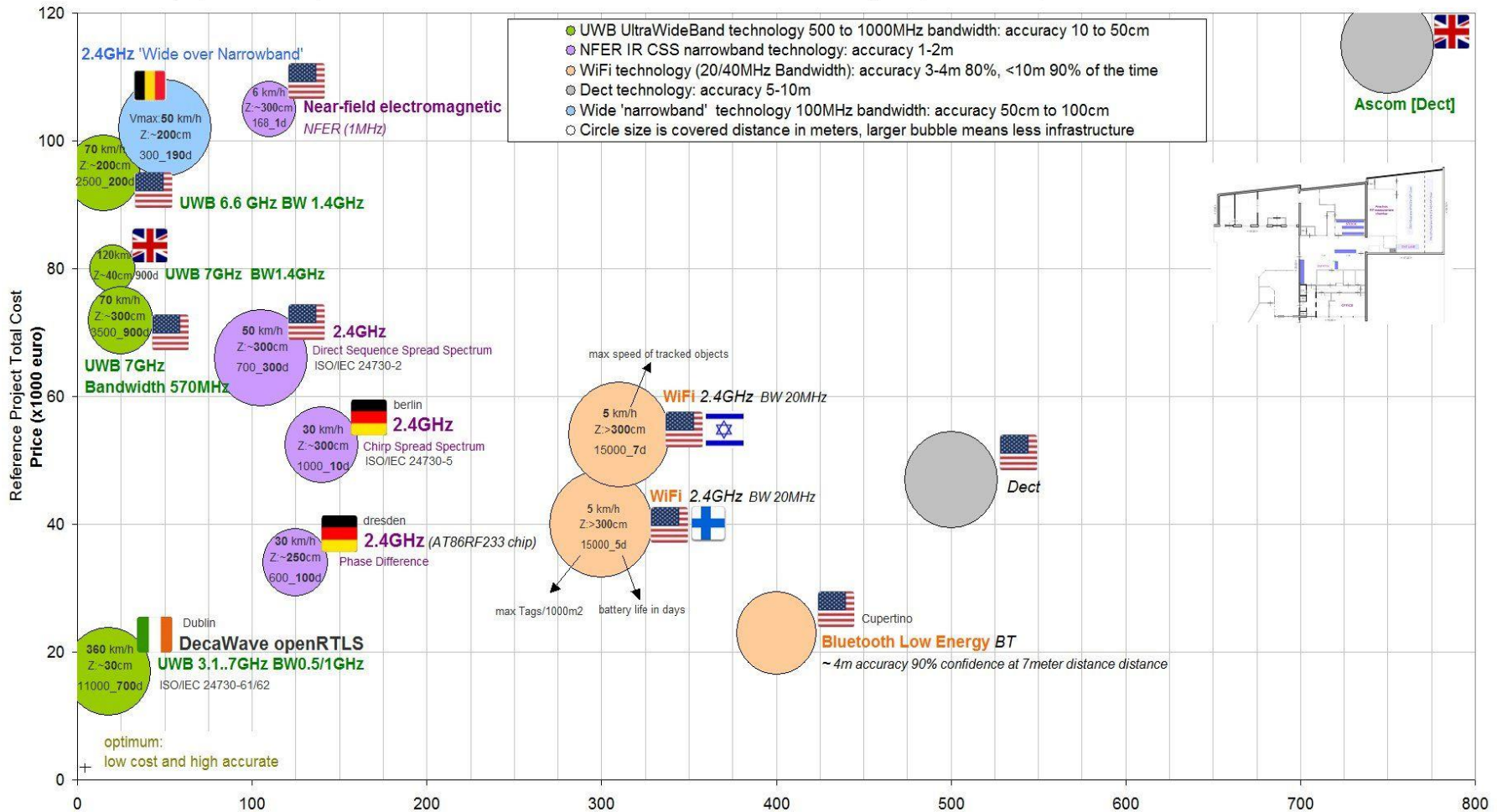


Figura 16) Confronto tra prodotti per RTLS con diverse tecnologie in commercio. [https://test.openrtls.com/cs\_CZ/page/website.Prices]

---

In figura (16) troviamo un diagramma dei principali prodotti in commercio; ogni bolla rappresenta un'infrastruttura RTLS. Bolle più larghe coprono una maggiore distanza, di conseguenza meno infrastrutture. Sulle ordinate troviamo il costo, sulle ascisse l'accuratezza. Su ciascuna bolla troviamo il margine d'errore, il numero massimo di tag tracciabili per 1000 m2, la durata delle batterie dei sensori e la velocità di tracking del tag.

## 2.3 Criteri di scelta

Il panorama piuttosto ampio di dispositivi UWB ha da un lato complicato la scelta di quale utilizzare per i test, dall'altro ha reso possibile soddisfare svariate esigenze:

si è scelto quindi il TREK1000 Decawave per i seguenti aspetti

- Costi  
l'evaluation kit della decawave era quello dal costo più basso
- Accuratezza dichiarata  
Anche in questo caso il kit si distingueva tra quelli più accurati
- Ottimo supporto manualistico

---

## 2.4 Overview trek1000 evaluation board

- comprende il Decawave DW1000 IC compatibile con il protocollo IEEE 802.15.4-2011, un transceiver wireless, processore ARM, interfaccia USB, display LCD e antenna esterna.
- L'evaluation board ha preinstallata l'applicazione "Decaranging", che implementa il two-way ranging.
- Processore ARM con codici sorgenti forniti da Decawave
- Permette sviluppo e di applicazioni che usano il TOF/two way ranging del DW1000 IC
- Antenna esterna
- 6 bande di frequenza centrate da 3.5 6.5 GHz
- Tx power -14 dBm/-10 dBm
- Tx power density -41.3 dBm/MHz
- lunghezza preambolo 64 ms fino a 4ms
- lunghezza pacchetti fino a 1023 bytes
- interfaccia SPI
- input power 5 V (da USB) o 3.3 V via 2-pin header
- processore STM32F105 ARM Cortex M3
- 32.768 kHz RTC crystal
- On-chip USB interface / SPI interface to DW1000
- 12 MHz external crystal

L'evaluation board verrà utilizzato per testare le seguenti caratteristiche del chip DW1000 IC attraverso il two way ranging:

- Range
- Range precision
- Transmit spectrum
- Power/current consumption
- Multipath immunity
- Blocking immunity
- Antenna options

---

## 2.5 Analisi protocollo 802.15.4 physical layer

- Overview struttura del frame

Le comunicazioni UWB sono basate sulla trasmissione e ricezione di frames. La Figura 17) illustra una struttura generale del frame UWB. Essa comincia con un header di sincronizzazione che consiste di un preambolo e di un SFD (start of frame delimiter), dopo il quale si trova un PHR (physical header) che definisce lunghezza e data rate del payload del frame.

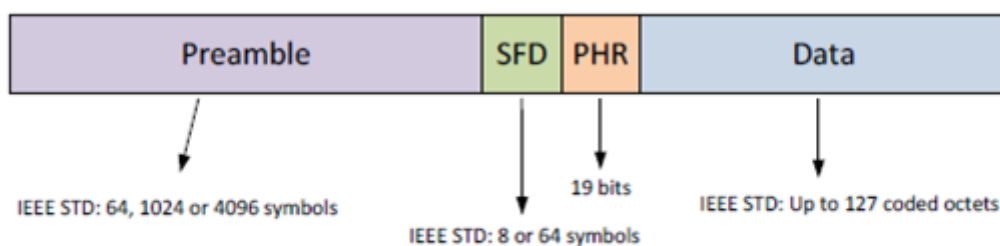


Figura 17) UWB PHY Frame structure

- Modulazione dati

Si tratta di un tipo di modulazione IR-UWB. Durante il PHR e Data, i bit di informazione sono segnalati tramite una modulazione di tipo BPM (burst position modulation).

Ogni bit di data passa attraverso un convolution encoder per generare un bit di parità usato per settare la fase del pacchetto (positivo o negativo, pratica che consiste in una BPSK).

Un ricevitore coerente (che tiene conto della fase) come quello implementato nel DW1000 può determinare la fase del pacchetto ed usare un Viterbi decoder con un guadagno aggiuntivo di 3dB.

- Synchronization header (SHR)

consiste nella sequenza di preambolo e nel SFD. Al contrario della modulazione BPM/BPSK usata per i dati, per la sincronizzazione viene usato un singolo impulso.

La sequenza del preambolo ha la proprietà di essere a perfetta autocorrelazione

periodica, che permette a un ricevitore coerente di determinare l'esatta risposta all'impulso del canale RF tra trasmettitore e ricevitore. Questo porta due vantaggi: in primis permette al ricevitore di trasformare il multipath da una sorgente di interferenza in un fattore positivo estendendo il range operativo. In secundis permette al ricevitore di analizzare il canale e determinare il tempo di arrivo del path principale, anche quando attenuato.

L'SFD segna la fine del preambolo e lo switch in una modulazione BPM/BPSK per i dati.

## 2.6 Frequenza centrale, banda, data rate

Il range operativo del DW1000 dipende dal data rate e dalla lunghezza del preambolo. Nello spazio libero, in LOS (Line of sight), questo può variare dai 60m ad un data rate di 6.8 Mbps fino a 250 m per un data rate di 110 kbps.

In un ambiente indoor il range in LOS aumenta, per via delle riflessioni multipath.

In condizioni LOS, a 850 kbps il range può arrivare ad essere il 40% più ampio rispetto allo spazio libero.

In condizioni di NLOS, il range sarà invece ridotto a causa delle attenuazioni subite dal segnale.

Il range dipende anche dalla frequenza centrale operativa e dalla banda: una frequenza centrale più bassa avrà un range maggiore di una più alta, mentre una larghezza di banda più ampia avrà più range a disposizione, inviando più energia.

Lo standard IEEE 802.15.4 definisce un numero di canali con frequenze centrali e ampiezze di banda, per i quali raccomanda specifici codici di preambolo. Di seguito è illustrata una tabella riassuntiva dei codici di preambolo supportati dal DW1000.

Channel number	Centre frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Preamble Codes (16 MHz PRF)	Preamble Codes (64 MHz PRF)
1	3494.4	499.2	1, 2	9, 10, 11, 12
2	3993.6	499.2	3, 4	9, 10, 11, 12
3	4492.8	499.2	5, 6	9, 10, 11, 12
4	3993.6	1331.2 *	7, 8	17, 18, 19, 20
5	6489.6	499.2	3, 4	9, 10, 11, 12
7	6489.6	1081.6 *	7, 8	17, 18, 19, 20
<b>N.B.</b> For correct operation of the DW1000 the software must take care to only allow selection of those preamble codes appropriate for the configured PRF.				

\* The DW1000 has a maximum receive bandwidth of 900 MHz

Figura 18) Tabella riassuntiva codici preambolo supportati dal DW1000

Per maggiori dettagli sui codici, si rimanda a [6].

---

Fissata la frequenza centrale e la banda, l'ampiezza del range dipende quindi dal data rate. Il preambolo è una sequenza di impulsi definiti nello standard IEEE 802.15.4. Per ogni canale, lo standard definisce due codici di preambolo per la 16 MHz PRF (Pulse repetition frequency) e quattro per la 64 MHz; questi codici sono semi-ortogonali, permettendo un accesso simultaneo ai dispositivi sullo stesso canale, come se agissero su canali differenti.

La proprietà di autocorrelazione periodica permette al ricevitore di accumulare preamboli e verificare un accurato modello di canale fra sé stesso e il trasmettitore. Questo permette buone performance a lungo raggio e un'accurata definizione del tempo di arrivo del raggio principale.

La sequenza del preambolo è la stessa per tutti i data rates. La lunghezza invece, cioè il numero degli intervalli di simbolo nella quale essa è ripetuta, ha un effetto significativo sul range operativo e sull'accuratezza del timestamp.

In generale un preambolo più lungo dà una maggiore performance di range e un'informazione più accurata in termini di time of arrival del path principale; di contro un preambolo più corto risparmia energia e tempo di lettura e scrittura. In figura 19) si trova una tabella delle lunghezze consigliate. [8]

Data Rate	Recommended preamble sequence length
6.8 Mbps	64 or 128 or 256
850 kbps	256 or 512 or 1024
110 kbps	2048 or 4096

Figura 19) Tabella riassuntiva della lunghezza dei preamboli

## 2.7 Sequenza trasmissione di base

In figura 20) è mostrato lo schema di funzionamento di base del DW1000, che comincia da uno stato di Idle in attesa di istruzioni dal controller.

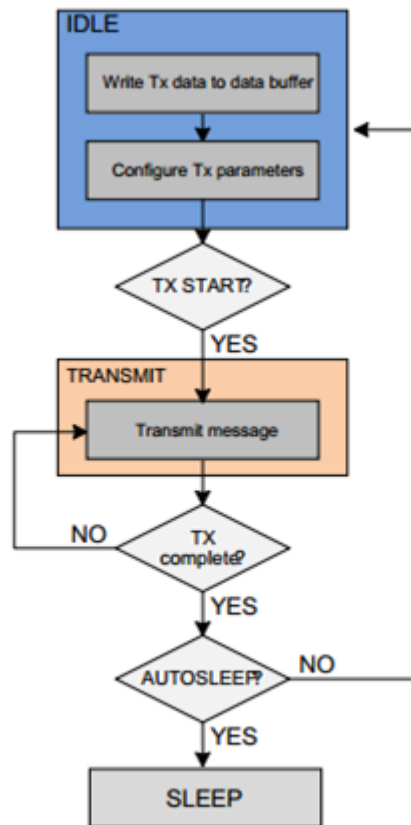


Figura 20) Basic transmit sequence

Per trasmettere, l'host controller deve scrivere i dati da trasmettere nel **Register file: 0x09 – Transmit Data Buffer**. I parametri come lunghezza preambolo, data rate, PRF vanno invece scritti in **Register file: 0x08 – Transmit Frame Control**. A questo punto il trasmettitore esce dallo stato di idle, e assunto che le configurazioni più rilevanti siano state effettuate, l'host controller comincia le trasmissioni settando il bit di controllo TXSTRT nel **Register file: 0x0D – System Control Register**.

Dopo che la trasmissione è stata richiesta, automaticamente il DW1000 IC manda il frame completo di preambolo, SFD, PHR e dati.

La fine della trasmissione è segnalata all' host tramite il bit di stato TXFRS **Register file: 0x0F – System Event Status Register**, dopodichè il DW1000 torna in idle attendendo nuove istruzioni.

- **Transmit Data Buffer**

Il file di registro 0x09 è il **Transmit Data Buffer**. I dati dal buffer vengono trasmessi nel *data payload* del *transmission frame*.

La procedura prevede la scrittura del data frame per la trasmissione nel TX\_BUFFER, il settaggio della lunghezza del frame ed altri dettagli in TX\_FCTRL . Invece il bit di inizio trasmissione si trova in TXSTART.

- **Trasmit Frame Control**

Il file di registro 0x08 è il **Transmit Frame Control**. In figura 21) ne è illustrata la struttura.

REG:08:00 – TX_FCTRL – Transmit Frame Control (Octets 0 to 3, 32-bits)																																	
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		
TXBOFFS								PE	TXPSR	TXPRF	TR	TXBR	R	TFLE								TFLEN											
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Figura 21) Struttura Trasmit frame control

Il campo TFLEN determina la lunghezza del frame da trasmettere. Tale lunghezza è anche copiata nel PHY Header in modo che il ricevitore sappia la lunghezza del frame da decodificare.

Il campo TFLE è un'estensione del precedente, permette una lunghezza del frame di 1023 bytes invece di 127 bytes.

R sono bytes riservati.

Il campo TXBR è quello riservato al trasmit bit rate.

Il bit TR indica il *transmit ranging*. Esso viene copiato nel PHY header (PHR) del frame trasmesso, identificandolo come frame di ranging.

Il campo TXPRF è quello dedicato alla *Pulse repetition frequency*. In Figura 22) le diverse configurazioni.

Bit 17	Bit 16	Nominal PRF
0	0	4 MHz
0	1	16 MHz
1	0	64 MHz
1	1	reserved

Figura 22)Configurazioni PRF

Affinchè la comunicazione tra trasmettitore e ricevitore abbia successo è necessario che entrambi i dispositivi siano impostati sulla stessa modalità.



Il campo TXPSR è quello relativo al *Transmit preamble symbol repetition*. Esso setta la lunghezza dei preamboli in simboli. I due bit vanno poi copiati nel PHY header (PHR).

I bit del campo PE sono quelli relativi al *Pulse extension*. In figura 23) le possibili configurazioni:

Bit 19	Bit 18	Bit 21	Bit 20	
TXPSR		PE		Preamble Length
0	1	0	0	64
0	1	0	1	128
0	1	1	0	256
0	1	1	1	512
1	0	0	0	1024
1	0	0	1	1536
1	0	1	0	2048
1	1	0	0	4096

Figura 23) Configurazioni preamble length

Il campo TXBOFFS è quello relativo all' *offset* della trama.

Un ulteriore Bytes è riservato all' *Inter-frame spacing*, che è un ritardo nel tempo di simbolo fra trame successive.

- **System Control Register**

Il bit TXSTRT è quello relativo all' inizio della trasmissione. Quando il DW1000 è in stato di idle, con il set di questo bit viene trasmesso un frame immediatamente. In figura 24) si trova l'ubicazione del bit TXSTRT nel **System Control Register**.

REG:0D:00 – SYS_CTRL – System Control																																
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	
.	.	.	.	.	.	.	HRBPT	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	RXDLYE	RXENAB	WAIT4RESP	TRXOFF	.	.	CANSFCS	TXDLYS	TXSTRT	SFCST
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 24) Struttura register file: 0x0D - System control register

- **System Event Status Register**

Questo registro contiene bit che indicano cambiamenti di stato del sistema, oltre che segnalare l'avvenimento di diversi eventi. In fig 25) se ne illustra la struttura.

REG:0F:00 – SYS_STATUS – System Status Register (octets 0 to 3)																																	
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		
ICRBP	HSRBP	AFFREJ	TXBERR	HPDWARN	RXSFDT0	CLKPLL_LL	RFPLL_LL	SLP2INIT	GPIOIRQ	RXPTO	RXOVRR	-	LDEERR	RXRFTO	RXRFSL	RXFCE	RXFCE	RXDFR	RXPHE	RXPHE	RXPHE	LDEDONE	RXSFDD	RXPRD	TXFRS	TXPHS	TXPRS	TXFRB	AAAT	ESYNCR	CPLOCK	IRCS	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

REG:0F:04 – SYS_STATUS – System Status Register (octet 4)																																
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	

Figura 25) Struttura system status register

Il bit TXFRS (evidenziato in rosso) è settato alla fine della trasmissione della parte data del frame; esso viene automaticamente azzerato quando si ha una nuova trasmissione.

- **Trasmission timestamp**

La definizione di timestamping è stabilita dallo standard 802.15.4. E' il momento in cui il primo simbolo del PHR viene trasmesso dall'antenna.

La circuiteria del DW1000 prende nota del clock in cui si è verificato l'evento e vi aggiunge il ritardo di antenna per ottenere il tempo netto che è scritto in TX\_STAMP, nel file di registro

0x17 – **Transmit Time Stamp**, con dettagli in figura 26).

REG:17:00 – TX_TIME – Transmit Time Stamp (Octets 0 to 3, 32-bits)																																
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	
TX_STAMP(low 32 bits of 40-bit value)																																
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 26) Struttura registro Trasmit Time Stamp

L'unità di misura dell'ultimo bit significativo è approssimativamente 15.65 picosecondi. [8]

---

## 2.8 Two way ranging

Il TWR è una tecnica per calcolare la distanza tra due oggetti utilizzando il time of flight (TOF), secondo la formula

$$D = c * TOF \quad (1)$$

dove  $c$  è la velocità della luce.

Il dw1000 utilizza dei clock interni alquanto precisi, che permettono anche di effettuare il timestamping dell'evento della trasmissione o della ricezione del pacchetto. TWR ha il vantaggio che può essere usato da dispositivi stand-alone, con distanze relative da misurare. Non c'è alcun prerequisito di infrastrutture richieste.

### 2.8.1 DW1000 Twr

Se usiamo una coppia di DW1000, una come tag e una come anchor possiamo far riferimento al diagramma di figura 27):

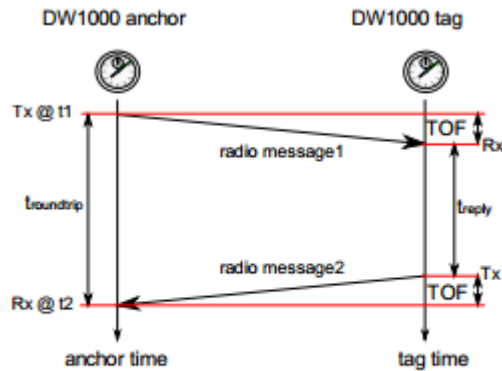


Figura 27) Diagramma temporale TWR

L'anchor trasmette un radiomessaggio al tag e registra il suo tempo di trasmissione (timestamp)  $t_1$ .

Il tag riceve il messaggio e trasmette una risposta (sempre via radiomessaggio) dopo un certo ritardo  $t_{reply}$  all' anchor. L' anchor riceve la risposta e registra il timestamp  $t_2$ .

Utilizzando i timestamps  $t_1$  e  $t_2$  l' anchor può calcolare il  $t_{roundtrip}$  e, conoscendo il tempo di elaborazione del tag  $t_{reply}$  il TOF risulta:

$$TOF = (t_2 - t_1 - t_{reply}) / 2 \quad (2)$$

da cui facilmente si ricava la distanza.

Nel caso di tag-to-anchor TWR, ci sono altre fonti di errore da considerare, come il clock e il frequency drift. Il Double Sided TWR permette di mitigare tali disturbi.

in figura 28) si illustra lo scambio di messaggi tra tag e anchor

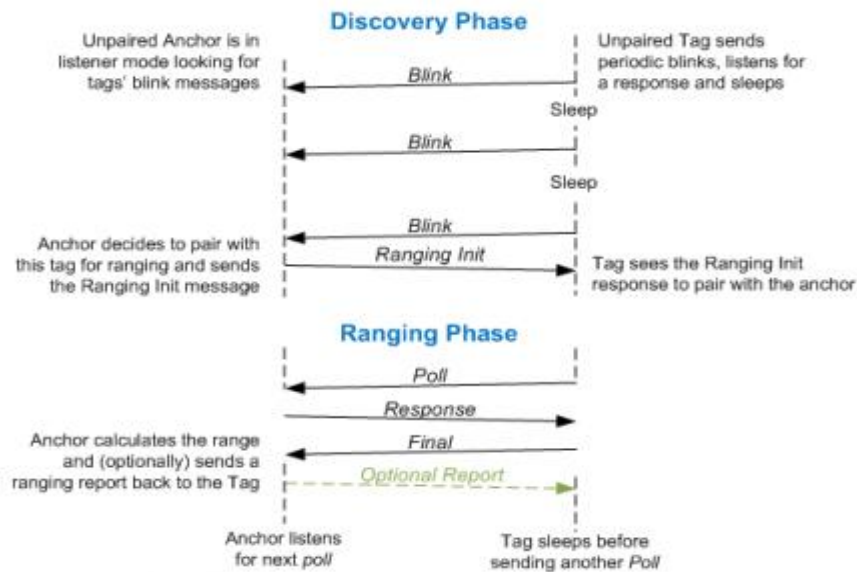


Figura 28) Scambio di messaggi Discovery e Ranging

Si distinguono diverse fasi:

- Fase discovery

inizialmente il tag si trova in fase discovery nella quale periodicamente invia dei messaggi di scoperta (blink messages) che contengono il suo indirizzo e ascolta per una risposta Ranging Init da parte dell' anchor. Se non ottiene risposta il tag entra in modalità sleep (di default pari a 1 sec). L'anchor inizialmente cerca i blink messages, e quando ne riceve uno, manderà un messaggio di Ranging init al tag. Tale processo segna il passaggio verso la Ranging phase.

- Fase ranging

nella fase di ranging il tag periodicamente effettua TWR con l'anchor. In ogni scambio il tag spedisce il cosiddetto Poll message, riceve il messaggio di risposta e quindi invia il messaggio finale. Come mostrato nella figura 28), può essere spedito un messaggio opzionale al tag (dall'anchor) permettendo al tag stesso di conoscere il range.

Sono utilizzati sei tipi di messaggi:

due nella discovery phase (*Blink* e *Ranging init*) e quattro nella ranging phase (*Poll*, *Response*, *Final* e *Range report* opzionale).

---

## 2.9 Tecniche di stima della posizione e di sincronizzazione

### 2.9.1 Time of flight – trasmettitore e ricevitore sincronizzati

In figura 29) viene illustrato il funzionamento del TOF.

In questo caso il tag (T) manda in broadcast a tutte le ancore un messaggio (A1, A2, A3) ad un noto istante. Ogni anchor riceve il messaggio e, poiché è a conoscenza di quando il messaggio è stato trasmesso e quando ricevuto (avendo una time-base comune), può calcolare il TOF. *La sincronizzazione è più difficile in caso di tag mobili.* Tale sistema è usato raramente.

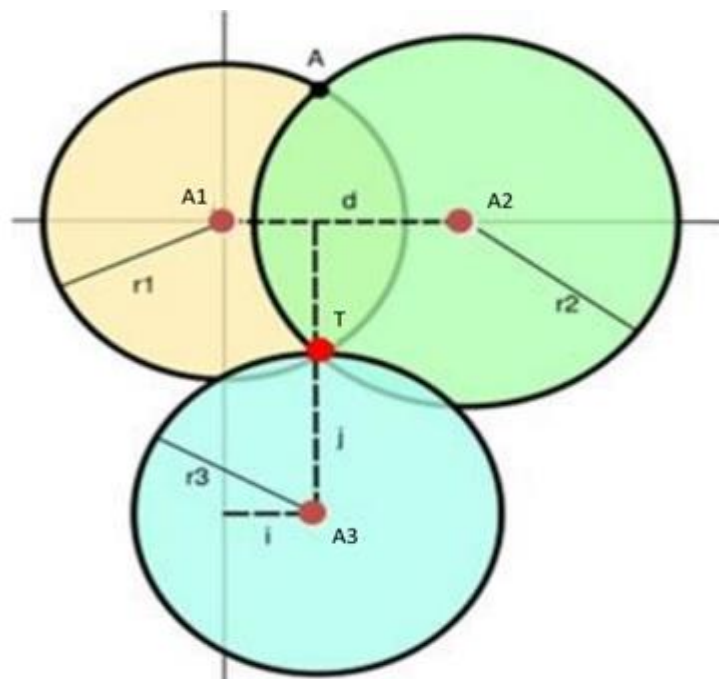


Figura 29) Schema di funzionamento TOF

### 2.9.2 Time of flight – trasmettitore e ricevitore non sincronizzati

In questo caso il tag comunica con ogni altra anchor attraverso il TWR. Il tag e ogni anchor in questo modo non hanno la necessità di essere sincronizzati. Una volta che ogni anchor ha le info necessarie, un central location engine può calcolare la posizione del tag. Questo implica che il tag deve essere capace di trasmettere e ricevere contemporaneamente con implicazioni in termini di risparmio energetico. Dato che il tag comunica individualmente con ogni anchor, ogni anchor calcola il suo TOF.

---

N.B.

In letteratura il TOF è talvolta chiamato TOA (Time of Arrive). D' ora in avanti si farà riferimento al TOA, come equivalente del Time of flight.

### 2.9.3 Time Difference of arrival (TDOA)

Questo approccio prevede che tre o più anchors siano posizionate in zone con coordinate note. Ognuna di queste ancore è time-sincronized con le altre. Come mostrato in figura, l'oggetto taggato (B) trasmette un messaggio ricevuto da tutte le anchors, che arriverà a istanti diversi a seconda della posizione delle anchors stesse. Il time-of-arrival viene memorizzato da ogni anchor; poiché vi è una sincronizzazione la differenza del tempo di arrivo dà informazioni sulla posizione del tag.

Usando la tecnica della multilaterizzazione è possibile ricavare la posizione del tag. Poiché il tag riceve soltanto, questa tecnica è chiamata *One way ranging* ma servono almeno due anchors per poter fare la differenza dei tempi di arrivo. La criticità di questo approccio sta nella sincronizzazione, infatti un offset di appena 1ns si traduce in 30 cm di errore. Una buona sincronizzazione si ottiene tramite segnali via cavo da un dispositivo centrale che fornisce il clock.

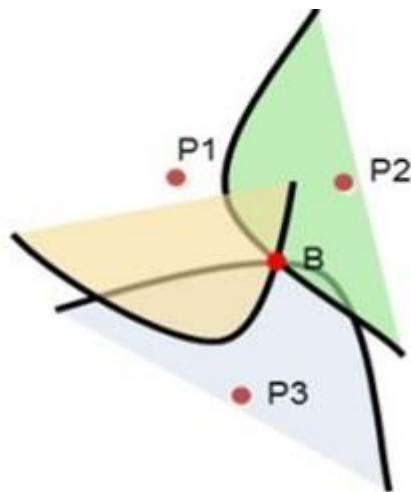


Figura 30) Schema TDOA

---

#### 2.9.4 Misura delle grandezze nel TOA

Il time of arrival ci dà informazioni sulla distanza tra tag e anchor, la cui posizione è nota. Il segnale ricevuto sarà pari a:

$$r(t) = \alpha s(t - \tau) + n(t) \quad (3)$$

dove  $\tau$  è il TOA,  $\alpha$  è un coefficiente di attenuazione e  $n(t)$  è rumore gaussiano bianco a media nulla, densità spettrale di potenza  $N_0/2$  [W/Hz]. Per estrarre il TOA dal segnale ricevuto, si ricerca la massima correlazione tra  $s(t - \hat{\tau})$  e il segnale ricevuto. Il  $\hat{\tau}$  che fornisce il massimo picco di correlazione dà la stima del TOA.

Sia

$$p(d) = \frac{1}{T} \int_0^T |r(t)|^2 dt \quad (4)$$

La potenza ricevuta dal ricevitore ad una distanza  $d$ ; possiamo allora definire una variabile aleatoria log-normale per modellare l'effetto dello shadowing in (5).

$$10 \log_{10} p(d) \sim N(\bar{p}(d), \sigma_{sh}^2) \quad (5)$$

Dove  $\bar{p}(d)$  è la potenza media ricevuta e  $\sigma_{sh}^2$  è la varianza di una distribuzione gaussiana.

Per un modello a variabile aleatoria log-normale, il limite di Cramer-Rào vale

$$\sqrt{\text{var}(\hat{\tau})} \geq \frac{1}{2\pi\sqrt{2SNR}\beta} \quad (6)$$

Si indica con  $\hat{\tau}$  il TOA stimato, con SNR il rapporto segnale-rumore  $SNR = \alpha^2 E / N_0$  con  $\beta$  la banda effettiva del segnale e con  $E$  l'energia del segnale stesso.

Un' importante proprietà del TOA è che, a differenza del RSS, dipende molto dalla banda utilizzata, come si evince dalla figura (31). [3]



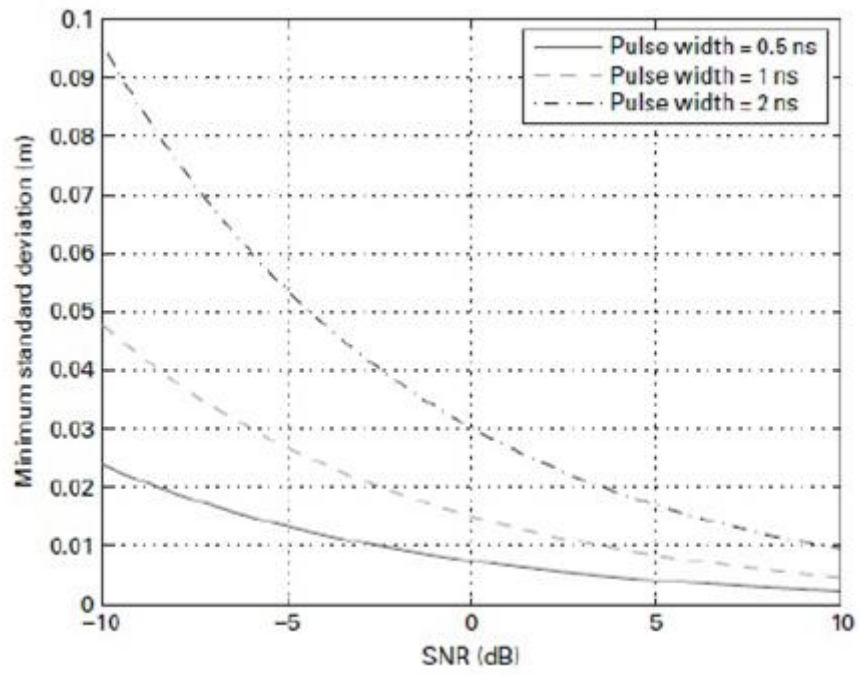


Figura 31) Minimum standard deviation di TOA per diversi valori di SNR

---

### 2.9.5 Misura delle grandezze nel TDOA

In questo tipo di approccio, il parametro estratto è la differenza tra il tempo di arrivo del segnale trasmesso dal tag a due nodi sorgente; questo parametro, moltiplicando il TDOA per la velocità della luce fornisce una posizione che potenzialmente giace sulla superficie di un'iperbole.

Il vantaggio del TDOA è che il tag e le anchors non è necessario che siano sincronizzate, mentre le anchors tra di loro si. Questo approccio si basa sul TOA misurato su due sorgenti che chiameremo  $\tau_1$  e  $\tau_2$ . Poiché le anchors sono tra loro sincronizzate, l'offset tra le due misure è nullo. L'unico offset è tra le anchor e il tag, poiché non vi è sincronizzazione. Ne consegue che  $TDOA = \tau_1 - \tau_2$ . Con questo approccio si ha lo stesso effetto sulla banda che si ha nel TOA. [3]

Un'altra metodologia di stima prevede il calcolo della cross-correlazione tra i due segnali ricevuti dalle anchor. Il massimo della funzione corrisponderà all'esatto offset. La funzione sarà pari a

$$\varphi_{1,2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T r_1(t)r_2(t-\tau)dt \quad (7)$$

Dove T è l'intervallo di osservazione e  $r_1(t)$  e  $r_2(t)$  sono i segnali ricevuti da due anchor. Quindi si ricava la stima del TDOA attraverso la (8).

$$\hat{\tau}_{TDOA} = \arg \max_{\tau} (\varphi_{1,2}(\tau)) \quad (8)$$

L'approccio a cross-correlazione si presta bene con rumore bianco e in LOS, mentre abbiamo un degrado delle prestazioni in caso di rumore colorato e in situazioni di multipath.

---

## CAPITOLO III - Modelli per la multilaterizzazione

In questo capitolo verranno approfondite le tecniche della multilaterizzazione, attuabili una volta che si ottengono i parametri di TOA e TDOA. Da quanto estratto da [2] e [4].

Facendo riferimento alla figura 32)

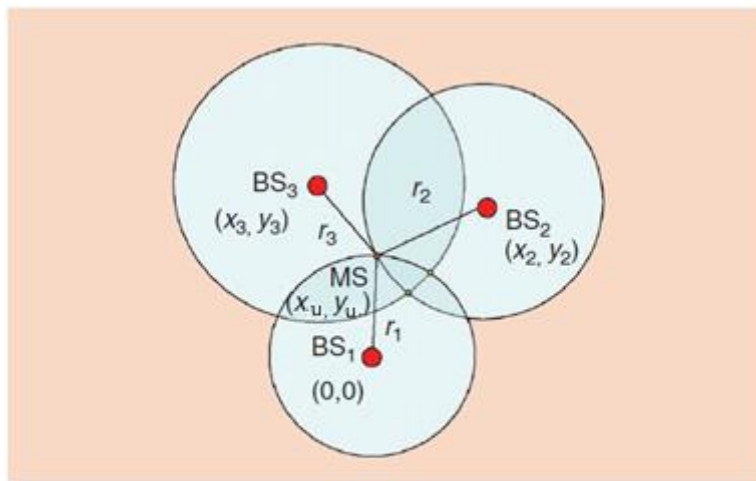


Figura 32) Schema di una trilaterazione con 3 antenne

Definiamo  $(x_u, y_u)$  come le coordinate cartesiane del tag, mentre  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  le coordinate delle rispettive antenne; per semplicità limitiamoci adesso alle coordinate  $x$  e  $y$  e assumiamo  $(x_1, y_1) = (0,0)$ .

Per semplicità stiamo considerando che il tag sia posto su un piano.

---

### 3.1 TOA

La distanza tra il tag e l'anchor *j-esima* vale

$$r_j = (t_j - t_0)c \quad (9)$$

Dove  $t_0$  è l'istante in cui il tag comincia a trasmettere mentre  $t_i$  è il TOA tra tag e anchor. La costante  $c$  è la velocità della luce nel vuoto, pari a  $3 \cdot 10^8 [m/s]$

Le distanze  $r_1 r_2 r_3$  possono essere usate per stimare  $(x_u, y_u)$  risolvendo il seguente sistema di equazioni

$$r_1^2 = x_u^2 + y_u^2 \quad (10)$$

$$r_2^2 = (x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 \quad (11)$$

$$r_3^2 = (x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 \quad (12)$$

Risolvendo le equazioni (10) e (11) rispetto  $(x_u, y_u)$  abbiamo due soluzioni: lo step successivo è scegliere quali delle due soluzioni è più vicina al cerchio dato dalla (12). Nonostante questo metodo cancelli l'ambiguità, non è possibile considerare più di tre anchors, pratica utile quando si vanno a considerare i disturbi che affliggono le misure.

Questo problema viene risolto utilizzando l'approssimazione a minimi quadrati, come segue:

sottraendo la (10) dalla (11) e la (10) dalla (12) si ottengono rispettivamente

$$r_2^2 - r_1^2 = x_2^2 - 2x_2x_u + y_2^2 - 2y_2y_u \quad (13)$$

$$r_3^2 - r_1^2 = x_3^2 - 2x_3x_u + y_3^2 - 2y_3y_u \quad (14)$$

Riordinando i termini, le equazioni di cui sopra possono esse scritte in forma matriciale

$$\begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2^2 - r_2^2 + r_1^2 \\ K_3^2 - r_3^2 + r_1^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

dove

$$K_j^2 = x_j^2 + y_j^2 \quad (17)$$

Quindi la (16) può essere riscritta come

$$\underline{\underline{H}} \underline{\underline{x}} = \underline{\underline{b}} \quad (18)$$

Dove

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{x}} = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{b}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2^2 - r_2^2 + r_1^2 \\ K_3^2 - r_3^2 + r_1^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Nel caso in cui siano disponibili più misure TOA si ha un'estensione della (19) in

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{b}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2^2 - r_2^2 + r_1^2 \\ K_3^2 - r_3^2 + r_1^2 \\ K_4^2 - r_4^2 + r_1^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (20)$$

In questo caso la soluzione ai minimi quadrati di (19) è data da

$$\underline{\underline{\hat{x}}} = (\underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{H}})^{-1} \underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{b}} \quad (20)$$

Il TOA richiede quindi una sincronizzazione tra anchors e il tag, il cui clock è soggetto a drift che va a penalizzare la misura. Per questo si considera un'alternativa che non richiede la sincronizzazione del tag, ovvero il TDOA.

### 3.2 TDOA

Il TDOA associato ad un' anchor *i-esima* vale  $t_i - t_1$ , ovvero la differenza dei TOA del segnale del TAG fra l'anchor 1 e l' anchor *i-esima*.

$$r_{j1} = r_j - r_1 = (t_j - t_0)c - (t_1 - t_0)c = (t_j - t_1)c \quad (21)$$

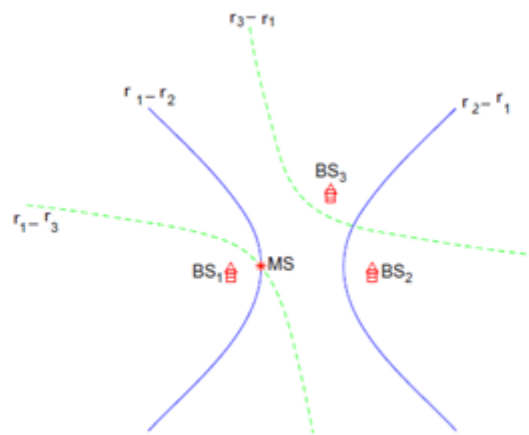


Figura 33) Iperboli disegnate dal TDOA

Si noti infatti che la dipendenza da  $t_0$  viene a mancare, quindi non abbiamo errori introdotti dal tag.

L'equazione (11) può essere quindi riscritta in termini di TDOA come segue:

$$(r_{21} + r_1)^2 = K_2^2 - 2x_2x_u - 2y_2y_u + r_1^2 \quad (22)$$

Che può essere riscritta come

$$-x_2x_u - y_u y_2 = r_{21}r_1 + \frac{1}{2}(r_{21}^2 - K_2^2) \quad (23)$$

Anche l'equazione (12) può essere così riscritta

---


$$-x_3x_u - y_u y_3 = r_{31}r_1 + \frac{1}{2}(r_{31}^2 - K_3^2) \quad (24)$$

Scrivendo queste equazioni in forma matriciale risulta

$$\underline{\underline{H}}\underline{x} = r_1\underline{c} + \underline{d} \quad (25)$$

Dove

$$\underline{c} = \begin{bmatrix} -r_{21} \\ -r_{31} \end{bmatrix}, \quad \underline{d} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2^2 - r_{21}^2 \\ K_3^2 - r_{31}^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

L'equazione (25) può essere utilizzata per risolvere rispetto a  $\underline{x}$

$$\underline{x} = r_1 \underline{\underline{H}}^{-1} \underline{c} + \underline{\underline{H}}^{-1} \underline{d} \quad (27)$$

Sostituendo questo risultato intermedio in (10) si ottengono delle equazioni quadratiche in  $r_1$ . Risolvendo rispetto  $r_1$  e sostituendo le radici positive nella (27) si ottengono le soluzioni finali per  $\underline{x}$ .

Se sono coinvolte più anchors la (26) diventa

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad \underline{c} = \begin{bmatrix} -r_{21} \\ -r_{31} \\ -r_{41} \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \underline{d} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2^2 - r_{21}^2 \\ K_3^2 - r_{31}^2 \\ K_4^2 - r_{41}^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (28)$$

Che fornisce la seguente soluzione intermedia a minimi quadrati

---

$$\hat{\underline{x}} = (\underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{H}})^{-1} \underline{\underline{H}}^T (r_1 \underline{c} + \underline{d}) \quad (29)$$

Ricombinando quest'ultima ancora con la (2) si ottiene la stima per  $x$ .



### 3.3 Metriche

Prendiamo in considerazione il caso del TOA. Si parla di *Dilution of precision* per indicare che gli errori di stima della posizione dipendono dalla geometria relativa del tag/anchors, come illustrato in Figura 34).

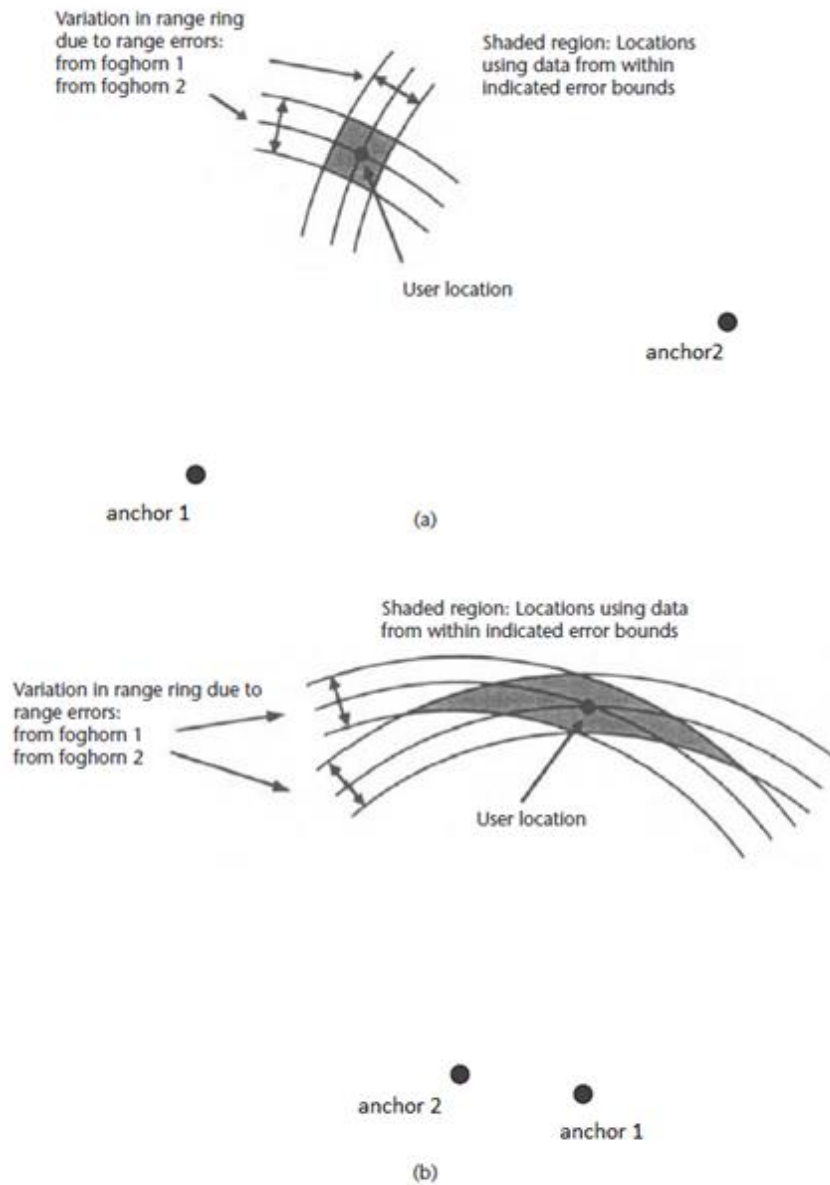


Figura 34) Geometrie e relative Dilution of precision a) Geometria a bassa DOP b) Geometria ad alta DOP

Le regioni di spazio evidenziate indicano l'insieme di punti che possono essere ottenuti da una misura di ranging con determinati bound di errore. Una geometria con alta DOP porta ad errori più ampi.

---

### 3.4 Costruzione dell'algoritmo

Definiamo il vettore come descritto in [1]

$$\underline{\Delta x} = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -c\Delta t_u \end{bmatrix} \quad (30)$$

esso ha quattro componenti, le prime tre sono l'offset tra la posizione del tag e il punto di linearizzazione, mentre la quarta è l'offset temporale del tag moltiplicato per  $c$ . Tale valore è nullo in caso di TDOA, in quanto si perde la dipendenza dalla sincronizzazione come dimostrato in (21). Invece il vettore

$$\underline{\Delta \rho} = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \rho_N \end{bmatrix} \quad (31)$$

è il vettore delle differenze tra pseudorange e pseudorange stimato per ogni ancora. Sono così definiti

$$\Delta \rho_j = \hat{\rho}_j - \rho_j \quad (32)$$

Prima di definire la matrice  $\underline{H}$ , è necessario introdurre lo pseudorange e lo pseudorange stimato come rispettivamente

$$\rho_j = \sqrt{(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2 + (z_j - z_u)^2} + ct_u = f(x_u, y_u, z_u, t_u) \quad (33)$$

$$\hat{\rho}_j = \sqrt{(x_j - \hat{x}_u)^2 + (y_j - \hat{y}_u)^2 + (z_j - \hat{z}_u)^2} + c\hat{t}_u = f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u) \quad (34)$$

Dove  $(x_u, y_u, z_u)$  e  $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$  sono posizione vera e stimata del tag mentre  $t_u$  e  $\hat{t}_u$  sono time bias e time bias stimato. Mentre la variabile  $j$  definisce il numero di anchor:

Si impone

$$\begin{aligned} x_u &= \hat{x}_u + \Delta x_u \\ y_u &= \hat{y}_u + \Delta y_u \\ z_u &= \hat{z}_u + \Delta z_u \\ t_u &= \hat{t}_u + \Delta t_u \end{aligned} \quad (34)$$

In modo da poter scrivere

$$f(x_u, y_u, z_u, t_u) = f(\hat{x}_u + \Delta x_u, \hat{y}_u + \Delta y_u, \hat{z}_u + \Delta z_u, \hat{t}_u + \Delta t_u) \quad (35)$$

sviluppando in serie di Taylor la (35), si ottiene

$$\begin{aligned} f(\hat{x}_u + \Delta x_u, \hat{y}_u + \Delta y_u, \hat{z}_u + \Delta z_u, \hat{t}_u + \Delta t_u) &= f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u) + \\ &+ \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{x}_u} \Delta x_u + \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{y}_u} \Delta y_u \\ &+ \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{z}_u} \Delta z_u + \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{t}_u} \Delta t_u + \dots \end{aligned} \quad (36)$$

Ove sono stati omissi i termini di ordine superiore al primo. Le derivate parziali valgono rispettivamente

---


$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{x}_u} &= -\frac{x_j - \hat{x}_u}{\hat{r}_j} \\
\frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{y}_u} &= -\frac{y_j - \hat{y}_u}{\hat{r}_j} \\
\frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{z}_u} &= -\frac{z_j - \hat{z}_u}{\hat{r}_j} \\
\frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u)}{\partial \hat{t}_u} &= c
\end{aligned} \tag{37}$$

Dove

$$\hat{r}_j = \sqrt{(x_j - \hat{x}_u)^2 + (y_j - \hat{y}_u)^2 + (z_j - \hat{z}_u)^2} \tag{38}$$

Effettuando le dovute sostituzioni risulta

$$\hat{\rho}_j - \rho_j = \frac{(x_j - \hat{x}_u)}{\hat{r}_j} \Delta x_u + \frac{(y_j - \hat{y}_u)}{\hat{r}_j} \Delta y_u + \frac{(z_j - \hat{z}_u)}{\hat{r}_j} \Delta z_u - c t_u \tag{39}$$

Per semplicità imponiamo adesso

$$\begin{aligned}
a_{xj} &= \frac{(x_j - \hat{x}_u)}{\hat{r}_j} \Delta x_u \\
a_{yj} &= \frac{(y_j - \hat{y}_u)}{\hat{r}_j} \Delta y_u \\
a_{zj} &= \frac{(z_j - \hat{z}_u)}{\hat{r}_j} \Delta z_u
\end{aligned} \tag{40}$$

---

Adesso possiamo definire la matrice H, nel seguente modo

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ a_{xN} & a_{yN} & a_{zN} & 1 \end{bmatrix}; \quad (41)$$

Dove N è il numero delle anchor;

Se  $N > 4$  e il punto di linearizzazione è accettabilmente vicino si applica il metodo dei minimi quadrati, che è ottenuto moltiplicando ambo i membri l'equazione (30) per  $\underline{\underline{H}}^T$

Ottenendo

$$\underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{H}} \Delta \underline{x} = \underline{\underline{H}}^T \Delta \underline{\rho} \quad (42)$$

Se la matrice H è invertibile si può scrivere

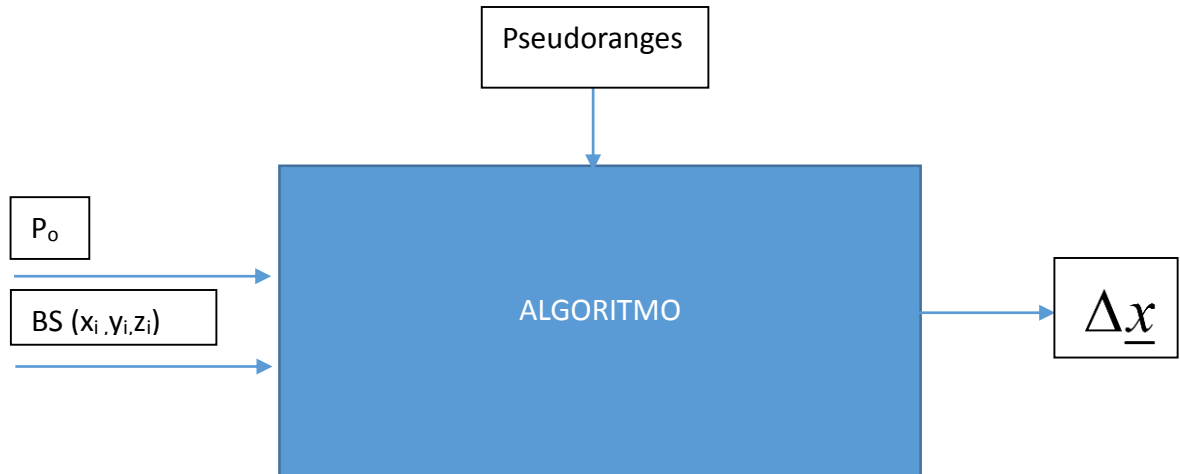
$$\Delta \underline{x} = \underline{\underline{H}}^{-1} \Delta \underline{\rho} \quad (43)$$

Quindi

$$\Delta \underline{x} = (\underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{H}})^{-1} \underline{\underline{H}}^T \Delta \underline{\rho} \quad (44)$$

---

### 3.4 Algoritmo implementato



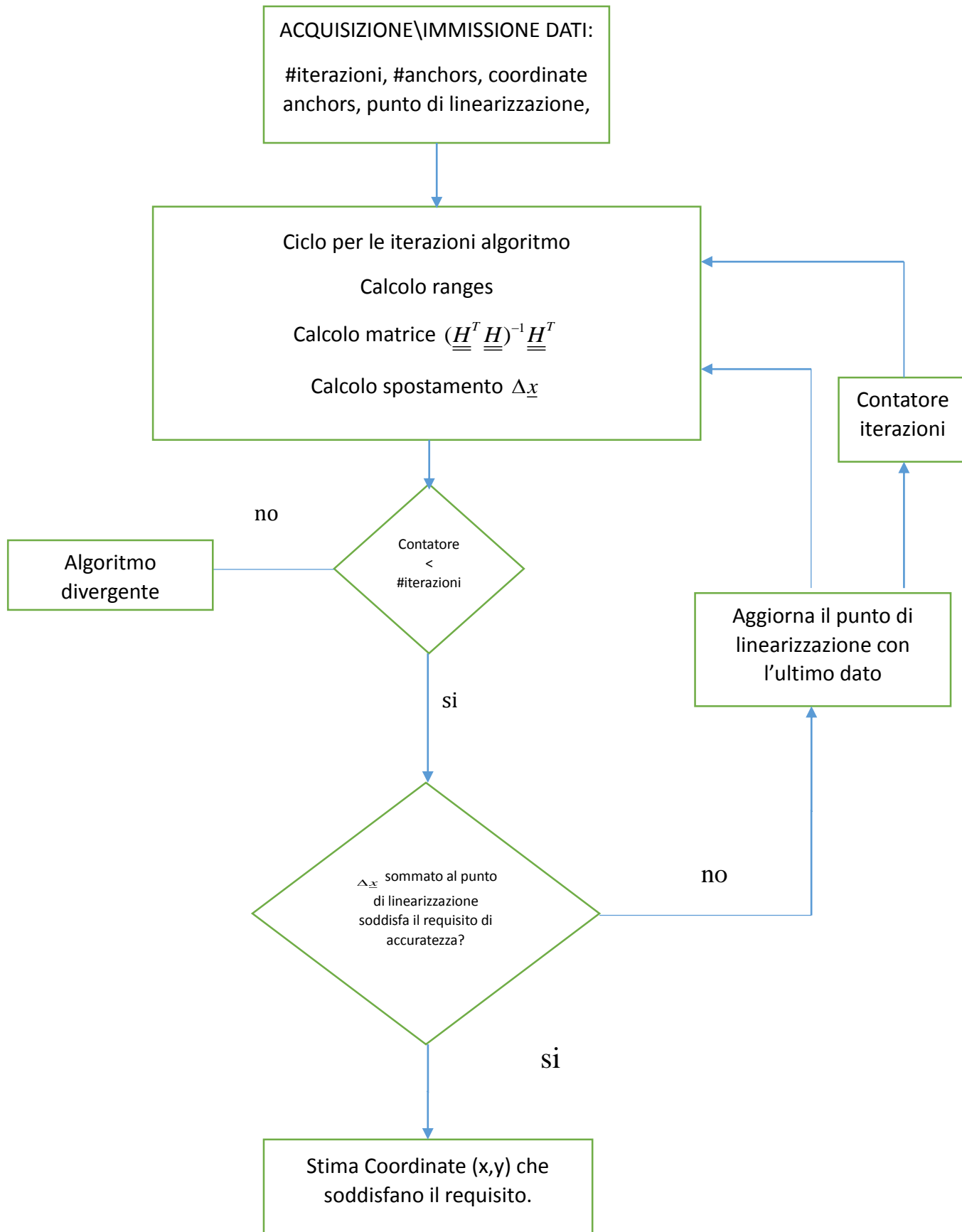
$P_0$  è il punto di linearizzazione, ovvero il punto iniziale dal quale comincia a iterare l'algoritmo.

$BS (x_i, y_i, z_i)$  sono le coordinate delle ancore, con  $i=1.....N$ ,  $N=$  numero delle ancore.

Pseudoranges sono le  $N$  distanze calcolate in base al TDOA. \_\_\_\_

$\underline{\Delta x}$  è il vettore posizione del tag, ovvero l'output dell'algoritmo.

### 3.5 Schema a blocchi algoritmo



## CAPITOLO IV - Misure

### 4.1 DWM1000

Per il tracking e la triangolazione è stato utilizzato il TRECK1000, un evaluation kit fornito dalla Decawave comprendente quattro moduli DWM1000.

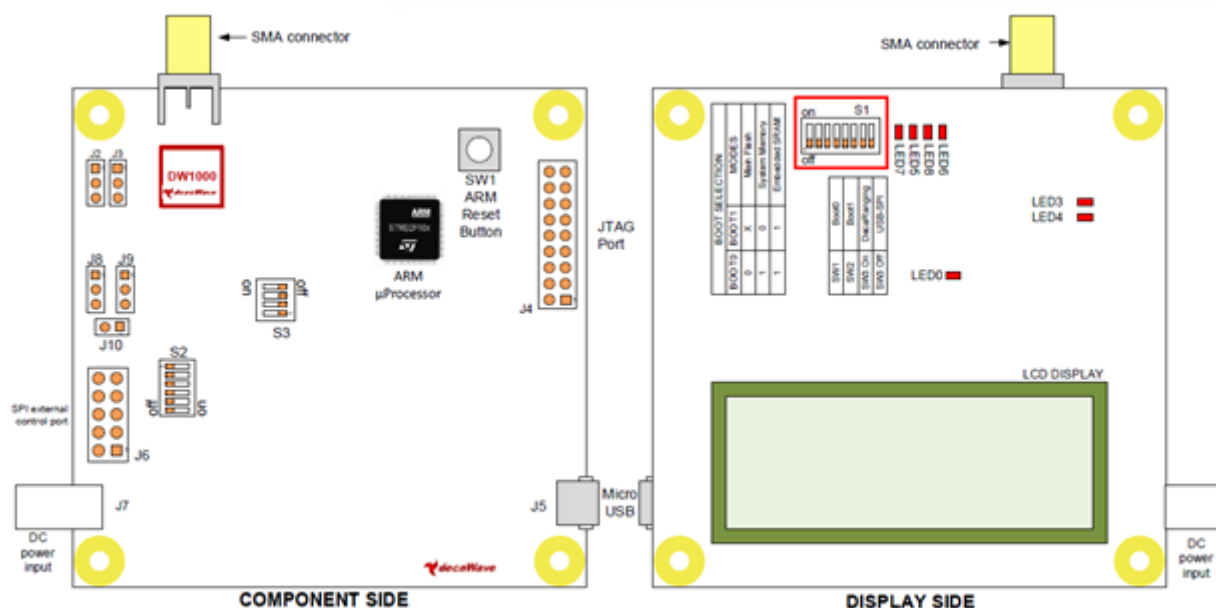


Figura 35) Fronte - retro di un modulo del Treck1000

Di seguito le caratteristiche tecniche:

Evaluation-kit composto da Quattro Decawave DW1000 IC, compatibili con il protocollo IEEE 802.15.4-2011, processore ARM, interfaccia USB, display LCD e antenna esterna.

- Permette sviluppo e di applicazioni che usano il TOF/two way ranging del DW1000IC
- 6 bande di frequenza centrate da 3.5 a 6.5 GHz
- Tx power -14 dBm/-10 dBm
- Tx power density -41.3 dBm/MHz
- interfaccia SPI
- input power 5 V (da USB) o 3.3 V via 2-pin header
  - STM32F105 ARM Cortex M3 processor
  - On-chip USB interface / SPI interface to DW1000



- 70 mm x 70 mm PCB

In Figura 35 e Figura 36) è inoltre evidenziato in rosso uno switch che permette di scegliere le modalità di trasmissione e ricezione, che sono riassunte in Figura 36)

S1-5	S1-6	S1-7	Mode	Channel	Data Rate	PRF	Preamble
OFF	OFF	OFF	1	2	110 kbps	16	1024
ON	OFF	OFF	2	2	6.8 Mbps	16	128
OFF	ON	OFF	3	2	110 kbps	64	1024
ON	ON	OFF	4	2	6.8 Mbps	64	128
OFF	OFF	ON	5	5	110 kbps	16	1024
ON	OFF	ON	6	5	6.8 Mbps	16	128
OFF	ON	ON	7	5	110 kbps	64	1024
ON	ON	ON	8	5	6.8 Mbps	64	128

Figura 36) Tabella riassuntiva modalità di funzionamento

Nei test sono state utilizzate quattro modalità di funzionamento; indicheremo con la nomenclatura L2 L5 S2 S5 le seguenti modalità:

	Frequenza	Datarate
L2	3.99 GHz	110 Kbps
L5	6 GHz	110 Kbps
S2	3.99 GHz	6,8 Mbps
S5	6 GHz	6,8 Mbps

Figura 37) Tabella modalità utilizzate nei test

In Figura 38) e Figura 39) e Figura 37) vengono illustrati gli andamenti in frequenza dei segnali trasmessi a 3.99 GHz e 6 GHz

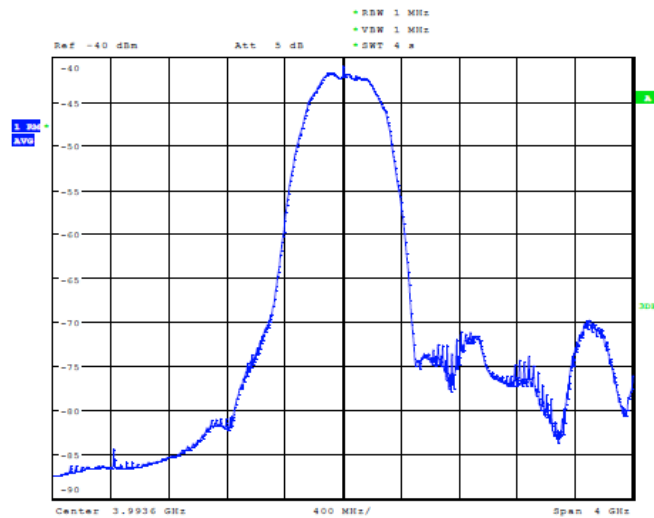


Figura 38) Spettro Canale 2, frequenza centrale 3993 Mhz, banda 500 Mhz [7]

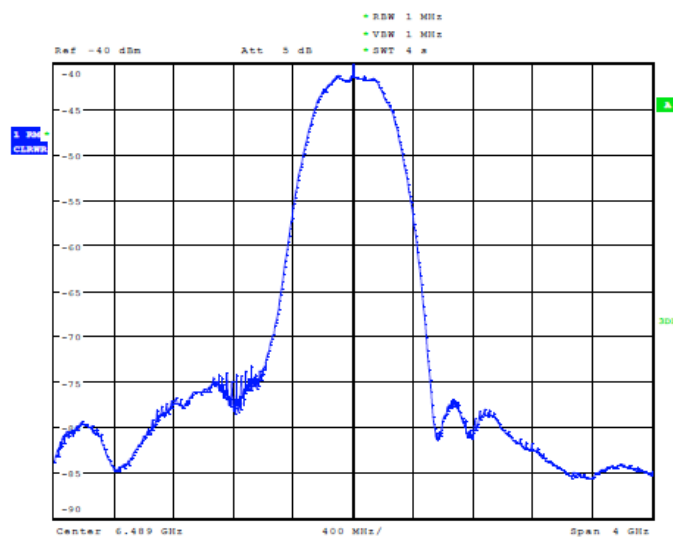


Figura 39) Spettro canale 5, frequenza centrale 6 Ghz, banda 500 Mhz [7]

## 4.2 Allestimento setup e sistema di riferimento

Il dover testare un dispositivo di un'accuratezza dichiarata di 10 cm, impone degli importanti vincoli sulla bontà del sistema di riferimento, sia per il tracking ma soprattutto per la triangolazione.

Sono stati usati quindi un metro laser a precisione millimetrica e delle guide metalliche sistemate in modo ortogonale poggiate al suolo.



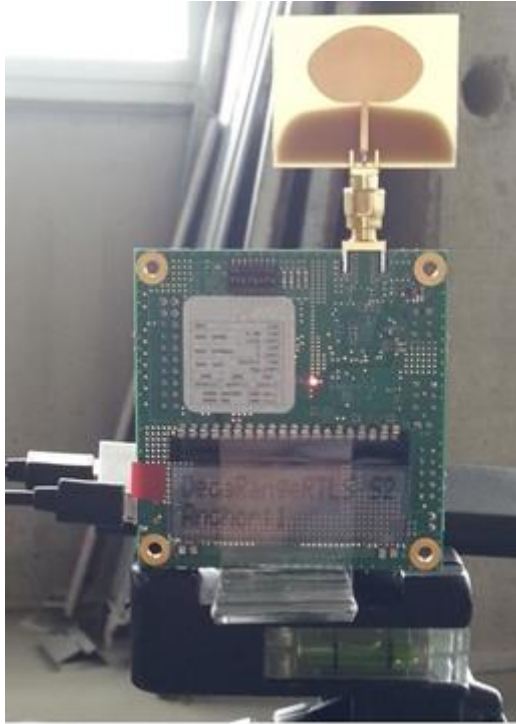
Figura 40) Metro laser



Figura 41) Uno dei trepiedi utilizzati



Figura 42 )Guida metallica



*Figura 43)DWM1000 con antenna*



*Figura 44)Ostacolo utilizzato*



Figura 45) Dettagli anchor e tag



Figura 46) Ulteriori dettagli

### 4.3 Modalità di trasmissione e Misure di ranging

I test sono stati svolti al chiuso in condizioni LOS e NLOS in un ambiente di dimensioni circa pari a 40x3.5x5.5 m. Lo spazio era sufficientemente sgombro da ostacoli e pareti e soffitto erano costituite da cemento armato.

In Figura 47) viene riportato lo scenario principale in cui si sono svolti i test.

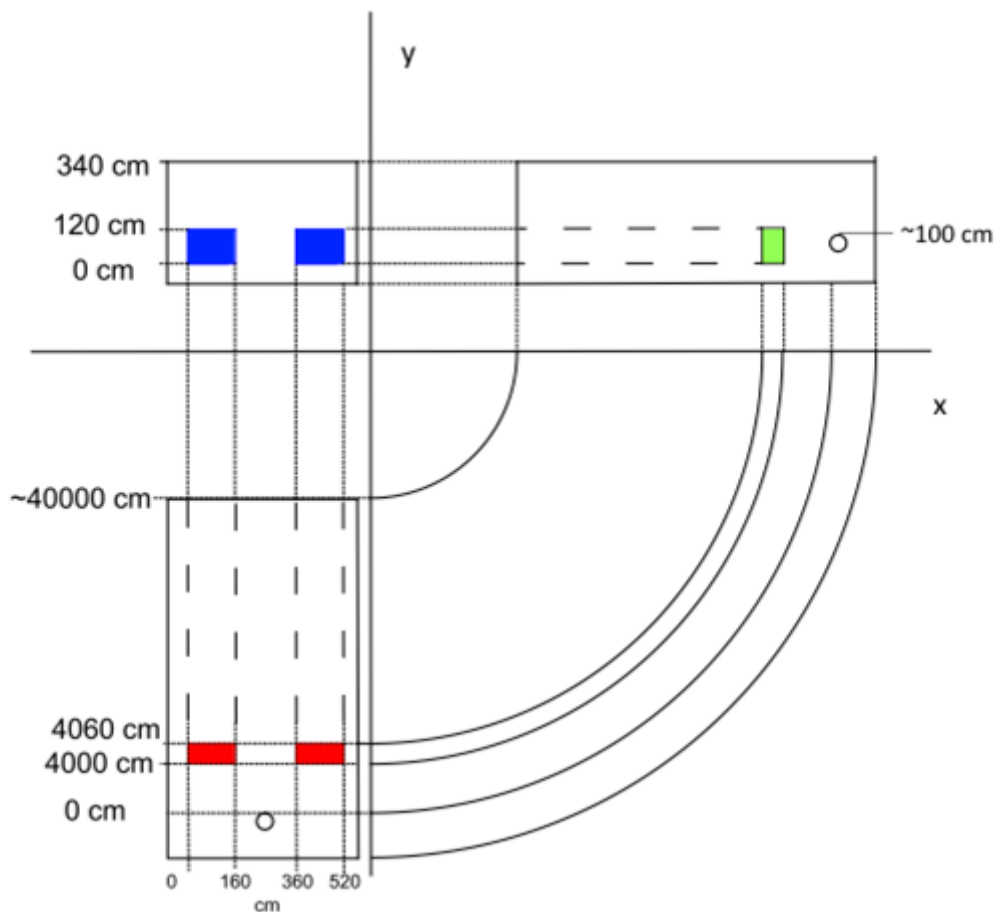


Figura 47) Piantina con ostacoli

Gli ostacoli sono costituiti da materiali non trasparenti alle onde elettromagnetiche, alle frequenze utilizzate.

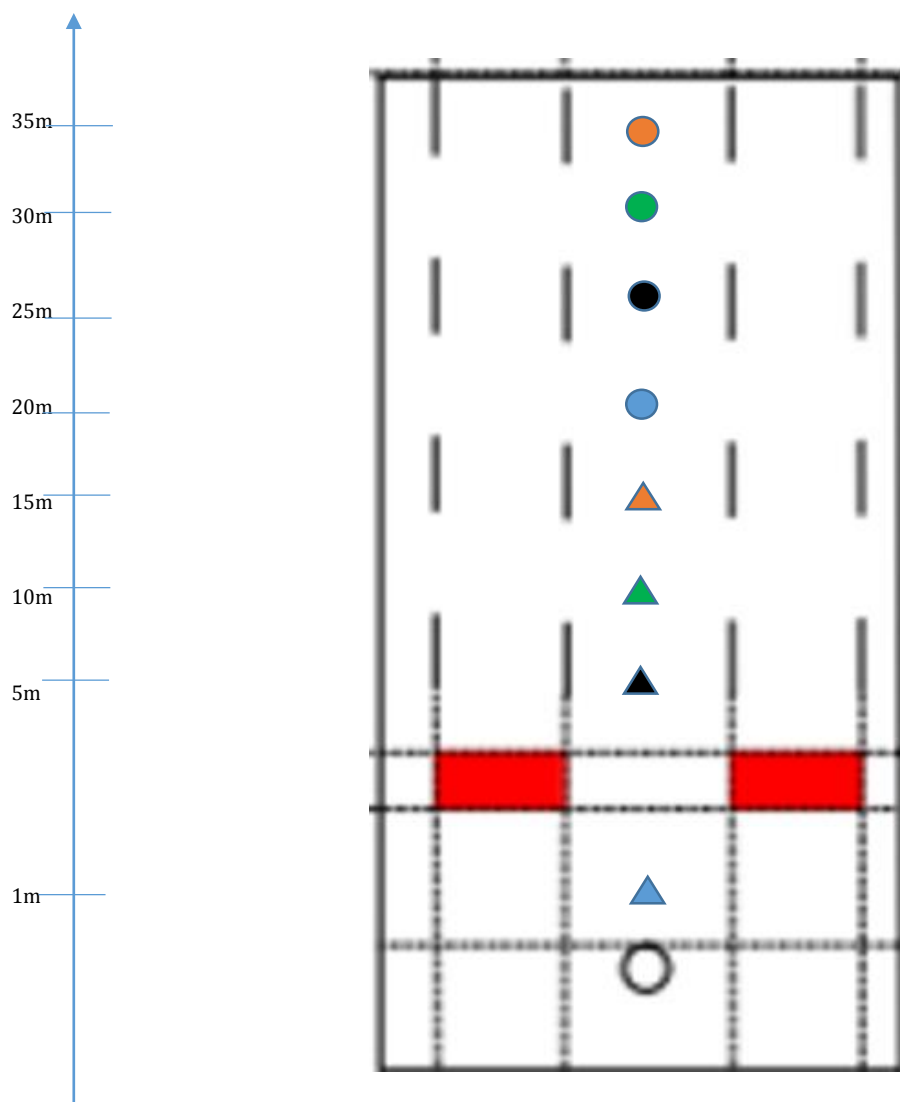


Figura 48) Misure effettuate

Di seguito le misure effettuate espresse in mm:

Misura 1	Misura 2	Misura 3	Misura 4	Misura 5	Misura 6	Misura 7	Misura 8
996	5099	9922	14902	20225	24938	29706	35655

N.B.

La misura 1 è stata effettuata senza ostacoli (evidenziati in rosso).

La misura 8 è stata effettuata in NLOS, ponendo un ostacolo nella Line of sight.

## 4.4 Statistiche

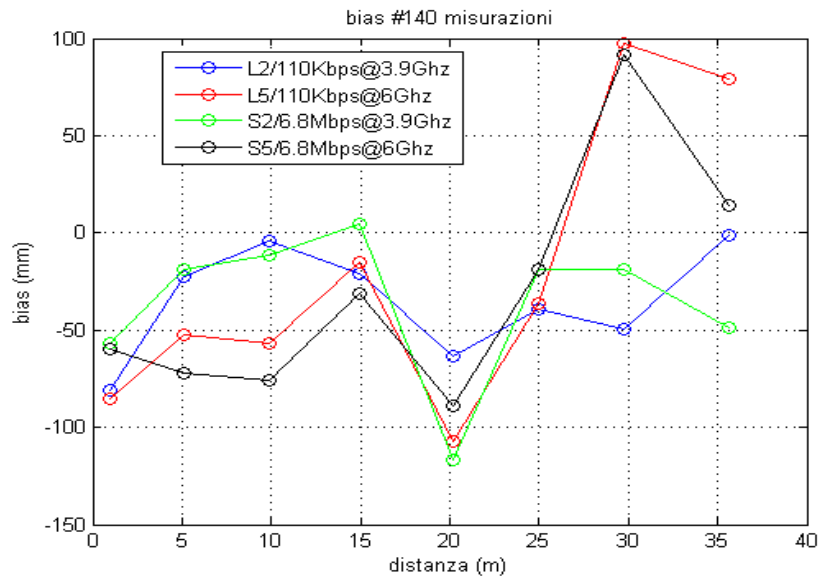


Figura 49) Bias tra valor medio e misura

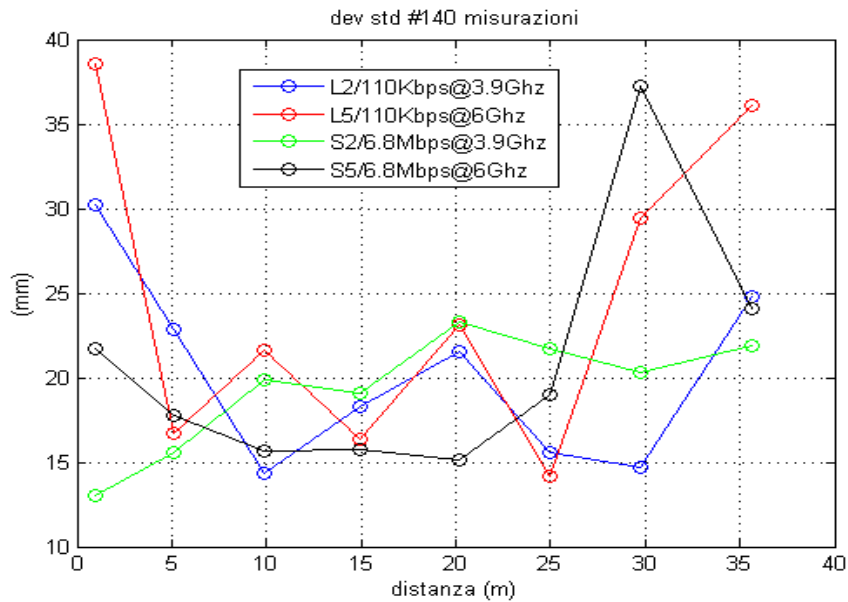


Figura 50) Dev standard misure di ranging



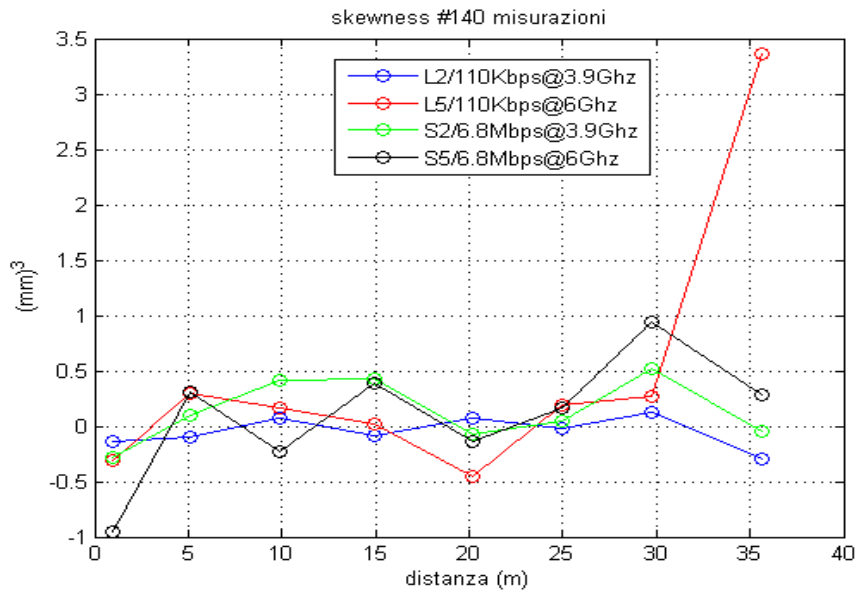


Figura 51) Skewness

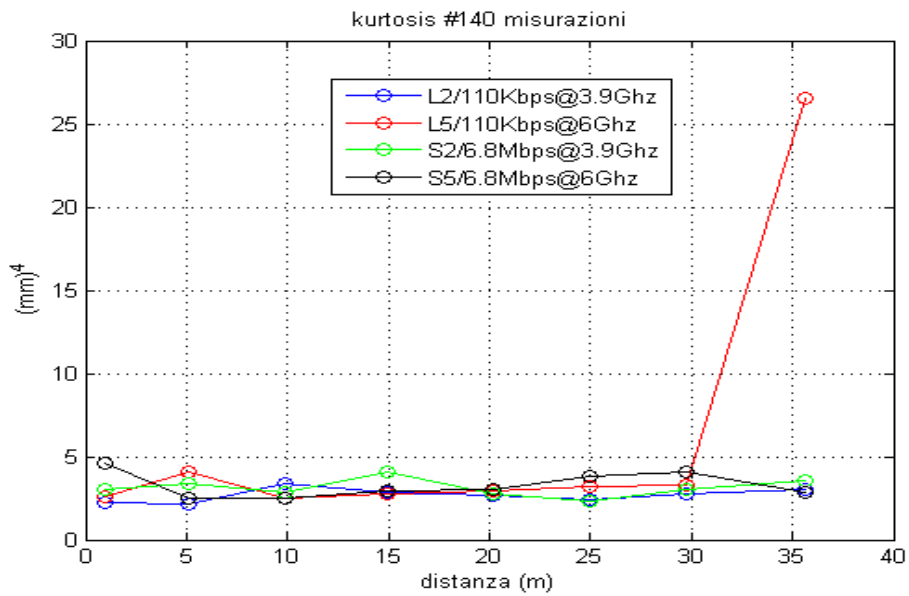


Figura 52) kurtosis

## 4.5 Istogrammi misure ranging

A0 T0 (Anchor to Tag)

1 m

LOS

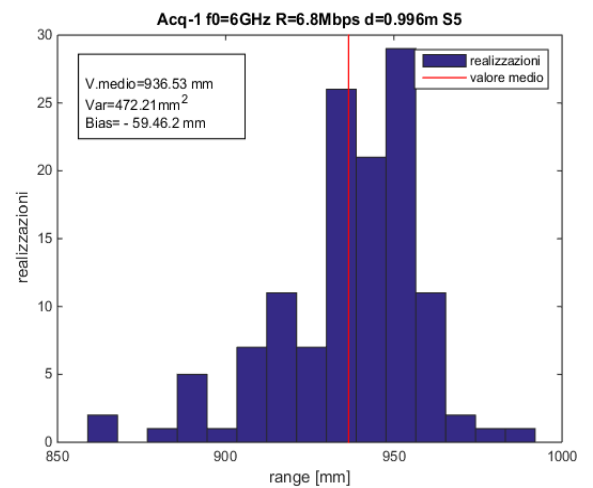
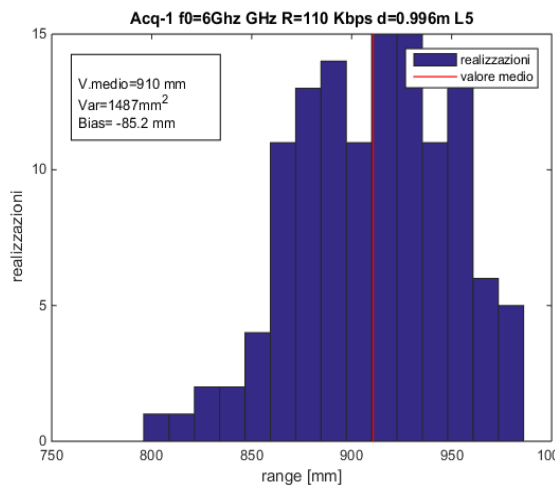
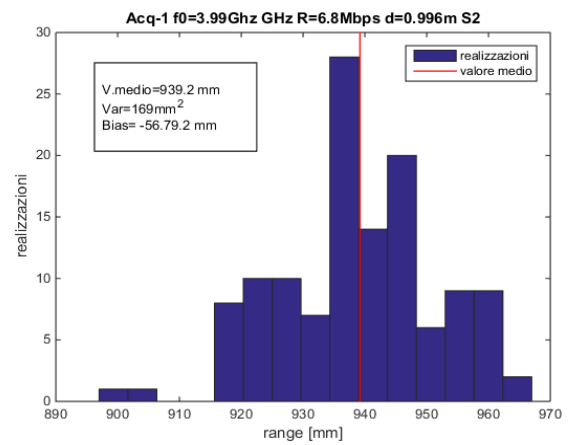
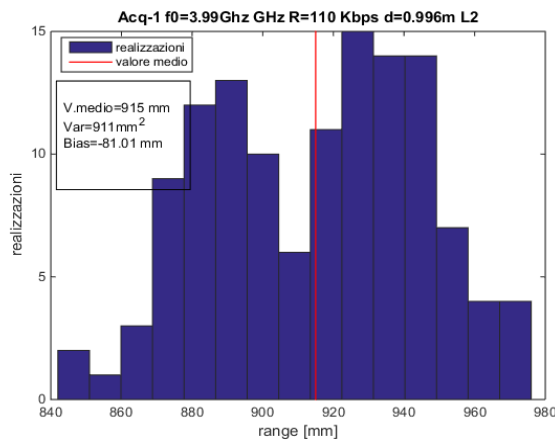


Figura 53) Istogrammi L2 L5 misura 1m

Figura 54) IstogrammiSL2 S5 misura 1m

A0 T0 (Anchor to Tag)

LOS

5 m

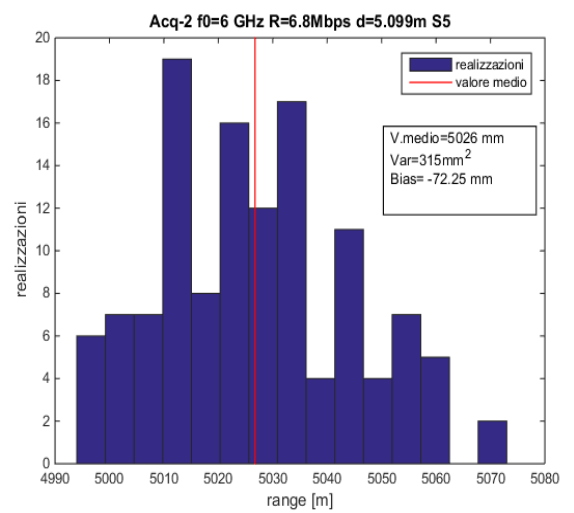
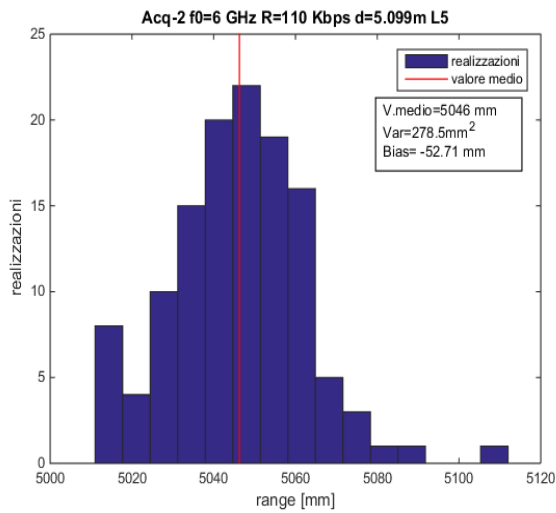
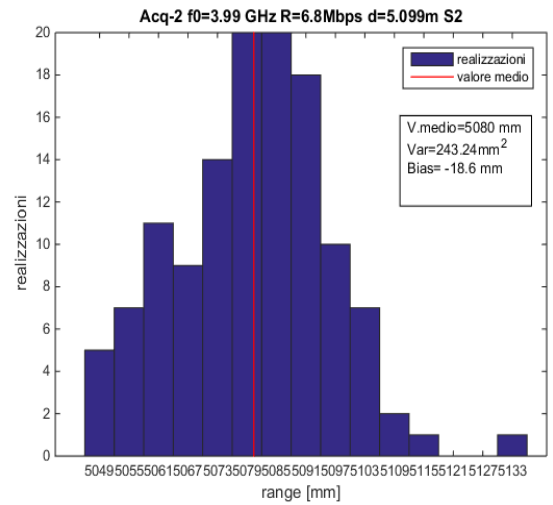
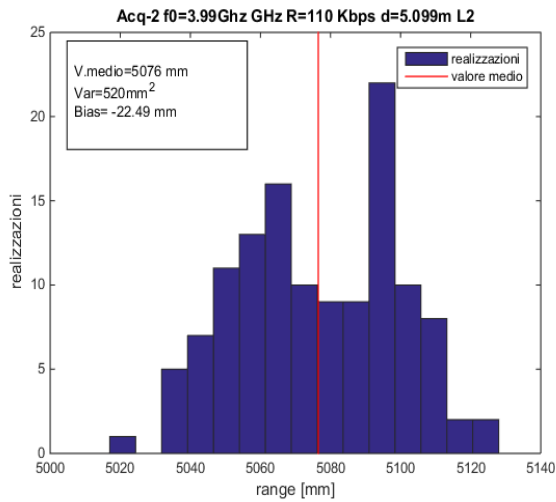
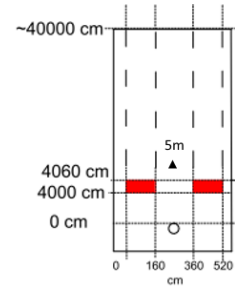


Figura 55) Istogrammi L2 L5 misura 5m

Figura 56) Istogrammi S2 S5 misura 5m

A0 T0 (Anchor to Tag)

LOS

10 m

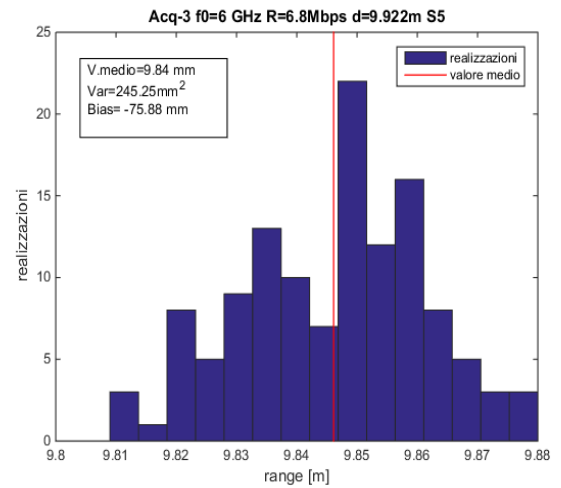
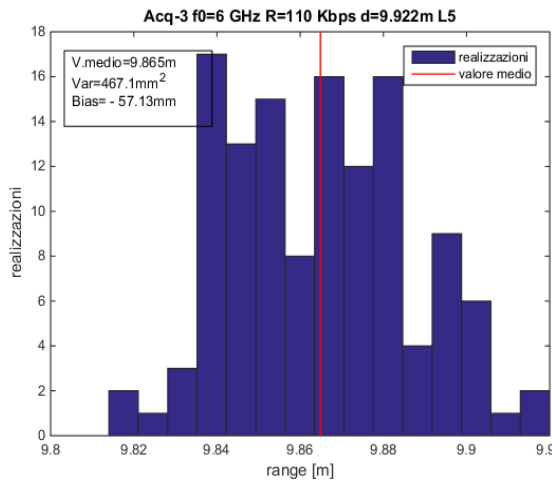
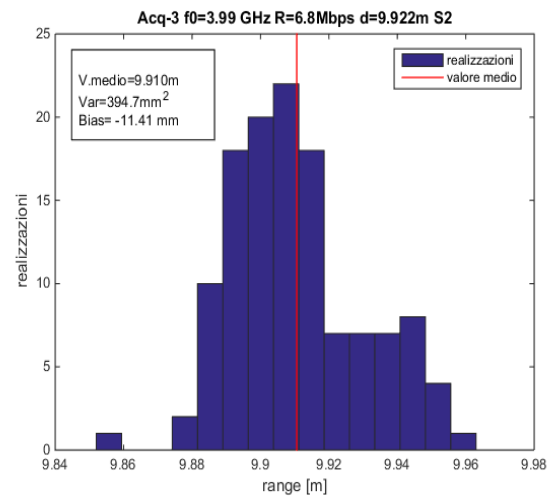
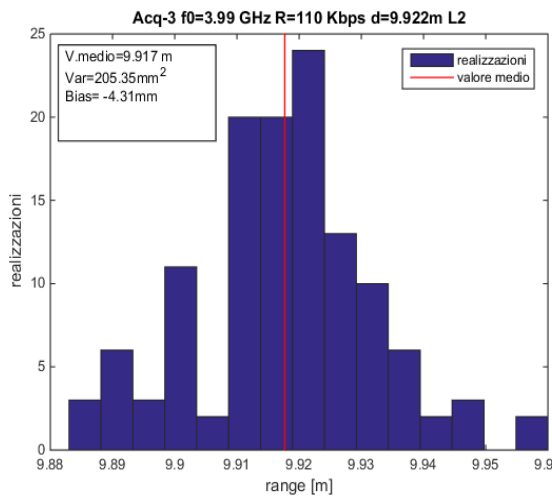
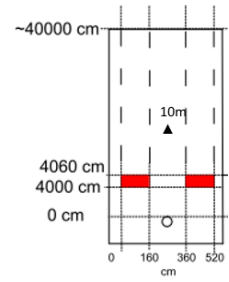


Figura 57) Istogrammi L2 L5 misura 10m

Figura 58) Istogrammi S2 S5 misura 10m

A0 T0 (Anchor to Tag)

LOS

15 m

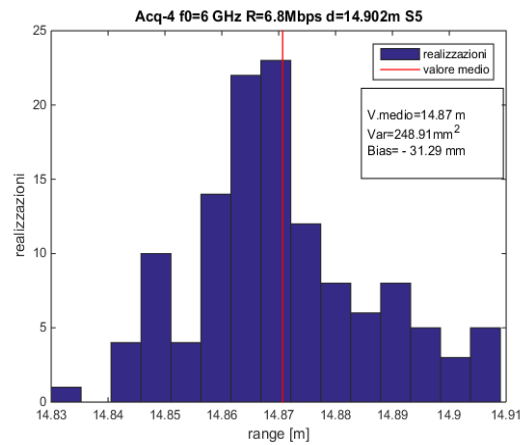
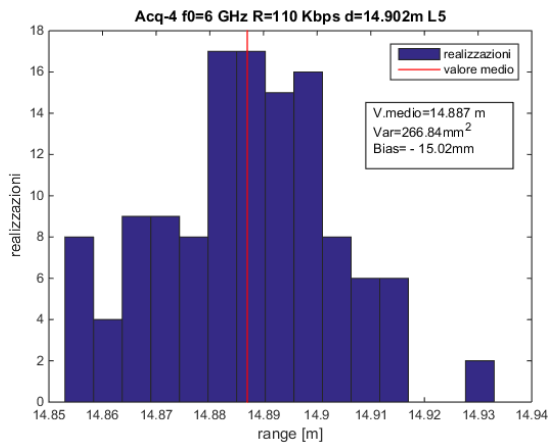
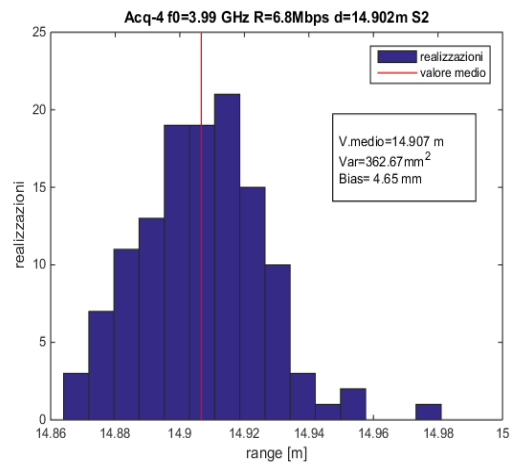
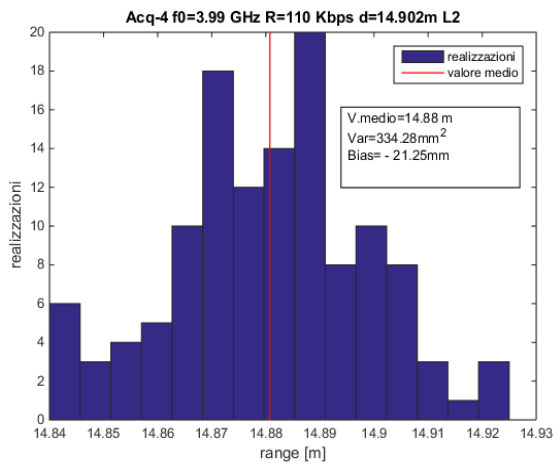
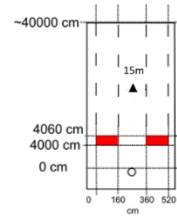


Figura 59)Istogrammi L2 L5 misura 15m

Figura 60) Istogrammi S2 S5 misura 15m

A0 T0 (Anchor to Tag)

LOS

20 m

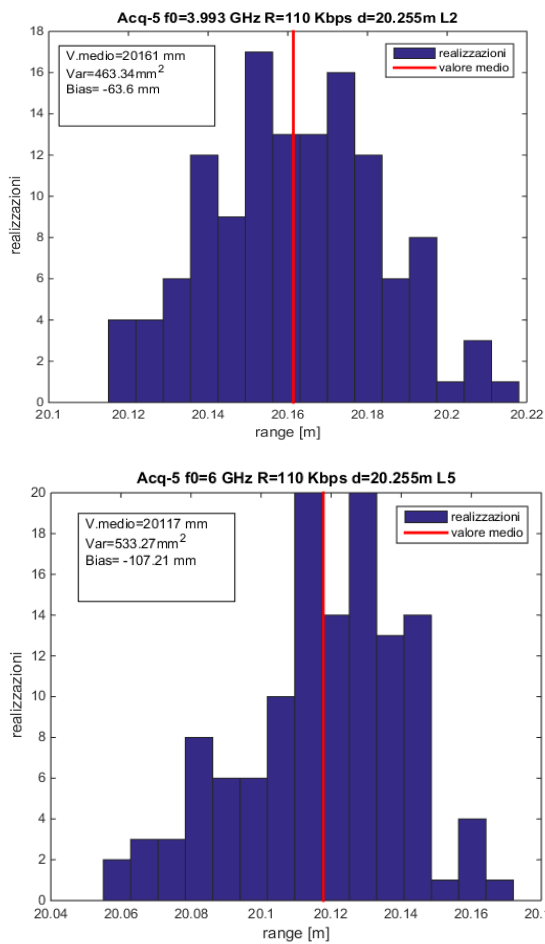
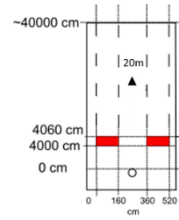


Figura 61) Istogrammi L2 L5 misura 20m

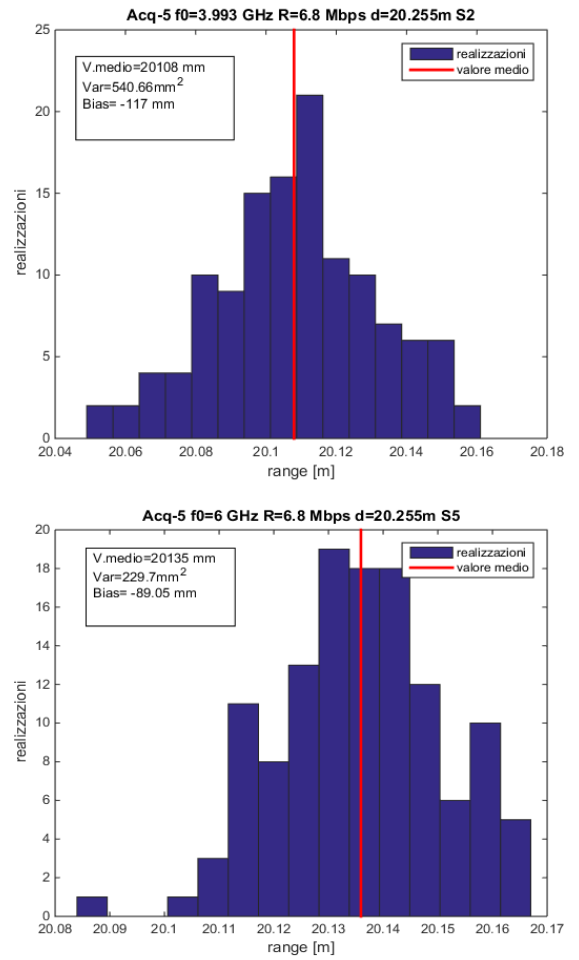


Figura 62) Istogrammi S2 S5 misura 20m

A0 T0 (Anchor to Tag)

LOS

25 m

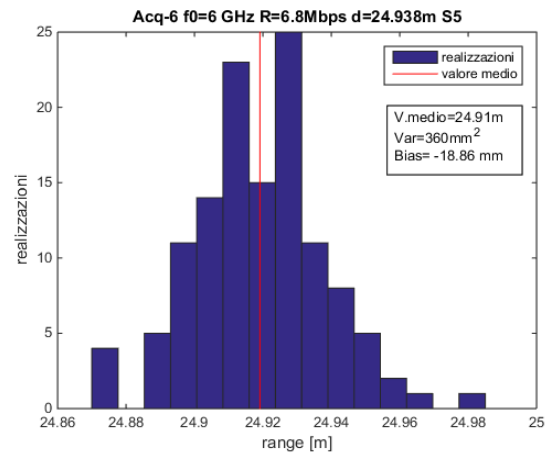
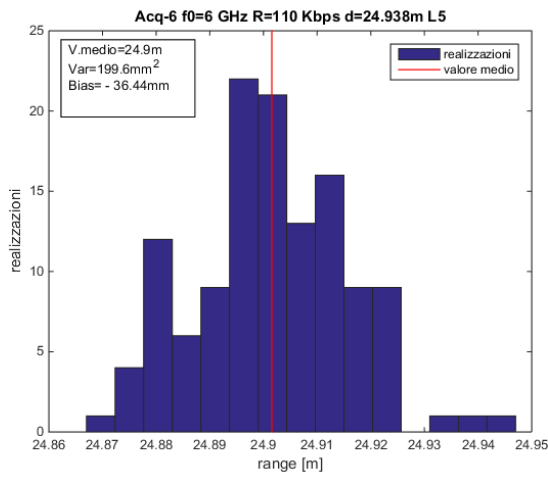
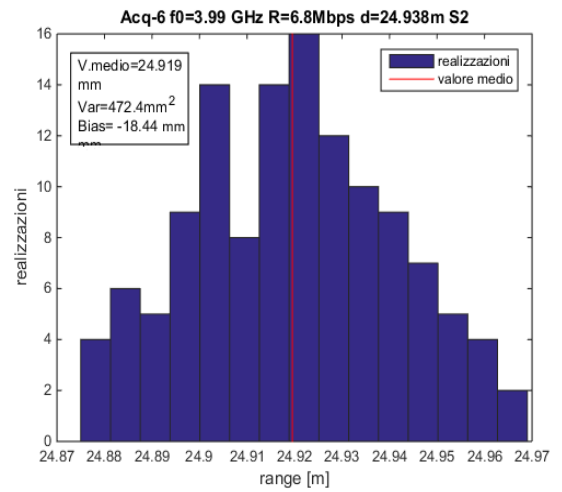
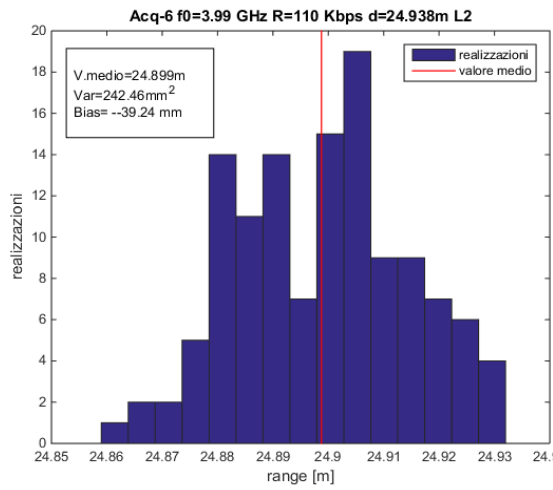
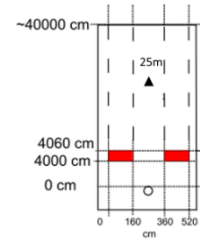


Figura 63) Istogrammi L2 L5 misura 25m

Figura 64) Istogrammi S2 S5 misura 25m

A0 T0 (Anchor to Tag)

LOS

30 m

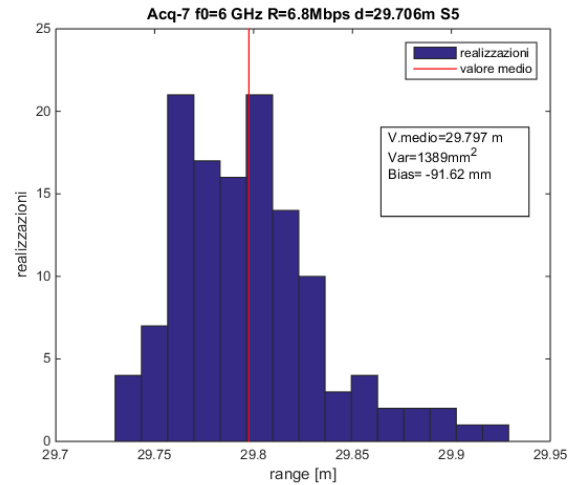
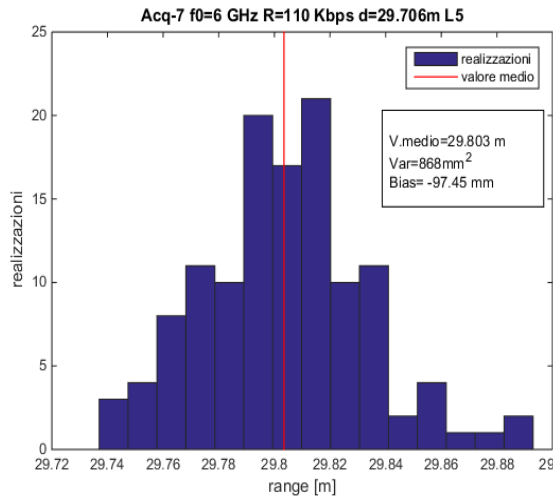
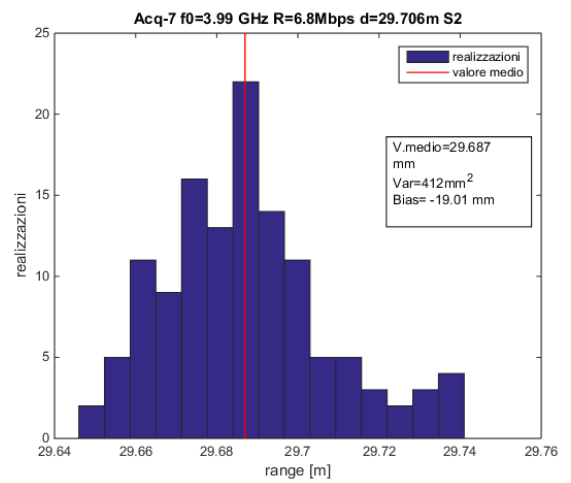
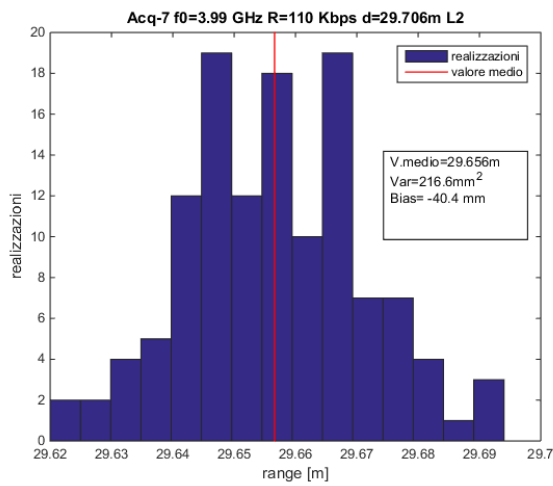
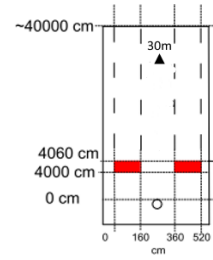


Figura 65) Istogrammi L2 L5 misura 30m

Figura 66) Istogrammi S2 S5 misura 30m



A0 T0 (Anchor to Tag)

NLOS

35 m

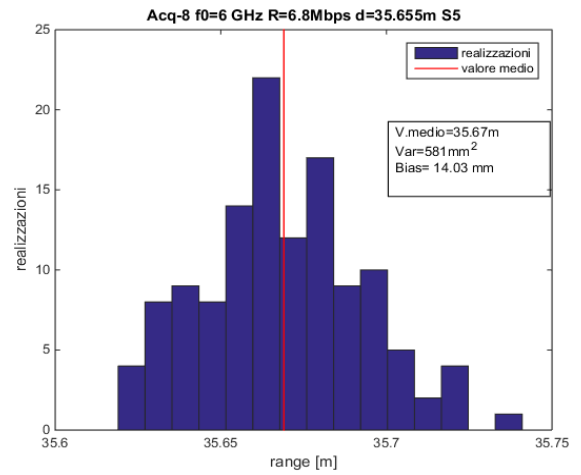
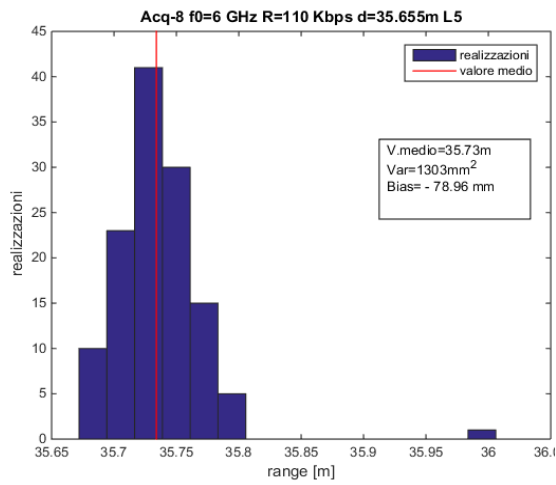
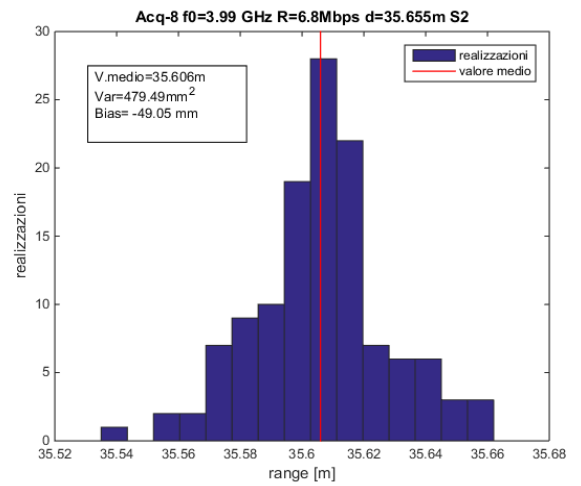
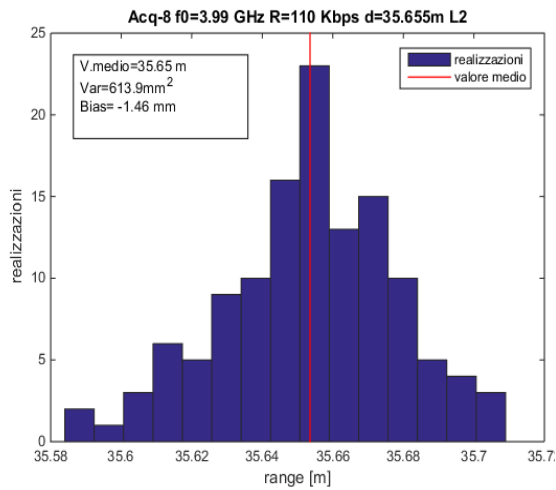
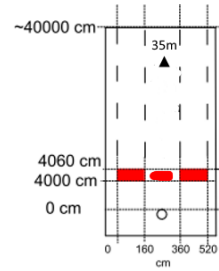


Figura 67) Istogrammi L2 L5 misura 35m con ostacolo

Figura 68) Istogrammi S2 S5 misura 35m con ostacolo

## 4.6 Triangolazione e Setup

Dopo le misure di ranging si è realizzato un setup per la triangolazione, con l'obiettivo di implementare un algoritmo che calcoli la posizione del tag a partire dalle misure di ranging. Il tag è stato collocato in quattro punti diversi nel sistema di riferimento e sono state inoltre misurate le coordinate delle ancore, come riportato in Figura 69).

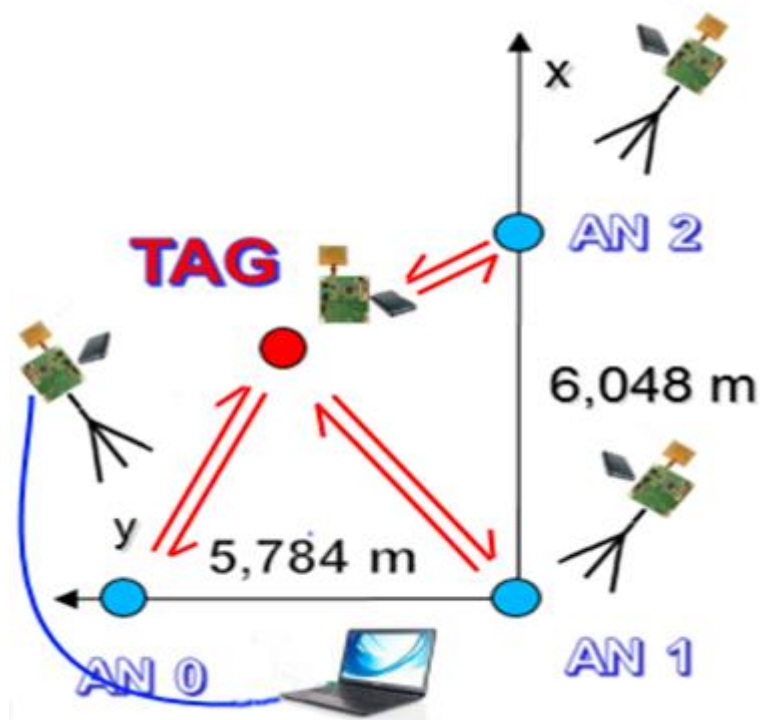


Figura 69)

In Figura 70) viene mostrato il setup di misura, con i binari metallici installati ortogonalmente tra loro. Sotto il treppiedi si può notare un carrellino su cui è stato installato il tag, e fatto scorrere lungo l'asse x (Figura 71) per effettuare diverse acquisizioni.



Figura 70)



Figura 71)

Vengono adesso riportate le tabelle con le esatte posizioni del tag e la stima dell'algoritmo sviluppato:

#### 4.6.1 Acquisizione I

#### Posizione Tag

<b>X</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
3,759 m	2,382 m	0,282 m

Modalità :

- S2 (6,8 Mbps , 3.99 GHz)

	<b>X</b>	<b>Y</b>
Stima	3,8328 m	2,4025 m

- L2 (110 Kbps , 3.99 GHz)

	<b>X</b>	<b>Y</b>
Stima	3,7473 m	2,3757 m

- S5 (6,8 Mbps , 6 GHz)

	<b>X</b>	<b>Y</b>
Stima	3,7924 m	2,3994 m

- L5 (110 Kbps , 6 GHz)

	<b>X</b>	<b>Y</b>
Stima	3,8024 m	2,4015 m

	<b>S2</b>	<b>S5</b>	<b>L2</b>	<b>L5</b>
Errore	0,079 m ✓	0,0426 m ✓	0,02 m ✓	0,0489 m ✓
# iterazioni	5	5	5	5

N.B.

Nelle caselle dove viene indicato l'errore, viene anche indicato se è stato rispettato quanto dichiarato dal costruttore, ovvero un errore di 10 cm.

#### 4.6.2 Acquisizione II

#### Posizione Tag

x	y	z
10,556 m	4,115 m	0,518 m

Modalità :

- S2 (6,8 Mbps , 3.99 GHz)

	X	Y
Stima	10,684 m	4,1865 m

- L2 (110 Kbps , 3.99 GHz)

	X	Z
Stima	10,613 m	0,4655 m

- S5 (6,8 Mbps , 6 GHz)

	X	Y
Stima	10,573 m	4,2593 m

- L5 (110 Kbps , 6 GHz)

	X	Y
Stima	10,577 m	4,2916 m

	S2	S5	L2	L5
Err.ore	0,1132 m <b>X</b>	0,1463 m <b>X</b>	0,1248 m <b>X</b>	0,1770 m <b>X</b>
# iterazioni	4	4	4	4

### 4.6.3 Acquisizione III

#### Posizione Tag

x	y	z
16,439 m	5,523 m	0,771 m

Modalità :

- S2 (6,8 Mbps , 3.99 GHz)

	X	Y
Stima	16,492 m	5,5048 m

- L2 (110 Kbps , 3.99 GHz)

	X	Y
Stima	16,416 m	5,6189 m

- S5 (6,8 Mbps , 6 GHz)

	X	Y
Stima	16,391 m	5,6487 m

- L5 (110 Kbps , 6 GHz)

	X	Y
Stima	16,430 m	5,6087 m

	S2	S5	L2	L5
Errore	0,0685 m	0,1348 m	0,100 m	0,0898 m
# iterazioni	4,84	4,17	4,14	4,1

#### 4.6.4 Acquisizione IV

#### Posizione Tag (con mascheramento)\*

x	y	z
33,130 m	4,294 m	0,949 m

Modalità :

- S2 (6,8 Mbps , 3.99 GHz)

	X	Y
Stima	33,158 m	4,6235 m

- L2 (110 Kbps , 3.99 GHz)

	X	Y
Stima	33,139 m	4,6808 m

- S5 (6,8 Mbps , 6 GHz)

	X	Y
Stima	33,136 m	4,5776 m

- L5 (110 Kbps , 6 GHz)

	X	Y
Stima	33,094 m	4,5214 m

	S2	S5	L2	L5
Errore	0,3323 m <b>X</b>	0,2858 m <b>X</b>	0,3876 m <b>X</b>	0,2394 m <b>X</b>
# iterazioni	5,61	5,88	5,71	5,99

\*Si veda Figura 72)



Figura 72) Tag posto nel punto  $(x=33.13m, y=4.294m, z=0.949m)$  del sistema di riferimento, con mascheramento parziale della line of sight



---

## Conclusioni e analisi dei dati

Dalle prove effettuate si è riscontrato un'ottima accuratezza dei dispositivi in modalità ranging. In particolare al variare della distanza le loro prestazioni non subivano particolari degradazioni, anche in presenza di ostacoli sulla line of sight. Da un'analisi delle statistiche, nella fase di ranging, si evince che nelle brevissime distanze (1m) le osservazioni sui moduli DWM1000 presentano delle deviazioni standard molto ampie; in particolar modo per le modalità L2 e L5 (lunga distanza, basso data rate). Questo è probabilmente da attribuirsi a disturbi di campo vicino. Dall'analisi dei momenti del terzo ordine (skewness) si evince invece che gli istogrammi, in un range che va dai 5 ai 25 metri, presentano alcuni elementi di gaussianità. Nei 30 metri solo le modalità L2 e L5 presentano tale proprietà. Si è così dimostrato sperimentalmente che le modalità L2 e L5 sono adatte per le distanze di oltre 25 metri. La presenza dell'ostacolo inoltre, ha fatto balzare in alto, nella misura da 35 metri, il valore del skewness nella sola modalità L5. Segno che l'ostacolo, per le trasmissioni ad alta frequenza, ha prodotto riflessione. Per quanto riguarda la triangolazione invece, sono stati acquisiti manualmente i range generati dalle anchor e dati in input all'algoritmo implementato in Matlab. Nelle tabelle relative alle acquisizioni vi sono le stime delle posizioni del tag con le rispettive modalità di funzionamento, e il numero di iterazioni impiegate prima che l'algoritmo convergesse ad un valore che soddisfaceva il requisito di accuratezza. La bontà dell'algoritmo è dimostrata dall'esiguo numero di iterazioni che sono occorse ad ottenere delle stime accettabili. L'errore risultante dalle simulazioni è in linea con l'accuratezza dichiarata dal produttore (10 cm), fatta eccezione per l'acquisizione IV per la quale l'errore si aggira intorno ai 30 cm. Si tratta comunque di ottimi risultati; sarebbe opportuno effettuare altri test con un numero maggiore di ancore in modo da poter stimare anche la componente z; Una volta testata l'accuratezza, sarebbe interessante effettuare il tracking di oggetti in movimento, con l'ausilio di ulteriori ancore per geometrie più consistenti ed efficaci.

---

## Bibliografia

- [1] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, "Understanding GPS Principles and Applications", Artech House, 2006.
- [2] Marco Luise, Davide Dardari, Emanuela Falletti, "Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques ", Elsevier.
- [3] Mohammadreza Yavari and Bradford G. Nickerson, "Ultra Wideband Wireless Positioning Systems Technical Report", TR14-230 March 27, 2014.
- [4] Ali H. Sayed, Alireza Tarighat, and Nima Khajehnouri, "Network-Based Wireless Location: Challenges Faced in Developing Techniques for Accurate Wireless Location Information".
- [5] 802.15.4 physical layer [<https://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>].
- [6] IEEE 802.15.4-2011 or "IEEE Std 802.15.4™-2011" (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE Computer Society Sponsored by the LAN/MAN Standards Committee. Available from <http://standards.ieee.org/>.
- [7] Dw1000-datasheet v2.02 [<http://www.decawave.com/support>]
- [8] Dw1000 User Manual v.2.02 [<http://www.decawave.com/support>]

## APPENDICE A – Mappa del registro

ID	Length (octets)	Type	Mnemonic	Description
0x00	4	RO	DEV_ID	Device Identifier – includes device type and revision info
0x01	8	RW	EUI	Extended Unique Identifier
0x02	-	-	-	Reserved
0x03	4	RW	PANADR	PAN Identifier and Short Address
0x04	4	RW	SYS_CFG	System Configuration bitmap
0x05	-	-	-	Reserved
0x06	5	RO	SYS_TIME	System Time Counter (40-bit)
0x07	-	-	-	Reserved
0x08	5	RW	TX_FCTRL	Transmit Frame Control
0x09	1024	RW	TX_BUFFER	Transmit Data Buffer
0x0A	5	RW	DX_TIME	Delayed Send or Receive Time (40-bit)
0x0B	-	-	-	Reserved
0x0C	2	RW	RX_FWTO	Receive Frame Wait Timeout Period
0x0D	4	SRW	SYS_CTRL	System Control Register
0x0E	4	RW	SYS_MASK	System Event Mask Register
0x0F	5	SRW	SYS_STATUS	System Event Status Register
0x10	4	ROD	RX_FINFO	RX Frame Information (in double buffer set)
0x11	1024	RWD	RX_BUFFER	Receive Data Buffer (in double buffer set)
0x12	8	ROD	RX_FQUAL	Rx Frame Quality information (in double buffer set)
0x13	4	ROD	RX_TTCKI	Receiver Time Tracking Interval (in double buffer set)
0x14	5	ROD	RX_TTCKO	Receiver Time Tracking Offset (in double buffer set)
0x15	14	ROD	RX_TIME	Receive Message Time of Arrival (in double buffer set)
0x16	-	-	-	Reserved
0x17	10	RO	TX_TIME	Transmit Message Time of Sending
0x18	2	RW	TX_ANTD	16-bit Delay from Transmit to Antenna
0x19	5	RO	SYS_STATE	System State information
0x1A	4	RW	ACK_RESP_T	Acknowledgement Time and Response Time
0x1B	-	-	-	Reserved
0x1C	-	-	-	Reserved
0x1D	4	RW	RX_SNIFF	Pulsed Preamble Reception Configuration
0x1E	4	RW	TX_POWER	TX Power Control
0x1F	4	RW	CHAN_CTRL	Channel Control
0x20	-	-	-	Reserved
0x21	41	RW	USR_SFD	User-specified short/long TX/RX SFD sequences
0x22	-	-	-	Reserved
0x23	32	RW	AGC_CTRL	Automatic Gain Control configuration
0x24	12	RW	EXT_SYNC	External synchronisation control.
0x25	4064	RO	ACC_MEM	Read access to accumulator data
0x26	44	RW	GPIO_CTRL	Peripheral register bus 1 access - GPIO control
0x27	44	RW	DRX_CONF	Digital Receiver configuration
0x28	58	RW	RF_CONF	Analog RF Configuration
0x29	-	-	-	Reserved
0x2A	52	RW	TX_CAL	Transmitter calibration block
0x2B	21	RW	FS_CTRL	Frequency synthesiser control block
0x2C	12	RW	AON	Always-On register set
0x2D	18	RW	OTP_IF	One Time Programmable Memory Interface
0x2E	-	RW	LDE_CTRL	Leading edge detection control block
0x2F	41	RW	DIG_DIAG	Digital Diagnostics Interface
0x30 to 0x35	-	-	-	Reserved
0x36	48	RW	PMSC	Power Management System Control Block

Figura 73) DW1000 Register map [8]

---

## APPENDICE B – Dilution of precision

Calcolo delle dilution of precision [1]. Data la matrice (41)

Ricaviamo le DOP attraverso le quantità

$$(\underline{\underline{H}}^T \underline{\underline{H}})^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix}$$

Da cui la General Dilution of Precision

$$GDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}}$$

Mentre per quanto riguarda Positional, Horizontal, Vertical, Time Dilution of precision

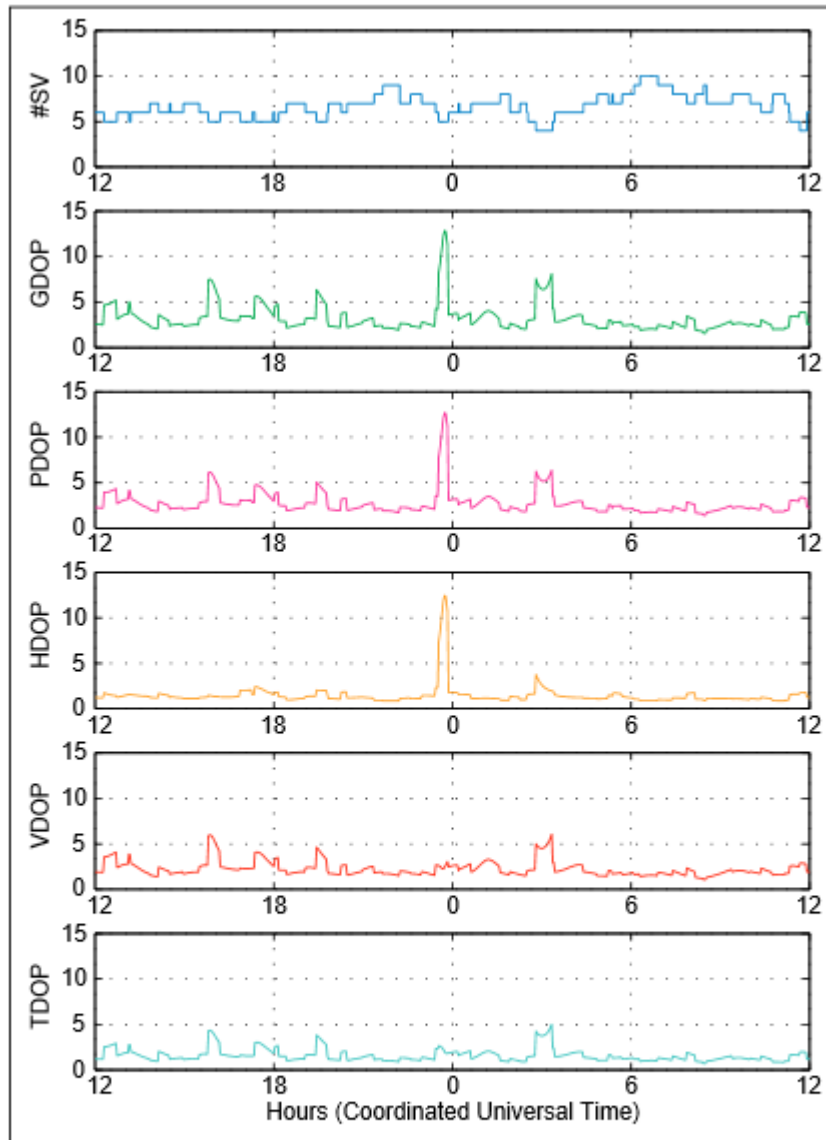
$$PDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$$

$$HDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22}}$$

$$VDOP = \sqrt{D_{33}}$$

$$TDOP = \sqrt{D_{44}}/c$$

In Figura 74) troviamo un esempio di DOP e di come questi valori si innalzano al deteriorarsi della geometria.



[[http://www.nrem.iastate.edu/class/assets/nrem446\\_546/week3/Dilution\\_of\\_Precision.pdf](http://www.nrem.iastate.edu/class/assets/nrem446_546/week3/Dilution_of_Precision.pdf)]

Figura 74) Valori DOP registrati in Canada, attraverso un broadcast di satelliti geostazionari. Valori sufficientemente bassi eccetto nell'ora 0, dove il numero di satelliti visibili (#SV) è il più basso