



UNIVERSITÀ DI PISA

SCUOLA DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

Tesi di Laurea Magistrale

**LOCALIZZAZIONE DI UN UAV MEDIANTE TECNICA
TOA IN SISTEMI UWB**

Relatori:

Prof. Ing. Paolo NEPA

Prof. Ing. Giuliano MANARA

Dr. Ing. Alice BUFFI

Ing. Sandro LAZZARI

Candidato:

S.T.V.(AN) Fabrizio LAZZARI

*“Chi dice che è impossibile, non dovrebbe
disturbare chi ce la sta facendo.”*

Albert Einstein

INDICE

| | |
|--|-----------|
| Indice | 1 |
| Lista degli Acronimi..... | 3 |
| Introduzione..... | 5 |
| Capitolo 1..... | 7 |
| Ultra Wide Band & Positioning..... | 7 |
| 1.1 Tecnologia UWB..... | 7 |
| 1.1.1 Segnali UWB e Modulazioni | 9 |
| 1.1.2 Vantaggi e Svantaggi Tecnologia UWB | 14 |
| 1.1.3 Regole e Limiti di Emissione FCC | 19 |
| 1.2 Tecniche di Localizzazione UWB..... | 21 |
| 1.2.1 Tecnica TOA..... | 22 |
| 1.2.2 Tecnica TDOA..... | 24 |
| 1.3 Algoritmo di Multilaterazione..... | 25 |
| Capitolo 2..... | 28 |
| Problema di Localizzazione di un UAV..... | 28 |
| 2.1 Scenari Operativi..... | 28 |
| 2.2 Piattaforme IMU | 32 |
| 2.3 Localizzazione: stato dell'arte..... | 34 |
| 2.4 Idea di Base per la Localizzazione dell'UAV | 35 |
| Capitolo 3..... | 38 |
| Algoritmo di multilaterazione ed Effetto del Ritardo UWB..... | 38 |
| 3.1 Sistemi di Riferimento | 38 |
| 3.2 Configurazioni dei Sensori UWB | 40 |
| 3.3 Caratterizzazione dei Sensori UWB..... | 41 |
| 3.4 Scelta dell'Algoritmo di Multilaterazione..... | 44 |
| 3.5 Ritardo UWB..... | 47 |
| 3.5.1 Scenario 1: Moto Rettilineo..... | 48 |
| 3.5.2 Scenario 2: Moto Sinusoidale | 57 |

| | |
|--|-----------|
| Capitolo 4 | 62 |
| Tecniche di Compensazione del Ritardo UWB | 62 |
| 4.1 TOA OW-TOF | 62 |
| 4.2 TDOA..... | 63 |
| 4.3 Algoritmo di localizzazione che sfrutta la stima della velocità longitudinale dell'UAV ... | 68 |
| Conclusioni | 77 |
| Appendice | 79 |
| <i>Metodo Algebrico</i> | 79 |
| <i>Metodi Iterativi</i> | 80 |
| Bibliografia | 86 |
| Ringraziamenti | 88 |

LISTA DEGLI ACRONIMI

ADCs: *Analog to Digital Converters*

AOA: *Angle Of Arrival*

BPSK: *Binary Phase Shift Keying*

EKF: *Extended Kalman Filter*

IED: *Improvised Explosively Devices*

INS: *Inertial Navigation System*

FCC: *U.S. Federal Communications Commission*

GPS: *Global Positioning System*

GS: *Ground Station*

LDPI: *Low Probability of Intercept and Detection*

LMA: *Levenberg-Marquardt Algorithm*

LOS: *Line Of Sight*

LSM: *Least Square Method*

NLOS: *Non Line Of Sight*

MO&O: *Memorandum Opinion and Order*

MP: *Multipath*

OOK: *On-Off Keying*

OW-TOF: *One Way-Time Of Flight*

PAM: *Pulse Amplitude Modulation*

PF: *Particle Filter*

PPM: *Pulse Position Modulation*

RF: *Radio Frequency*

RMSE: *Root Mean Square Error*

SDRE: *State Dependent Riccati Equation*

TDOA: *Time Difference Of Arrival*

TOA: *Time Of Arrival*

TOF: *Time Of Flight*

TW-TOF: *Two Way-Time Of Flight*

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

UNIFIL: United Nations Interim Force in Lebanon

UWB: Ultra Wide Band

VBED: Vehicle Borne Improvised Explosive Devices

WLS: Weighted Least Square

INTRODUZIONE

L'insorgenza di nuove minacce belliche sta spingendo le forze armate ad adottare nuovi sistemi, altamente performanti, di prevenzione. La tecnologia, sempre più innovativa, permette di sostituire l'uomo alla macchina in operazioni a rischio incolumità. Alcune tra le più importanti missioni militari consistono nella bonifica di campi da minacce di tipo *Improvised Explosively Devices* (IED), (come ad esempio mine esplosive), come la missione UNIFIL (*United Nations Truce Supervision Force in Lebanon*) in Libano, e l'uomo svolge un ruolo fondamentale nel raggiungimento di tale obiettivo. Principalmente nel settore commerciale, negli ultimi anni si sta espandendo il pensiero di utilizzare i ben noti *droni* per raggiungere luoghi angusti, di non facile accessibilità all'uomo, in modo da registrare dati e immagini, basti pensare ai nuovi quadricotteri dotati di telecamere Full-HD e svariati sensori di misura. Uno degli aspetti fondamentali riguarda la conoscenza della posizione del robot, ovvero il *positioning*, in modo da controllarne la navigazione.

Il lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con l'azienda *Finmeccanica Divisione Sistemi di Difesa*, ed è inserito nell'ambito del *Progetto Nazionale di Ricerca Militare* (P.N.R.M.) con interesse in "Pilotaggio Semi-Automatico di Robot ad ala rotante in Funzione Anti-IED - (*Unmanned Air Vehicle Automatic Guidance: U.A.G.*)", che ha l'obiettivo di ottenere un sistema di guida quasi esclusivamente automatico, facilitando il compito del personale impegnato in teatro operativo.

Questo documento ha lo scopo di definire, mediante *simulazioni Matlab*, l'accuratezza del sistema di localizzazione di un *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), ossia un piccolo robot ad ala rotante, atto alla scoperta di minacce di tipo IED. Il piccolo drone è seguito da un rover o *Ground Station* (GS), ovvero la testa di un convoglio militare, che ne stima istante per istante la posizione, mediante la tecnica di multilaterazione che sfrutta le misure di distanze di quattro sensori rispetto all'UAV, effettuate in modo sequenziale. Il sensore sull'UAV risponde ai segnali trasmessi dai sensori sulla piattaforma a terra secondo il protocollo *Time Of Arrival Two Way-Time Of Flight* (TOA TW-TOF). L'innovativa tecnologia adottata dai sensori per ottenere il *positioning* è l' *Ultra Wide Band* (UWB), che rientra nella gamma dei segnali a brevissima durata temporale e permette di avere delle misure di distanza con precisione del centimetro.

Rispetto ad un classico problema di localizzazione indoor dove tipicamente i sensori sono dislocati perimetralmente all'area oggetto di osservazione da parte del *drone*, nel problema in questione, essi sono ravvicinati a bordo del rover e quindi tutti dalla stessa parte rispetto all'UAV. Per valutare l'effetto di tale geometria si mostrano i risultati delle simulazioni atte a verificare l'accuratezza della stima della posizione dell'UAV risolvendo un algoritmo di multilaterazione per alcuni scenari operativi. Nell'analisi numerica viene analizzato l'effetto del rumore introdotto dai sensori UWB nella misura della distanza e del ritardo temporale necessario per effettuare tale misura. In particolare, per compensare l'effetto di quest'ultimo viene proposto un nuovo algoritmo che garantisce buone prestazioni in presenza di eventuali velocità relative tra la GS e l'UAV.

Il documento è organizzato nella seguente maniera: nel capitolo 1 sono illustrate le caratteristiche peculiari dei segnali UWB, con l'attenzione alle possibili modulazioni ed agli innumerevoli vantaggi. Sono quindi esaminate le tecniche di localizzazione maggiormente utilizzate per sistemi UWB ed alcuni algoritmi di multilaterazione. Nel successivo capitolo 2 si introduce il problema di radiolocalizzazione dell'UAV, definendo dapprima la geometria, poi l'idea di base per la localizzazione dell'UAV stesso. Nel capitolo 3 si definisce il cuore del sistema, ovvero l'algoritmo di multilaterazione che consenta di avere errori di stima minimi in presenza di rumore di misura, e la migliore configurazione dei sensori. Inoltre si studiano gli effetti sulla stima della posizione dovuti al ritardo UWB e quale ordine di misura dei sensori sia in grado di minimizzarli. Nell'ultimo capitolo, si descrive la nuova tecnica di localizzazione che si svincola dal ritardo UWB con cui i sensori effettuano la misura della distanze, introducendo un'opportuna compensazione del moto dell'UAV.

CAPITOLO 1

ULTRA WIDE BAND & POSITIONING

Un segnale *Ultra Wide Band* (UWB) è un segnale di brevissima durata, tipicamente dell'ordine dei nanosecondi. Le tecnologie a radio frequenza (RF) ad impulsi di questo tipo consentono di ottenere una elevata larghezza di banda. Questa tecnologia può essere utilizzata per le comunicazioni, per applicazioni in ambito radar, e principalmente per il *positioning*, ovvero la localizzazione, data la brevissima durata del segnale.

Al contrario delle tecnologie radio ad ampio spettro che consentono di ottenere bande dell'ordine del KiloHertz o del MegaHertz, i segnali UWB presentano bande dell'ordine del GigaHertz, con bande percentuali pari a 25%-100%. I sistemi UWB raggiungono questa larghezza di banda trasmettendo una forma d'onda ad impulso. Tali forme d'onda sono implicitamente a banda larga. L'analisi di Fourier ci insegna che un impulso ideale, cioè una forma d'onda con una data ampiezza ed una durata infinitamente breve, presenterebbe una larghezza di banda infinita. Di conseguenza, queste trasmissioni sono abbastanza diverse da quelle tradizionali, in quanto si avvicinano ai treni d'impulsi.

1.1 Tecnologia UWB

Come stabilito dall'ente federale americano, *U.S. Federal Communications Commission* (FCC), i segnali UWB, per essere definiti tali, devono avere una larghezza di banda almeno pari a 500 MHz, oppure una banda relativa percentuale non inferiore a 20 % [1]. La banda relativa è il parametro maggiormente usato per classificare i segnali come a banda stretta, larga, oppure ultra larga, ed è definito dal rapporto tra la larghezza di banda e la frequenza centrale. In Figura 1.1 è riportato un esempio dello spettro di un segnale UWB, con particolare attenzione alla definizione della banda, intesa come la differenza tra i valori di frequenza a -10 dB.

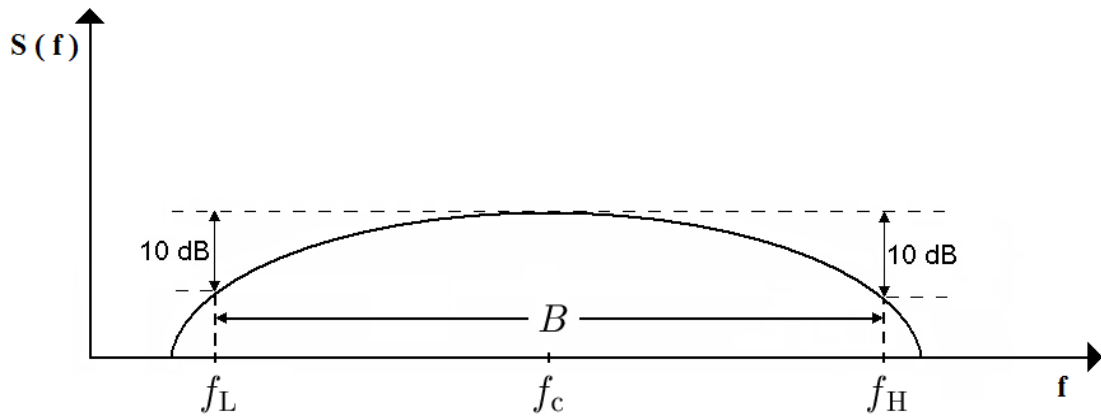


Figura 1.1: Esempificazione dello spettro di un segnale UWB.

La banda assoluta di questo segnale è definita dalla relazione (1.1)

$$B_{abs} = f_H - f_L \quad (1.1)$$

Dove f_H e f_L rappresentano rispettivamente gli estremi superiori ed inferiori di banda.

Come evidenziato precedentemente, un segnale UWB ha necessariamente (1.2):

$$B_{abs} \geq 500 \text{ MHz} \quad (1.2)$$

Analogamente, possiamo definire la banda relativa del segnale UWB, la cui relazione è riportata in (1.3):

$$B_{rel} = \frac{B_{abs}}{f_c} = \frac{f_H - f_L}{f_c} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (1.3)$$

Dove f_c rappresenta la frequenza centrale, ottenuta nel seguente modo (1.4):

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (1.4)$$

Tipicamente si adotta il seguente criterio per stabilire se un segnale è a banda ultra larga oppure no (1.5):

$$B_{rel} \geq 0.2 \quad \text{oppure} \quad B_{\%} = B_{rel} \times 100 \geq 20\% \quad (1.5)$$

1.1.1 Segnali UWB e Modulazioni

In letteratura sono disponibili una lunga serie di segnali a banda ultra larga. Di seguito ne sono riportati alcuni esempi, ottenuti da forme d'onda gaussiane e sue derivate [2]:

- **Impulso Gaussiano:** impulso definito dalla seguente relazione (1.6):

$$p(t) = A e^{-\left(\frac{t-T_c}{T_G}\right)^2} \quad (1.6)$$

A rappresenta l'ampiezza dell'impulso, T_c l'istante centrale e T_G il parametro relativo alla forma dell'impulso gaussiano, più elevato è questo parametro, minore sarà la banda del segnale. Nelle rappresentazioni successive si sono considerati i seguenti valori: $A=1$, $T_c = 0.5 \text{ ns}$, $T_G = 0.1 \text{ ns}$.

La forma dell'impulso e la sua densità spettrale di potenza sono riportati in Figura 1.2:

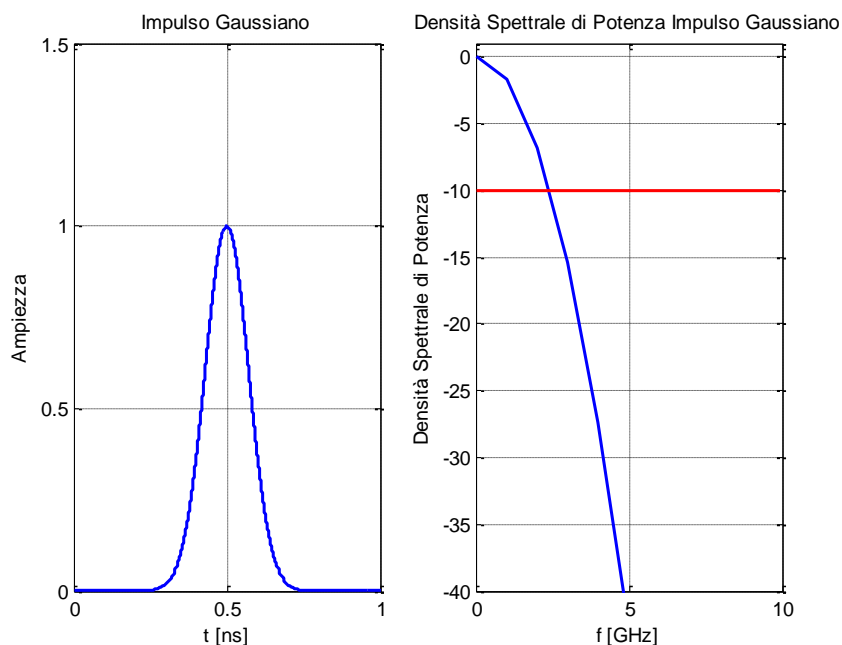


Figura 1.2: Analisi temporale e spettrale dell'Impulso Gaussiano.

- **Monociclo Gaussiano:** il monociclo gaussiano è una forma d'onda molto simile alla derivata prima dell'impulso gaussiano. La sua espressione è riportata in (1.7):

$$p(t) = 2 \frac{A}{T_G} \sqrt{e} (t - T_c) e^{-2 \left(\frac{t - T_c}{T_G} \right)^2} \quad (1.7)$$

La forma d'onda dell'impulso e la sua densità spettrale di potenza sono riportati in Figura 1.3:

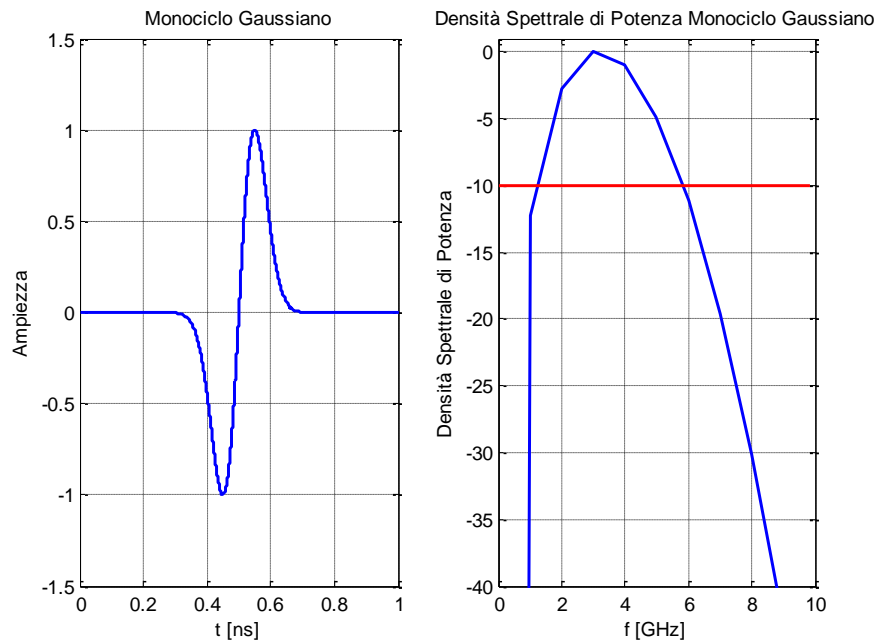


Figura 1.3: Analisi temporale e spettrale del Monociclo Gaussiano.

- **Monociclo di Scholtz:** questa tipologia di segnale proviene dalla derivata seconda dell'impulso gaussiano. La sua espressione è definita dalla relazione (1.8):

$$p(t) = A \left[1 - 4\pi \left(\frac{t - T_c}{T_G} \right)^2 \right] e^{-2\pi \left(\frac{t - T_c}{T_G} \right)^2} \quad (1.8)$$

La forma d'onda dell'impulso e la sua densità spettrale di potenza sono riportati in Figura 1.4:

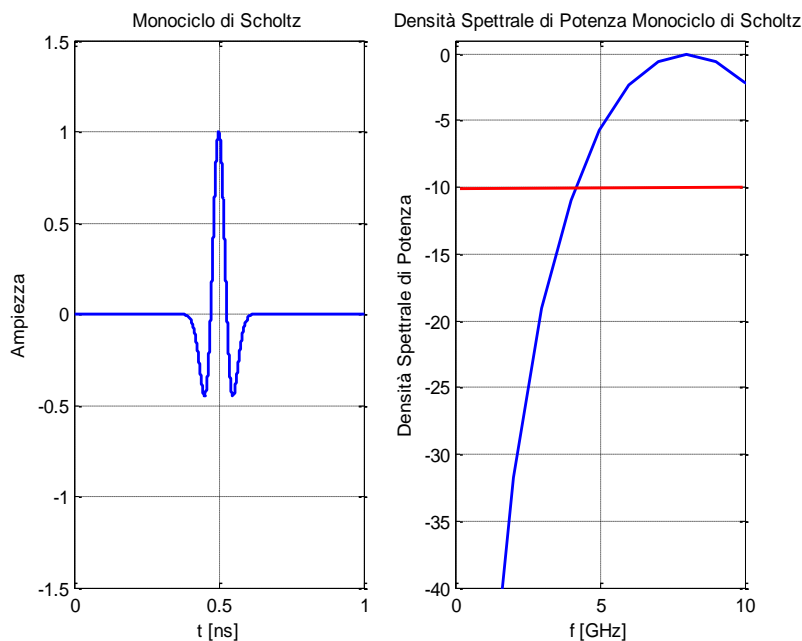


Figura 1.4: Analisi temporale e spettrale del Monociclo di Scholtz.

Sono disponibili altre tipologie di segnali UWB come: il monociclo Manchester, il monociclo Manchester RZ, il monociclo sinusoidale e quello rettangolare. Questi segnali sono opportunamente filtrati per regolare l'occupazione spettrale.

Le informazioni possono essere codificate in un segnale UWB in vari modi [3]. Gli schemi di modulazione più utilizzati per segnali UWB sono: la *Pulse Position Modulation* (PPM), la *Pulse Amplitude Modulation* (PAM), la *On-Off Keying* (OOK), e la *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), chiamata anche modulazione bifase. Sono disponibili altre tipologie di modulazione, ma queste rappresentano quelle maggiormente utilizzate per soddisfare i requisiti derivanti da applicazioni differenti. Analizziamo più nel dettaglio le modulazioni precedentemente citate.

- PPM:** la *Pulse Position Modulation* si basa sul principio di codifica dell'informazione su due o più posizioni nel tempo, riferite a quella nominale, come evidenziato in Figura 1.5. Un impulso trasmesso nella posizione nominale codifica uno 0, e un impulso trasmesso dopo la posizione nominale codifica un 1. La Figura 1.5 mostra un tipo di modulazione con 2 posizioni dell'impulso, dove un bit è codificato mediante un impulso. Si possono avere posizioni aggiuntive, utilizzate per trasmettere più bit per impulso. Il ritardo tra le posizioni è tipicamente una frazione di nanosecondo, mentre il tempo tra posizioni nominali è in genere molto più lungo per evitare interferenze tra gli impulsi.

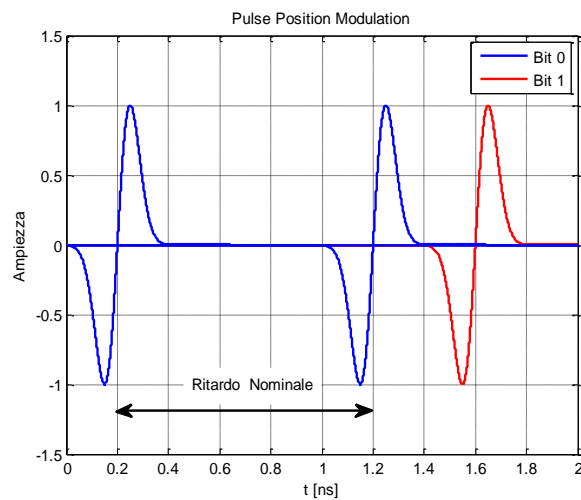
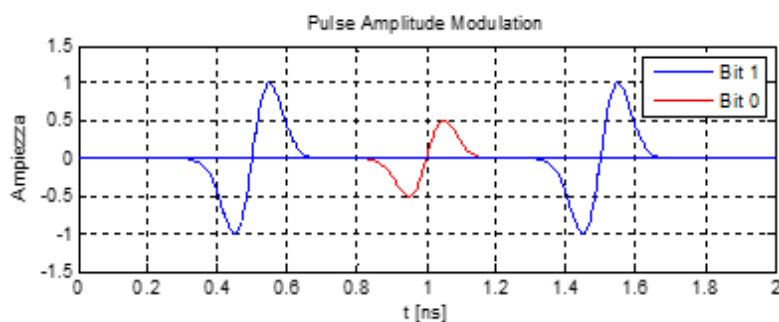
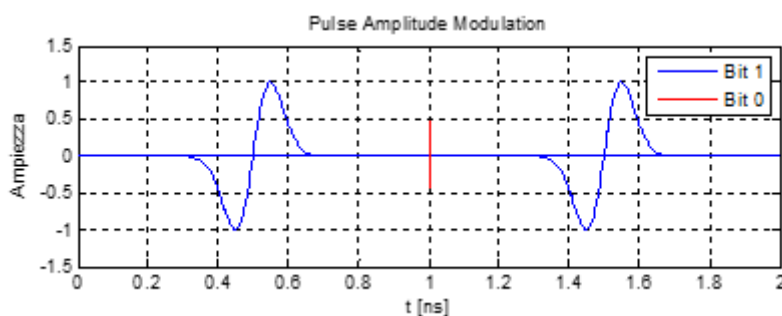


Figura 1.5: Esempio Modulazione PPM.

- PAM:** la *Pulse Amplitude Modulation* si basa sulla codifica dell'informazione nell'ampiezza dell'impulso trasmesso, come rappresentato in Figura 1.6. L'immagine raffigura un tipo di modulazione a due livelli, dove rispettivamente, il bit 0 può essere codificato mediante un impulso attenuato o nullo.



(a)



(b)

Figura 1.6: Esempio Modulazione PAM con (a) impulso attenuato per il bit 0 e (b) impulso nullo.

- **BPSK:** la *Binary Phase Shift Keying*, meglio nota come modulazione di fase binaria, codifica l'informazione sulla polarità dell'impulso, come mostrato in Figura 1.7. L'impulso subisce un meccanismo di commutazione, a seconda che si voglia trasmettere il bit 0 oppure il bit 1. In questo caso può essere codificato un solo bit per impulso, in quanto possiamo scegliere una tra le due sole polarità disponibili.

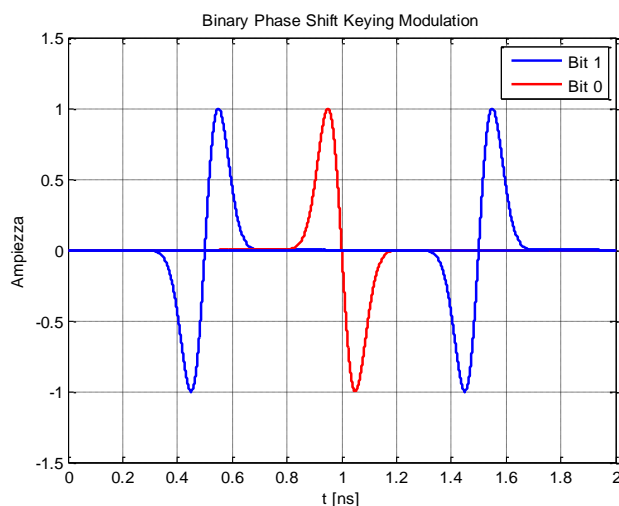


Figura 1.7: Esempio Modulazione BPSK.

1.1.2 Vantaggi e Svantaggi Tecnologia UWB

La natura dei segnali UWB, ossia di essere a brevissima durata, offre diversi vantaggi rispetto ai sistemi di comunicazione a banda stretta. In questa sezione si discutono alcuni tra i vantaggi più importanti [1].

- **Elevata Capacità di Canale.** Uno dei principali vantaggi della banda larga per impulsi UWB è il miglioramento della capacità di canale. La capacità di canale, o velocità di trasmissione, è definita come la quantità massima di dati al secondo che possono essere trasmessi su una canale di comunicazione, ammettendo una probabilità d'errore arbitrariamente piccola. Questo aspetto è evidenziato dalla *formula di Shannon* (1.9).

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1.9)$$

Dove C rappresenta la capacità massima del canale, B la banda, e SNR il rapporto di potenza segnale-rumore. Come mostrato nell'equazione (1.9), la capacità di canale C aumenta linearmente con la banda B . Pertanto, avendo diversi gigahertz di larghezza di banda disponibile per i segnali UWB, si possono ottenere velocità informative prossime al *Gbit/s*. Tuttavia, a causa della limitazione della potenza sulle trasmissioni UWB, come definito dalle norme FCC, questo alto rate di trasmissione dati è disponibile solo per brevi distanze, fino a 10 metri. Questo rende i sistemi UWB i candidati perfetti per le trasmissioni a corto raggio. Il *trade-off* tra la distanza e la velocità informativa rende la tecnologia UWB quella ideale per una vasta gamma di applicazioni in settori militari, civili e commerciali.

- **Bassa Probabilità di Intercettazione.** Grazie alla bassa potenza media di trasmissione, come discusso nella precedente sezione, i sistemi di comunicazione UWB hanno una immunità all'intercettazione. Con bassa potenza di trasmissione, l'intercettatore deve essere molto vicino al trasmettitore per poter rilevare le informazioni trasmesse. Inoltre, gli impulsi UWB sono modulati con codici unici per ogni coppia trasmettitore-ricevitore. Pertanto, i sistemi UWB rappresentano una significativa promessa per le comunicazioni sicure, a bassa probabilità di intercettazione e rivelazione (*Low Probability of Intercept and Detection*, LPI/D), necessità critiche per le operazioni militari.

- **Elevate Prestazioni in presenza di Multipath.** Il *multipath* è inevitabile nelle comunicazioni wireless. Esso è causato da riflessioni multiple del segnale trasmesso, che viene reirradiato da varie superfici quali edifici, alberi e persone, e giungono con ritardi e attenuazioni differenti al ricevitore. Se il trasmettitore ed il ricevitore sono in vista si parla di propagazione diretta o in *Line of Sight* (LOS); i segnali riflessi dalle superfici non sono in linea di vista, pertanto la propagazione ad essi associata è detta *Non Line of Sight* (NLOS). In Figura 1.8 è raffigurato un esempio schematico dei due tipi di propagazione. Per segnali a banda stretta il multipath può causare una notevole attenuazione del segnale ricevuto in base alla differenza di fase tra i segnali LOS e NLOS.

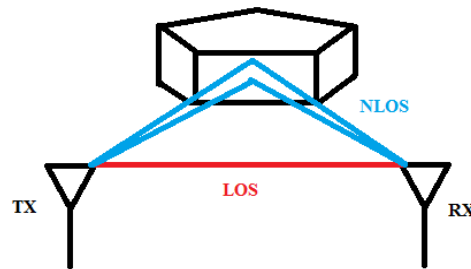


Figura 1.8: Esempio di propagazione LOS e NLOS.

La brevissima durata degli impulsi UWB invece li rende meno sensibili all'effetto *multipath*. Infatti essendo tale durata di una trasmissione UWB tipicamente più breve di un nanosecondo, l'impulso riflesso raramente entra in collisione con il segnale LOS e quindi si ha minor probabilità che il segnale ricevuto sia degradato.

In Figura 1.9 è mostrato l'effetto del *multipath* per segnali UWB, ovvero si osserva una netta separazione temporale tra gli impulsi LOS e NLOS. Questa proprietà di risolvere il canale *multipath* rende la tecnologia UWB una delle più utilizzate in ambito di *positioning*.

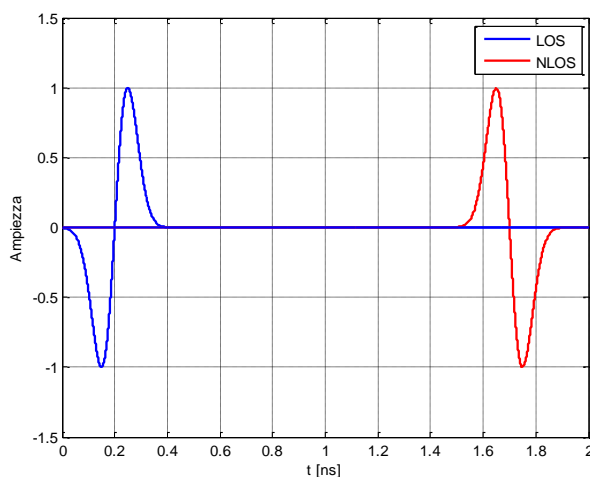


Figura 1.9: Effetto del Multipath per segnali UWB.

Nonostante ciò, le comunicazioni UWB non sono totalmente immuni da distorsioni del canale. La ricerca sui modelli di canale UWB ha dimostrato che a seconda dello schema di modulazione utilizzato, gli impulsi UWB a bassa potenza possono subire una notevole distorsione in ambienti *indoor*, in cui vi siano un gran numero di oggetti e diffusori ravvicinati. Normalmente il segnale sul percorso diretto è quello più forte con ritardo minimo, ma questo non è sempre vero. In Figura 1.10 è raffigurato un esempio di segnale UWB ricevuto su canale *multipath* intenso, dove il percorso diretto è sensibilmente più debole rispetto ai segnali forti contrassegnati da un punto rosso. Un sistema UWB è in grado di estrarre uno di questi segnali forti. Infatti, a causa delle interferenze *multipath* di tipo costruttivo, vi possono essere segnali che sono in realtà molto più forti del primo impulso ricevuto. Con l'acquisizione e il riferimento al segnale più forte presente, la tecnologia radio UWB è in grado di sfruttare efficacemente il *multipath* per aumentare la potenza del segnale ricevuto.

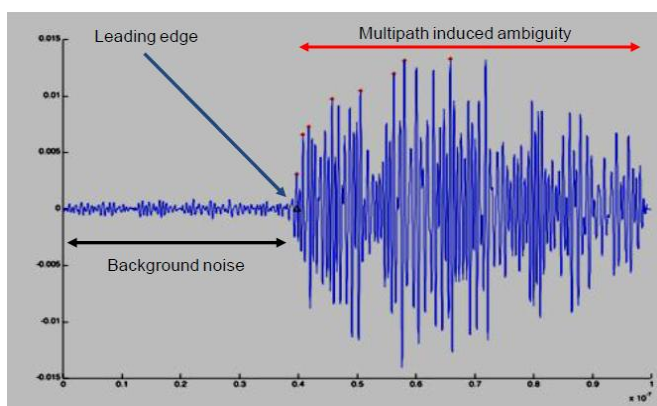


Figura 1.10: Segnale UWB ricevuto su canale Multipath moderato.

- **Positioning.** La tecnologia UWB è una delle più performanti nel campo del *positioning*, grazie alla brevissima durata dell'impulso trasmesso. Tipicamente il posizionamento o localizzazione di un *target* nello spazio avviene grazie alla conoscenza delle distanze che separano quest'ultimo da un insieme di nodi, le cui posizioni sono note, per poi applicare una serie di algoritmi di *trilaterazione* o *multilaterazione*. Questo aspetto sarà più chiaro nei successivi capitoli. Si è interessati alla distanza, di conseguenza alla quantità di tempo trascorsa tra la trasmissione di un segnale e la successiva ricezione. Nel caso illustrato in Figura 1.10, è relativamente facile determinare il momento in cui il primo impulso giunge al ricevitore. Quel punto è contrassegnato con un piccolo triangolo. La *Time Domain* si riferisce a questo punto come il termine “*Leading Edge*”, ovvero il *bordo d'attacco*. Si deve notare che la posizione esatta del target è ancora un po' ambigua, ma con integrazione e algoritmi avanzati, questa misura di ambiguità in distanza può essere ridotta a meno di alcuni centimetri. Con opportuna elaborazione del segnale ed in presenza di un ambiente cooperativo, l'ambiguità potrebbe essere ridotta a meno di 2 mm.

La tecnologia UWB non è prettamente vantaggiosa. Infatti, diverse sono le sfide che comporta l'utilizzazione di impulsi a durata brevissima. Alcune delle principali difficoltà di comunicazione mediante segnali UWB sono discusse nelle seguenti sottosezioni [1].

- **Distorsione della Forma d'Onda.** Le caratteristiche degli impulsi UWB sono più complesse di quelle dei segnali sinusoidali a banda stretta. Un segnale a banda stretta rimane sinusoidale su tutto il canale di trasmissione. Mentre gli impulsi UWB deboli e a bassa potenza possono essere distorti in modo significativo dal collegamento di trasmissione. Possiamo mostrare questa distorsione mediante la formula di trasmissione di Friis (1.10).

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1.10)$$

P_R e P_T rappresentano rispettivamente la potenza ricevuta e trasmessa, G_T e G_R i guadagni d'antenna in trasmissione e in ricezione, λ la lunghezza d'onda e r la distanza che separa il ricevitore dal trasmettitore.

Questa formula mostra che la potenza del segnale ricevuto cresce con il quadrato della lunghezza d'onda, di conseguenza diminuisce con il quadrato della frequenza in quanto vale la seguente relazione (1.11):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.11)$$

Per i segnali a banda relativa stretta, la variazione di frequenza modifica solo minimamente la potenza ricevuta, e quindi l'effetto di distorsione è quasi assente. Diversamente, a causa della ampia gamma di frequenze che ricopre lo spettro UWB, la potenza ricevuta cambia drasticamente, con conseguente distorsione dell'impulso. Questo aspetto limita le prestazioni dei ricevitori UWB a correlazione, come i classici *Filtri Adattati*.

- **Stima del Canale.** La stima del canale è di fondamentale importanza per la progettazione del ricevitore nei sistemi di comunicazioni wireless. Poiché i parametri del canale wireless non sono noti a priori in ricezione, come attenuazioni e ritardi di propagazione, vengono utilizzate delle sequenze di “*simboli UWB noti al RX*”. Dato che la maggior parte dei ricevitori UWB correlano il segnale ricevuto con un segnale modello predefinito, nominato *template*, prima di venire a conoscenza dei parametri del canale è necessario prevedere la forma del segnale trasmesso. A causa dell'elevata larghezza di banda e ridotta energia del segnale, gli impulsi UWB subiscono distorsioni piuttosto gravi; in tal modo, la stima del canale nei sistemi di comunicazione UWB diventa molto complicata.
- **Sincronizzazione.** La sincronizzazione dei tempi è una delle sfide più importanti, tanto che rappresenta una ricca area di studio e ricerca nei sistemi di comunicazione UWB. Come per qualsiasi altro sistema di comunicazione wireless, la sincronizzazione tra il ricevitore e il trasmettitore è uno dei fattori più controllati per i sistemi UWB. Purtroppo il campionamento e la sincronizzazione degli impulsi di brevissima durata pongono una limitazione importante sulla progettazione dei sistemi UWB. Per campionare questi impulsi stretti, molto veloci (frequenze dell'ordine del gigahertz) sono necessari dei campionatori molto performanti (*ADCs - Analog to Digital Converters*). Inoltre, le limitazioni di potenza e di durata dell'impulso rendono le prestazioni dei sistemi UWB altamente sensibili ad errori di temporizzazione quali *jitter* e *drift*. Questo può diventare un problema rilevante per i ricevitori con modulazione PPM, che si basano sulla rilevazione della posizione esatta del segnale ricevuto.

1.1.3 Regole e Limiti di Emissione FCC

Il 14 febbraio 2002, la FCC decise di aprire una porzione dello spettro per lo sviluppo commerciale della tecnologia UWB. Un anno dopo, nel febbraio del 2003, avvenne il rilascio di un *Memorandum Opinion and Order* (MO&O) che ha assicurato agli sviluppatori dell'avvenuta messa sul mercato della tecnologia UWB [1].

Questi sostenitori provengono da aziende leader in ambito del networking, colossi dell'elettronica di consumo come la *Philips Electronics* e *Samsung Electronics*; di giganti del *personal computing* come la *Intel*, la *Texas Instruments* e la *Microsoft*.

La maschera spettrale definita da FCC prevede di utilizzare 7.5 GHz di banda, tra 3.1 GHz e 10.6 GHz per i dispositivi di comunicazione. La FCC si prefigge di controllare le emissioni degli utenti che operano all'interno di questo spettro, limitando la potenza di trasmissione del segnale. I livelli di densità spettrale di potenza dei dispositivi UWB non devono superare -41.3 dBm/MHz o 75 nW/MHZ. Vi è una differenza fondamentale tra le comunicazioni *indoor* e *outdoor*, quest'ultime necessitano infatti di un più alto grado di attenuazione. Questo protegge ulteriormente i ricevitori GPS, con frequenza centrale di lavoro intorno a 1.6 GHz. I dispositivi di comunicazione vengono posti allo stesso livello dei radiatori involontari (*FCC Part 15*), come i televisori o i monitor dei computer.

In base alle norme FCC, i dispositivi UWB vengono classificati in diverse categorie come le comunicazioni ed i sistemi radar veicolari.

Per le comunicazioni, FCC ha stabilito due differenti limiti di emissioni per *indoor* e *outdoor*. La maschera spettrale relativa alle comunicazioni è rappresentata in Figura 1.11:

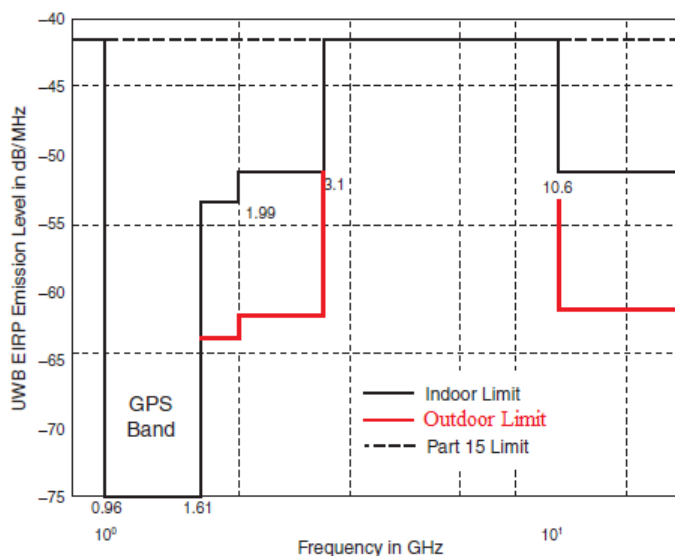


Figura 1.11: Limiti di emissione per le comunicazioni UWB indoor e outdoor [1].

La maschera spettrale per le comunicazioni outdoor è 10 dBm più bassa tra 1.61 GHz e 3.1 GHz. Secondo le norme FCC, i dispositivi UWB interni devono consistere in apparecchiature portatili, e le loro attività dovrebbero essere limitate all'interno degli edifici. FCC impone che nessuna infrastruttura fissa può essere utilizzata per comunicazioni UWB in ambienti esterni.

I *sistemi radar veicolari* sono invece autorizzati ad emettere al di sotto di -41.3 dBm/MHz nella gamma di frequenze che si estende da 22 GHz a 29 GHz. Questi dispositivi radar possono essere montati sui veicoli di trasporto terrestre e possono essere attivati indipendentemente dal moto o dalla stazionarietà del vettore.

1.2 Tecniche di Localizzazione UWB

Ogni sistema di localizzazione è dotato di due componenti fondamentali:

- **Nodi mobili:** corrispondono agli oggetti che si vuole localizzare, ad esempio l'UAV, la loro posizione non è nota a priori, sono liberi di muoversi nello spazio tridimensionale;
- **Ancore o punti di riferimento:** sensori che vengono installati in posizioni note a priori e vi restano stabilmente, come ad esempio quelli ubicati sulla GS.

Per stimare la posizione di un oggetto occorre effettuare alcune misure di grandezze, rispetto ad altri punti di riferimento le cui posizioni sono note a priori. Queste misure consentono di scoprire le distanze dei punti di riferimento oppure le direzioni di osservazione. Un sistema di localizzazione può misurare le seguenti grandezze per stimare la posizione:

- Tempo di arrivo;
- Intensità del segnale;
- Angolo di arrivo del segnale.

Per questo lavoro di tesi ci soffermeremo soltanto sulle tecniche basate sul tempo di arrivo del segnale, ovvero la *Time Of Arrival* (TOA) e la *Time Difference Of Arrival* (TDOA) . Per applicare la tecnica *Angle Of Arrival* (AOA), e quindi misurare l'angolo di arrivo del segnale, è necessario disporre di antenne ad array per ogni sensore [4]. Questo lavoro considera le antenne come se fossero “*puntiformi*”, motivo per cui la tecnica AOA è stata solo introdotta come una possibile soluzione per la localizzazione. Esistono altre tecniche che consentono di localizzare un oggetto; la potenza del segnale ricevuto è legata alla distanza, basti pensare alla legge dell'inverso del quadrato della distanza per un canale con sola LOS, però questa soluzione è meno precisa di quelle basate sul tempo di arrivo.

1.2.1 Tecnica TOA

Time Of Arrival o *Time Of Flight* è una delle tecniche maggiormente adottate nella ricerca della distanza tra due punti, a partire dalla conoscenza dell'istante di arrivo del segnale. Questa procedura è particolarmente efficace quando si utilizza la tecnologia UWB, garantendo ottimi livelli di accuratezza. Le tecniche TOA si dividono in: *One Way Time Of Flight* (OW-TOF) e *Two Way Time Of Flight* (TW-TOF) [5].

Nella modalità OW-TOF è richiesto un perfetto sincronismo dei clock dei due nodi. Il nodo N_i trasmette verso il nodo ricevente N_j l'informazione riguardante l'istante t_1 di avvenuta trasmissione del pacchetto, definita *Time Stamp*. Il nodo N_j riceve il pacchetto all'istante t_2 ed è in grado di calcolare il tempo di volo del segnale e, di conseguenza, la distanza tra i nodi N_i e N_j . La misura di distanza migliora quanto più accurato è il sistema di sincronizzazione. In Figura 1.12 vi è rappresentato uno schema esemplificativo di questa modalità.

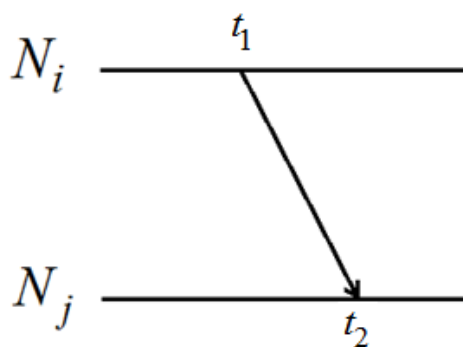


Figura 1.12: Schema esemplificativo della tecnica TOA nella modalità OW-TOF.

Nella modalità TW-TOF si supera il problema della sincronizzazione misurando il Round Trip Time τ_{RTT} , ovvero la differenza tra l'istante t_{i1} in cui il sensore N_i trasmette il segnale al nodo N_j e l'istante t_{i2} in cui riceve il segnale dal nodo N_j . Il sensore N_j riceve il segnale al tempo t_{j1} e, dopo un ritardo τ_d noto ad entrambi i nodi, ritrasmette un pacchetto verso il nodo N_i al tempo t_{j2} . In Figura 1.13 vi è uno schema esemplificativo della tecnica in questione che permette di ricavare la distanza tra i nodi N_i ed N_j .

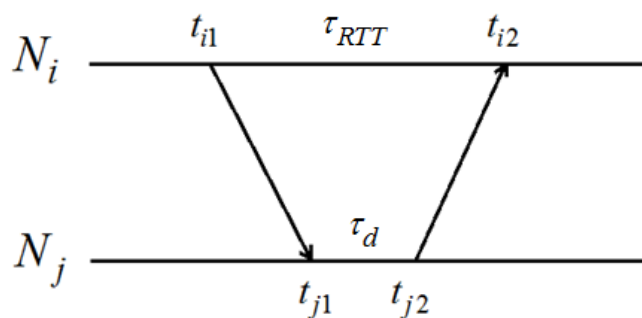


Figura 1.13: Schema esemplificativo della tecnica TOA nella modalità TW-TOF.

Il tempo impiegato dal nodo N_j nell'elaborazione del segnale è noto a priori, questo dipende da vari parametri come l'indice della potenza trasmessa e dal numero di impulsi integrati. Conoscendo questo tempo e conoscendo gli istanti t_{i1} e t_{i2} è possibile estrarre il tempo di volo e di conseguenza la distanza tra i nodi.

Uno dei problemi riguardanti la tecnica TOA nella modalità TW-TOF è rappresentato dal ritardo temporale necessario per effettuare la misura della distanza. Siccome è prevista una tratta di ritorno del segnale, *downlink*, questo non può essere trasmesso dal nodo mobile verso tutte le *ancore* in modalità broadcast. Quello che si fa è far trasmettere al nodo *ancora* nella tratta *uplink* ed al nodo mobile nella tratta *downlink* o viceversa, e questo lo si fa sensore per sensore in modo sequenziale. Questo comporta che ogni sensore debba attendere un certo intervallo temporale prima di iniziare la trasmissione, dato che il canale è occupato da un altro sensore. Se durante questo intervallo temporale il nodo mobile non fosse stazionario, le distanze misurate sarebbero relative a posizioni diverse, contribuendo ad una minor accuratezza della stima della posizione.

Diversamente accade nella modalità OW-TOF, in questo caso è possibile una trasmissione broadcast dal nodo mobile verso tutte le stazioni fisse o note, per cui la stima della distanza da parte dei sensori avviene relativamente ad un'unica posizione del nodo mobile. Occorre però che la rete di sensori fissa ed il nodo mobile siano perfettamente sincronizzati.

1.2.2 Tecnica TDOA

Un altro parametro che può essere valutato per la localizzazione riguarda la differenza degli istanti d'arrivo, *Time Difference Of Arrival* (TDOA), di segnali che viaggiano tra il nodo mobile di cui si vuole conoscere la posizione, e più nodi di riferimento che dovranno essere necessariamente sincronizzati. Secondo [6], la misura del TDOA avviene diversamente dal TOA, ovvero il segnale è trasmesso dal nodo mobile verso tutti i ricevitori o sensori. Il segnale giunge ai ricevitori con differenti ritardi temporali. Se vi è perfetta sincronizzazione tra i nodi trasmittente e ricevente si può applicare la tecnica TOA e di conseguenza estrarre la differenza tra i ritardi temporali. Se non vi è sincronizzazione, si può effettuare la cross-correlazione di coppie di segnali ricevuti e ottenere il TDOA come il ritardo per cui essa è massima ovvero (1.12):

$$TDOA_{ij} = \arg \max_{\tau} \left| \int_0^T s_i(t) s_j(t + \tau) d\tau \right| \quad (1.12)$$

s_i ed s_j rappresentano i segnali ricevuti dai nodi N_i, N_j e trasmessi dal nodo mobile, T è l'intervallo di osservazione. In Fig 1.14 vi è uno schema esemplificativo relativo al TDOA.

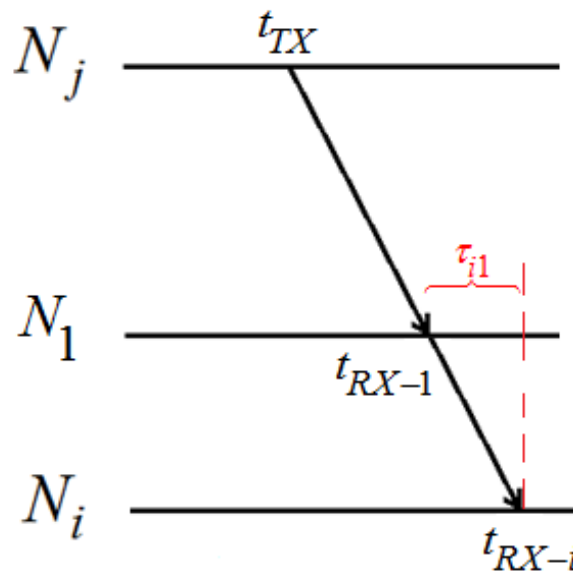


Figura 1.14: Schema esemplificativo della tecnica TDOA.

1.3 Algoritmo di Multilaterazione

Nelle precedenti sezioni è stato espresso che la localizzazione di un oggetto può avvenire grazie a misure TOA o TDOA. Per l'UWB queste grandezze sono misurate con accuratezze centimetriche. In [7] vi è un confronto delle prestazioni di alcuni algoritmi di multilaterazione basati su misure di TOA e di TDOA in un ambiente con sola *Line Of Sight* (LOS). Per un bersaglio posto casualmente in uno spazio 3D $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$, disponendo di 5 nodi di riferimento con errore sulla distanza individuato dal *Root Mean Square Error* (RMSE) non superiore a 30 cm, l'errore medio di stima, nel caso TOA, non supera 50 cm, mentre nel caso TDOA non supera 75 cm, applicando il *Maximum Likelihood Method* nella risoluzione del problema non lineare. La maggior parte dei sistemi di localizzazione assumono il posizionamento dei sensori spazati intorno al *drone* e non distribuiti in un unico settore dello spazio, questo permette di avere errori di stima più bassi. Inoltre in uno scenario indoor non sempre vengono garantite le condizioni di sola LOS, e le prestazioni del sistema di localizzazione possono essere influenzate [8], per cui è necessario mitigare l'effetto del multipath.

Per la tecnica TOA, note le distanze, il passo successivo della fase di localizzazione riguarda la multilaterazione. Si effettua un'intersezione tra sfere aventi come centro i nodi le cui posizioni sono note e come raggi le distanze tra le ancore ed il nodo mobile. Il sistema di equazioni è definito in (1.13):

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = r_i^2 \quad (1.13)$$

Dove (x_i, y_i, z_i) con $i = 1, \dots, N$ rappresentano le coordinate dei sensori ovvero dei centri delle sfere mentre r_i costituiscono le distanze che separano l' i -esimo sensore dal nodo mobile.

La Figura 1.15 mostra una esemplificazione del processo di multilaterazione sul piano considerando tre ancore disposte intorno al target (Figura 1.15a) e quattro ancore ubicate da una stessa parte rispetto al target (Figura 1.15b).

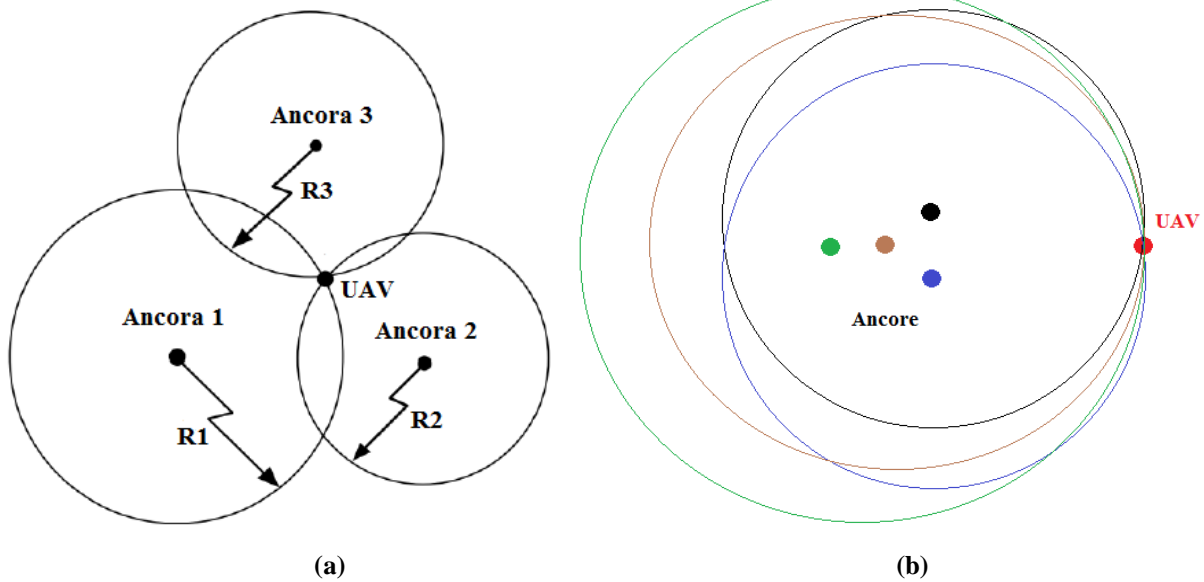


Figura 1.15: Schema esemplificativo del processo di multilaterazione sul piano per la tecnica TOA per (a) tre ancore intorno al target, (b) quattro ancore da una stessa parte rispetto al target.

Relativamente alla tecnica TDOA, il sistema di equazioni da risolvere per la localizzazione è il seguente (1.14):

$$m_{i,1} = r_i - r_1 = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-y_1)^2} \quad (1.14)$$

Dove (x_i, y_i, z_i) con $i=1, \dots, N$ rappresentano le coordinate dei sensori e $m_{i,1} = r_i - r_1$ con $i=2, \dots, N$ rappresentano le misure TDOA in termini di distanze riferite al sensore 1. Risolvere questo set di $N-1$ equazioni in tre incognite equivale a determinare il punto di intersezione di $N-1$ iperboloidi. Per confrontare la tecnica TDOA con la tecnica TOA è necessario aggiungere un ulteriore sensore [7]. Questa tecnica, analogamente alla tecnica TOA nella modalità OW-TOF, ci consente di riferire le misure ad un'unica posizione del nodo mobile, in quanto la trasmissione avviene in modalità broadcast. Occorre però valutare le prestazioni dei due sistemi dato che le superfici di intersezione sono di natura differente. Inoltre è necessario un segnale di sincronismo per la rete di sensori fissa.

La Figura 1.16 mostra una esemplificazione del processo di multilaterazione sul piano considerando tre ancore disposte intorno al target.

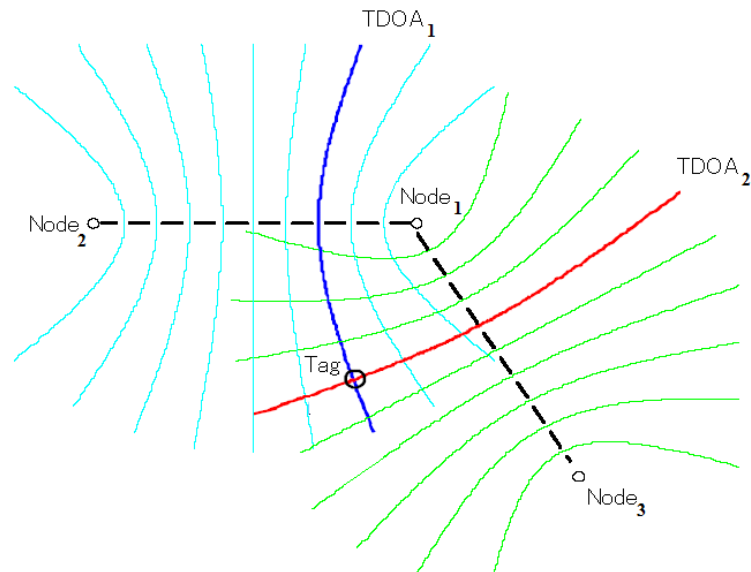


Figura 1.16: Schema esemplificativo del processo di multilaterazione sul piano per la tecnica TDOA.

CAPITOLO 2

PROBLEMA DI LOCALIZZAZIONE DI UN UAV

In questo capitolo viene introdotta la geometria del problema di localizzazione di un UAV, gli scenari operativi ed alcuni metodi di localizzazione. Inoltre è presentata l'idea di base per localizzare l'UAV, esaminando le problematiche legate alla geometria del problema.

2.1 Scenari Operativi

L'azienda *Finmeccanica Divisione Sistemi di Difesa* ha provveduto alla realizzazione di una serie di simulazioni delle più promettenti tecnologie di guida dell'UAV, al fine di selezionare con maggiore sicurezza la tecnologia da utilizzare nella successiva fase di realizzazione del progetto. Da analisi preliminari si è giunti alla conclusione che l'innovativa tecnologia UWB risulta essere quella maggiormente performante in ambito di *positioning*. Diversi sono gli scenari operativi dove vengono impiegati gli UAV, guidati da *rover* che ne comandano il moto agendo su determinati parametri della traiettoria. Se l'algoritmo di stima della posizione presenta ottimi risultati, questo potrebbe permetterci una guida quasi completamente automatica dell'UAV. Il target da perseguire è garantire una stima della posizione con errori confrontabili con le dimensioni dell'UAV. Uno dei principali scenari operativi (scenario 1) riguarda la protezione del convoglio militare in missione scoperta IED/MINE e anti-imboscata. La GS e l'UAV sono entrambi in movimento. La Figura 2.1 riporta uno schema generale della geometria del problema.

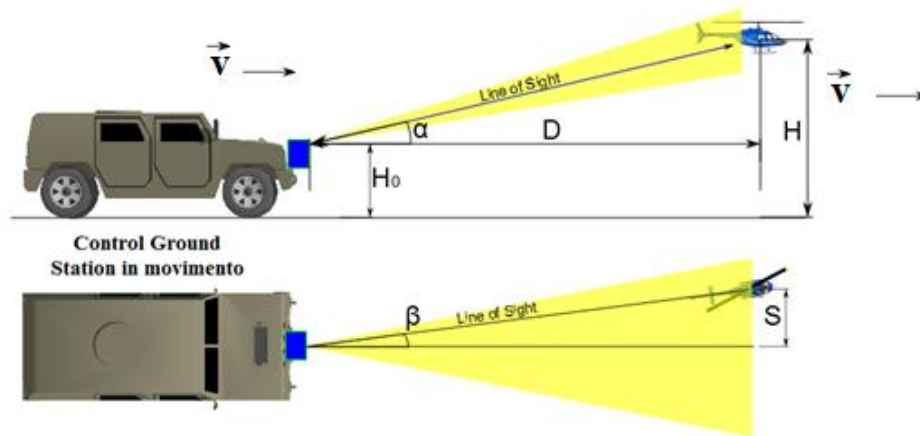


Figura 2.1: Schema Scenario 1: GS e UAV entrambi in movimento.

Le minacce tipiche per questa tipologia di missione risiedono in:

- IED - *Improvised Explosive Devices*;
- VBIED - *Vehicle Borne Improvised Explosive Devices* (auto-bombe) .

In Figura 2.2a è rappresentata un'immagine del convoglio militare mentre in Figura 2.2b vi sono degli esempi di possibili minacce.



(a)



(b)

Figura 2.2: (a) Convoglio militare, (b) minacce VBIED-IED .

A bordo dell'UAV sono ubicati un certo numero di sensori, definiti payload, atti alla scoperta degli ordigni esplosivi e si possono classificare in:

1. Contromisure elettroniche all'attivazione di IED remoti - *JAMMER*;
2. *Sniffer* di esplosivi: sensori ottici e basati su rilevatori di campi magnetici tipici degli esplosivi; rilevatori stand-off basati su tecnologia *Photo-Thermal Infrared Imaging Spectroscopy* e tecnologia laser.

Gli aspetti critici del payload risiedono nella capacità di essere imbarcati sull'UAV e nella possibilità di adoperarli anche con volo radente.

Un altro scenario tipico (scenario 2) è rappresentato in Figura 2.3, esso interessa la bonifica di un terreno minato delimitato, sia in ambito militare che umanitario. In questo caso la GS è stazionaria mentre l'UAV è in movimento, effettuando una scansione dell'area da monitorare durante lo spostamento.

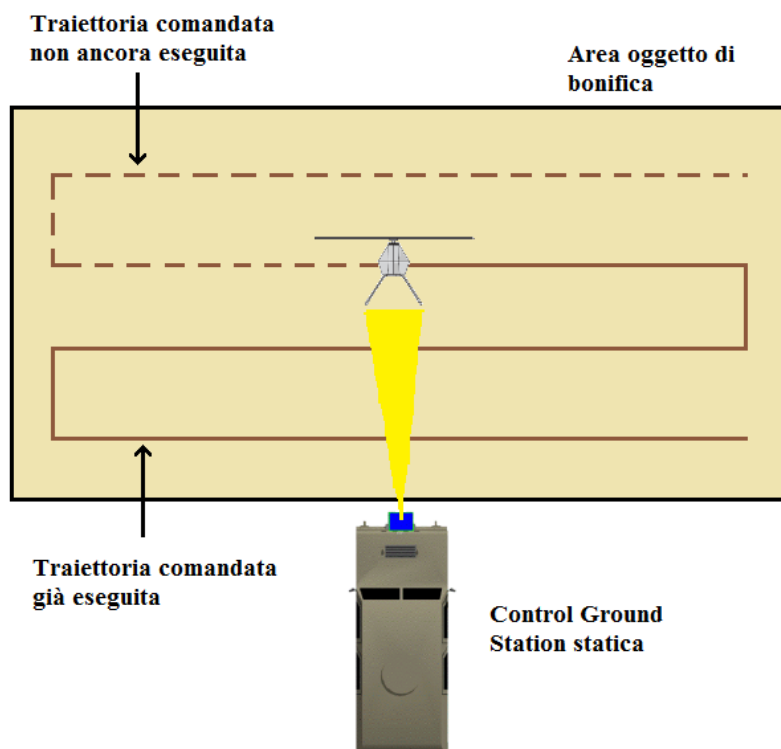


Figura 2.3: Schema scenario 2: GS stazionaria e UAV in scansione.

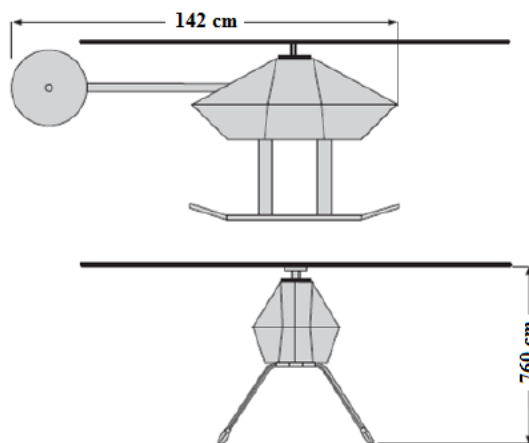
Per questa tipologia di scenario è necessario che a bordo dell'UAV siano installati nuovi sensori oltre a quelli descritti precedentemente, che sono:

1. Metal detector;
2. Sistemi acustici direttivi;
3. Vibrometri laser.

Per ogni tipologia di missione vengono aggiornati i parametri della traiettoria dell'UAV, rappresentati in Figura 2.1 che sono:

- Altezza da Terra (H) per ottimizzare l'impronta a terra del sensore;
- Angolo della traiettoria (β) al fine di percorrere la giusta traiettoria;
- Velocità (V) o Distanza Relativa (D) per consentire alla piattaforma UAV di permanere in ciascuna posizione il tempo necessario per avere un preciso feedback dal sensore di missione.

Le dimensioni e le caratteristiche dell'UAV sono riportate in Figura 2.4.



| | |
|---------------------|---|
| Max take-off weight | 12 Kg |
| Payload weight | 2 Kg |
| Length | 1700 mm |
| Rotor span | 1560 mm |
| Overall height | 760 mm |
| Propulsion | brushless motor |
| Batteries | Li-Po |
| Max speed | 90 Km/h |
| Endurance | 35 min |
| Operational range | 5 Km (standard) 10 Km (no real time video) |

Figura 2.4: Caratteristiche tecniche dell'UAV dell'azienda *Finmeccanica Divisione Sistemi di Difesa*.

2.2 Piattaforme IMU

L'UAV ed il rover ospitano a bordo anche delle piattaforme IMU (*Inertial Measurement Unit*), precisamente una è posizionata frontalmente rispetto alla GS mentre l'altra si trova sotto l'UAV. In Figura 2.5 si osserva il posizionamento delle piattaforme IMU:

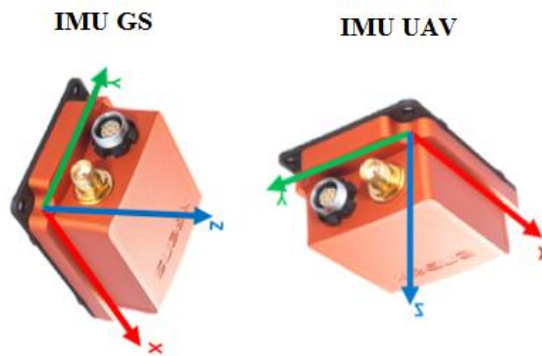


Figura 2.5: Piattaforme IMU ubicate a bordo del rover e dell'UAV.

Le piattaforme IMU consentono di misurare gli angoli di rotazione $[\alpha, \beta, \gamma]$, ovvero di *yaw*, *pitch* e *roll* (imbardata, beccheggio e rollio), della GS e dell'UAV, misurati rispetto al sistema di riferimento inerziale che verrà introdotto nel seguito. Nella figura sottostante, Figura 2.6, sono rappresentati gli angoli di inclinazione precedentemente citati, dovuti alla rotazione della piattaforma IMU-GS. Il sistema di riferimento che utilizzeremo per la rappresentazione dei risultati è quello solidale con il rover, quindi sarà soggetto ad una rotazione e ad una traslazione a seconda delle dinamiche che interessano la GS. Di conseguenza, nel medesimo sistema di riferimento, i sensori conservano la loro posizione nel tempo.

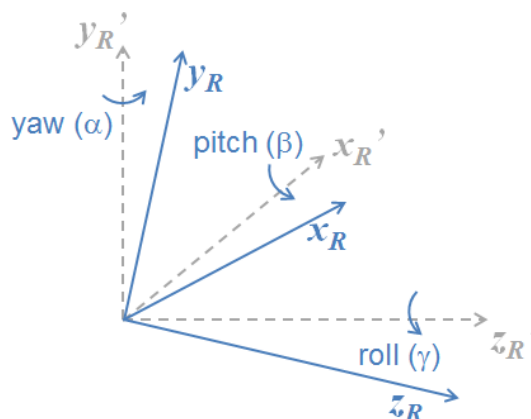


Figura 2.6: Angoli di Yaw, Pitch e Roll piattaforma IMU-GS e rotazione del Sistema di Riferimento locale GS.

Inoltre, queste piattaforme, o giroscopi, permettono di misurare il vettore velocità dei mezzi sui quali sono ubicate. Di seguito, in Figura 2.7, sono riportate le specifiche relative ad alcuni modelli. In rosso sono racchiuse quelle che riteniamo siano le più importanti, ovvero gli errori introdotti dallo strumento nella misura degli angoli di rotazione e della velocità per il modello MTi-G-700.

| | | MTi-20 VRU | | MTi-30 AHRS | | MTi-200 VRU | | MTi-300 AHRS | | MTi-G-700 GPS/INS | |
|------------|---------|---------------|------|----------------|------|----------------|------|-----------------|------|----------------------|-------|
| | | Typ | Max | Typ | Max | Typ | Max | Typ | Max | Typ | Max |
| Roll/Pitch | Static | 0.2° | 0.4° | 0.2° | 0.4° | 0.2° | 0.4° | 0.2° | 0.4° | 0.2° | 0.25° |
| | Dynamic | 0.5° | 2.0° | 0.5° | 2.0° | 0.5° | 2.0° | 0.3° | 1.0° | 0.5° | 1.0° |
| Yaw | | Unreferenced | | 1.0 | N/A | Unreferenced | | 1.0° | N/A | 1.0° | N/A |

| Parameter | Data source | Condition | Specification |
|-----------|---|------------|----------------|
| Position | AHRS augmented (400 Hz GPS/INS), SBAS | Horizontal | 1.0 m STD |
| | | Vertical | 2.0 m STD |
| | GPS receiver (4 Hz GPS navigation solution), SBAS | Horizontal | 2.0 m CEP |
| | | Vertical | 5.0 m CEP |
| Velocity | AHRS augmented (400 Hz GPS/INS) | @ 30 m/s | 0.1 m/s 1σ RMS |
| | GPS receiver (4 Hz GPS navigation solution) | @ 30 m/s | 0.1 m/s 1σ RMS |

Figura 2.7: Dati di precisione di alcuni giroscopi nella misura degli angoli di rotazione e della velocità.

La conoscenza dell'errore introdotto dalla piattaforma IMU-GS sugli angoli di rotazione, ovvero $\varepsilon_{GYRO} \in U(-1^\circ, 1^\circ)$, è di notevole importanza per la misura della corretta posizione dei sensori. In particolare quando il rover è in movimento, in presenza di terreno disconnesso potremmo avere degli angoli di rotazione della piattaforma diversi da zero ed affetti da errore. Siccome il problema è analizzato nel sistema di riferimento solidale con il rover, avere errori nulli sulla misura degli angoli ci consentirebbe di ruotare in forma ideale il sistema di riferimento. Per simulare gli effetti dell'errore introdotto dalla piattaforma IMU-GS sulla stima della posizione dell'UAV si possono utilizzare le misure delle posizioni dei sensori che risultano essere diverse da quelle vere a causa della presenza di ε_{GYRO} . Questo significa che la rappresentazione della posizione avviene in un sistema di riferimento che non è quello reale. Inoltre i *datasheet* presentano un errore di misura della velocità della piattaforma IMU con deviazione standard pari a 0.1 m/s. L'effetto sulla stima della posizione dell'UAV dovuto all'errore di misura degli angoli di rotazione non è stato valutato in questo lavoro di tesi.

2.3 Localizzazione: stato dell'arte

Diverse tecnologie vengono adottate per determinare la posizione di un target, alcune sono di tipo *vision-based* [9][10], ovvero basate su sistemi video. Questi sono dei sistemi passivi, motivo di forte vantaggio, ma le prestazioni dipendono fortemente dalle condizioni ambientali. Altre tecnologie sono basate su sistemi *Inertial Navigation System/Global Positioning System* (INS/GPS), in particolare in [11] si sfrutta il filtraggio non lineare di tipo *State-Dependent Riccati Equation* (SDRE), mentre [12] espone un Filtro di Kalman Esteso (EKF) per stimare la posizione dei droni quando la connessione GPS è persa, conoscendo la distanza inter-UAV (*inter - Unmanned Aerials Vehicle*). [13] descrive una tecnica GPS basata sul *Time Difference Of Arrival* (TDOA) utilizzando un algoritmo di tipo Dual-EKF per ottenere una soluzione robusta in presenza di componenti non lineari di rumore. Per calcolare la differenza di tempo nel TDOA, è richiesta la sincronizzazione tra le stazioni base, ma [14] presenta una soluzione efficiente che la evita. Comunque il sistema GPS è soggetto a interruzioni e interferenze, quindi il posizionamento ottenuto non è sufficientemente accurato. [15] definisce un sistema di localizzazione di un robot di trasporto utilizzando la tecnologia *IEEE 802.15.4a* e telemetri laser, usati per rilevare punti di riferimento e per assistere le manovre fornendo massima precisione. Una delle specifiche di *IEEE 802.15.4a* riguarda l'*Ultra Wide Band* (UWB), in [16] è descritta una tecnica di localizzazione dove viene sfruttato il segnale riflesso dal bersaglio. I sensori sono costituiti da un array lineare di due ricevitori e un'antenna trasmittente situata in mezzo a loro; le antenne sono collegate ad un singolo modulo UWB, rendendo i sensori in grado di localizzare il target in modo autonomo, questa soluzione non necessita di alcuna sincronizzazione diretta tra i sensori. Sono presenti altre soluzioni UWB, [17] presenta un sistema radar UWB multistatico basato su *Particle Filter* (PF), composto da un trasmettitore e diversi ricevitori tipicamente distribuiti sul perimetro di un'area; tutti i segnali ricevuti confluiscono in un nodo centrale. La tecnologia UWB rappresenta una valida alternativa ai sistemi di localizzazione precedentemente esposti, consentendo di garantire elevate prestazioni, oltre che bassi costi e basse potenze trasmesse [18].

Il *Global Positioning System* (GPS) è una delle tecnologie più note, che utilizza sistemi satellitari per la localizzazione. E' stato concepito come un sistema che a partire dalle posizioni note dei satelliti in orbita si arrivi alle posizioni sconosciute a terra, in mare, e nello spazio di un oggetto. Per questi sistemi, il segnale del satellite è continuamente contrassegnato con il proprio tempo di trasmissione, in modo che quando giunge al ricevitore si possa valutare il periodo di propagazione del segnale, misurato con un ricevitore sincronizzato [19]. Gli obiettivi originari

del GPS riguardavano la determinazione della posizione istantanea e velocità, nonché la navigazione, di un mezzo dotato di ricevitore satellitare. La tecnica implementata in questo progetto segue le linee adottate dal GPS, ma con la diversità nella geometria e nel fatto che i segnali trasmessi non siano contrassegnati dal tempo di trasmissione e che quindi sia necessario un segnale di risposta. Inoltre non è previsto alcun segnale di sincronismo tra le stazioni UWB.

2.4 Idea di Base per la Localizzazione dell'UAV

In questo sottocapitolo è presentata l'idea di base di localizzazione dell'UAV. Come descritto nei precedenti capitoli, la stima della posizione di un oggetto può essere ottenuta in diversi modi a partire da conoscenze che riguardano, ad esempio, la direzione di individuazione dell'oggetto da parte di determinati sensori come avviene per la tecnica AOA, o la conoscenza della distanza tra essi e l'oggetto in esame che interessa la tecnica TOA. Se si conoscono le posizioni vere dei sensori e le misure di distanza tra essi e l'UAV si può pensare di adottare la tecnica di multilaterazione che prevede l'intersezione tra sfere. Per ottenere una stima tridimensionale della posizione del drone, ovvero nello spazio, è necessario che siano presenti almeno quattro sensori che misurino la distanza. In Figura 2.8 vi è un esempio di intersezione tra sfere per localizzare un oggetto nello spazio, come avviene per il GPS.

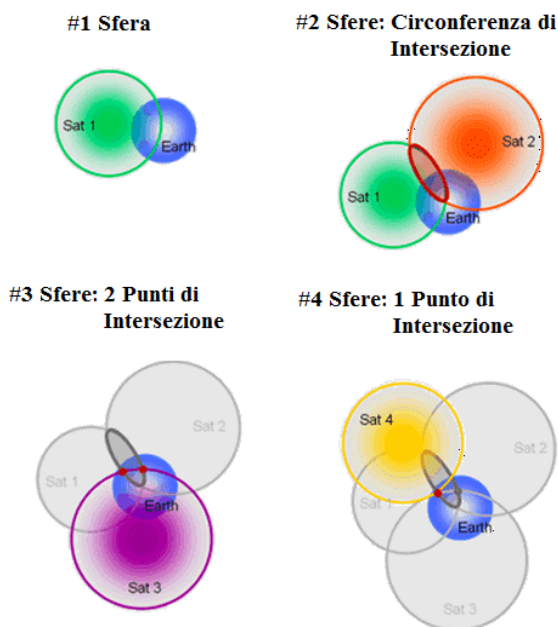


Figura 2.8: Esempio di intersezione tra sfere per stimare la posizione di un oggetto nello spazio 3D.

In Figura 2.8 si osserva che sono necessarie almeno quattro sfere per ottenere un punto di intersezione, questo significa che il numero di sensori UWB, ovvero i centri di queste sfere, deve essere maggiore o uguale a quattro. I raggi delle sfere sono identificati dalle distanze che separano l'UAV dai sensori. E' altresì possibile utilizzare un numero pari a tre sensori, purché sia disponibile un sensore a bordo dell'UAV che stimi una delle tre coordinate spaziali, come la quota ad esempio, misurata da un altimetro.

In realtà l'UAV è provvisto di sistemi per la misura della quota, ma questo progetto si svincola da dati possibilmente forniti da altre fonti. Nel settore commerciale, tipicamente, si preferisce valutare la posizione di robot in ambienti chiusi senza preoccuparsi di stimare tutte le coordinate spaziali in quanto questi si muovono su un piano. Questo potrebbe permettere di ridurre il numero di sensori da un minimo di quattro ad un minimo di tre, risparmiando sui dispositivi utilizzati.

L'errore sulla distanza influenza la stima della posizione dell'UAV in quanto le sfere non si intersecano in un punto, bensì in un volume. Il problema può essere facilmente comprensibile se si analizzasse il caso bidimensionale, dove si avrebbe un'area di sovrapposizione. In Figura 2.9 è riportato un esempio di trilaterazione con rumorosità della distanza, la curva continua rappresenta la circonferenza ideale, ovvero quella ottenuta in assenza di errore, mentre quelle a tratteggio costituiscono i limiti inferiori e superiori di distanza dovuti all'errore, che può assumere un valore all'interno di un certo range con assegnata probabilità. Il risultato dell'intersezione non è un punto, ma un'area, evidenziata in giallo, quindi a seconda dell'algoritmo di risoluzione del sistema potremmo avere una stima della posizione più o meno accurata.

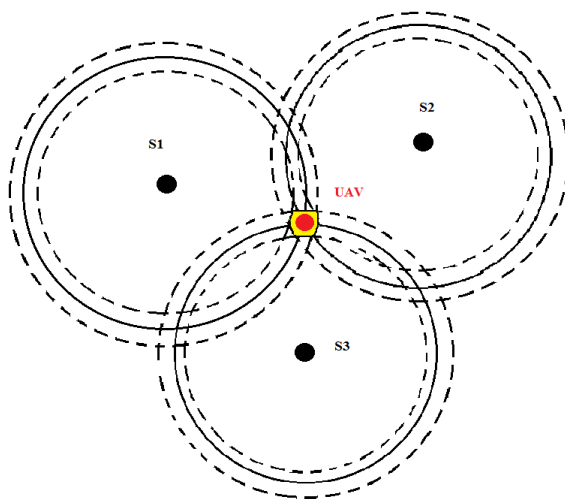


Figura 2.9: Esempio di trilaterazione sul piano in presenza di errore sulla distanza.

Nel caso tridimensionale il discorso è del tutto analogo salvo considerare una regione volumetrica di intersezione. Un aspetto molto importante da sottolineare è legato alla distanza tra i sensori (ancore o centri) e l'UAV. I sensori, come vedremo più avanti, ubicati a bordo del rover, sono posizionati prevalentemente in una regione spaziale, quindi non equispaziati intorno all'UAV, e questo fa sì che le sfere siano *tangenti*. In presenza di errore UWB, all'aumentare della distanza aumenta il volume di intersezione. In Figura 2.10a vi è un esempio di multilaterazione per una particolare posizione dell'UAV e configurazione dei sensori, introducendo il rumore sulla distanza. A causa dell'aleatorietà della misura, la regione di sovrapposizione, volumetto cerchiato in rosso in Figura 2.10b, può essere più o meno grande ed estendersi maggiormente quanto più aumenta la distanza. Questo effetto di allungamento è prettamente aleatorio, se si ripetesse la simulazione si otterrebbe una nuova regione, ma le dimensioni aumenterebbero ugualmente con la distanza. La distanza tra i sensori e l'UAV è di fondamentale importanza se si considera l'errore introdotto dai moduli UWB, motivo per cui è bene definire un range di distanze entro cui far muovere l'UAV in modo da garantire errori di stima mediamente bassi.

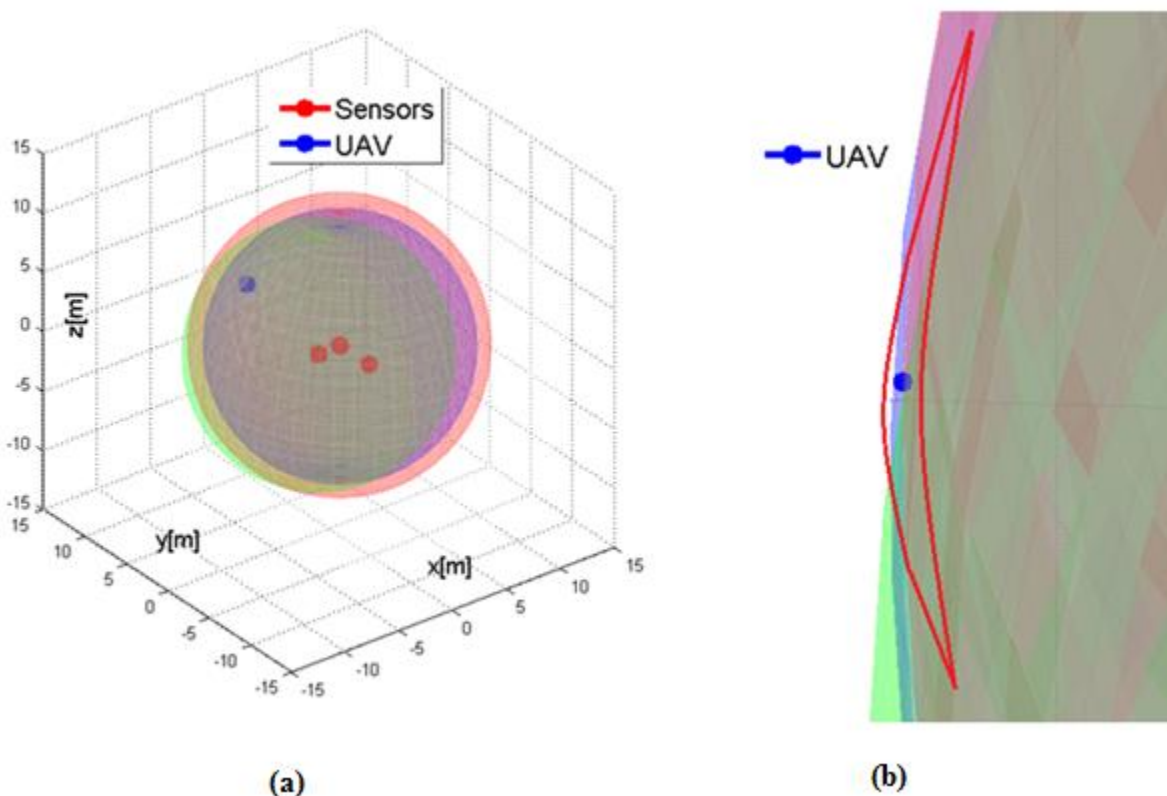


Figura 2.10: (a) Esempio di multilaterazione nello spazio; (b) Regione di intersezione delle sfere.

CAPITOLO 3

ALGORITMO DI MULTILATERAZIONE ED EFFETTO DEL RITARDO UWB

In questo capitolo sono introdotte le configurazioni dei sensori a bordo del rover, la caratterizzazione dei moduli UWB e la valutazione delle prestazioni di due algoritmi di multilaterazione. Successivamente è mostrato particolare attenzione all'effetto del ritardo temporale con cui i sensori effettuano la misura della distanza.

3.1 Sistemi di Riferimento

Conviene a questo punto richiamare la geometria del problema, e fissare i sistemi di riferimento considerati. Nelle simulazioni sono stati considerati tre differenti sistemi di riferimento:

- **Sistema di riferimento R (ROVER).** Questo sistema è una terna ortogonale destrorsa solidale con il rover. L'origine è posizionato sulla prua del rover, l'asse z_R è un'asse orizzontale orientato lungo la direzione di marcia del rover. L'asse y_R è un'asse verticale orientato con verso positivo verso l'alto, e l'asse x_R deriva di conseguenza. Tale sistema è utilizzato per rappresentare i risultati delle simulazioni in termini di traiettorie e di errori di stima.

- **Sistema di riferimento U (UAV).** Questo sistema è una terna ortogonale destrogira solidale con l'UAV. L'origine è posizionato nel baricentro dell'UAV. L'asse x_U è un'asse orientato lungo la direzione di prora dell'UAV. L'asse z_U è un asse orientato verso il basso, e l'asse y_U deriva di conseguenza. Tale sistema è utilizzato per la definizione del vettore velocità nel tempo dell'UAV.
- **Sistema di riferimento I (INERZIALE).** Questo sistema è una terna ortogonale destrogira solidale con il terreno (e quindi con la mappa). L'origine coincide con quello del sistema rover nella posizione iniziale, prima cioè che il rover inizi a muoversi. Nelle medesime condizioni coincidono gli assi $y_I = z_R$ e $z_I = y_R$, x_I viene di conseguenza. Tale sistema sarebbe quello che vedrebbe un osservatore esterno, ma ha poco significato adottarlo in quanto non hanno importanza gli spostamenti assoluti, bensì quelli relativi GS-UAV.

In Figura 3.1 sono riportati i sistemi di riferimento precedentemente descritti.

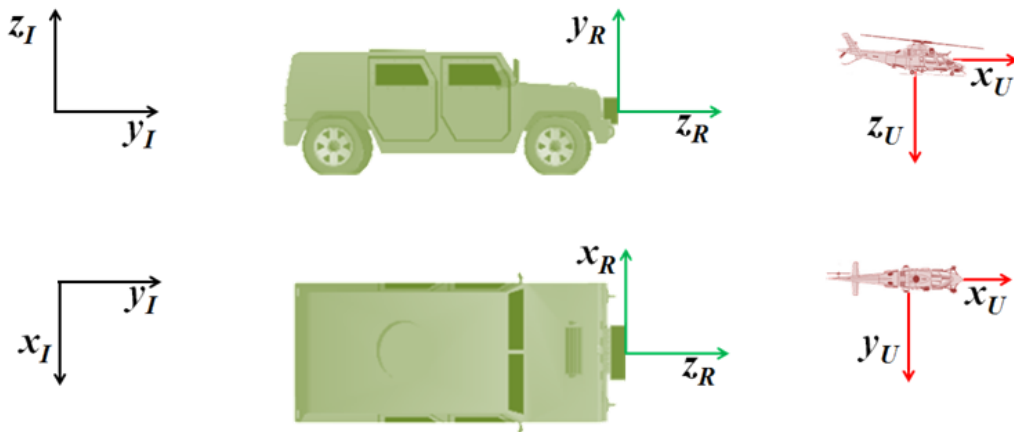


Figura 3.1: Sistemi di Riferimento Inerziale, Locale Rover, Locale UAV.

3.2 Configurazioni dei Sensori UWB

Da un'analisi preliminare svolta nella scelta della configurazione dei sensori, è emerso che conviene avere i sensori disposti in modo tale che almeno due siano allineati su un piano principale. A tal proposito, sono state analizzate le seguenti configurazioni di sensori, rappresentate in Figura 3.2. I sensori sono ubicati a bordo del rover, definiti nel sistema di coordinate locale, ovvero centrato a prua della GS.

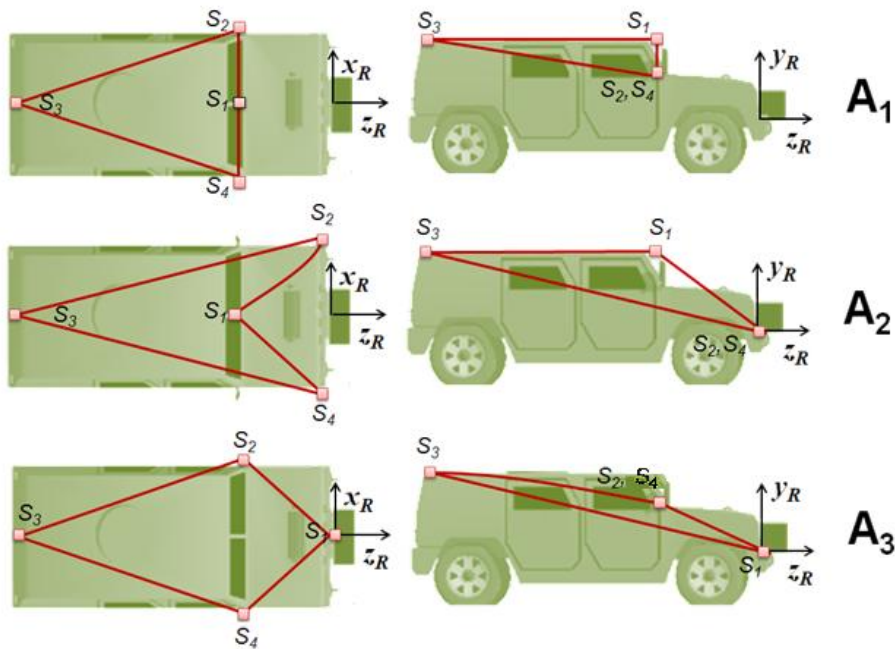


Figura 3.2: Configurazioni dei sensori A1, A2 e A3.

I sensori hanno le seguenti coordinate (3.1):

$$\underline{S}_{A_1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1.2 \\ 1 & 0.5 & -1.2 \\ 0 & 1 & -4.8 \\ -1 & 0.5 & -1.2 \end{pmatrix} m, \quad \underline{S}_{A_2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1.2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4.8 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} m, \quad \underline{S}_{A_3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & -1.2 \\ 0 & 1 & -4.8 \\ -1 & 0.5 & -1.2 \end{pmatrix} m \quad (3.1)$$

Le posizioni dei sensori, ossia dei centri delle sfere, sono note a priori.

3.3 Caratterizzazione dei Sensori UWB

In passato è stata effettuata la caratterizzazione dei sensori UWB presso lo stesso Dipartimento di Ingegneria. In riferimento al lavoro in questione [20], questo progetto tende ad estrarre i parametri essenziali dei sensori per l'implementazione dell'algoritmo, come gli errori nella misura della distanza ed il ritardo con cui viene effettuata. Per la campagna sperimentale di misure sono stati impiegati dei sensori UWB *PulsON 400* della *Time Domain*, questi garantiscono performance eccellenti. Un sensore può interrogare un altro sensore e dalla sua risposta, calcolando il tempo di volo (Time of Flight), è in grado di stimare la distanza a cui si trova.

La tecnica adottata è la *Time Of Arrivals Two Way Time Of Flight*, che può essere riassunta nei seguenti passaggi:

- Il sensore che vuole misurare la distanza (*Requester*) invia una serie di impulsi (pseudorandom);
- Il sensore ricevente (*Responder*) riceve il segnale e lo demodula, successivamente, in un momento preciso, trasmette un pacchetto di risposta;
- Il sensore richiedente calcola il ritardo di tempo preciso dalla trasmissione del pacchetto di richiesta e la ricezione dello stesso, sottraendoci alcuni offset temporali noti. Dividendo questo numero per 2 e moltiplicando per la velocità della luce si ottiene la distanza tra i sensori.

Uno schema rappresentativo della tecnica adottata è in Figura 3.3:



Figura 3.3: Trasmissione dei pacchetti necessari per la misura della distanza secondo la tecnica TW-TOF [20].

In Figura 3.4 sono riportati il modulo hardware e l'antenna relativi al PulsON 400.



Figura 3.4: Modulo Hardware ed Antenna Broadspec P200 del sensore PulsON 400 RCM [20].

Le misure sperimentali sono state eseguite all'esterno del dipartimento, con i sensori posizionati in linea di vista (*Line of Sight*, LOS) e le antenne in adattamento di polarizzazione. La caratterizzazione è stata eseguita al variare dei seguenti parametri: *Pulse Integration Index* (PII), dove 2^{PII} rappresenta il numero di impulsi trasmessi per simbolo; *Transmit Gain* (TG), che individua l'indice legato alla potenza di trasmissione.

Estraendo la funzione di distribuzione di probabilità dell'errore sulla distanza misurata, è possibile vedere come l'andamento sia approssimabile a quello di una funzione di distribuzione di probabilità di una variabile aleatoria gaussiana standard a valor medio nullo e deviazione standard σ_{UWB} . In Figura 3.5 è rappresentato l'andamento della funzione distribuzione di probabilità dell'errore sulla distanza misurata per i seguenti valori: $d=25$ m, $TG=63$, $PII=4$. Questa funzione è stata ottenuta considerando un numero pari a 200 campioni.

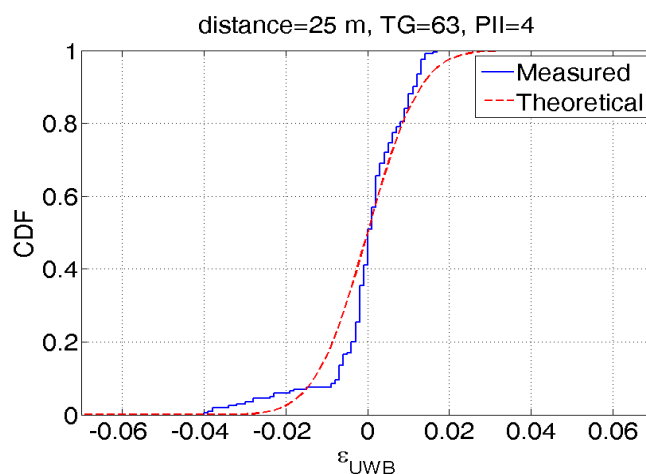


Figura 3.5: Funzione distribuzione di probabilità dell'errore sulla distanza misurata nelle condizioni: $d=25$ m, $TG=63$, $PII=4$.

Dalla campagna di misure è emerso che:

- In condizioni statiche e di LOS, l'errore di misura della distanza eseguita dal sensore UWB è caratterizzabile come una *variabile aleatoria gaussiana standard*, ovvero è valida la seguente definizione: $\varepsilon_{UWB} \in N(0, \sigma_{UWB}^2)$;
- Per distanze fino a 88 m, l'utilizzo di PII=6 e della potenza massima pari a 1.62 mW (TG=63), consente di ottenere un buon rapporto segnale-rumore e i seguenti valori dei parametri: deviazione standard della misura di distanza $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$; intervallo temporale per eseguire la singola misura $\Delta t_{UWB} < 13 \text{ ms}$.

In Tabella 3.1 sono riportati i valori di PII da garantire per una determinata distanza massima, con i relativi data rate ed in particolare i ritardi necessari per la misura. Si è dimostrato che all'aumentare della distanza tra i sensori, per ottenere un buon rapporto segnale-rumore è necessario aumentare il valore del PII, questo però provoca un aumento del ritardo temporale UWB. Come vedremo, il ritardo temporale UWB inciderà fortemente sulla stima della posizione dell'UAV nel caso in cui siano presenti delle velocità relative tra la GS e l'UAV stesso. Per le simulazioni si utilizzerà $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, in modo da garantire buoni rapporti segnale-rumore per distanze non superiori a 88 m.

| <i>PII</i> | <i>Max Range (meters)</i> | <i>Data rate: (bps)</i> | <i>Precision Range Measurement (time, rate)</i> |
|------------|---------------------------|-------------------------|---|
| 4 | 35 | 632k | 6.5 ms, 154 Hz |
| 5 | 60 | 316k | 8.5 ms, 118 Hz |
| 6 | 88 | 158k | 12.5 ms, 80 Hz |
| 7 | 125 | 79k | 20 ms, 50 Hz |
| 8 | 177 | 39.5k | 36 ms, 28 Hz |
| 9 | 250 | 19.7k | 67 ms, 15 Hz |
| 10 | 354 | 9.86k | 132 ms, 8 Hz |

Tabella 3.1: PII, Distanza Massima, Rate Informativo e Ritardo di Misura per il sensore UWB P400 RCM [20].

I sensori, posizionati in punti le cui coordinate sono note a priori, costituiscono i centri delle sfere da intersecare, e rappresentano i *Requester*. E' quindi necessario che a bordo dell'UAV sia installato un ulteriore sensore UWB (per un totale di 5 sensori UWB), con la funzione di *Responder*. Questa scelta ci consente di effettuare l'elaborazione a bordo del rover.

3.4 Scelta dell'Algoritmo di Multilaterazione

Questo sottoparagrafo introduce il motivo per il quale si sia adottato il metodo iterativo di Levenberg-Maquardt come algoritmo di multilaterazione. Di seguito, in Figura 3.7, sono riportati i risultati degli errori di stima assoluti medi supponendo di avere sei possibili posizioni dell'UAV per le tre configurazioni dei sensori (A1, A2, A3), come mostrato in Figura 3.6, per la quale si è usata la sola configurazione A2. Le posizioni dell'UAV, definite nel sistema di riferimento locale rover, sono le seguenti:

$$p_{UAV-1R} = (0 \quad 1 \quad 5) m, p_{UAV-2R} = (-1 \quad 0.5 \quad 6) m, p_{UAV-3R} = (-0.5 \quad 1.5 \quad 10) m, \\ p_{UAV-4R} = (0.5 \quad 2 \quad 12) m, p_{UAV-5R} = (-2 \quad 2.5 \quad 15) m, p_{UAV-6R} = (-1.5 \quad 3 \quad 20) m.$$

Il problema di multilaterazione è descritto dalla relazione (3.2).

$$\begin{cases} (x_{S_1} - x_{UAV})^2 + (y_{S_1} - y_{UAV})^2 + (z_{S_1} - z_{UAV})^2 = r_1^2 \\ (x_{S_2} - x_{UAV})^2 + (y_{S_2} - y_{UAV})^2 + (z_{S_2} - z_{UAV})^2 = r_2^2 \\ (x_{S_3} - x_{UAV})^2 + (y_{S_3} - y_{UAV})^2 + (z_{S_3} - z_{UAV})^2 = r_3^2 \\ (x_{S_4} - x_{UAV})^2 + (y_{S_4} - y_{UAV})^2 + (z_{S_4} - z_{UAV})^2 = r_4^2 \end{cases} \quad (3.2)$$

Dove $[x_{S_i}, y_{S_i}, z_{S_i}]$ per $i = 1, \dots, 4$ rappresentano le coordinate dei sensori, r_i le distanze che separano l' i -esimo sensore dall'UAV, affette da errore gaussiano a valor medio nullo e deviazione standard $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$, mentre $[x_{UAV}, y_{UAV}, z_{UAV}]$ le coordinate dell'UAV da stimare.

Sono rappresentati gli errori medi assoluti delle coordinate $[x_{UAV}, y_{UAV}, \hat{z}_{UAV}]$ per due differenti algoritmi di multilaterazione, l'algoritmo Least Square Method (LSM) e l'algoritmo iterativo di Levenberg-Marquardt (LMA), introdotti in appendice, per le configurazioni dei sensori proposte. In presenza di perturbazioni sulla distanza misurata, l'algoritmo iterativo è mediamente più accurato, inoltre *la configurazione che minimizza l'errore medio di stima è la A2*. L'errore medio di stima su tutte le coordinate risulta essere pari a 14 cm per LSM, mentre decresce a 8 cm per LMA.

Di conseguenza, il seguente progetto sposa il metodo di *Levenberg-Marquardt* come algoritmo di stima della posizione dell'UAV, per motivi legati alla miglior convergenza in condizioni affette da errori.

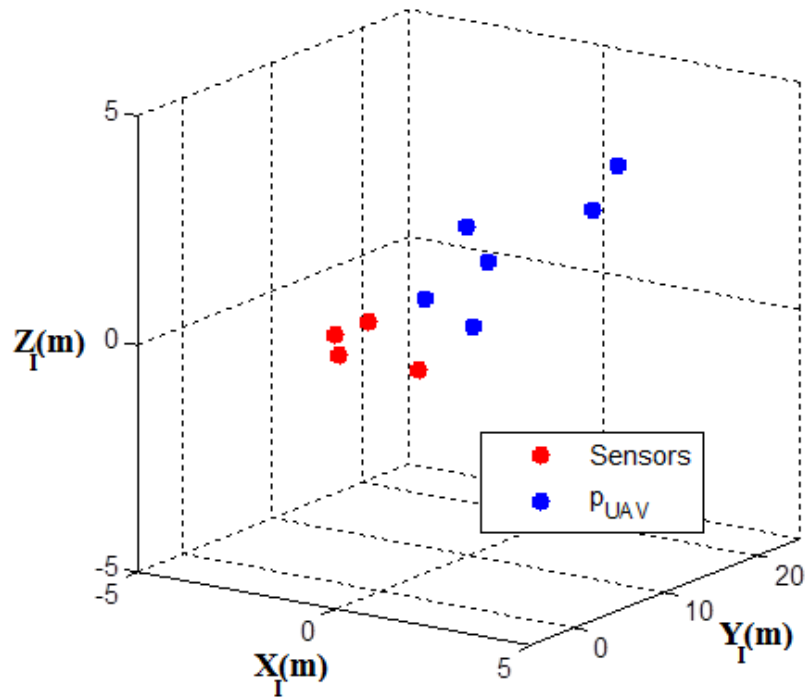
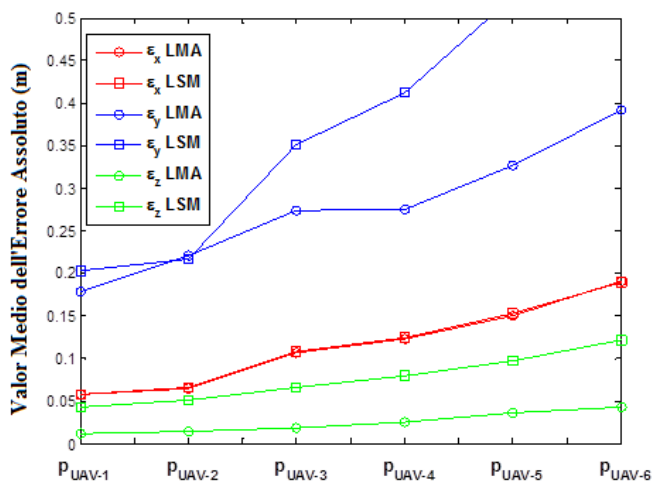
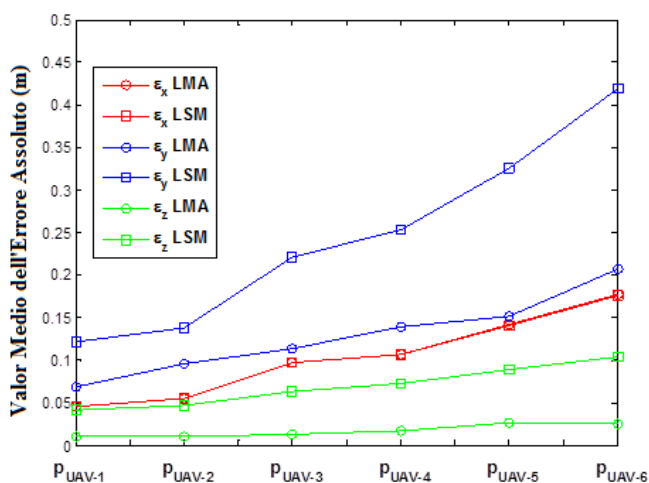


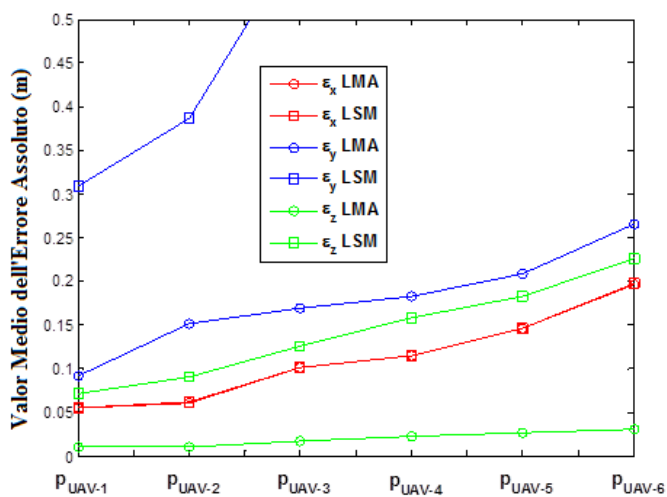
Figura 3.6: Plot 3D di sei possibili posizioni dell'UAV in configurazione A2.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7: Valor medio dell'errore assoluto medio di stima della posizione dell'UAV per sei diverse posizioni considerando l'algoritmo LSM (marker quadrati) e l'algoritmo LMA (marker circolari) per (a) la Configurazione A1 dei sensori, (b) la Configurazione A2 e (c) la Configurazione A3.

3.5 Ritardo UWB

Una volta definito l'algoritmo di multilaterazione, ossia il cuore del sistema di localizzazione, si introducono gli effetti sulla stima della posizione dell'UAV dovuti al ritardo UWB con il quale i sensori misurano la distanza. Nel precedente paragrafo si era determinato che era necessario un ritardo pari a $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$ per stimare la distanza tra due sensori UWB posti ad una distanza massima pari a 88 m. Il problema di localizzazione è stato definito nel sistema di riferimento locale rover, quindi gli spostamenti rilevanti sono quelli relativi GS-UAV e non assoluti. Ogni sensore effettua la stima della distanza dell'UAV ogni 13 ms in modo sequenziale, dove come vedremo più avanti, conta l'ordine oltre che la configurazione dei sensori. Se sono presenti delle velocità relative GS-UAV, ad esempio l'UAV è in allontanamento o in avvicinamento rispetto alla GS, oppure effettua una scansione sinusoidale con la GS stazionaria, l'effetto del ritardo UWB è di notevole importanza.

In Figura 3.8 è rappresentato uno schema esemplificativo di quello che accade quando l'UAV è in moto relativo rispetto alla GS. Supponendo che il sensore S_1 sia il primo a stimare la distanza dell'UAV, questa è relativa alla posizione del drone al tempo t_1 . Dopo un tempo pari al ritardo UWB interviene il secondo sensore nella misura della distanza, supponiamo che sia S_2 , siccome l'UAV si è spostato rispetto alla posizione occupata all'istante precedente, esso effettua una misura di distanza relativa alla posizione dell'UAV all'istante t_2 . Valgono le medesime condizioni per la stima della distanza da parte degli altri sensori.

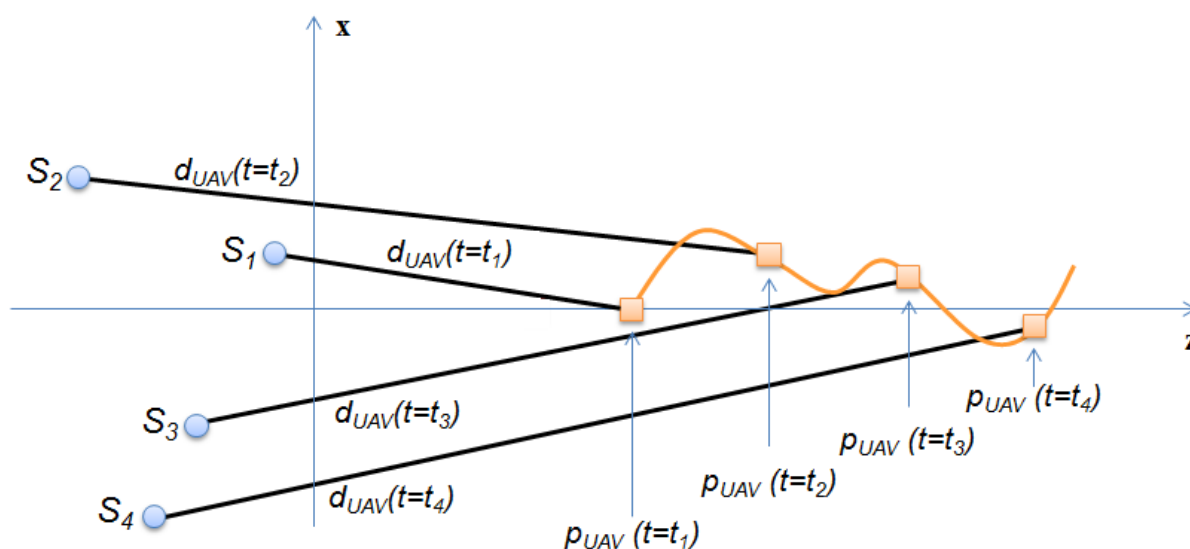


Figura 3.8: Schema esemplificativo del moto relativo dell'UAV rispetto alla GS e delle distanze relative al variare della posizione dell'UAV.

Sebbene i sensori siano nelle stesse posizioni per tutto il tempo in quanto lo studio è nel sistema di riferimento locale rover, lo stesso non si può dire per le posizioni dell'UAV negli intervalli temporali scanditi dal ritardo UWB. Intersecando le sfere si ottiene, analogamente all'effetto dell'errore sulla distanza introdotto dai sensori, un volume di sovrapposizione. A differenza del caso precedente, siccome gli spostamenti sono lineari nel tempo, istante per istante l'errore di stima della posizione dell'UAV introduce una polarizzazione nei dati, significa che è "poco ballerino". Questo effetto dipende fortemente dalla configurazione dei sensori e dall'ordine con cui essi stimano la distanza. Potremmo avere un errore su una particolare coordinata totalmente differente da quello che avremmo cambiando l'ordine. Per analizzare l'effetto del ritardo UWB sono state effettuate delle simulazioni per entrambi gli scenari, al variare della configurazione e dell'ordine.

3.5.1 Scenario 1: Moto Rettilineo

Per lo scenario 1 consideriamo un caso particolare, ovvero la GS e l'UAV sono entrambi in movimento rettilineo, con l'UAV ad una distanza fissata dalla GS. Supponiamo che l'UAV presenti una velocità relativa V_{Rel} di avanzamento diversa da zero e consideriamo un caso estremo di UAV in allontanamento con $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$. L'UAV è disposto frontalmente alla GS, inizialmente ad una distanza da essa pari a 20 m, ad una quota di 1 m. Quindi le coordinate iniziali dell'UAV risultano essere: $x_R = 0 \text{ m}$, $y_R = 1 \text{ m}$, $z_R = 20 \text{ m}$. La traiettoria dell'UAV nel sistema di riferimento locale rover è definita nella seguente relazione (3.3):

$$p_{UAV_R}(t) = (0 \quad 1 \quad 20 + tV_{Rel}) \text{ m} \quad (3.3)$$

Di seguito, dalla Figura 3.9 alla Figura 3.17 si riportano i risultati relativi ad una serie di simulazioni con un intervallo di osservazione pari a 10 secondi, considerando un ritardo $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$. Sono stati considerati 5 diversi ordini dei sensori, ovvero gli ordini [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2]. Con l'identificativo [#1 #2 #3 #4] si indica il "polling" di misura, in particolare #1 identifica il numero di intervalli temporali UWB necessari affinché il sensore S_1 effettui la misura della distanza. Ad esempio se si considera l'ordine [3 1 4 2], esso indica che il sensore S_1 è il terzo ad effettuare la misura, S_2 il primo, S_3 il quarto e S_4 il

secondo, ovvero l'ordine risulta essere $S_2 \rightarrow S_4 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3$. Per analizzare il solo effetto del ritardo UWB abbiamo trascurato l'errore sulla distanza misurata.

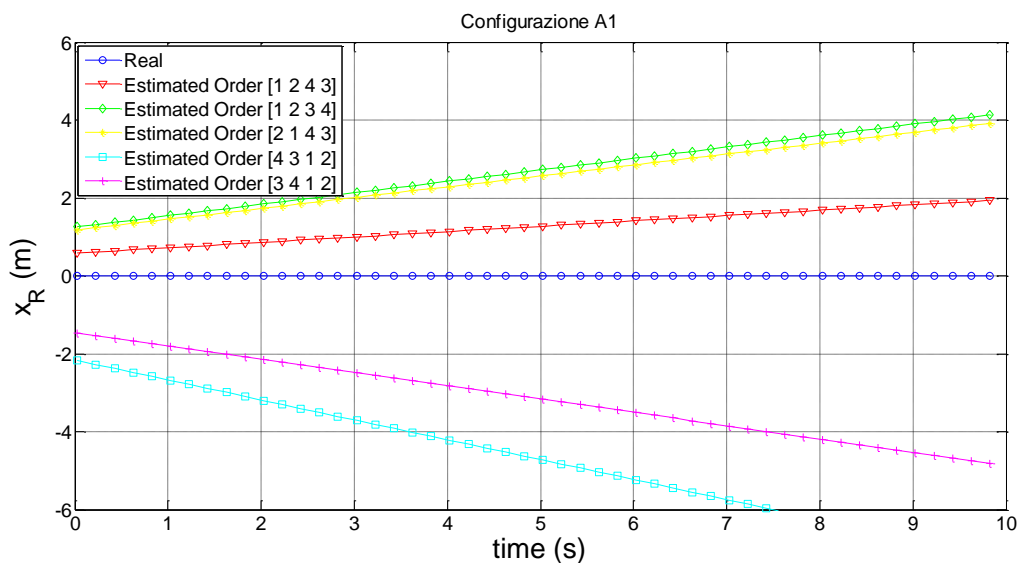


Figura 3.9: Stima della coordinata x_R dell'UAV per la configurazione A1 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

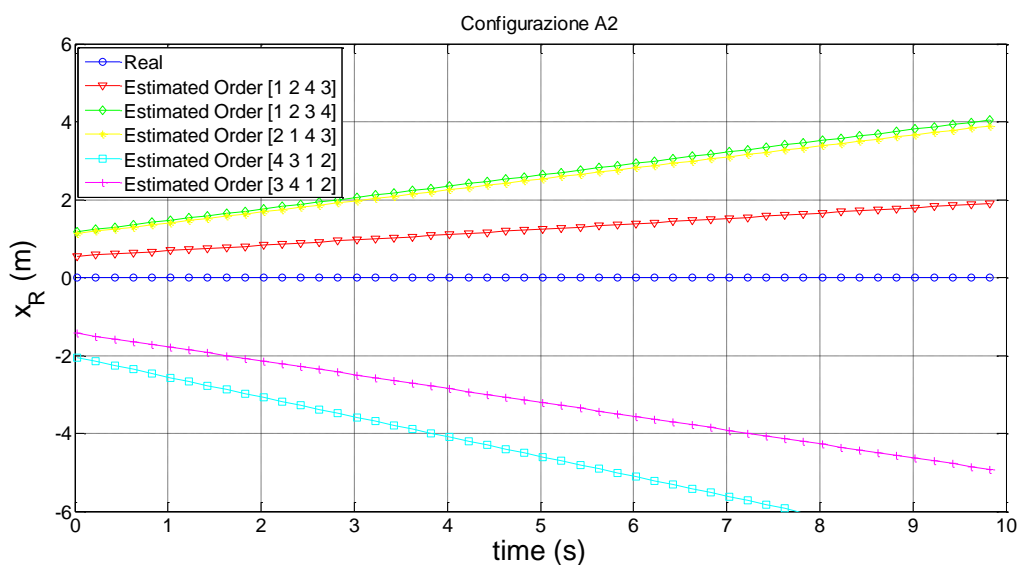


Figura 3.10: Stima della coordinata x_R dell'UAV per la configurazione A2 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

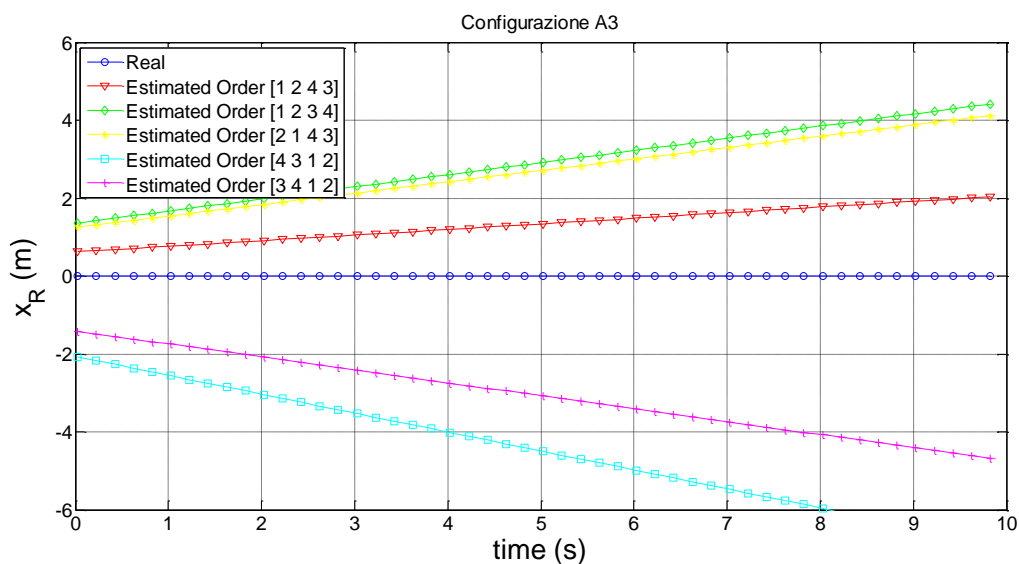


Figura 3.11: Stima della coordinata x_R dell'UAV per la configurazione A3 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

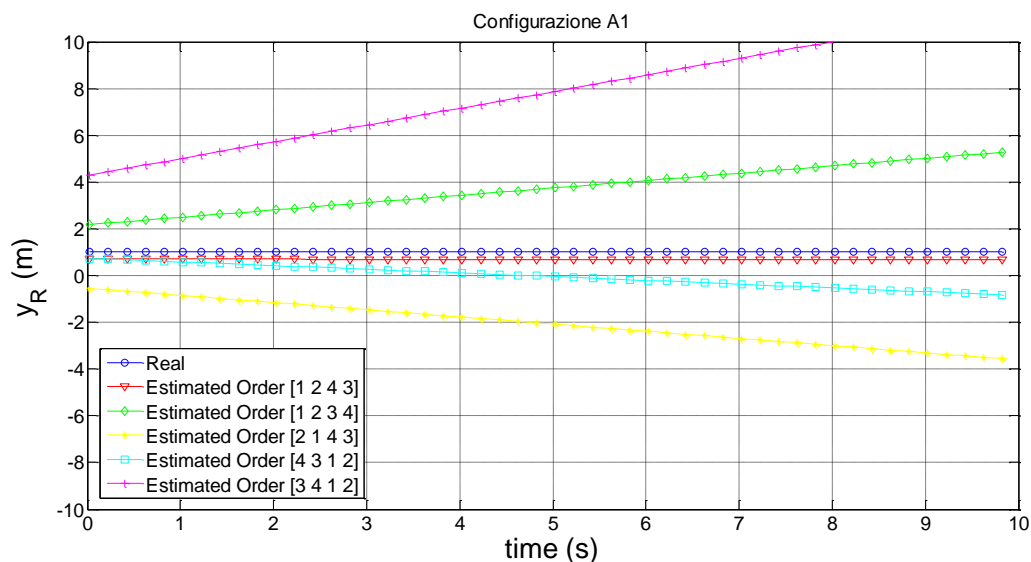


Figura 3.12: Stima della coordinata y_R dell'UAV per la configurazione A1 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

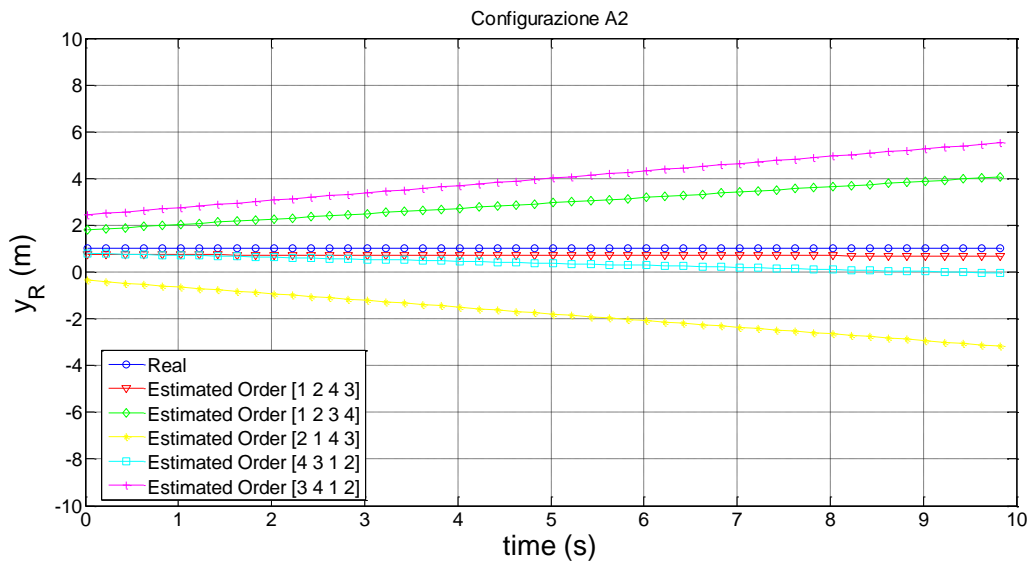


Figura 3.13: Stima della coordinata y_R dell'UAV per la configurazione A2 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

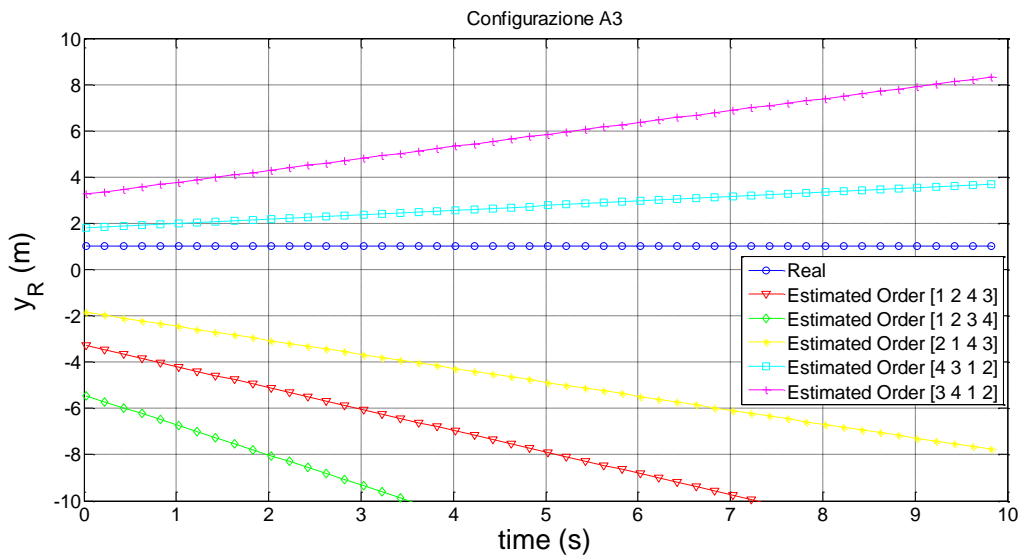


Figura 3.14: Stima della coordinata y_R dell'UAV per la configurazione A3 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

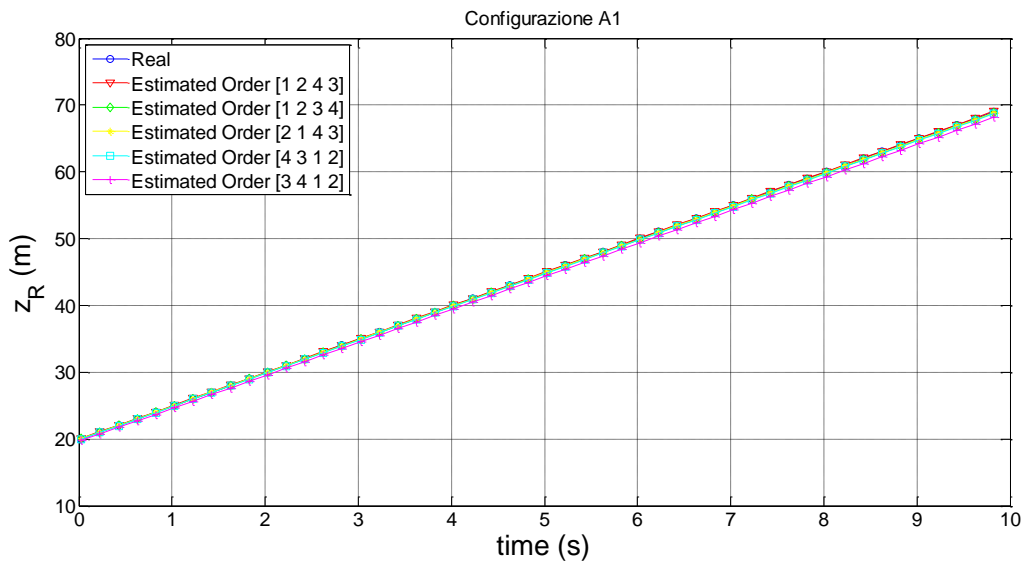


Figura 3.15: Stima della coordinata z_R dell'UAV per la configurazione A1 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

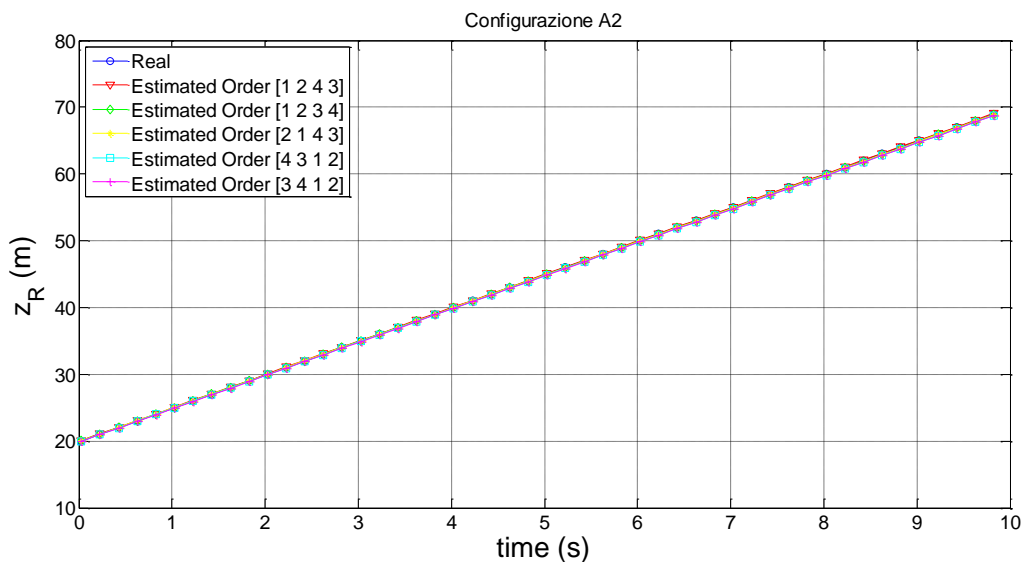


Figura 3.16: Stima della coordinata z_R dell'UAV per la configurazione A2 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

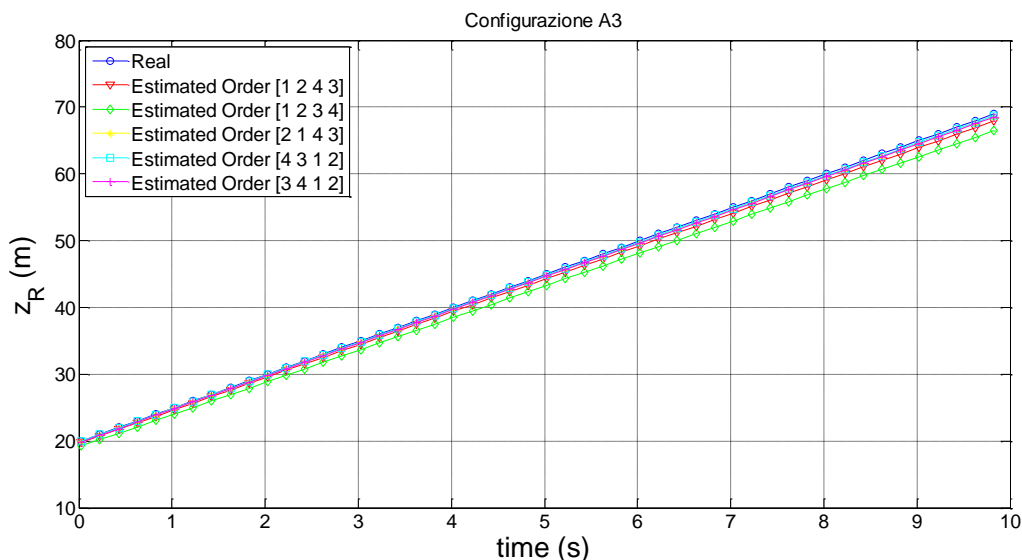


Figura 3.17: Stima della coordinata z_R dell'UAV per la configurazione A3 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

Si osserva un errore sulla stima della posizione che può essere dell'ordine del metro per le coordinate x_R e y_R . Come detto precedentemente, l'errore risulta essere lineare nel tempo in quanto il moto è rettilineo. Diverso è invece l'errore sulla coordinata z_R , che risulta essere dell'ordine di pochi centimetri. Questo ci porta ad una prima conclusione, ovvero che la stima della coordinata di avanzamento risulta essere quella più accurata. Se diminuisse la velocità relativa, gli effetti sarebbero vantaggiosi, cioè si osserverebbe una minore differenza tra le rette. Questo effetto è dovuto al fatto che le sfere non si intersecano in un punto, e all'aumentare della distanza GS-UAV la regione di sovrapposizione aumenta. Il fatto che le rette abbiano una pendenza differente dipende dall'ordine con cui i sensori misurano la distanza. Questo significa che ci sarà un ordine di interrogazione migliore di altri. Per questa tipologia di scenario, la configurazione migliore risulta essere la A2 con ordine [1 2 4 3], con un errore di stima sull'intera traiettoria minore di 0.5 m per la coordinata y_R , minore di 2 m per la coordinata x_R e tendente a zero per z_R . Questi valori però non rientrano nelle specifiche di progetto, dopo un certo intervallo l'errore di stima è talmente grande da indurre correzioni del moto inappropriate. Quindi occorre trovare una soluzione alternativa per compensare tale effetto.

In Figura 3.18 sono rappresentate le mappe del valore massimo dell'errore assoluto di stima rispettivamente sulle coordinate x_R, y_R, z_R . I risultati si sono ottenuti considerando una traiettoria che si estende da 20 m a 80 m, al variare del ritardo temporale UWB $\Delta t_{UWB} = [0, 20]$ ms, della velocità relativa di avanzamento $V_{Rel} = [0.25, 5.25]$ m/s, trascurando l'errore di misura della distanza. Tale figura si riferisce alla configurazione A2 con ordine [1 2 4 3].

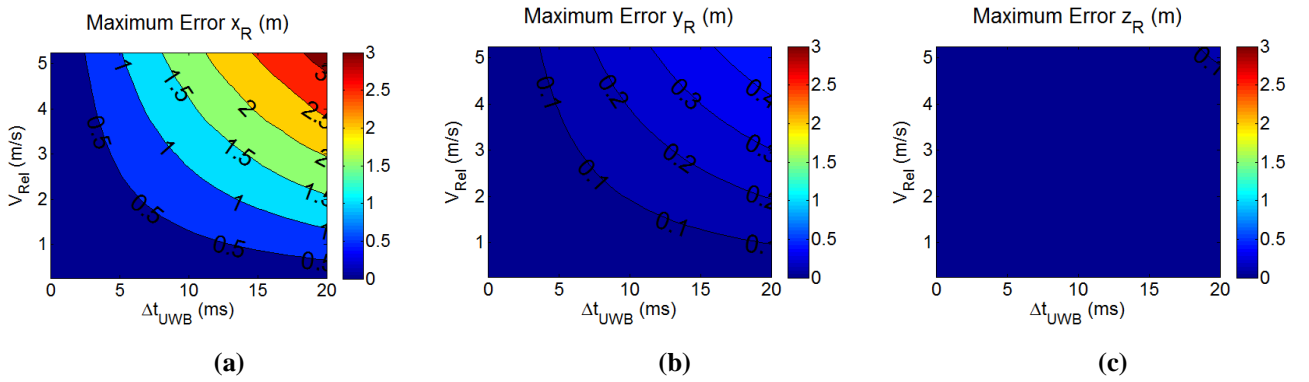


Figura 3.18: Valore massimo dell'errore assoluto di stima al variare di Δt_{UWB} e V_{Rel} , per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $z_R = [20, 80]$ m, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20)$ m, (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R .

Dai grafici precedenti si osserva che l'errore massimo di stima può assumere valori piuttosto elevati, in particolare per la coordinata x_R , in presenza di ritardo UWB e velocità relative elevate. Per questa particolare configurazione e ordine, l'errore sulla coordinata x_R cresce dipendentemente dal prodotto $\Delta t_{UWB} V_{Rel}$. Anche l'errore sulla coordinata y_R risulta essere dipendente da V_{Rel} e da Δt_{UWB} , ma complessivamente è minore. Invece la stima della coordinata z_R è molto accurata, probabilmente a causa del fatto che i sensori sono tutti da una stessa parte rispetto all'UAV che avanza lungo z_R . Assumendo $\Delta t_{UWB} V_{Rel} = \alpha$ possiamo scrivere le seguenti relazioni approssimate (3.4) per l'errore massimo di stima:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\max-x_R}(\alpha) \approx 33.3\alpha \\ \varepsilon_{\max-y_R}(\alpha) \approx 5.3\alpha \\ \varepsilon_{\max-z_R}(\alpha) \approx 0.55\alpha \end{cases} \quad (3.4)$$

Queste relazioni sono riferite alla particolare traiettoria che si estende da 20 m a 80 m.

Di seguito, in Figura 3.19 sono rappresentati i risultati relativi agli errori assoluti medi di stima per le tre coordinate in assenza ed in presenza del ritardo UWB, in presenza dell'errore di misura della distanza, e considerando una velocità relativa pari a 5 m/s. Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

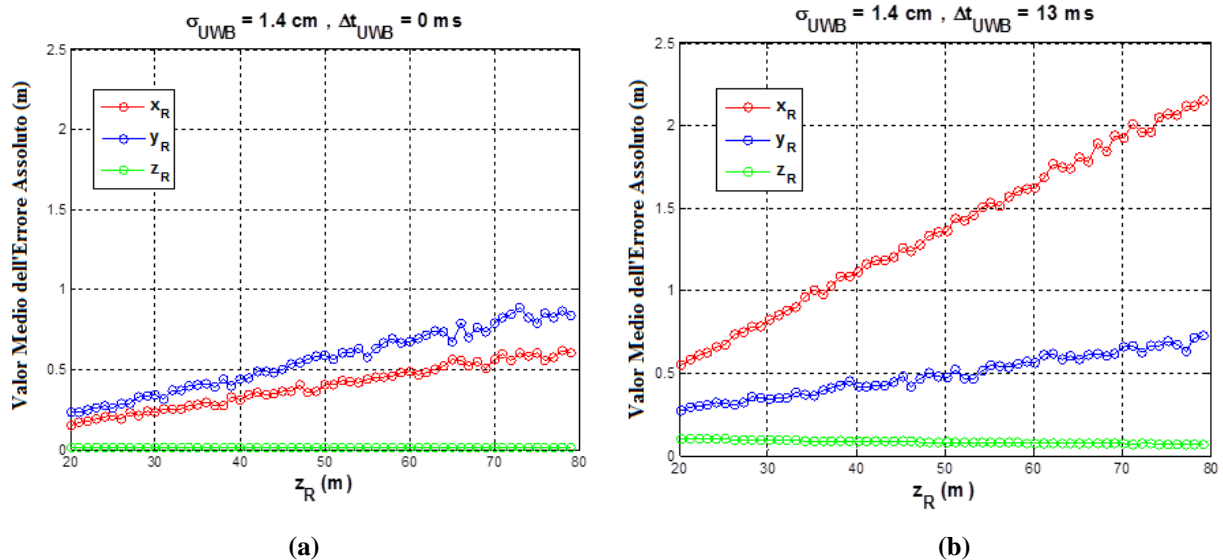


Figura 3.19: Valor medio dell'errore assoluto di stima per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 5 \text{ m/s}$, $z_R = [20, 80] \text{ m}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$, (a) $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$, $\Delta t_{UWB} = 0 \text{ ms}$ e (b) $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$. Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

Da questi primi risultati si evince che il ritardo temporale UWB gioca un ruolo fondamentale nella stima della posizione dell'UAV, specialmente per la coordinata x_R .

La Figura 3.19a mostra che l'errore medio di stima cresce all'aumentare della distanza UAV-GS per via della presenza del rumore UWB, con maggior pendenza per quanto riguarda la coordinata y_R . Questo avviene considerando un ritardo $\Delta t_{UWB} = 0 \text{ s}$. Si osserva che all'interno di un range di distanze $[20, 40] \text{ m}$ l'errore medio non supera 50 cm, valore accettabile note le dimensioni dell'UAV. La Figura 3.19b invece evidenzia l'effetto del ritardo temporale. La coordinata y_R non sembra essere dipendente da questo fattore, mentre x_R peggiora drasticamente. L'errore medio di stima per la coordinata x_R è tendenzialmente pari all'errore massimo che si avrebbe considerando i sensori ideali (Figura 3.18a), dato che

$V_{Rel}\Delta t_{UWB}|_{V_{Rel}=5m/s, \Delta t_{UWB}=13ms} = 6.5 \text{ cm} > \sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$. Infatti se si considera $z_R = 80 \text{ m}$, questi errori sono entrambi prossimi a 2 m. Possiamo dire empiricamente che per valori $V_{Rel}\Delta t_{UWB} > \sigma_{UWB}$ gli effetti dominanti sono dati da $V_{Rel}\Delta t_{UWB}$. La coordinata z_R permane la più accurata in entrambe le situazioni. Il fatto che z_R sia ben stimata ci permetterà nel seguito di sfruttare questa informazione per la stima della velocità relativa di avanzamento dell'UAV.

In Figura 3.20 sono rappresentate le statistiche, in termini di valor medio, dell'errore assoluto di stima sulle coordinate x_R, y_R al variare del prodotto $\Delta t_{UWB}V_{Rel} = [0, 5] \text{ cm}$ ed al variare della deviazione standard UWB $\sigma_{UWB} = [0, 5] \text{ cm}$. I risultati sono ottenuti mediando gli errori su tutta la traiettoria, che si estende da 20 m a 80 m, considerando un numero pari a 100 simulazioni. La coordinata z_R non è stata rappresentata in quanto è la più accurata, con errori dell'ordine del centimetro. Si sono considerati configurazione A2 e ordine [1 2 4 3].

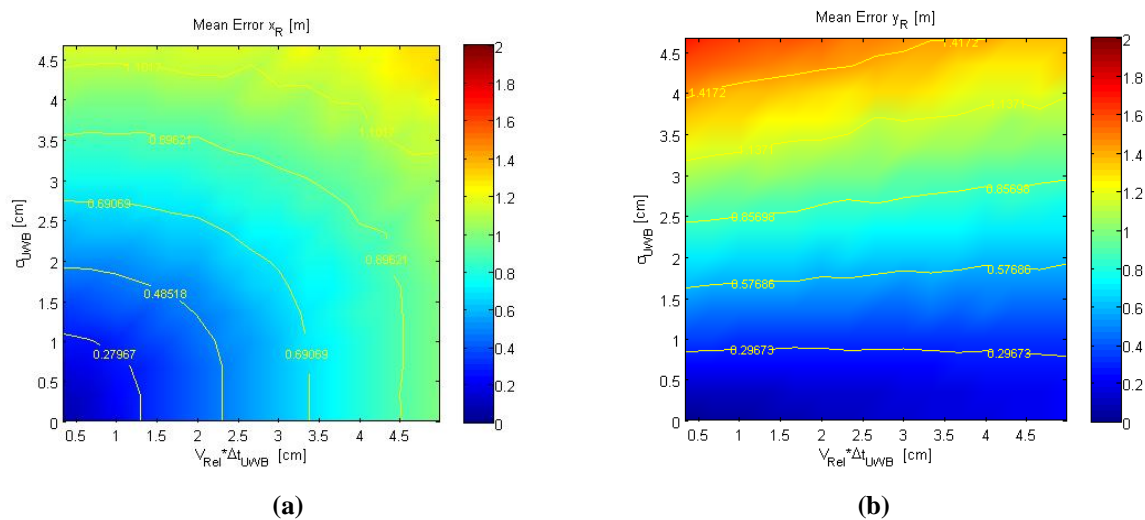


Figura 3.20: Valor medio dell'errore assoluto di stima sull'intera traiettoria al variare del prodotto $\Delta t_{UWB}V_{Rel}$ e di σ_{UWB} per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $z_R = [20, 80] \text{ m}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$, (a) x_R e (b) y_R . Ogni punto è il risultato di 100 simulazioni Monte Carlo.

Da quest'analisi dell'errore si evince che la coordinata x_R dipende da entrambi i fattori σ_{UWB} e $\Delta t_{UWB} V_{Rel}$, con una maggior dipendenza da σ_{UWB} in quanto l'errore cresce più rapidamente all'aumentare della deviazione standard UWB.

Diversamente accade per la coordinata y_R , infatti si osserva che non dipende dal prodotto $\Delta t_{UWB} V_{Rel}$, bensì da σ_{UWB} , almeno per piccoli valori della deviazione standard σ_{UWB} .

Quindi siamo giunti ad un primo risultato importante, ovvero per la configurazione A2 e ordine [1 2 4 3] accade che:

- L'errore di stima della coordinata x_R dipende da entrambi i fattori: $\Delta t_{UWB} V_{Rel}$, σ_{UWB} ;
- L'errore di stima della coordinata y_R dipende esclusivamente da σ_{UWB} ;
- L'errore di stima della coordinata z_R è trascurabile.

3.5.2 Scenario 2: Moto Sinusoidale

Il secondo scenario è relativo alla scansione di un'area da parte dell'UAV. In questo caso la GS è ferma mentre l'UAV è in movimento. È stato simulato un andamento sinusoidale sul piano $x_R z_R$ molto simile alla realtà, con ampiezza della sinusoide $A = 5 \text{ m}$, velocità relativa di avanzamento $V_{Rel} = 1 \text{ m/s}$, durata della simulazione pari a 100 s e periodicità dell'oscillazione $L = 20 \text{ m}$. L'UAV inizia la scansione ad una distanza iniziale dal rover pari a 20 m. La relazione della traiettoria dell'UAV nel sistema di riferimento locale rover è definita in (3.5):

$$p_{UAV_R}(t) = \left(A \sin\left(\frac{2\pi V_{Rel} t}{L}\right) \quad 1 \quad 20 + t V_{Rel} \right) m \quad (3.5)$$

Anche per questo scenario si riportano le simulazioni relative ad una durata di 100 secondi, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, con i risultati rappresentati nel sistema di riferimento locale al rover. Si sono considerati gli stessi ordini dei sensori come per lo scenario 1, ma per la sola configurazione A2. In Figura 3.21 ed in Figura 3.22 sono rappresentate rispettivamente le coordinate x_R e y_R , la

z_R non è riportata in quanto presenta errori inferiori al centimetro. Non è stato considerato l'effetto di rumorosità dei sensori UWB.

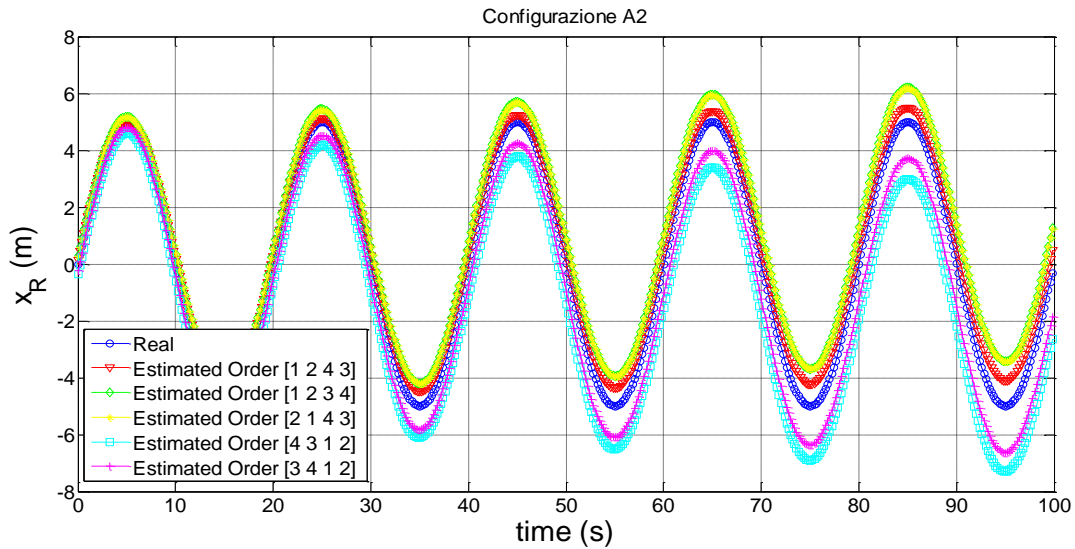


Figura 3.21: Stima della coordinata x_R dell'UAV per la configurazione A2 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 1 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $A = 5 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

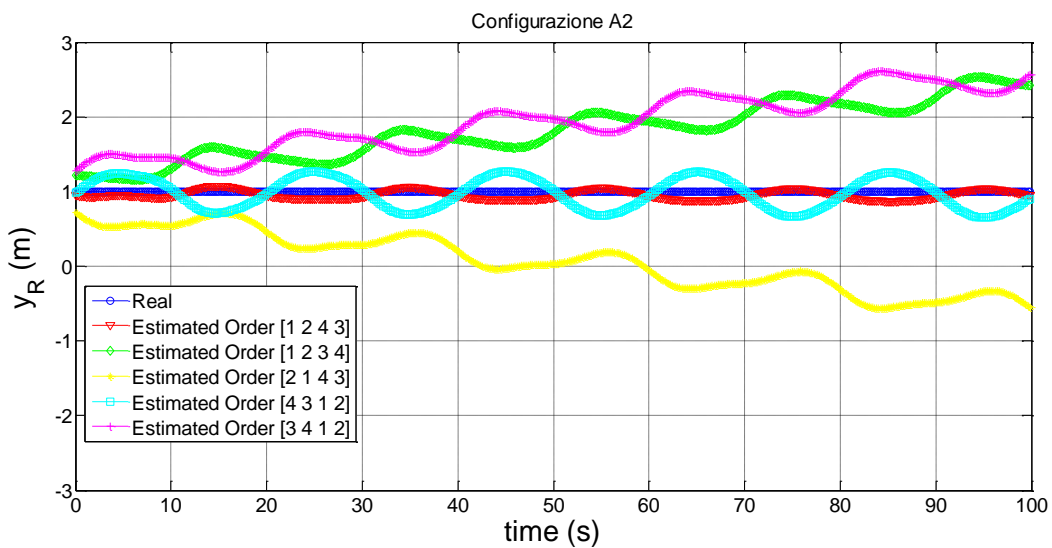


Figura 3.22: Stima della coordinata y_R dell'UAV per la configurazione A2 e ordine dei sensori [1 2 4 3], [1 2 3 4], [2 1 4 3], [4 3 1 2], [3 4 1 2] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 1 \text{ m/s}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $A = 5 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$.

Si osserva nuovamente che l'ordine [1 2 4 3] risulta essere quello ad errore di stima minimo.

Sono state effettuate delle simulazioni atte alla valutazione dell'errore massimo di stima al variare di $A=[0, 10] m$, $V_{Rel}=[0.25, 5.25] m/s$ con $L=20 m$, $\Delta t_{UWB}=13 ms$ e $\varepsilon_{UWB}=0 m$ (Figura 3.23), $\Delta t_{UWB}=0 ms$ e $\varepsilon_{UWB}\neq 0 m$ (Figura 3.24).

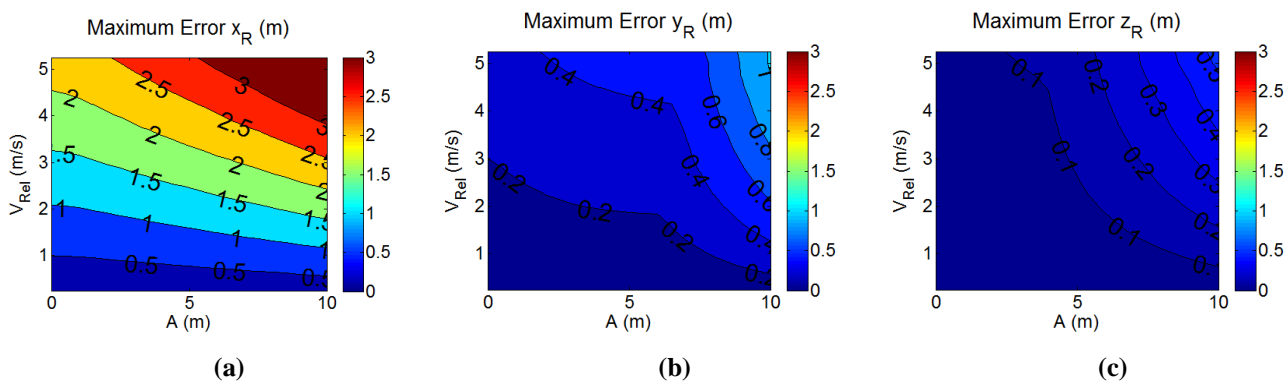


Figura 3.23: Valore massimo dell'errore assoluto di stima al variare di V_{Rel} e di A , per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $\varepsilon_{UWB}=0 m$, $\Delta t_{UWB}=13 ms$, $z_R=[20, 80] m$, $L=20 m$, $p_{UAV0}=(0 \ 1 \ 20) m$, (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R .

Questi risultati dimostrano la dipendenza dell'errore di stima dall'ampiezza della sinusoide A . Analizzando solo la coordinata x_R , se $A=0 m$ valgono le stesse considerazioni relative allo scenario 1, con errori di stima limitati a 2 m, se invece $A=10 m$ gli errori raggiungono i 3 m. La Figura 3.24 analizza l'errore massimo di stima sulla traiettoria da 20 m a 80 m, annullando l'effetto del ritardo, ma considerando il rumore di misura. I valori seguenti corrispondono ai massimi ottenuti dalla media di 300 realizzazioni.

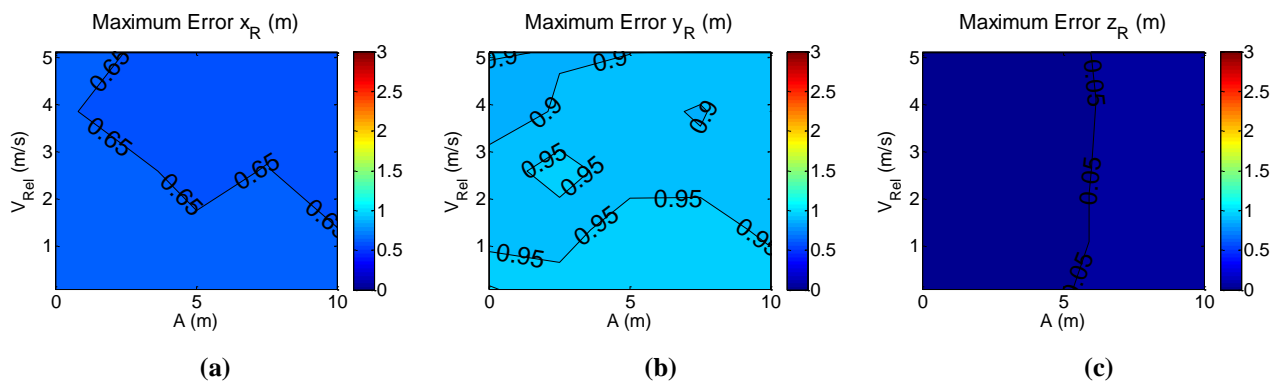


Figura 3.24: Valore massimo dell'errore assoluto di stima medio al variare di V_{Rel} e di A , per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $\varepsilon_{UWB} \neq 0$ m, $\Delta t_{UWB} = 13$ ms, $z_R = [20, 80]$ m, $L = 20$ m, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20)$ m, (a) x_R ; (b) y_R ; (c) z_R .

Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

Indipendentemente dall'ampiezza della sinusoide e dalla velocità di avanzamento dell'UAV, l'errore assume valori limite, in media, pari a 0.7 m, 1 m e trascurabile rispettivamente per le coordinate x_R , y_R e z_R .

In Figura 3.25 sono rappresentati i risultati relativi agli errori assoluti medi di stima per le tre coordinate considerando $\sigma_{UWB} = 1.4$ cm al variare della distanza z_R , per un caso particolare ovvero: velocità relativa di avanzamento $V_{Rel} = 1$ m/s, ampiezza della sinusoide $A = 5$ m e periodicità $L = 20$ m, in assenza ed in presenza del ritardo UWB. Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

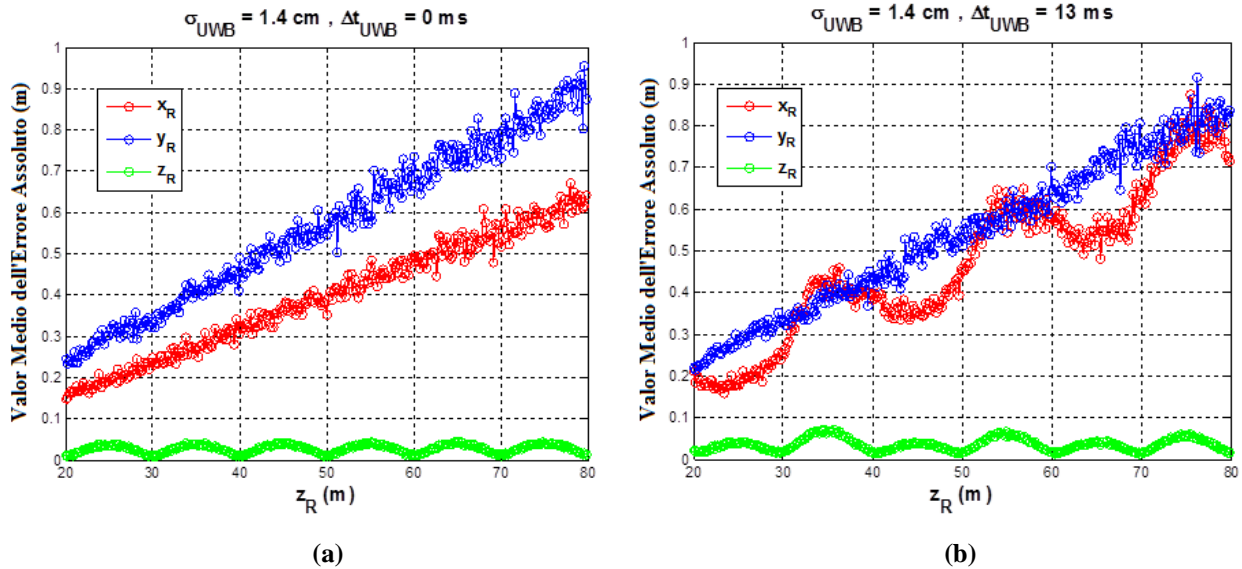


Figura 3.25: Valor medio dell'errore assoluto di stima per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $V_{Rel} = 1 \text{ m/s}$, $z_R = [20, 80] \text{ m}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$, $A = 5 \text{ m}$, (a) $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$, $\Delta t_{UWB} = 0 \text{ ms}$ e (b) $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$. Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

Questi grafici dimostrano nuovamente che la coordinata x_R è dipendente dal prodotto $\Delta t_{UWB} V_{Rel}$, mentre la coordinata y_R è poco sensibile alla variazione del ritardo temporale. La coordinata z_R è accurata. Da notare che i valori dell'errore di Figura 3.25a per $z_R = 80 \text{ m}$ corrispondono ai valori ottenuti nelle mappe di Figura 3.24.

Da queste analisi concludiamo che per la configurazione A2 e ordine [1 2 4 3] si osserva una dipendenza dell'errore di stima dai seguenti fattori:

- L'errore di stima della coordinata x_R dipende da: $\Delta t_{UWB} V_{Rel}$, σ_{UWB} , A .
- L'errore di stima della coordinata y_R dipende da: σ_{UWB} , A ;
- L'errore di stima della coordinata z_R è trascurabile.

CAPITOLO 4

TECNICHE DI COMPENSAZIONE DEL RITARDO UWB

Diverse soluzioni permettono di compensare l'effetto del ritardo UWB. In questo capitolo valuteremo la possibilità di impiegare la tecnica TOA OW-TOF e la tecnica TDOA. Infine, sarà descritta la nuova tecnica proposta che basandosi sul metodo TOA TW-TOF senza la necessità di alcun sincronismo, prevede di sfruttare la stima della velocità longitudinale dell'UAV per riferire le distanze misurate alla stessa posizione dell'UAV prima di applicare l'algoritmo di multilaterazione.

4.1 TOA OW-TOF

Impiegando la tecnica TOA TW-TOF, il problema di localizzazione richiede che tutti i sensori siano sincronizzati. Rispetto alla tecnica TW-TOF, è il sensore UWB sull'UAV a trasmettere e i nodi sulla GS ricevono. Il pacchetto informativo contiene l'istante di trasmissione *Time Stamp*, che viene trasmesso in modalità broadcast verso tutti i sensori ubicati sul Rover, cosicché ognuno può estrarre l'informazione sull'istante di arrivo e misurare la distanza dall'UAV. Anche in questo caso, il numero minimo di sensori per ottenere la posizione dell'UAV è pari a quattro e le superfici da intersecare sono delle sfere. Con questa tecnica, le distanze sono tutte riferite ad un'unica posizione dell'UAV perché effettuate in contemporanea e il moto relativo dell'UAV non produce alcun effetto. In Figura 4.1 è rappresentata la geometria del problema di localizzazione per la tecnica in questione. I risultati di questa tecnica coincidono con quelli mostrati per la TW-TOF in Figura 3.19a ed in Figura 3.26a considerando $\Delta t_{UWB} = 0 \text{ ms}$. Mediamente, per distanze inferiori a 40 m, l'errore in quota è minore di 50 cm, l'errore sulla coordinata trasversale è minore di 40 cm, mentre l'errore lungo la direzione di avanzamento è praticamente trascurabile. Se l'UAV si trovasse ad una distanza massima dal rover pari a 20 m, la tecnica garantirebbe errori medi inferiori a 20 cm su tutte le coordinate.

Chiaramente l'utilizzo di questa soluzione non è semplice a causa della sincronizzazione richiesta tra tutti i sensori, sia sulla GS che sull'UAV.

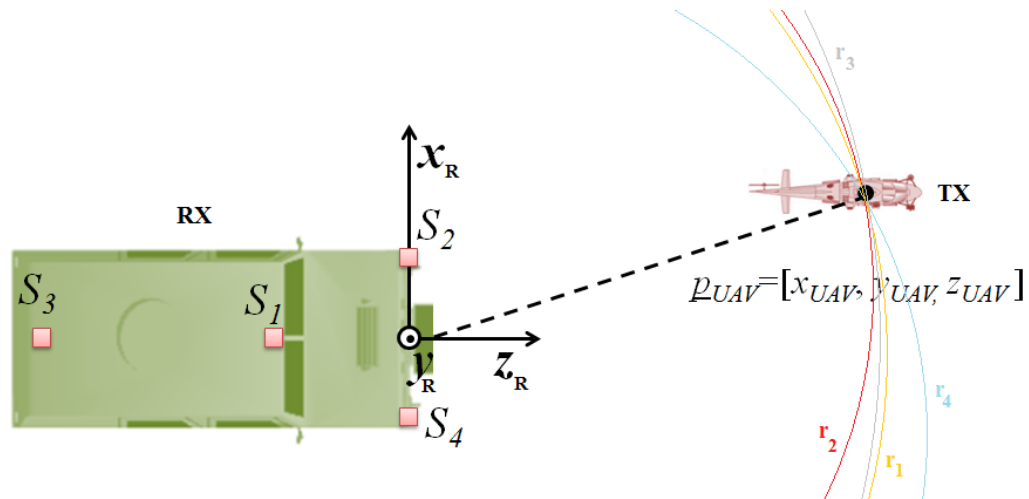


Figura 4.1: Geometria di Localizzazione dell'UAV per la tecnica TOA nella modalità OW-TOF.

4.2 TDOA

Un'altra tecnica che può essere impiegata per risolvere il problema del ritardo introdotto dalle misure dei sensori UWB è la TDOA, per la quale si misura la differenza tra gli istanti di arrivo dei segnali per determinare la differenza di distanza rispetto alla stessa posizione del nodo mobile. In questo caso è richiesta la sincronizzazione tra i sensori posti sulla GS. Come illustrato nel paragrafo 1.2.2, per determinare la posizione dell'UAV è necessario impiegare un sensore aggiuntivo rispetto alla tecnica TOA e intersecare degli iperboloidi. Per valutare gli effetti sulla localizzazione intersecando non più delle sfere, ma queste nuove superfici, abbiamo modificato la configurazione con cinque sensori in Figura 4.2.

Le coordinate dei sensori sono riportate nella relazione (4.1):

$$\underline{S}_{TDOA} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1.2 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -4.8 \\ -1 & 1 & -4.8 \end{pmatrix} m \quad (4.1)$$

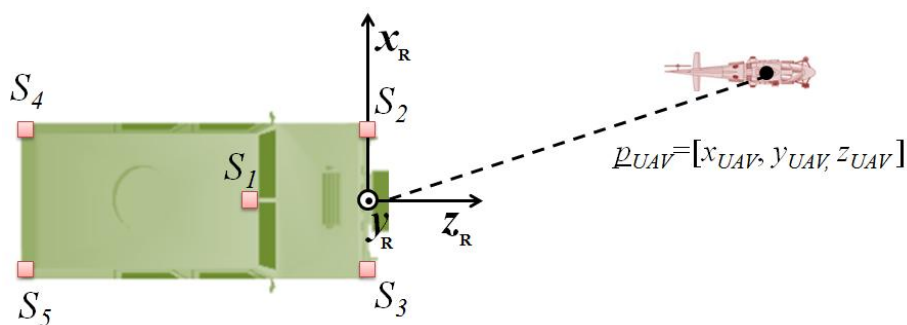


Figura 4.2: Geometria di Localizzazione dell'UAV con cinque sensori sulla GS per la tecnica TDOA.

Supponendo di riferire le misure rispetto al sensore 1, assumendo un errore di misura uguale al caso della tecnica TOA TW-TOF e le sei identiche posizioni dell'UAV come visto nel capitolo 3, l'algoritmo di multilaterazione presenta i seguenti valori medi degli errori assoluti di stima, rappresentati in Figura 4.3. Per risolvere l'algoritmo è stato impiegato il metodo LMA. Si osserva che l'errore medio di stima assume valori molto più elevati rispetto alla tecnica TOA, precisamente dell'ordine del metro per le coordinate x_R e y_R e dell'ordine di alcuni metri per la coordinata z_R che non risulta più essere quella maggiormente accurata.

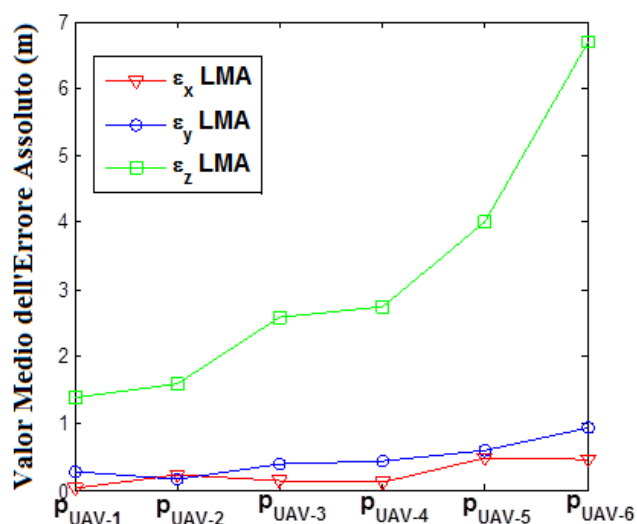


Figura 4.3: Valor medio dell'errore assoluto di stima della posizione dell'UAV per 6 diverse posizioni (UAV statico), in presenza di errore di misura da parte dei sensori UWB ($\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$) impiegando la tecnica TDOA per la configurazione di sensori (4.1).

Questo potrebbe dipendere dalla geometria del problema, ovvero l'errore che si ottiene dall'intersezione di iperboloidi risulta maggiormente suscettibile alla posizione ravvicinata dei sensori in presenza di rumore di misura. Infatti considerando una configurazione di sensori che preveda una maggiore separazione tra gli stessi, come evidenziato dalle coordinate in (4.2):

$$\underline{\underline{S}}'_{TDOA} = \begin{pmatrix} 0 & 10 & 10 \\ 10 & 0 & 0 \\ 10 & 10 & 10 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \end{pmatrix} m \quad (4.2)$$

l'errore medio si riduce al di sotto di 20 cm per tutte le coordinate come rappresentato in Figura 4.4.

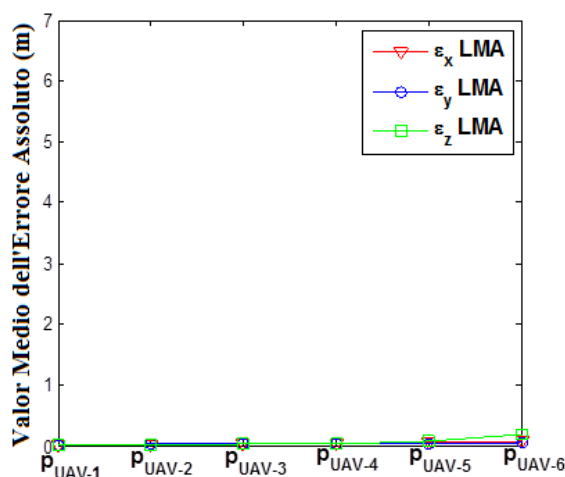


Figura 4.4: Valor medio dell'errore assoluto di stima della posizione dell'UAV per 6 diverse posizioni (UAV statico), in presenza di errore di misura da parte dei sensori UWB ($\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$) impiegando la tecnica TDOA per la configurazione di sensori (4.2).

Chiaramente la configurazione dei sensori in (4.2) non è compatibile con le dimensioni della GS, ma questi risultati dimostrano che allontanando i sensori è possibile garantire errori piccoli. In Tabella 4.1 sono sintetizzate le caratteristiche delle diverse tecniche di localizzazione UWB: TOA nella modalità OW-TOF, TOA nella modalità TW-TOF e TDOA.

| Tecnica | Effetto σ_{UWB} | Effetto Δt_{UWB} | Sincronismo | # Sensori |
|--|---|---|--|----------------------------|
| TOA OW-TOF <i>(Time Of Arrival – One Way Time Of Flight)</i> | Il valor medio dell'errore assoluto di stima per $z_R < 40 m$ risulta essere: <ul style="list-style-type: none"> • $\varepsilon_{x_R} < 0.4 m$ • $\varepsilon_{y_R} < 0.5 m$ • $\varepsilon_{z_R} \rightarrow$ Trascurabile | Assente | Necessario per tutti i sensori UWB (Rover + UAV) | Minimo 5 (4 Rover + 1 UAV) |
| TOA TW-TOF <i>(Time Of Arrival – Two Way Time Of Flight)</i> | Il valor medio dell'errore assoluto di stima per $z_R < 40 m$ risulta essere: <ul style="list-style-type: none"> • $\varepsilon_{x_R} < 0.4 m$ • $\varepsilon_{y_R} < 0.5 m$ • $\varepsilon_{z_R} \rightarrow$ Trascurabile | L'errore massimo assoluto di stima sulla traiettoria per $z_R = [20, 80] m$ dipende linearmente da $\Delta t_{UWB} V_{Rel} = \alpha$: $\begin{cases} \varepsilon_{\max-x_R}(\alpha) \approx 33.3\alpha \\ \varepsilon_{\max-y_R}(\alpha) \approx 5.3\alpha \\ \varepsilon_{\max-z_R}(\alpha) \approx 0.55\alpha \end{cases}$ | Non Necessario | Minimo 5 (4 Rover + 1 UAV) |
| TDOA <i>(Time Difference Of Arrival)</i> | Il valor medio dell'errore assoluto di stima per $z_R < 20 m$ risulta essere: <ul style="list-style-type: none"> • $\varepsilon_{x_R} \sim 1 m$ • $\varepsilon_{y_R} \sim 1 m$ • $\varepsilon_{z_R} \sim$ Qualche metro | Assente | Necessario per i sensori a bordo del Rover | Minimo 6 (5 Rover + 1 UAV) |

Tabella 4.1: Caratteristiche ed errori delle diverse tecniche di localizzazione. Per i sensori sono state valutate le seguenti configurazioni: configurazione A2 per la tecnica TOA OW-TOF, configurazione A2 e ordine [1 2 4 3] per la tecnica TOA TW-TOF, configurazione in Figura 4.2 per la tecnica TDOA con riferimento al sensore 1.

Sono rappresentati gli errori di stima nelle condizioni $\varepsilon_{UWB} \neq 0$, $\Delta t_{UWB} \neq 0$ per le configurazioni dei sensori proposte precedentemente, ovvero A2 per la tecnica TOA OW-TOF, A2 e ordine [1 2 4 3] per la tecnica TOA TW-TOF e configurazione in Figura 4.2 per la tecnica TDOA con riferimento al sensore 1.

La tecnica TOA nella modalità OW-TOF consente di ottenere un basso errore di localizzazione e non è influenzata dall'effetto del ritardo UWB. Sebbene questa tecnica richieda lo stesso numero di sensori utilizzati nella tecnica TW-TOF, essa necessita di sincronizzare l'intera rete sensoriale (sensori su rover e UAV) requisito non semplice da soddisfare. In più l'accuratezza della misura della distanza dipende fortemente da eventuali disallineamenti temporali.

La sincronizzazione dei soli sensori ubicati a bordo del Rover potrebbe essere più semplice, come prevede la tecnica TDOA, ma essa non garantisce buone prestazioni in termini di errore di localizzazione che è dell'ordine del metro per le tre coordinate.

La tecnica TOA TW-TOF permette di svincolarci da problematiche legate alla sincronizzazione, ma richiede di ridurre gli effetti dovuti al ritardo UWB, attraverso una compensazione del moto. Nel paragrafo seguente sarà proposta una modifica dell'algoritmo di localizzazione che consente di compensare il ritardo Δt_{UWB} mediante un aggiornamento delle distanze misurate dai sensori.

4.3 Algoritmo di localizzazione che sfrutta la stima della velocità longitudinale dell'UAV

Consideriamo il moto dell'UAV sul piano $x_R z_R$ ad una quota costante con una certa velocità relativa rispetto alla GS che definiamo \vec{V}_{UAV} . Nello scenario in esame, con l'UAV che si muove relativamente alla GS principalmente lungo la direzione longitudinale, la componente della velocità in tale direzione è quella che influisce maggiormente sull'errore di localizzazione. In Figura 4.5, è mostrata l'area di intersezione di tre circonferenze quando si considera uno spostamento dell'UAV lungo la direzione z_R (Figura 4.5a) e lungo la direzione x_R (Figura 4.5b) durante le misure di distanze. Nel primo caso, (Figura 4.5a), la posizione stimata dell'UAV potrebbe essere all'interno dell'area evidenziata in giallo, ed è evidente che l'incertezza è piuttosto elevata. Nel secondo caso invece (Figura 4.5b) l'UAV si sposta in direzione x_R e l'area di intersezione è più piccola con una conseguente minor incertezza sulla stima.

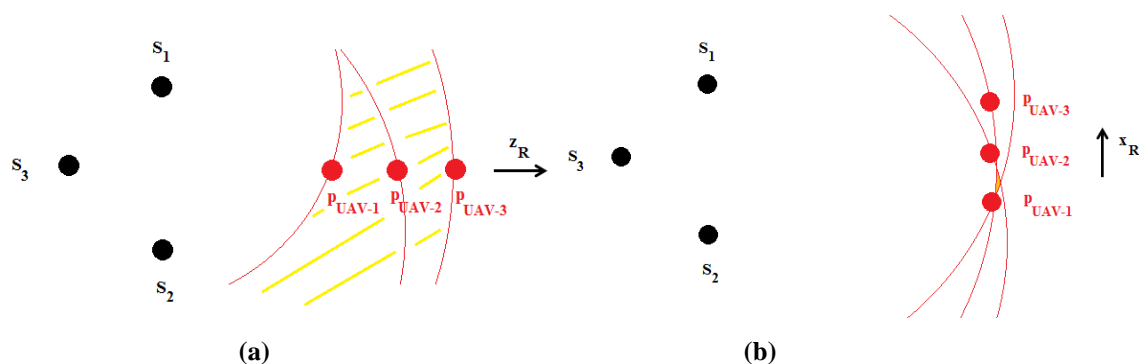


Figura 4.5: Area di intersezione delle circonferenze per effetto dello spostamento relativo dell'UAV (a) in direzione z_R e (b) in direzione x_R .

Per verificare quanto appena detto è stato considerato un moto rettilineo dell'UAV lungo l'asse x_R con $V_x = 2 \text{ m/s}$ su una traiettoria $x_R = [-5, 5] \text{ m}$, ovvero $\Delta x = 10 \text{ m}$, situato a tre diverse distanze dalla GS: $z_{UAV} = 10 \text{ m}$, $z_{UAV} = 40 \text{ m}$, $z_{UAV} = 80 \text{ m}$. Gli errori assoluti di stima della posizione sono riportati in Figura 4.6 per la configurazione A2 e ordine [1 2 4 3] considerando un ritardo $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$ senza errore sulle distanze misurate.

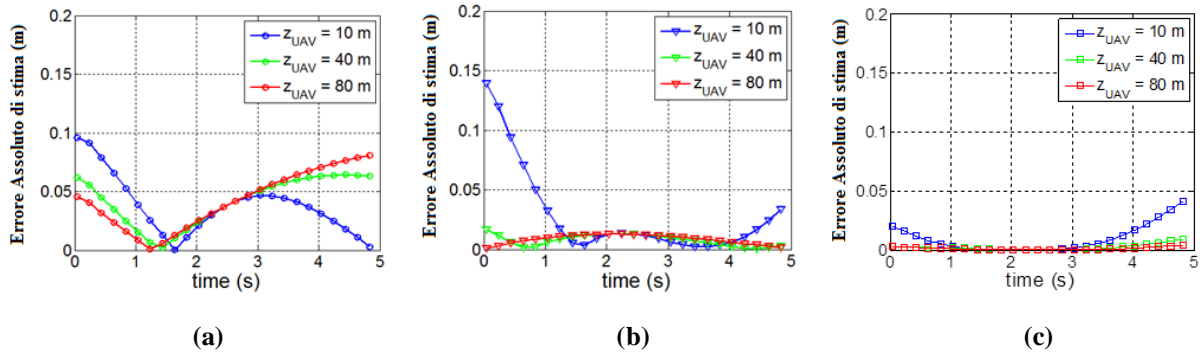


Figura 4.6: Errore assoluto di stima per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] supponendo un moto relativo rettilineo dell'UAV lungo l'asse x_R per i seguenti parametri di sistema: $\sigma_{UWB} = 0 \text{ cm}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $\Delta x = 10 \text{ m}$, $V_x = 2 \text{ m/s}$, $p_{UAV-01} = (5 \ 1 \ 10) \text{ m}$, $p_{UAV-02} = (5 \ 1 \ 40) \text{ m}$, $p_{UAV-03} = (5 \ 1 \ 80) \text{ m}$, (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R .

L'errore di stima dovuto al movimento relativo dell'UAV lungo la direzione x_R durante le misure di distanze è inferiore a 15 cm per tutte le coordinate e si riduce all'aumentare della distanza GS-UAV. Quanto più l'UAV si allontana dalla GS, tanto minore sarà l'effetto sulla stima dovuto al moto relativo in direzione x_R . Questa osservazione, insieme al fatto che dall'analisi dei risultati del capitolo precedente, la stima della coordinata z_R risulta essere quella più accurata per la particolare geometria del problema con l'UAV che si muove frontalmente rispetto alla GS, ci suggeriscono un metodo per poter compensare il moto dell'UAV durante le misure consecutive di distanza da parte dei sensori sulla GS. Nel dettaglio, utilizzando la coordinata z_R è possibile stimare la velocità dell'UAV nella direzione principale di avanzamento, dopodiché essa può essere impiegata per correggere le distanze misurate e riferirle alla stessa posizione dell'UAV, prima di applicare l'algoritmo di multilaterazione. In questo modo il vettore velocità viene approssimato con la sua componente longitudinale, ipotesi plausibile nello scenario in questione.

Conoscendo il tempo tra una stima della posizione dell'UAV e la successiva, la velocità relativa di avanzamento dell'UAV è stata stimata nel modo seguente (4.3):

$$\begin{cases} \hat{V}_{z_R}(0) = 0 & n = 0 \\ \hat{V}_{z_R}(n) = \frac{\hat{p}_{UAV_z}(n) - \hat{p}_{UAV_z}(n-1)}{\Delta t_{EST}} & n \neq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Dove n identifica l'istante di stima e Δt_{EST} l'intervallo di stima, che è almeno pari a $4\Delta t_{UWB}$. Supponendo che il vettore velocità dell'UAV non cambi in modo significativo in almeno 3 intervalli temporali Δt_{UWB} , circa pari a 39 ms, è possibile stimare la velocità e sommare o sottrarre ad ogni distanza misurata il percorso dell'UAV nella sola direzione longitudinale, in base all'ordine delle misure. La formula di aggiornamento delle distanze è riportata in (4.4):

$$r_i' = r_i - \hat{V}_{z_R} (N_i - 1) \Delta t_{UWB} \quad (4.4)$$

Dove r_i' per $i=1, \dots, 4$ rappresentano le distanze aggiornate, r_i le misure di distanza da parte dell' i -esimo sensore, \hat{V}_{z_R} la velocità relativa longitudinale dell'UAV stimata, $(N_i - 1)$ il numero di intervalli temporali UWB che separano la misura del primo sensore dall' i -esimo.

La Figura 4.7 mostra in modo grafico quanto precedentemente descritto. Il sensore S_1 è il primo ad effettuare la misura di distanza, ad esso corrisponde una posizione dell'UAV P_1 . Nel tempo che intercorre tra una misura della distanza e la successiva, l'UAV si sposta di una quantità rappresentata dal vettore $\vec{V}_{UAV} \Delta t_{UWB}$, la posizione P_2 è in questo caso quella di riferimento per il sensore S_2 . Abbiamo supposto un vettore velocità dell'UAV costante in almeno 3 intervalli UWB, quindi il moto infinitesimale dell'UAV evolve in un'unica direzione sul piano $x_R z_R$. Si procede allo stesso modo per i sensori S_3 e S_4 . La componente del vettore spostamento stimata accuratamente è stata definita come $\vec{V}_{z_R} \Delta t_{UWB}$. Il passo successivo risiede nell'aggiornamento delle distanze compensando il percorso eseguito dall'UAV da una misura alla successiva, nella sola direzione di avanzamento. Questo significa sottrarre o sommare alle distanze misurate, a seconda che vi sia un allontanamento o un avvicinamento dell'UAV alla GS, i segmenti in rosso. Per la geometria del problema, considerando che i sensori sono ubicati prevalentemente in una regione dello spazio, che l'UAV può muoversi frontalmente a loro e che la sua posizione è ottenuta mediante intersezione tra sfere, è sufficiente compensare il moto nella sola direzione longitudinale per avere ottimi risultati di stima. Una volta aggiornate le distanze si applica l'algoritmo di multilaterazione di Levenberg-Marquardt.

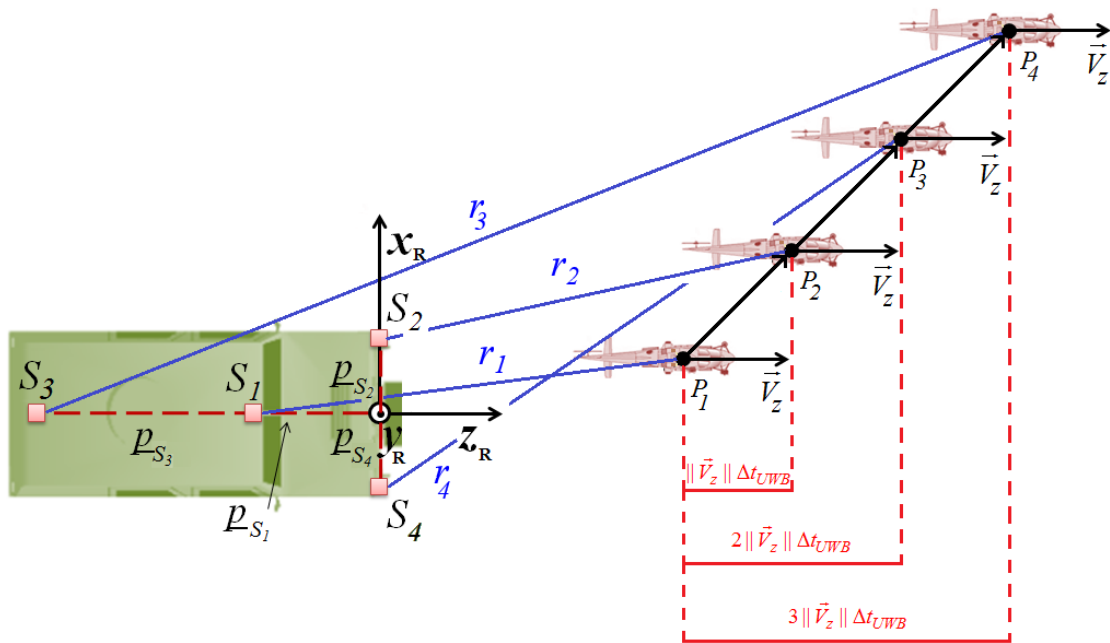


Figure 4.7: Geometria del problema di compensazione del ritardo UWB mediante stima della componente longitudinale del vettore velocità relativa dell'UAV per la tecnica TOA nella modalità TW-TOF.

La Figura 4.8 rappresenta gli errori massimi di stima su una traiettoria $z_R = [20, 80] m$, sulle tre coordinate al variare dell'ampiezza dell'oscillazione $A = [0, 10] m$ per i seguenti parametri: $V_{Rel} = [0.25, 5.25] m/s$, $L = 20 m$, e $\Delta t_{UWB} = 13 ms$.

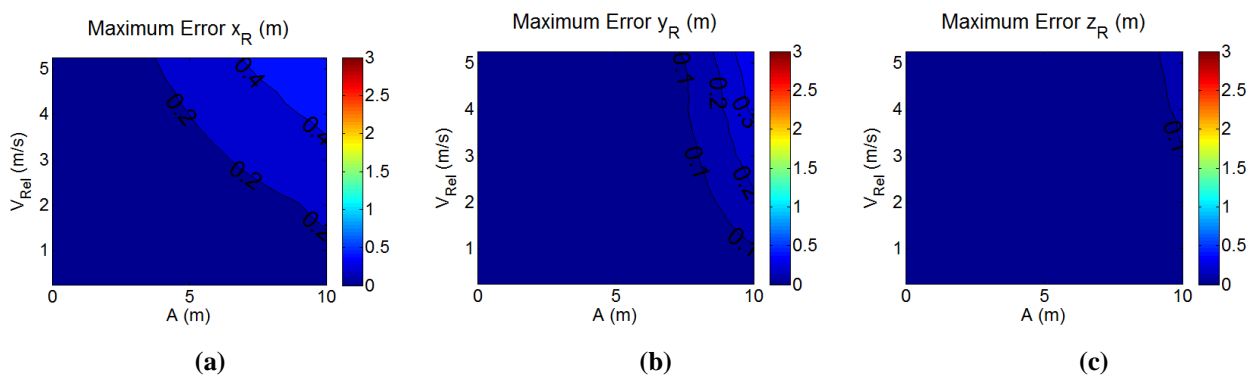


Figure 4.8: Valore massimo dell'errore assoluto di stima al variare di V_{Rel} e di A , per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $\varepsilon_{UWB} = 0 m$, $\Delta t_{UWB} = 13 ms$, $z_R = [20, 80] m$, $L = 20 m$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) m$, (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R .

La modifica dell'algoritmo consente di ridurre notevolmente l'errore di localizzazione. Nel dettaglio, la coordinata z_R rimane la più robusta, con un errore massimo inferiore a 10 cm per tutti i parametri considerati. L'errore massimo sulla coordinata y_R decresce fino a 30 cm, mentre per la coordinata x_R fino a 50 cm. Questo conferma l'efficacia dell'algoritmo di localizzazione proposto mediante la compensazione del ritardo temporale, senza che vi sia alcuna sincronizzazione tra i sensori e senza alcuna conoscenza del vettore velocità UAV da fonti esterne. In Figura 4.9 sono riportate le mappe di errore massimo considerando anche l'errore di misura UWB. Ogni punto rappresenta il valore massimo ottenuto dalla media di 300 simulazioni Monte Carlo della traiettoria che si estende da 20 m a 80 m.

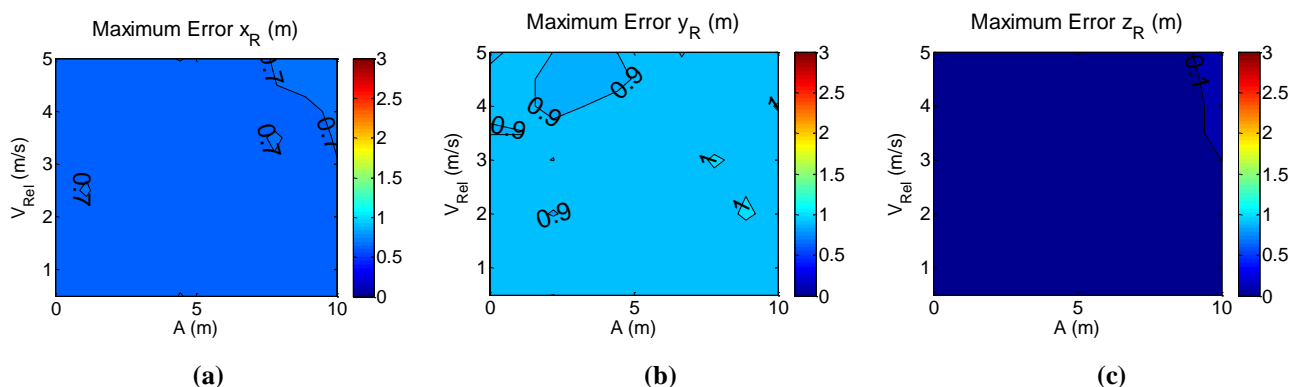


Figura 4.9: Valore massimo dell'errore assoluto di stima medio al variare di V_{Rel} e di A , per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $\varepsilon_{UWB} \neq 0$ m, $\Delta t_{UWB} = 13$ ms, $z_R = [20, 80]$ m, $L = 20$ m, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20)$ m, (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R .

Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

La compensazione del ritardo UWB permette di svincolare il problema di localizzazione dalla presenza della velocità relativa e dal ritardo. L'errore massimo raggiunge valori prossimi a 0.7 m per la coordinata x_R , circa 1 m per la coordinata y_R , trascurabile per la coordinata z_R . Queste mappe sono molto simili a quelle di Figura 3.24, dove era stato ipotizzato delle misure di distanza contemporanee ($\Delta t_{UWB} = 0$ ms).

In Figura 4.10 ed in Figura 4.11 sono rappresentati valor medio e varianza dell'errore assoluto di stima della posizione dell'UAV lungo la traiettoria come mostrato in Figura 3.19b ed in Figura 3.25b, confrontando l'algoritmo senza e con compensazione dell'effetto del ritardo, considerando l'errore di misura della distanza.

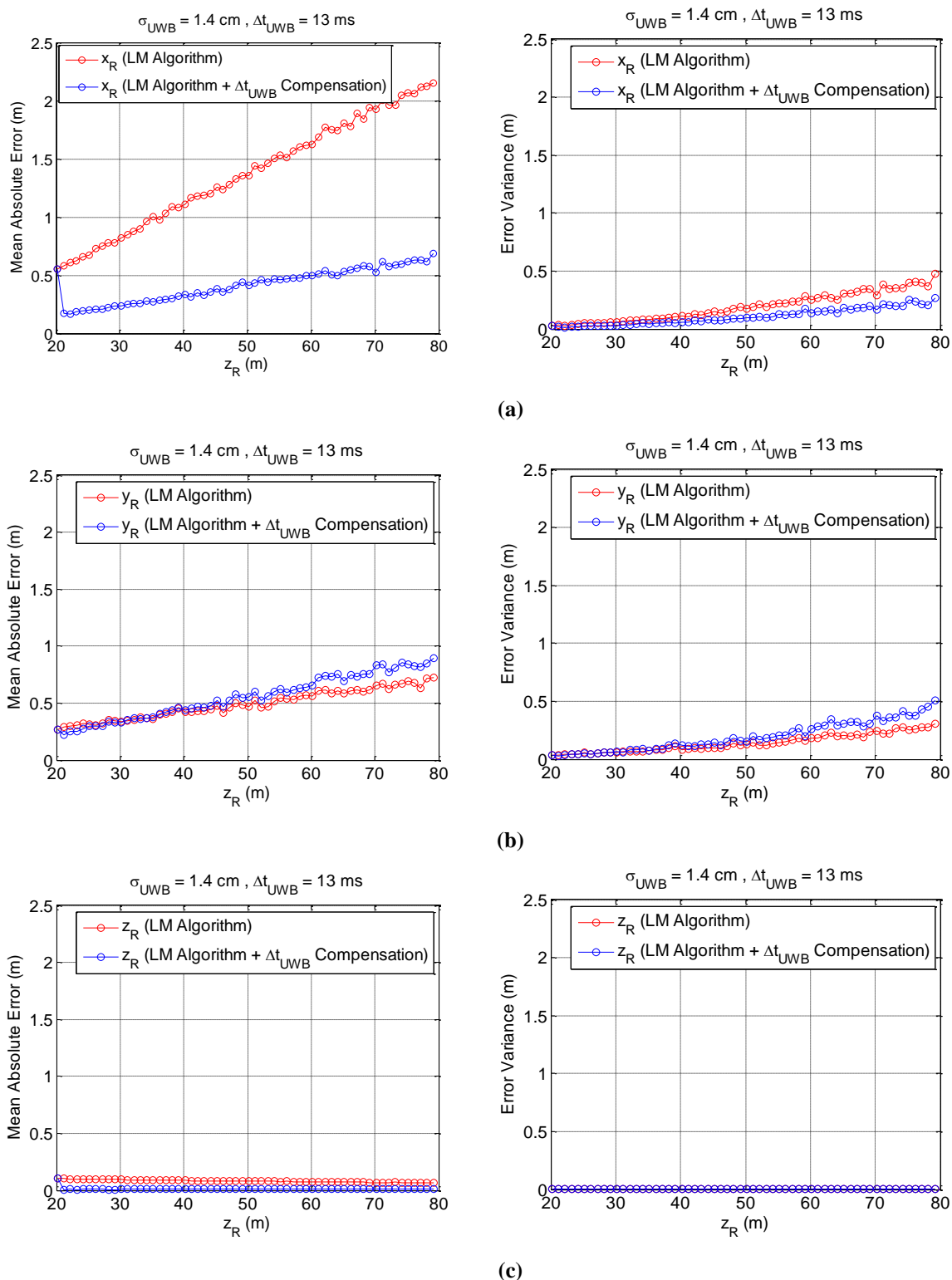


Figura 4.10: Valor medio e varianza dell'errore assoluto di stima per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 1 per i seguenti parametri di sistema: $\sigma_{UWB} = 1.4$ cm, $\Delta t_{UWB} = 13$ ms, $V_{Rel} = 5$ m/s, $z_R = [20, 80]$ m, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20)$ m. Confronto dell'algoritmo LMA (marker rossi) con l'algoritmo LMA con compensazione del ritardo Δt_{UWB} (marker blu), (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R . Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

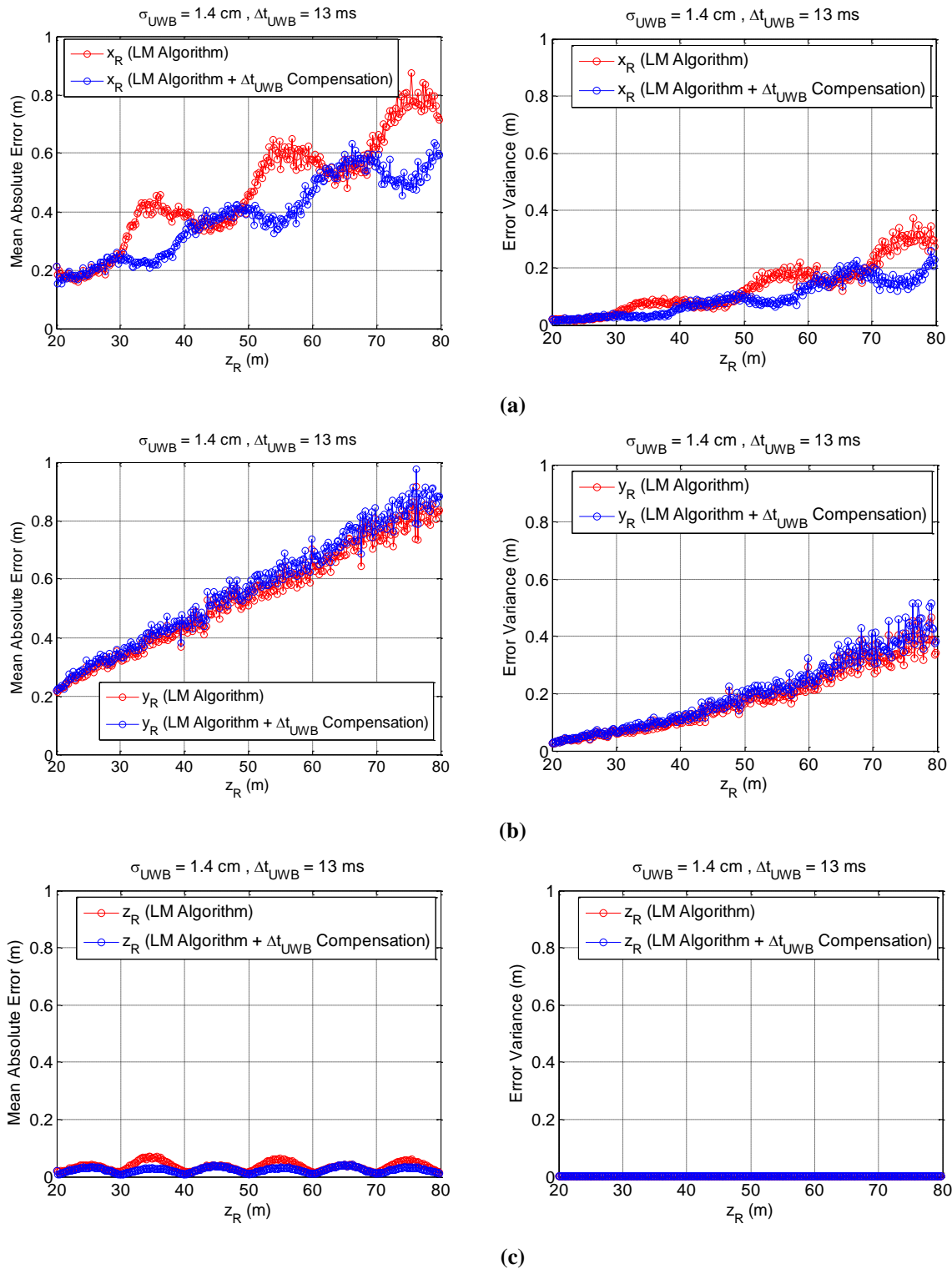


Figura 4.11: Valor medio e varianza dell'errore assoluto di stima per la configurazione A2 dei sensori con ordine [1 2 4 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $\sigma_{UWB} = 1.4$ cm, $\Delta t_{UWB} = 13$ ms, $V_{Rel} = 1$ m/s, $z_R = [20, 80]$ m, $L = 20$ m, $A = 5$ m, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20)$ m. Confronto dell'algoritmo LMA (marker rossi) con l'algoritmo LMA con compensazione del ritardo Δt_{UWB} (marker blu), (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R . Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

I grafici precedenti dimostrano che la compensazione del ritardo UWB consente di ridurre l'errore medio di stima, e per le coordinate x_R e z_R anche la varianza. Si osserva nuovamente che la coordinata z_R è quella maggiormente accurata. Un'ulteriore soluzione da adottare per ridurre l'errore di stima può essere quella di sfruttare diverse ordini di misura dei sensori UWB. In Figura 4.12 è rappresentato l'errore medio di stima per le coordinate x_R e y_R considerando due diversi ordini di misura: [1 2 4 3] e [1 4 2 3]. La compensazione del moto consente di avere un errore in x_R mediamente più basso per l'ordine [1 4 2 3] relativamente alla semionda positiva, mentre l'ordine [1 2 4 3] garantisce errori più bassi per la semionda negativa. Questo suggerisce la possibilità di cambiare l'ordine con i sensori UWB sull'UAV interrogano il nodo sulla GS, durante il moto.

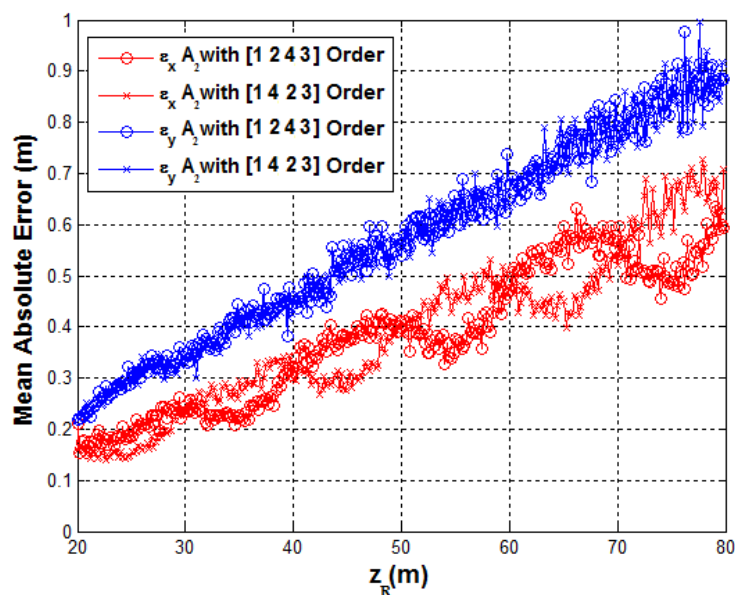


Figura 4.12: Valor medio dell'errore assoluto di stima per le coordinate x_R, y_R per la configurazione A2 dei sensori con ordini [1 2 4 3] e [1 4 2 3] nello scenario 2 per i seguenti parametri di sistema: $\sigma_{UWB} = 1.4 \text{ cm}$, $\Delta t_{UWB} = 13 \text{ ms}$, $V_{Rel} = 1 \text{ m/s}$, $z_R = [20, 80] \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$, $A = 5 \text{ m}$, $p_{UAV0} = (0 \ 1 \ 20) \text{ m}$. Confronto dell'algoritmo LMA (marker rossi) con l'algoritmo LMA con compensazione del ritardo Δt_{UWB} (marker blu), (a) x_R , (b) y_R e (c) z_R . Ogni punto è il risultato di 300 simulazioni Monte Carlo.

Quest'analisi evidenzia che è possibile ridurre l'errore di stima della posizione dell'UAV conoscendo una stima del moto nella direzione di avanzamento, senza necessariamente conoscere il vettore velocità. Inoltre non è necessario alcun sistema di sincronizzazione tra i nodi. Per distanze inferiori a 40 m è possibile ottenere un errore medio inferiore a 50 cm per tutte le coordinate, valori ampiamente accettabili date le dimensioni dell'UAV.

Per gli sviluppi futuri, è possibile aumentare l'accuratezza della stima mediante un algoritmo di tracking.

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha analizzato il problema di localizzazione di un UAV mediante tecnica TOA in sistemi UWB. Le missioni dell'UAV rientrano nella ricerca di ordigni esplosivi e anti imboscata, e per consentire una navigazione quasi esclusivamente automatica è necessario localizzarlo con estrema precisione. La scelta della tecnologia UWB è stata determinata dal fatto che è possibile ottenere misure di distanze con accuratezze centimetriche. In particolare, impiegando la tecnica TW-TOF implementata nei sensori commerciali PulSON 400 della Time Domain, è possibile misurare la distanza con precisioni dell'ordine del centimetro impiegando circa 13 ms per distanze fino a 88 m. Tale tecnica non prevede alcun segnale di sincronismo tra i nodi UWB.

Per determinare la posizione dell'UAV è necessario risolvere un algoritmo di multilaterazione che determina l'intersezione di quattro sfere. In scenari reali, tale intersezione non avviene in un punto, ma crea un volume all'interno del quale è possibile determinare una soluzione approssimata. Per risolvere il sistema di equazioni non lineari è stato impiegato il metodo iterativo di Levenberg-Marquardt in quanto permette di avere errori di stima mediamente più piccoli rispetto al classico metodo dei minimi quadrati. In base alle dimensioni della GS, sono state considerate diverse configurazioni di sensori e tra queste è stata scelta quella con i sensori a distanza massima che consente di minimizzare l'errore di stima dell'UAV.

E' stato valutato l'effetto del ritardo temporale UWB con cui i sensori effettuano la misura della distanza. Per garantire errori di stima bassi è necessario compensare tale effetto, quindi introdurre delle modifiche al processo di multilaterazione. A tal proposito è stato proposto un nuovo algoritmo. Grazie all'elevata precisione della stima della coordinata z_R è stato possibile stimare la velocità relativa di avanzamento dell'UAV ed impiegarla per aggiornare le distanze misurate dai sensori secondo il percorso eseguito dallo stesso. Questa modifica ha consentito di compensare l'effetto del ritardo UWB, che non avremmo avuto se avessimo adottato altre tecniche quali la OW-TOF o la TDOA, queste ultime però necessitano di un sistema di sincronizzazione. Con il nuovo algoritmo di localizzazione, per distanze inferiori a 40 m l'errore di stima medio risulta essere minore di 50 cm per tutte le coordinate, valore congruo con le

dimensioni dell'UAV. Inoltre, per distanze inferiori a 20 m il valor medio dell'errore di stima è limitato a 20 cm.

E' stato notato che, in condizioni dinamiche dell'UAV ha importanza l'ordine di interrogazione dei sensori, ragion per cui è stato identificato un ordine che presentasse errori minimi in presenza congiunta della velocità relativa di avanzamento dell'UAV e del ritardo UWB. L'uso opportuno di diversi ordini con cui i sensori UWB effettuano le misure di distanza in base alla particolare traiettoria, può aumentare ulteriormente l'accuratezza della localizzazione.

APPENDICE

In questa sottosezione si analizzano due differenti tipologie di algoritmi di risoluzione dei sistemi non lineari: un algoritmo in forma algebrica basato sul metodo dei minimi quadrati (*Least Square Method*, LSM) ed una serie di metodi basati sulla ricerca della soluzione secondo un processo iterativo.

Metodo Algebrico

Negli ultimi anni ci sono stati numerosi studi sulla soluzione dei problemi inerenti la multilaterazione. Ad esempio, si può fare riferimento a [21] che illustra un *metodo algebrico*, alternativo ai metodi algebrici adottati nel GPS, per risolvere un sistema di equazioni con bassa complessità computazionale. Questo algoritmo viene applicato ai dati di misura, per un sistema di localizzazione TOA basato su sensori UWB.

Consideriamo il seguente problema di multilaterazione: supponiamo di avere n punti di riferimento P_1, P_2, \dots, P_n e n distanze r_1, r_2, \dots, r_n . Il problema può essere scritto nella forma lineare $b = \Gamma a$, con le relazioni definite in (A.1):

$$b = \begin{pmatrix} r_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ r_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ r_3^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \\ \vdots \\ r_n^2 - x_n^2 - y_n^2 - z_n^2 \end{pmatrix}, \Gamma = \begin{pmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -2x_n & -2y_n & -2z_n \end{pmatrix}, a = \begin{pmatrix} x^2 + y^2 + z^2 \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

La soluzione del problema si può ottenere seguendo l'approccio dei minimi quadrati [22], o il *Least Square Method* (LSM), come mostrato in (A.2):

$$a = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T b \quad (\text{A.2})$$

Da notare che tutti gli elementi della matrice $L = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T$ sono ottenuti esclusivamente dalla conoscenza delle posizioni dei punti di riferimento. Inoltre il vettore b è legato alle distanze tra il nodo mobile e tutti i punti di riferimento. Questo criterio si applica anche al caso di misure

incorrelate con differente incertezza, adottando una soluzione più raffinata, definita come *Weighted Least Square* (WLS) [22]. La soluzione finale è la seguente (A.3):

$$a = (\Gamma^T V^{-1} \Gamma)^{-1} \Gamma^T V^{-1} b \quad (\text{A.3})$$

V rappresenta la matrice di covarianza degli errori di misura.

Metodi Iterativi

In questo sottoparagrafo si introducono alcuni metodi iterativi per la risoluzione di sistemi non lineari quali: *il metodo del Gradiente*, *il metodo di Newton*, *il metodo di Gauss-Newton* ed *il metodo di Levenberg-Marquardt*. Supponiamo di considerare un sistema non lineare di N equazioni in M incognite del tipo (A.4):

$$\begin{cases} f_1 = g_1(x_1, x_2, \dots, x_M) \\ f_2 = g_2(x_1, x_2, \dots, x_M) \\ \vdots \\ f_N = g_N(x_1, x_2, \dots, x_M) \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

f_1, f_2, \dots, f_N rappresentano le funzioni non lineari, un esempio classico potrebbe essere la funzione associata ad una circonferenza: $f_1 = (x_1 - a)^2 + (x_2 - b)^2 - R^2$; x_1, x_2, \dots, x_M rappresentano le variabili del sistema.

La convergenza alla soluzione di questo sistema è controllata verificando la diminuzione di una *funzione obiettivo*. Il problema in questione diventa un problema di *minimizzazione*. L'idea di risolvere un sistema non lineare mediante un algoritmo di minimizzazione applicato alla funzione obiettivo, o di merito, non è detto che sia la migliore. Questo perché potrebbero nascere, in fase di trasformazione del problema, tanti minimi parassiti. Un sistema non lineare può non avere soluzioni nel caso di equazioni incompatibili tra loro, ma un problema di ottimo ha sempre una soluzione. Questi metodi consentono di ottenere la convergenza ad un minimo locale, mentre potremmo non avere la garanzia che il sistema ammetta soluzione.

L'ottimo del problema può essere determinato *annullando il gradiente* della funzione da minimizzare ovvero imponendo che sia $g(x) = 0$. La ricerca della soluzione consiste in un *calcolo iterativo* delle soluzioni candidate. E' necessario verificare, mediante un criterio, se la soluzione di tentativo x_{k+1} sia migliore o peggiore di quella al passo precedente x_k . Il criterio classico accetta la nuova soluzione se: $\|f(x_{k+1})\| < \|f(x_k)\|$, con la seguente definizione di norma (A.5):

$$\|f(x)\| = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N f_i^2(x) \quad (\text{A.5})$$

Nel caso in cui le singole funzioni f_i abbiano ordini di grandezza diversi tra loro si adotta la seguente definizione di norma (A.6), pesando opportunamente le funzioni:

$$\|f(x)\| = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i^2 f_i^2(x) \quad (\text{A.6})$$

Tipicamente si considerano come *funzioni di merito* quest'ultime. Adesso possiamo esporre alcuni tra i più importanti algoritmi che si basano sui concetti precedentemente asseriti.

• Metodo del Gradiente

Uno dei primi algoritmi iterativi è il *metodo del gradiente*. Il gradiente di una funzione è un vettore che definisce la direzione secondo la quale varia il più rapidamente possibile. Considerando come funzione di merito la (A.5), essa può essere riscritta nel seguente modo (A.7):

$$\|f(x)\| = \frac{1}{2} f^T f \quad (\text{A.7})$$

A questo punto il gradiente di tale funzione valutato nel punto x_k è definito dalla (A.8):

$$g(x_k) = g_k = J_k^T f_k \quad (\text{A.8})$$

La direzione individuata da $p_k = -g_k$ è quella lungo la quale la funzione obiettivo diminuisce rapidamente. Questo metodo risulta essere il complementare del metodo di Newton, che definiremo successivamente, per la soluzione dei sistemi non lineari. Il metodo di Newton può essere maggiormente convergente nella fase finale di ricerca, mentre può non andare a buon fine all'inizio.

• Metodo di Newton

Il metodo di Newton consiste in una linearizzazione del problema, ovvero si attua un'espansione in serie di Taylor del sistema di equazioni non lineari, $f(x) = 0$, intorno al punto x_k , come descritto nella relazione lineare (A.9):

$$f(x_k + d_k) \approx f_k + J_k d_k \quad (\text{A.9})$$

Troncando lo sviluppo in serie al primo termine o al primo grado, si ottiene una nuova forma della funzione, valutata nel punto x_{k+1} , che ne rappresenta una previsione (A.10):

$$f(x_k + d_k) = f(x_{k+1}) \approx f(x_k) + J(x_k)(x_{k+1} - x_k) = 0 \quad (\text{A.10})$$

Quindi (A.11):

$$x_{k+1} = x_k + d_k = x_k - J^{-1}(x_k)f(x_k) \quad (\text{A.11})$$

Questa è equivalente alla seguente relazione (A.12):

$$J_k d_k = -f_k \quad (\text{A.12})$$

Diversamente dal metodo del gradiente, il metodo di Newton ha come direzione di ricerca $p_k = d_k$, ossia quella lungo la quale la funzione di merito decresce rapidamente. Il metodo di Newton può anche non convergere, questo accade quando lo *Jacobiano* è singolare o mal condizionato. In analisi numerica, per il sistema $Ax = b$, la matrice A è definita mal condizionata

se piccole perturbazioni degli elementi di A generano grandi variazioni dell'incognita x ; inoltre viene definito un indice di condizionamento. Se l'indice di condizione è prossimo ad 1, la matrice è ben condizionata, se invece è molto maggiore di 1, allora la matrice è mal condizionata.

Dato il sistema non lineare $f(x) = 0$, lo *Jacobiano* risulta essere (A.13):

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_M} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_M} \end{pmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Il calcolo analitico della *matrice Jacobiana* può essere decisamente oneroso in termini di ritardo della CPU. Tipicamente le colonne di tale matrice si ottengono mediante il rapporto incrementale (A.14):

$$\Delta_i f(x) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + h_i, \dots, x_M) - f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_M)}{h_i} \quad (\text{A.14})$$

- **Metodo di Gauss-Newton**

Qualora il metodo di Newton non dovesse convergere, si potrebbero introdurre alcuni metodi modificati, come il *metodo di Gauss-Newton*. Si consideri nuovamente l'espressione (A.7), il gradiente di tale funzione è riportato in (A.8), mentre l'*Hessiano* è definito in (A.15):

$$G_k = J_k^T J_k + \sum_{i=1}^N f_i(x_k) T_i(x_k) \quad (\text{A.15})$$

$T_i(x_k)$ rappresenta l'*Hessiano* della funzione i -esima $f_i(x_k)$. Applicando il metodo di Newton alla funzione di merito (A.15) si ottiene la seguente relazione per la correzione d_k (A.16):

$$G_k d_k = [J_k^T J_k + \sum_{i=1}^N f_i(x_k) T_i(x_k)] d_k = -J_k^T f_k \quad (\text{A.16})$$

Durante l'azzeramento del sistema, le funzioni $f_i(x_k)$ tendono a zero. Se le singole equazioni sono *poco non lineari*, allora l'*Hessiano* $T_i(x_k)$ tende anch'esso a zero, in quanto un'equazione lineare presenta *Hessiano* nullo. Ricordiamo la forma dell'*Hessiano* di una funzione $f: \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R}$ (A.17):

$$T_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_M} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_M \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_M \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_M^2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.17})$$

A questo punto la correzione d_k si riduce in (A.18):

$$J_k^T J_k d_k = -J_k^T f_k \quad (\text{A.18})$$

Si osserva che questa condizione è ottenibile da quella di Newton moltiplicando a sinistra entrambi i membri per J_k^T . Si può dimostrare che il numero di condizione della matrice $J_k^T J_k$ è il quadrato di quello della matrice J_k , quindi la soluzione del sistema $J_k^T J_k d_k = -J_k^T f_k$ è meno precisa del metodo di Newton.

• Metodo di Levenberg-Marquardt

Uno dei metodi iterativi maggiormente utilizzati per risolvere sistemi di equazioni non lineari è il *metodo di Levenberg-Marquardt* [23]. Viene utilizzato in sostituzione al metodo di Gauss-Newton per motivi legati al possibile mal condizionamento del problema, ossia dello Jacobiano. Per ovviare a questo problema il sistema (A.18) può essere modificato in (A.19) secondo l'analisi di *Levenberg*:

$$\left(J_k^T J_k + \lambda_k I \right) d_k = -J_k^T f_k \quad (\text{A.19})$$

Il parametro λ_k viene scelto in modo tale da rendere ben condizionata la matrice $J_k^T J_k + \lambda_k I$. Questo metodo è il connubio tra il metodo di Newton ed il metodo del gradiente. Infatti, se $\lambda_k = 0$ si ottiene il metodo di Newton, mentre per valori grandi del parametro si ha prevalentemente il metodo del gradiente, con il passo eseguito approssimativamente nella direzione del gradiente. L'algoritmo di *Levenberg* ha uno svantaggio, ovvero se il parametro assume valori elevati, il termine $J_k^T J_k + \lambda_k I$ non viene affatto considerato. *Marquardt* risolse questo problema modificando la legge (A.19) con la (A.20), sostituendo la matrice identità con la matrice diagonale costituita dagli elementi $J_k^T J_k$. In questo modo per le direzioni dove il gradiente è basso, è possibile effettuare ugualmente dei salti grandi, evitando così una convergenza lenta.

$$\left(J_k^T J_k + \lambda_k \text{diag} \{ J_k^T J_k \} \right) d_k = -J_k^T f_k \quad (\text{A.20})$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Nekoogar, "Introduction to Ultra Wideband Communications", *Nekoogar.book*, 2005.
- [2] Xiaomin Chen e Sayfe Kiaei, "Monocycles shapes for ultra wideband system", *Circuits and Systems, 2002. ISCAS 2002. IEEE International Symposium on*, pp. I-597-I-600 vol. 1, 2002.
- [3] G.Roberto Aiello e Gerald D. Rogerson, "Ultra-WideBand Wireless Systems", in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 36-47, June 2003.
- [4] Rong Peng and Mihail L. Sichitiu, "Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks", *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on*, pp.374-382, Reston, VA, 2006.
- [5] Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, M.Z. Win, "Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments", *Proceedings of IEEE*, Vol. 97, No 2, Febbraio 2009.
- [6] Fredrik Gustafsson and Fredrik Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements", *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on*, pp. VI-553-6 vol.6, 2003.
- [7] Guowei Shen, Rudolf Zetik, Reiner S.Thoma, "Performance Comparison of TOA and TDOA Based Location Estimation Algorithms in LOS Environment", *Positioning, Navigation and Communication, 2008. WPNC 2008. 5th Workshop on*, pp. 71-78, Hannover, 2008.
- [8] N. A. Alsindi, B. Alavi, and K. Pahlavan, "Measurement and Modeling of Ultrawideband TOA-Based Ranging in Indoor Multipath Environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 3, pp. 1046-1058, March 2009.
- [9] F. Kendoul, I. Fantoni, K. Nonami, "Optic Flow-Based Vision System for Autonomous 3D Localization and control of small Aerial Vehicles", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, no. 6-7, pp 591-602, June 2009.
- [10] J. Tisdale, A. Ryan, Z. Kim, D. Tornqvist, and J. Hedrick, "A multiple UAV system for vision-based search and localization", *American Control Conference*, pp. 1985-1990, Seattle, WA, 2008.

- [11] A. Nemra and N. Aouf, "Robust INS/GPS Sensor Fusion for UAV Localization Using SDRE Nonlinear Filtering", *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 789-798, April 2010.
- [12] G. Mao, S. Drake, B.D.O. Anderson, "Design of a Extended Kalman Filter for UAV Localizzazione", *Information, Decision and Control, 2007. IDC '07*, Adelaide, Qld, 2007.
- [13] S.C.Lee, W.R.Lee, K.H. You, "TDOA based UAV Localization Using Dual-EKF Algorithm", *Control and Automation-Communications in Computer and Information Science*, vol. 65, pp. 47-54, 2009.
- [14] Sangdeok Kim and Jong-Wha Chong, "An Efficient TDOA-Based Localization Algorithm without Synchronization between Base Stations", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, Article ID 832351, 5 pages, 2015.
- [15] C. Rohrig, D. Hes, C. Kirsch, and F. Kunemund, "Localization of an Omnidirectional Transport Robot Using IEEE 802.15.4a Ranging and Laser Range Finder", *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3798-3803, Taipei, 2010.
- [16] S. Jovanoska and Reiner Thoma, "Multiple target tracking by a distributed UWB sensor network based on the PHD filter", *Information Fusion (FUSION), 2012 15th International Conference on*, pp. 1095-1102, Singapore, 2012.
- [17] B. Sobhani, E. Paolini, A. Giorgetti, M. Mazzotti and M. Chiani, "Bayesian Tracking in UWB Radar Sensor Networks", *Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 47-51, Budapest, 2013.
- [18] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 70-84, July 2005.
- [19] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., E. Wasle, "GNSS - Global Navigation Satellite Systems (GPS, GLONASS, Galileo, and more) ", *Springer Wien NewYork*, 2008.
- [20] A. Ippolito, "Caratterizzazione di sensori UWB per Radiolocalizzazione", *Tesi*, 2015.
- [21] Abdelmoumen Norrdine, "An Algebraic Solution to the Multilateration", *Research*, 2015.
- [22] W. Greene, "Econometric Analysis", *Fifth Edition, Prentice Hall*, 1997.
- [23] A.Ranganathan, "The Levenberg-Marquardt Algorithm", *Research*, 2004.

RINGRAZIAMENTI

Non meno importante delle sezioni precedenti è l'espressione della mia gratitudine per il sostegno e l'aiuto ricevuti durante il cammino verso questo ambito traguardo. In primo luogo vorrei ringraziare il Prof. Nepa ed i suoi assistenti Alice e Andrea, i quali hanno contribuito a rendere questo lavoro un valido documento, risolvendo ogni mio dubbio con umiltà e serenità. Senza i vostri consigli e le vostre conoscenze non credo sia stato in grado di ottenere risultati simili, motivo per cui vi ringrazio nuovamente. Colgo l'occasione per ringraziare anche l'intero team di *Microwave and Radiation Laboratory*, che con naturalezza ha ottemperato ad ogni mia richiesta.

L'aiuto più grande ed il sostegno costante derivano dagli affetti più cari, da chi ti conosce nei minimi particolari. Dovrei dedicarti una sezione di ringraziamenti a parte, ma non mi è possibile, spero di riuscire a farti capire quanto questo mio percorso di vita sia stato anche merito tuo, Stefania. Mi domando cosa avrei fatto se non ti avessi conosciuta, risponderei a me stesso che avrei affrontato una strada in salita e ricca di ostacoli. La grinta e la determinazione fanno parte del tuo bagaglio di valori, valori che mi hai trasmesso. Sei riuscita a farmi osservare le cose da un altro punto di vista, rendendomi diverso, critico ed a volte pignolo. Ti dedico parte di questo lavoro per l'amore e la sopportazione durante l'intero periodo passato insieme. Ringrazio di cuore anche i tuoi genitori, cognati e cognate per l'affetto che ogni giorno mi dimostrano, rendendomi parte integrante della tua famiglia, grazie infinite.

Tra le persone che hanno sempre creduto in me e non mi hanno mai abbandonato ci siete voi: Mamma, Papà, Nonno, Ale, Zii. Anche per voi ci sarebbe un capitolo intero da scrivere per dimostrarvi quanto siete importanti per me. Da ragazzo ero un po' scettico sul fatto che in futuro sarei riuscito a raggiungere mete importanti, ma mi avete trasmesso la determinazione ed il sacrificio nell'affrontare gli impegni. Papà, spero di essere all'altezza delle attività future che dovrò affrontare, spero di raggiungere forti ambizioni e superare altrettanti ostacoli che la vita ed il lavoro ti pongono davanti. Mi piacerebbe valere almeno metà di quanto tu sia valso, infinitamente grazie per quello che hai fatto e continuerai a fare per me. Mamma, sinonimo di amore e sacrificio, grazie dei tuoi insegnamenti, della tua pazienza, grazie per esserci sempre stata quando ne ho avuto bisogno. A voi, mamma e papà, dedico l'altra parte di questo lavoro, frutto di passione e dedizione, la stessa passione e la stessa dedizione che avete dimostrato nei miei confronti, grazie. Nonno, Ale, Zii, non avete mai perso un'occasione per trasferirmi il vostro amore, mi avete sempre sostenuto ed incoraggiato, grazie di tutto.

Termino con il ringraziare i cugini, gli amici e i colleghi del tempo che mi avete dedicato, per l'aiuto ricevuto, per il confronto reciproco, inevitabile per accrescere umanamente oltre che professionalmente.

Infinitamente GRAZIE.