

---

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
CAMPUS DI CESENA  
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA,  
INFORMATICA E DELLE TELECOMUNICAZIONI

MISURE SPERIMENTALI SU SISTEMI WIRELESS  
PER LA LOCALIZZAZIONE INDOOR

Elaborato in Telecomunicazioni

*Relatore*  
Prof. Marco Chiani

*Presentata da*  
Domenico Di Iorio

*Correlatore*  
Dott. Ing. Matteo Mazzotti

---

SESSIONE II ANNO ACCADEMICO 2012-2013



*Dove sei?*  
*Sai la risposta, ma la chiedi a me,*  
*come se i sassi potessero muoversi*  
Aimone Romizi,  
Fast Animals And Slow Kids



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>vii</b>
<b>1 Sistemi di localizzazione radio e satellitare</b>	<b>1</b>
1.1 Classificazione dei Sistemi Wireless di Posizionamento . . . .	2
1.1.1 Classificazione Basata sulle Misure Disponibili . . . .	4
1.1.2 Classificazione basata sulla configurazione di rete . . .	9
1.1.3 Performance . . . . .	9
1.2 Sistemi di Posizionamento e di Navigazione in uso . . . . .	10
1.2.1 Sistemi Basati su Satellite . . . . .	11
1.2.2 Sistemi Basati su Reti Terrestri . . . . .	12
<b>2 Tecniche di ranging e localizzazione attraverso misure di tempo</b>	<b>17</b>
2.1 Misura del tempo, analisi delle non idealità . . . . .	17
2.2 Algoritmi per la sincronizzazione . . . . .	19
2.2.1 Sincronizzazione dei nodi Two-way . . . . .	20
2.2.2 Sincronizzazione attraverso broadcast di riferimento .	20
2.3 Metodo di ranging del nanoLOC: SDS-TWR . . . . .	21
2.3.1 SDS-TWR, Passo 1: Generazione del primo set di valori di tempo . . . . .	22
2.3.2 SDS-TWR, Passo 2: Concessione dei permessi per effettuare la misura . . . . .	22
2.3.3 SDS-TWR, Passo 3: Eliminazione dell'Errore di Clock, generazione della seconda metà dei valori . . . . .	22
2.3.4 SDS -TWR, Passo 4: scelta del modo di ranging . . .	23
2.3.5 SDS-TWR, Passo 5: calcolo di $Tof$ e $d$ . . . . .	24

<b>3</b>	<b>Attività svolta</b>	<b>25</b>
3.1	Le applicazioni dimostrative . . . . .	25
3.2	Obiettivi . . . . .	28
3.3	L'ambiente di sviluppo: AVR Studio . . . . .	30
3.4	Strutture dati e funzioni utilizzate . . . . .	30
3.5	Algoritmi sviluppati e diagrammi di flusso . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Risultati numerici, descrizione tecnica dell'hardware utilizzato</b>	<b>37</b>
4.1	Programma MatLab . . . . .	38
4.2	Valutazione ed analisi dei ranging . . . . .	42
4.3	Valutazione ed analisi delle localizzazioni . . . . .	47
4.4	Descrizione dell'Hardware . . . . .	50
4.4.1	Caratteristiche Tecniche nanoPAN DK Board . . . . .	50
4.4.2	Caratteristiche Tecniche nanoPAN 5375 RF Module . . . . .	54
4.4.3	Caratteristiche Tecniche ATmega 1284P . . . . .	54
	<b>Conclusioni</b>	<b>57</b>

# Introduzione

La localizzazione è il processo che si usa per valutare la posizione di un oggetto o persona, rispetto ad un sistema di riferimento prefissato. È un tema centrale nelle telecomunicazioni e negli ultimi decenni ha riscosso un sempre maggiore interesse grazie allo sviluppo di tecnologie che permettono di ottenere risultati migliori in termini di accuratezza, a costi sempre più sostenibili. Si può innanzitutto fare una distinzione tra sistemi per la localizzazione indoor e outdoor, le due categorie devono infatti rispondere a specifiche ben differenti ed affrontano problemi di natura profondamente diversa. Nel primo capitolo, verranno fatte una serie di classificazioni: inizialmente verranno differenziati i sistemi di localizzazione in base al metodo applicato ed alla grandezza fisica misurata dai sensori presenti nel sistema. Si vedranno diverse tecniche di *ranging* (valutazione della distanza tra nodi), basate su tempo di propagazione del segnale elettromagnetico, direzione di arrivo, o potenza trasportata. Una seconda classificazione verrà fatta sulla base della configurazione del sistema di localizzazione a livello di topologia di rete. Infine si farà un accenno a quali siano gli strumenti per valutare le performance di una misura di posizione rilevata. I sistemi di posizionamento possono essere suddivisi in due grandi gruppi: quelli satellitari e quelli terrestri. I primi hanno copertura globale ma sono estremamente inefficaci per ambienti chiusi o zone in ombra, i secondi ottimi per la localizzazione indoor, ma limitati in raggio di copertura. Il sistema utilizzato nell'elaborato in oggetto utilizza tecniche di ranging basate sul tempo di propagazione del segnale. Questi aspetti verranno quindi approfonditi nel secondo capitolo. In particolare verranno evidenziati i problemi riscontrati nelle misure di tempo, derivanti da effetti strutturali dei dispositivi (non idealità e non sincronizzazione di clock) e da altri fenomeni aleatori (rumore). Esistono alcuni algoritmi in grado di risolvere o per lo meno contenere questi problemi e ne verranno descritti alcuni. Verrà poi analizzato con maggiore

dettaglio l'algoritmo di ranging usato dal sistema di interesse, il quale comprende al suo interno anche una delle tecniche per far fronte ai problemi di sincronizzazione dei clock.

Il terzo capitolo è rivolto all'attività svolta e riassume al suo interno le esperienze effettuate utilizzando il software e l'hardware forniti. In particolare vengono illustrati gli obiettivi del lavoro e come si è pervenuti ad una soluzione. Si è andati ad intervenire in un progetto già esistente, portato avanti dal CIRI ICT, aggiungendovi la funzionalità di localizzazione di un *tag*<sup>1</sup>. Infine verrà fatta una panoramica sull'ambiente di sviluppo e verranno forniti alcuni dettagli sui fondamenti del codice scritto.

I risultati ottenuti verranno raccolti nell'ultimo capitolo, insieme ad una breve descrizione tecnica dei dispositivi componenti il sistema.

---

<sup>1</sup>nome usato per indicare un generico oggetto di cui si vuole conoscere la posizione



# Capitolo 1

## Sistemi di localizzazione radio e satellitare

Sfruttando principalmente le comunicazioni wireless è stato possibile sviluppare una grande varietà di sistemi in grado di compiere la localizzazione, nei più svariati contesti, e con le più svariate tecnologie. Localizzazione è un termine che fa riferimento a sistemi, algoritmi, procedure, nati in campo militare, ma recentemente espansi alle applicazioni civili e industriali. Il più noto ed utilizzato sistema di localizzazione radio è senza dubbio il GPS (Global Positioning System, Sistema di posizionamento globale) il quale rende possibile ad un utente, attraverso un dispositivo terrestre, di mappare la propria posizione geografica, sfruttando le comunicazioni satellitari. Attualmente questi sistemi sono presenti su molteplici tipologie di terminali, e vengono sfruttati per una vasta quantità di applicazioni, quali rintracciamento, navigazione, segnalazione di pericolo, richieste di soccorso, e così via... Si può intuire facilmente quanto sia vasto l'interesse allo sviluppo di questo tipo di tecnologie, e conseguentemente, quale sia lo stimolo ad investimenti sempre più importanti in questa direzione. Nessuna delle tecnologie attualmente esistente può funzionare autonomamente e soddisfacentemente per localizzazioni in ambienti eterogenei e con necessità di accuratezza variabile. È dunque verosimile pensare ad un futuro sempre più permeato da sistemi di localizzazione a tecniche ibride, ad esempio, sistemi GPS, che utilizzino tecnologia terrestre laddove il satellite non sia efficace (edifici, luoghi chiusi o cavi). Oltre alle classiche applicazioni in campo militare, medico, civile, industriale sono già esistenti progetti più sofisticati e suggestivi. Un

esempio è costituito dall'automobile intelligente finanziata dal motore di ricerca Google in collaborazione con alcune delle più famose case automobilistiche, capace di navigare autonomamente verso una destinazione usando contemporaneamente sistemi GPS, radar e tecnologie di controllo automatico che monitorino il corretto funzionamento meccanico della vettura, il tutto senza la necessità di alcun utente umano alla guida. Per progetti complessi e innovativi come questo, sono previsti investimenti di oltre 6 miliardi di Euro entro il 2017 [1].

## 1.1 Classificazione dei Sistemi Wireless di Posizionamento

La peculiarità primaria dei sistemi di posizionamento wireless è la necessità di un terminale attivo, di cui si vuole conoscere la posizione. Questo aspetto è profondamente diverso dai classici sistemi di radio-localizzazione, ove l'elemento oggetto della ricerca non collabora alla propria localizzazione, come ad esempio i sistemi radar usati nel settore militare e per la sorveglianza. Al contrario, la presenza di un terminale attivo che contribuisca alla propria localizzazione implica che quest'ultimo raccolga informazioni ad esempio effettuando misure relative alla distanza da nodi del sistema assunti come riferimento e scambi dati con essi o con altri elementi del sistema. Queste informazioni sono generalmente usate dal terminale stesso, ma in alcune circostanze sono invece inoltrate ad un altro utente che sia responsabile delle attività dell'elemento localizzato. Vi è inoltre una fondamentale differenza tra localizzazione/posizionamento e navigazione. Infatti per navigazione ci si riferisce all'obiettivo di pianificare, registrare, controllare il percorso di un veicolo, dati posizione di partenza e posizione di arrivo. Ciò implica che la navigazione non è finalizzata solo a conoscere la posizione puntuale di un terminale, ma anche tracciarne la traiettoria dopo averlo localizzato. È evidente che per la navigazione non è sufficiente solo una mera raccolta dati, relativa alla distanza di un terminale dal sistema di riferimento, ma è necessaria una più articolata elaborazione di questi, per la stima della velocità, e per la possibilità di accelerazione (controllata o aleatoria) subita dal terminale stesso. In generale i sistemi di posizionamento wireless sono costituiti da due elementi fondamentali: un certo numero di nodi, detti *ancore*, la cui posizione sia nota con la massima precisione all'interno di un

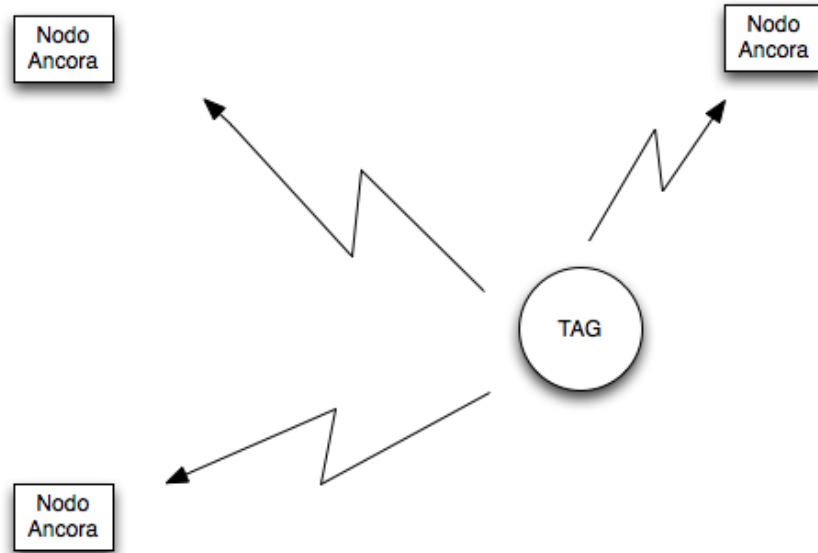


Figura 1.1: Elementi necessari per un sistema di localizzazione wireless

sistema di riferimento, ed uno o più elementi mobili di cui si vuole calcolare la posizione, detti tag o target (Fig. 1.1). La terminologia non è affatto universale e dipende dall'ambiente di lavoro. Ad esempio nei sistemi di posizionamento basati su cellulare si usa il termine Stazione Base e Stazione Mobile (Base Station, Mobile Station) per far riferimento a dispositivi RF le cui coordinate siano rispettivamente note oppure ignote. Nel contesto delle WSN ( Wireless Sensor Networks ) è più consueto utilizzare il termine nodo, che come visto pocanzi si distinguono in nodo ancora, e nodo tag, target, o agente. Il posizionamento avviene usualmente in due passi:

- Rilevazione di misure specifiche da parte dei nodi;
- Processamento delle misure per determinare la posizione del nodo agente;

Un tipico esempio (nonché quello che verrà più ampiamente discusso nelle pagine a seguire) è dato dalla misura delle distanze tra nodo agente e nodo

ancora. Quest'operazione viene comunemente chiamata ranging.

### 1.1.1 Classificazione Basata sulle Misure Disponibili

In linea di principio, ogni segnale o quantità fisica misurabile che dipende dalla posizione, può contribuire alla stima della posizione. A seconda dell'hardware di cui sono muniti i nodi, sono disponibili diversi tipi di misure: RF, infrarossi, ultrasuoni e accelerometri (o altri dispositivi inerziali). In particolare quando si prendono in considerazione le comunicazioni a RF, si possono trarre informazioni dipendenti dalla posizione, analizzando le caratteristiche dei segnali, come ad esempio la potenza del segnale ricevuto (Received Signal Strength, RSS), tempo di arrivo (Time Of Arrival, TOA) e l'angolo di arrivo (Angle Of Arrival, AOA), o valutando se due o più nodi siano in visibilità.

#### Angolo di Arrivo (Angle Of Arrival, AOA)

Il metodo dell'Angolo di Arrivo si usa per determinare la direzione di propagazione di un segnale RF inviato da un tag. Usando antenne fortemente direzionali sul ricevitore, si può stimare la direzione del segnale inviato dal trasmettitore (tag). L'angolo di arrivo si misura tra due rette, una passante per ancora e tag, l'altra passante per l'ancora, e con una direzione fissata, che può essere per esempio il nord (Fig. 1.2). Fare misure utilizzando questo metodo, spesso richiede un complesso sistema di array di antenne in diverse postazioni della cella. La precisione cresce al crescere del numero di array di antenne usate. Altro problema non trascurabile è l'estrema vulnerabilità contro le minacce alla sicurezza, in quanto si possono eludere facilmente i lettori riflettendo o ritrasmettendo i segnali.

#### Tempo di Arrivo (Time Of Arrival, TOA)

Considerando che le onde elettromagnetiche viaggiano alla velocità della luce:

$$c \approx 10^8 m \cdot s^{-1}; \quad (1.1)$$

la distanza  $d$  può essere facilmente ottenuta dalla misura del ritardo di propagazione o tempo di volo (Time of Flight, TOF), attraverso la stima

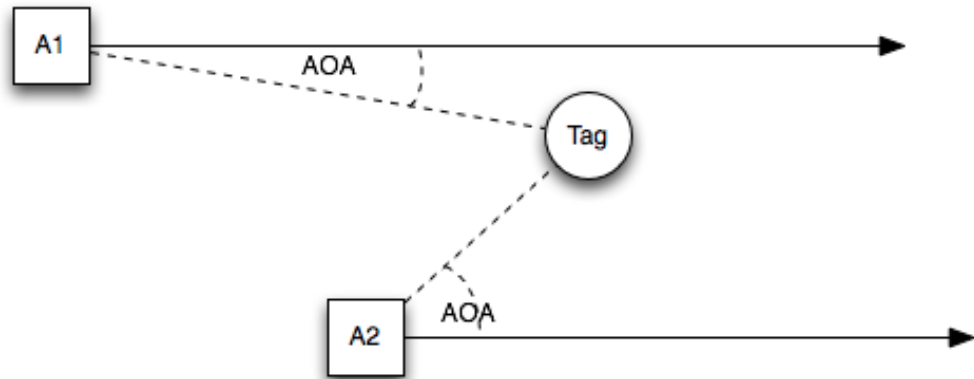


Figura 1.2: Schema rappresentativo del metodo dell'Angolo di Arrivo

del tempo di arrivo del segnale (TOA):

$$\tau = \frac{d}{c}. \quad (1.2)$$

Quando sono disponibili segnali a banda larga e misure di tempo molto accurate, il ranging può avere un'accuratezza molto raffinata. Ad ogni modo, le fondamentali fonti di errore sono date dall'errore sulla misura dei tempi e dalla sincronizzazione dei dispositivi. A partire dal ranging è facile ottenere la vera e propria localizzazione: l'algoritmo usato per il calcolo è dato da semplici constatazioni geometriche relative all'intersezione delle circonferenze con raggi forniti dai ranging e centri nelle ancore (Fig. 1.3).

### Differenza nel Tempo di Arrivo (Time Difference Of Arrival, TDOA)

Mentre la localizzazione tramite TOA può essere vista come risultato dell'intersezione di opportune circonferenze con centro nelle ancore, il metodo del TDOA richiede di determinare le intersezioni di iperboli aventi come fuochi i nodi in considerazione. In questo caso entrano in gioco due ancore, entrambe misurano il tempo impiegato da un segnale a percorrere la distanza dal tag. Il valore preso in considerazione stavolta però è la differenza

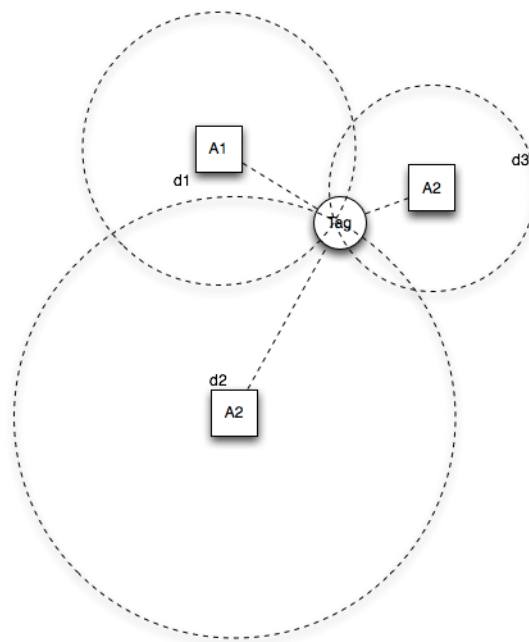


Figura 1.3: Schema rappresentativo della localizzazione attraverso il metodo TOA e RSS

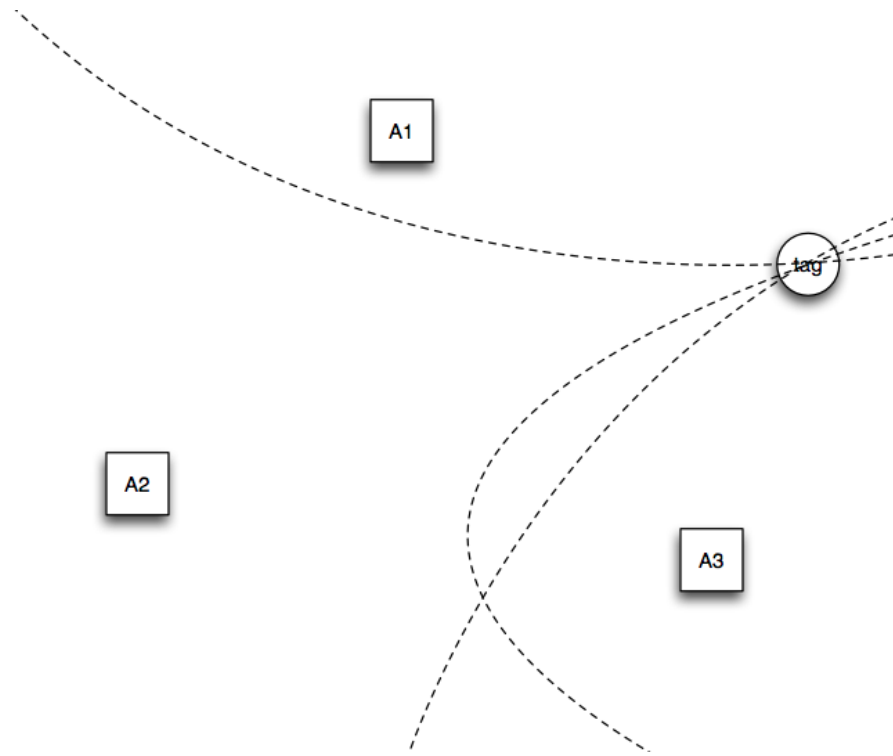


Figura 1.4: Schema rappresentativo del metodo TDOA

tra i due tempi misurati, ottenendo così *il luogo di punti avente costante la differenza delle distanze da due punti dati*<sup>1</sup>: il tag apparterrà ad un punto di tale insieme. Avendo dunque almeno tre antenne ed usate a coppie, si può individuare univocamente il tag intersecando i tre grafici ottenuti (Fig. 1.4).

### Potenza del Segnale Ricevuto (Received Signal Strength, RSS)

Il metodo della potenza del segnale ricevuto, usa un certo numero di access points (AP) WLAN 802.11, contemporaneamente per tracciare la posizione del tag. Si presuppone che il tag sia dotato di un dispositivo per la ricezione attraverso WLAN 802.11. Sono necessari almeno 3 access point per determinarne la posizione. Per incrementarne la precisione, una versione

<sup>1</sup>definizione di parabola

più sofisticata di questo metodo si crea una mappa chiamata RF fingerprint (impronta digitale), basata sulla calibrazione della potenza di un segnale Wi-Fi in aree predefinite. In un sistema RSS la distanza tra un tag e un ancora è stimata a partire dalla potenza del segnale Wi-Fi ricevuto da un access point, conoscendo la potenza del segnale in uscita dal tag, utilizzando un particolare modello di perdita della tratta radio. Un server di localizzazione usa un algoritmo per posizionare il tag, a partire dalle distanza tag-ancora misurate. Sebbene vi sia profonda diversità nelle misure, una volta calcolate le distanze, l'algoritmo è praticamente identico a quello utilizzato dal metodo del TOA ed è fondamentalmente dato dall'intersezione di 3 circonferenze (Fig. 1.3). I problemi di questo metodo sono legati principalmente alla necessità di avere un elevato numero di access point nella cella di lavoro. Inoltre bisogna tenere in considerazione la non esistenza di un modello di perdite della tratta radio per un ambiente non stazionario ed eterogeneo. Conseguentemente le misurazioni fatte durante la fase di ranging potrebbero non essere adeguatamente accurate. Bisogna inoltre escludere questa metodologia dalle applicazioni in campo di sicurezza, in quanto è estremamente facile ingannare le ancore, modificando la potenza in uscita al dispositivo sul tag.

Quantità Misurata	Schema Posizionamento	Aspetti Caratteristici
Angolo di Arrivo	Basato sugli angoli	Caratterizza la direzione di propagazione. Richiede l'uso di array di antenne.
Potenza del segnale ricevuto	Basato sulle distanze	Misura la potenza ricevuta.
Tempo di arrivo	Basato sulle distanze	Misura il ritardo di propagazione delle onde elettromagnetiche
Differenza di tempi di arrivo	Basato sulla differenza delle distanze	Misura la differenza tra i ritardi di propagazione delle onde elettromagnetiche



### 1.1.2 Classificazione basata sulla configurazione di rete

Il tipo di misura disponibile e la configurazione di rete sono gli elementi principali che fanno determinare l'algoritmo necessario per risolvere il problema della localizzazione. A seconda delle restrizioni dell'applicazione, potrebbe capitare che solo alcuni nodi (le ancore) conoscano la propria posizione, essendo equipaggiati di ricevitore GPS o essendo stati installati in posizioni note. Gli altri nodi (agenti, o tag) sono quelli di cui si desidera individuare la posizione e li si dovrà far interagire con i nodi ancora. Quando è possibile l'interazione diretta tra tag e un sufficiente numero di ancore sarà possibile usare gli algoritmi per la localizzazione cosiddetti single-hop. Quando contrariamente la posizione deve essere ricavata attraverso una cooperazione di nodi ancora non direttamente con il tag gli algoritmi sono di tipo multi-hop. Ulteriore distinzione può essere fatta tra scenari basati su ancore, ove la localizzazione è relativa alle ancore stesse, e scenari liberi da ancore, ove si localizza il tag in maniera assoluta, riferendolo a coordinate terrestri oppure coordinate convenzionali dell'ambiente in cui il sistema è utilizzato. Quest'ultimo caso rispecchia gran parte dei sistemi usati nella sicurezza e nel settore militare. Infine la localizzazione può essere anchor-centered, o network-centered: nel primo caso è il tag a raccogliere informazioni ed elaborare la propria posizione, nel secondo a compiere le operazioni di localizzazione sono le ancore.

### 1.1.3 Performance

I requisiti della qualità in un processo di localizzazione, sono determinati dall'applicazione della stessa. In particolare, poichè la misura della distanza tag-ancora è affetta da incertezza, anche il posizionamento finale del tag lo è. L'errore di stima di posizione è dato dalla distanza euclidea tra il punto stimato  $\hat{x}$  ed il punto reale  $x$ :

$$e(x) = \| \hat{x} - x \|; \quad (1.3)$$

Una misura locale delle prestazioni dal cosiddetto Root Mean Square Error della posizione stimata:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\mathbb{E}\{e^2(x)\}} \quad (1.4)$$

dove l'operatore  $\mathbb{E}$  indica la media statistica del processo aleatorio  $e$ . La RMSE è legata alla precisione, in quanto essa misura di quanto devia il valore stimato, dal valore reale. Alte precisioni corrispondono a basse RSME. Un'altra rappresentazione della precisione nella misura riguarda il raggio di confidenza, ossia l'insieme di punti con distanza dal punto reale inferiore ad una soglia data. Per caratterizzare la qualità di un sistema di localizzazione in termini di precisione, si può misurare qual'è la probabilità (o percentuale di tempo, ipotizzando il processo aleatorio ergodico) per cui la stima di una misura cada al di fuori del raggio di confidenza, essa prende il nome di outage probability, e la sua espressione analitica è:

$$p_{\text{out}} = \mathbb{P}\{e^2(x) > e_{th}\}; \quad (1.5)$$

$\mathbb{P}\{\dots\}$  rappresenta la probabilità che l'errore sia maggiore di una soglia. La probabilità viene valutata sull'insieme di ogni possibile configurazione spazio-temporale del sistema. Questo parametro, rappresenta un indice globale delle prestazioni del sistema.

## 1.2 Sistemi di Posizionamento e di Navigazione in uso

Oltre alla classificazione precedentemente fatta, si possono distinguere i sistemi di localizzazione tra terrestri e satellitari. I sistemi satellitari, consistono in costellazioni di satelliti artificiali che ruotano in orbite ben note, e trasmettono continuamente segnali a terminali mobili per ottenere misure di ranging. Questi a differenza dei secondi sono i più sfruttati per i sistemi di navigazione, invece che solo per il posizionamento. Si nomini il GPS che è oggi il sistema primario per la navigazione satellitare globale. I sistemi terrestri, invece, sono basati su una rete di stazioni di riferimento posizionate in terra. Questi sono caratterizzati da applicazioni in campi specializzati, ed alti costi di installazione e manutenzione. Una delle principali differenze tra sistemi satellitari e terrestri, è nello scopo primario che essi hanno: mentre i primi sono stati costruiti nella maggior parte dei casi con la finalità di localizzare, nel caso dei sistemi terrestri, la localizzazione è spesso stato un effetto collaterale del loro utilizzo. Negli ultimi anni tuttavia, i due tipi di sistemi stanno tendendo a convergere verso un'unica strada, attraverso l'integrazione di dispositivi, servizi ed applicazioni di

navigazione e comunicazione (sistemi e servizi NAV/COM). Una frontiera del posizionamento wireless, è un sistema ibrico che usi contemporaneamente la tecnologia satellitare e quella terrestre. Un esempio lampante è dato dal sistema assistito di navigazione GPS, il quale usa la rete terrestre per migliorare le performance del ricevitore GPS.

### 1.2.1 Sistemi Basati su Satellite

Oltre al GPS esistono altri tipi di sistemi di navigazione satellitare, si faccia riferimento all'europeo Galileo, o al Russo GLONASS, o ancora al Cinese Beidou. Essi creano un'importante competizione e complementarità all'indiscusso primato del GPS.

#### GPS

Il GPS è un sistema di radio navigazione basato su satellite che permette di calcolare, una posizione precisa nel tempo e spazio tridimensionale in un qualunque luogo della terra. I dati utilizzati dal GPS per compiere l'operazione, sono ottenuti attraverso segnali per la misura del TOA, o pseudo-ranging, da un minimo di 4 satelliti. Lo pseudo-ranging, è la distanza misurata attraverso la linea di vista di un segnale broadcast da ognuno degli  $N$  satelliti. Lo pseudo-range  $PR_k$  per ogni satellite è dato da un'equazione del tipo:

$$PR_k = \sqrt{(x_k - x_u)^2 + (y_k - y_u)^2 + (z_k - z_u)^2} + c \cdot \Delta b_u, \quad (1.6)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_{sat} \quad (1.7)$$

dove  $x_k$ ,  $y_k$  e  $z_k$  sono le coordinate del  $k$ -esimo satellite chiamato ECEF (Earth Centered, Earth-fixed),  $x_u$ ,  $y_u$  e  $z_u$  sono le coordinate dell'utente,  $c$  è la velocità della luce e  $\Delta b_u$  è l'offset tra il riferimento di tempo dell'utente e quello del GPS (non noto). È possibile dimostrare che per trovare la posizione dell'utente, è necessario un sistema di almeno quattro equazioni del tipo precedente, le quali vengono linearizzate e risolte iterativamente. In linea di principio è possibile localizzare utenti in maniera molto accurata, ma esistono altre fonti di errore nel sistema. Un elemento di cui occorre tener conto è dato dai ritardi atmosferici, in quanto i segnali viaggiano attraverso ionosfera e troposfera, e pertanto arrivano in ritardo rispetto a quanto previsto.

## Galileo

Galileo può essere vista come la versione europea dell'americano GPS o del russo GLONASS. Implementato e messo in funzione da ESA (European Space Agency) nel Maggio 2003, ha il compito di cooperare con i due sistemi, nominati pocanzi. Esso consta di 30 satelliti MEO (Medium Earth Orbit) situati in orbite dal semiasse maggiore di 29601,297 km in media.

### 1.2.2 Sistemi Basati su Reti Terrestri

Il trend nell'ambito di localizzazione personale è che i dispositivi siano in grado di funzionare in diverse e variabili condizioni critiche, come all'interno di abitazioni, di edifici, luoghi sotterranei, o cavi. Sfortunatamente, i sistemi di localizzazione basati su satellite non funzionano correttamente in questi luoghi, a causa dell'estrema attenuazione introdotta dagli elementi architettonici e dell'effetto multipercorso che si verifica con la riflessione involontaria delle onde elettromagnetiche. Laddove vi sia un ricevitore in ambiente indoor, la ricezione del segnale è affetta da forte attenuazione della componente diretta e non trascurabili componenti riflesse o disperse. L'attenuazione di percorso diretto può essere incrementata di valori tra i 10 e i 25 dB, prendendo il caso di un segnale GPS, la potenza tipica outdoor (intorno ai -160dB) arriva può arrivare a minimi di -190 dB; la sensibilità nominale dei ricevitori GPS commerciali in ingresso è di circa -178 dBW. Aggiungendo a ciò i problemi dell'effetto multi-percorso, si capisce facilmente che l'uso del ricevitore GPS in ambienti indoor diventa inadeguato, sostanzialmente bisogna approcciare il problema in modo diverso. Oggi una sostanziosa parte della ricerca è focalizzata allo sviluppo di sistemi terrestri come mezzo di posizionamento e navigazione, laddove fallisce il sistema GPS. I requisiti sono notevoli in fatto di precisione, nonostante notevoli siano anche le problematiche tipiche delle comunicazioni wireless. Oltre a quelle già citate occorre anche la necessità di soddisfare più utenti contemporaneamente (in particolare minimizzando le interferenze) ed il rapporto segnale rumore (SNR) tipicamente debole. Sono state studiate diverse tecnologie per il posizionamento indoor.

I loro elementi distintivi sono:

- L'algoritmo di posizionamento, che usa i vari tipi di misura sui segnali (TOA, AOA o RSS);
- Lo strato fisico dell'infrastruttura di rete usata per comunicare con utente finale;

La tecnologia che sembra essere più promettente sul posizionamento e la comunicazione indoor sembra essere quella a Banda Ultra Larga (UWB, Ultra Wide Band), ma attualmente i più usati sono i sistemi basati sulle reti cellulari, su WLAN (Wireless Local Area Network), su reti di sensori, e sull'identificazione a radio frequenza. I sistemi basati su reti terrestri in generale hanno la caratteristica di avere copertura solo locale, o a stretto raggio, a differenza di quelli satellitari che invece si pongono lo scopo di avere una copertura globale.

### **Posizionamento in Reti Cellulari**

Le reti cellulari sono composte da una serie di stazioni base (BS), ognuna con copertura di raggio dell'ordine della decina di chilometri. Esse sono oggi largamente diffuse nei paesi sviluppati. Nella maggior parte dei casi il posizionamento è basato su TDOA: ad esempio la localizzazione GSM si basa sulla differenza di tempo osservato (OTD, Observe Time Difference). La tecnica dell'OTD consiste nel valutare la differenza di tempo tra segnali che partendo da due stazioni base diverse arrivano allo stesso terminale. Come nel caso del TDOA, anche in questo caso per ogni coppia di Stazioni Base si genera un'iperbole che ha come fuochi le stazioni stesse e a cui appartiene la posizione del Tag; conseguentemente, anche in questo caso, per individuare univocamente la posizione il terminale deve essere in visibilità con almeno 3 stazioni base. La precisione finale della stima nel posizionamento è compresa tra i 50 e i 500 metri. Nel caso delle reti UMTS il metodo usato per la stima del parametro si chiama OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival) ed è basato su un approccio molto simile a quello appena descritto. L'accuratezza del posizionamento basato su reti cellulari è tuttavia decisamente modesta, per questo motivo i più moderni algoritmi cercano di ottenere ogni informazione disponibile nell'ambiente (topologia della rete, effetto doppler) per abbassare l'errore di stima unendo i dati ricavati dalle diverse fonti.

### **Posizionamento in LAN Wireless**

Le localizzazioni tramite WLAN sono diffuse in aree più piccole rispetto a quelle in considerazione per i sistemi cellulari. Sono ampiamente utilizzati sia in ambito pubblico che privato, usano questa tecnologia uffici, università, aziende, aeroporti, musei, centri commerciali e altro ancora. Questo tipo di localizzazione è estremamente comodo, ed economico, perchè si basa sul metodo del RSS, e dal momento che in ogni WLAN la misura della potenza del segnale ricevuto fa parte dell'uso ordinario di ogni dispositivo ad essa connesso, per la localizzazione non è necessario installare ne' configurare alcun altro tipo di infrastruttura hardware ad hoc.

### **Posizionamento in Identificazione a Radio Frequenza**

La tecnologia dell'identificazione a Radio Frequenza ha attratto un notevole interesse in tutto il mondo, in quanto può essere datata al 1948. Un numero enorme di applicazioni nei più svariati settori ne fa uso: logistica, trasporti, sorveglianza, automazione e più in generale nell'identificazione di oggetti real-time. Un sistema RFID consiste di etichette (tags) applicati agli oggetti e dei corrispondenti lettori. Il lettore interroga i tags via collegamento wireless, per ottenere i dati salvati in essi. Nei casi di specifiche stringenti in termini di costi e consumi di potenza, si prende in considerazione l'idea di usare tag passivi o semi-passivi. Gli sviluppi recenti evidenziano un trend che tende a fondere le tecnologie RFID con quelle RTLS, nel 2006 è stato introdotto lo standard ISO/IEC 24730 con l'obiettivo di colmare le lacune che separano la tecnologia RFID da quella RTLS. Gli algoritmi di posizionamento usati nei sistemi RFID basati su RTLS sono i medesimi adottati nei sistemi WLANS e WSN.

### **Posizionamento in WSN**

Una rete WSN è definita da dispositivi chiamati nodi, che possono monitorare una parte dell'ambiente attraverso dei sensori e comunicare le informazioni attraverso un collegamento wireless. I dati sono inoltrati ad un controllore, o ad un'altra rete. Questo tipo di reti sono, o saranno utilizzate nella medicina, agricoltura, sicurezza stradale, rilevamento pericoli naturali. Col termine WSN si intende un vasto insieme di strutture, che variano a seconda dell'applicazione in ogni aspetto (hardware utilizzato, misure fatte,

algoritmi adottati...): in alcuni casi si prevede l'installazione di una struttura fisica, in altri i nodi possono essere mobili. L'infrastruttura può prevedere un nodo centrale di posizione nota oppure una postazione per il processamento dati con risorse più estese in termini di capacità di calcolo e energia. La dimensione della rete, strettamente legata alla densità dei nodi ed alla copertura d'area che si vuole ottenere, occupa un ruolo fondamentale nella progettazione di questi sistemi. Per aree di grande estensione l'obiettivo primario è trovare un compromesso tra quantità e densità di nodi installati, e complessità computazionale degli algoritmi di localizzazione adottati.

### **La tecnologia UWB**

La tecnologia UWB è quella che sembra promettere i risultati migliori in termine di localizzazione indoor in quanto può consentire stime molto accurate nelle brevi distanze. Essa potrà diventare una tecnologia utilizzabile anche per le comunicazioni a breve distanza negli ambienti indoor e desta un notevole interesse in quanto le sue caratteristiche saranno : alta velocità, bassa complessità, bassi costi e consumi. Ha comprensibilmente generato notevole interesse da quando la FCC (Federal Communications Commission, Commissione federale per le comunicazioni) ha concesso all'UWB l'uso dei 7,5 GHz di spettro compresi tra i 3,1 e i 10,6 GHz. Tradizionalmente i sistemi di comunicazione UWB utilizzano impulsi di brevissima durata, tipicamente dell'ordine del nanosecondo, distribuendo così l'energia del segnale radio in modo piuttosto uniforme sulla larga banda di frequenze a disposizione. Questo metodo è chiamato IR-UWB impulso radio UVWB. Un enorme vantaggio dato da ciò è la possibilità di poter stimare in modo estremamente fine il TOA, permettendo così ranging con errore di ordine inferiore al metro. Verso la fine del 2011 sono usciti sul mercato i primi dispositivi UWB e nel prossimo futuro sarà possibile ottenere sistemi wireless per la localizzazione indoor estremamente precisi con tag caratterizzati da costi e consumi molto bassi.





## Capitolo 2

# Tecniche di ranging e localizzazione attraverso misure di tempo

Il sistema a cui si fa riferimento nel presente elaborato utilizza la misura del tempo come tecnica di ranging, a tal fine viene utilizzato un oscillatore al quarzo di cui ogni nodo è equipaggiato per la misura del tempo. I principali problemi a cui si va incontro sono proprio legati alle non idealità di tali oscillatori, per poter effettuare delle misure significative ed efficaci, si deve quindi tener conto di tali fattori, e ci si deve premurare di effettuare una periodica sincronizzazione tra nodi remoti (quindi con diversi riferimenti di tempo). Nel presente capitolo saranno illustrate le problematiche principali che si riscontrano durante le misure di tempo e, in seguito, verrà illustrata dettagliatamente la tipologia di ranging usata dallo specifico sistema di interesse dell'elaborato.

### 2.1 Misura del tempo, analisi delle non idealità

Come detto, i nodi sono dotati di oscillatori locali usati come riferimento per effettuare misure del tempo reale  $t$ . Sfortunatamente, ogni oscillatore è soggetto a non idealità, dovute ad effetti fisici, dunque per il tempo stimato

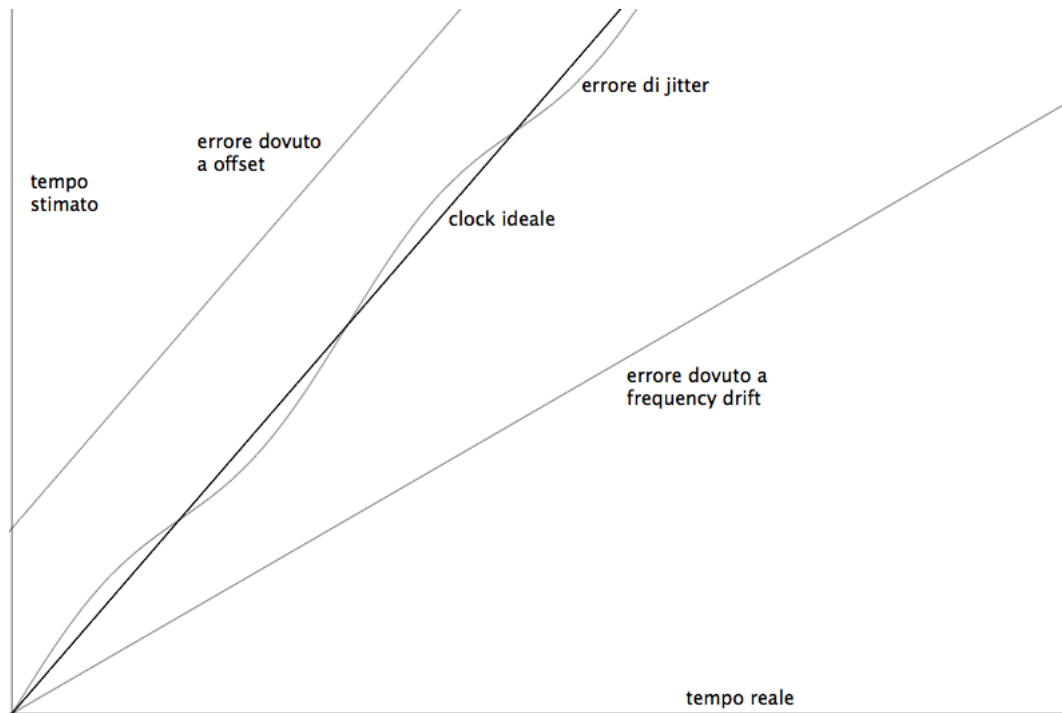


Figura 2.1: Rappresentazione grafica delle non idealità di un oscillatore

$\hat{t} = \mathbf{C}(t)$  si fa riferimento al seguente modello che lo lega al tempo reale:

$$\mathbf{C}(t) = (1 + \delta)t + \mu; \quad (2.1)$$

questo modello tiene in considerazione i più significativi effetti di non idealità dell'oscillatore, quali la variazione della frequenza nel tempo, il jitter, e l'errore di offset. In particolare nella funzione data, il parametro  $\delta$  rappresenta il frequency drift (deriva di frequenza) e il parametro  $\mu$  è l'errore di offset. Si faccia riferimento al grafico per una rappresentazione più intuitiva degli effetti di non idealità citati (Fig. 2.1). Nel caso di un oscillatore ideale, la derivata  $\frac{d}{dt}\mathbf{C}$  vale costantemente 1 ( $\delta = 0$ ). Le performance di un oscillatore sono riferite a quello ideale, si esprimono in ppm, e sono il conteggio di quanti cicli di clock sono stati persi o aggiunti, in  $10^6$  periodi di clock di un oscillatore ideale. Questo parametro è dato semplicemente da  $\delta \cdot 10^6$ . Supponendo che un nodo debba generare un ritardo di  $\tau_d$  secondi,

il tempo effettivo  $\tau_{d,eff}$  in presenza di un drift è dato da:

$$\tau_{d,eff} = \frac{\tau_d}{(1 + \delta)} \quad (2.2)$$

Nel caso in cui si debba misurare un intervallo  $\tau = t_2 - t_1$ , il corrispondente stimato è dato da:

$$\hat{\tau} = \tau \cdot (1 + \delta) \quad (2.3)$$

In entrambi i casi non appare alcuna dipendenza dall'errore di offset  $\mu$ . Si considerino due nodi, i cui oscillatori funzionino a frequenze leggermente diverse, essi vedranno gradualmente divergere i valori rispettivi del conteggio di clock. Questo effetto viene chiamato clock skew. Verranno ora citati alcuni algoritmi che vengono usati per la sincronizzazione e per rimediare ai problemi fin ora trattati.

## 2.2 Algoritmi per la sincronizzazione

Il clock skew è uno dei parametri più importanti nella valutazione di un algoritmo di sincronizzazione. Esso infatti rappresenta la massima differenza assoluta tra i tempi percepiti dai nodi. Il fattore che maggiormente causa il clock skew è l'incertezza riguardo i ritardi accumulati per la consegna dei messaggi tra i nodi, che in generale aumenta all'aumentare dei nodi stessi. L'obiettivo di ogni algoritmo di sincronizzazione è di equalizzare il clock logico di ogni nodo, per ridurre al minimo il clock skew tra essi. Si riesce generalmente ad ottenere questo risultato grazie ad uno scambio di messaggi tra i nodi. I requisiti di sincronizzazione sono classificabili in tre modelli basilari, a seconda delle esigenze dell'applicazione. La forma più semplice di sincronizzazione è l'ordine cronologico degli eventi, in tal caso l'algoritmo deve semplicemente riuscire a riconoscere se un evento è accaduto prima o dopo un secondo evento. Un secondo tipo di requisiti di sincronizzazione è il mantenimento di clock relativi, ovvero pur essendoci clock indipendenti in due nodi distinti, questi si scambiano messaggi per tener traccia dell'offset e del drift, in modo da poter in ogni momento convertire la misura di tempo del clock locale, in quella del clock di un altro nodo. Il terzo tipo di algoritmo è quello più complesso, richiede infatti che ogni nodo sia sempre sincronizzato con un clock centrale di riferimento.

### 2.2.1 Sincronizzazione dei nodi Two-way

La procedura base di gran parte degli algoritmi di localizzazione è un doppio e simmetrico scambio di messaggi tra una coppia di nodi A e B. L'obiettivo è stimare l'offset di clock tra A e B assumendo costante il tempo di propagazione ed il drift. Viene effettuata la seguente procedura:

- Il nodo A inizia inviando un pacchetto al tempo  $t_1$ . (dato dal suo sistema di riferimento temporale). Questo pacchetto contiene il valore di  $t_1$ .
- Il nodo B riceve il pacchetto all'istante  $t_2 = t_1 + S + D(A, B)$ , dove S è il clock skew tra i due nodi, e D è il tempo di consegna del pacchetto da A a B.
- Al tempo  $t_3$  B risponde con un pacchetto di acknowledge, il quale include i valori  $t_2$  e  $t_3$  (riferiti al clock del nodo B).
- Quest'ultimo pacchetto è ricevuto dal nodo A al tempo  $t_4 = t_3 + S + D(B, A)$ .
- Il nodo A può ora stimare il clock skew e provare a sincronizzarsi a B:

$$\hat{S} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} = \frac{2S + D(A, B) - D(B, A)}{2} = S + \frac{u}{2} \quad (2.4)$$

dove  $u = D(A, B) - D(B, A)$ , ed è l'unica componente di incertezza, a causa della natura aleatoria di D. In generale questa procedura viene ripetuta diverse volte, e viene preso in considerazione il valore più basso, o il valor medio.

### 2.2.2 Sincronizzazione attraverso broadcast di riferimento

L'idea di fondo di questo algoritmo di sincronizzazione è che un sistema di ricevitori siano sincronizzati ad un nodo di riferimento. In particolare il nodo centrale (MASTER, M) invia un pacchetto detto beacon, il suo ToA è usato dai nodi riceventi per stimare il proprio offset di clock relativo attraverso lo scambio dei rispettivi ToA. Può essere così stimato il clock skew tra due nodi A e B:

$$\hat{S} = t_A - t_B; \quad (2.5)$$

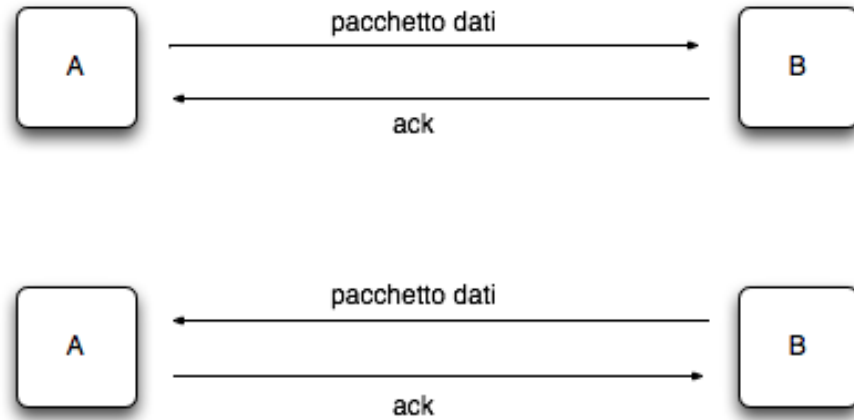


Figura 2.2: Illustrazione del metodo SDS-TWR

viene in questo modo annullato il termine aleatorio dato dal ritardo introdotto dal sistema per l'invio del pacchetto.

### 2.3 Metodo di ranging del nanoLOC: SDS-TWR

Verrà ora illustrato il metodo di ranging utilizzato nel sistema oggetto dell'elaborato. Esso prende il nome di SDS-TWR (Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging, Ranging simmetrico a doppio lato in due tempi): simmetrico, in quanto la prima misura di ranging dal Peer A al Peer B è speculare ad una seconda misura di ranging dal Peer B al Peer A, doppio lato, indica che è sempre fatta tra due terminali, a due Tempi, perchè un pacchetto dati ed un ack automatico a livello hardware provvedono la misura dei tempi usata nella stima del ranging (Fig. 2.2). Come suggerisce il nome, e come si vedrà, questa metodologia di ranging include al suo interno un algoritmo di sincronizzazione two-way.

### 2.3.1 SDS-TWR, Passo 1: Generazione del primo set di valori di tempo

Il RTT (Round Trip Time) del pacchetto dati e dell'ack, viene utilizzato per generare il valore  $T_1$ , il ritardo di propagazione in trasmissione, mentre il tempo di elaborazione è il valore  $T_2$ . I tempi sono generati nel modo seguente:

#### $T_1$

- Quando l'applicazione su A fa una richiesta di ranging, viene inviato un pacchetto a B che risponde automaticamente con un Ack.
- A genera  $T_1$  usando l'istante in cui il pacchetto è stato spedito e l'istante in cui l'Ack è stato ricevuto.
- Questo valore viene tenuto in memoria da A.

#### $T_2$

- $T_2$  è il valore del tempo impiegato a processare un Ack, esso viene tenuto in memoria da B.

### 2.3.2 SDS-TWR, Passo 2: Concessione dei permessi per effettuare la misura

Una volta mandata la richiesta di ranging a B, quest'ultimo deve concedere il permesso di fare la misura di ranging prima che possano essere generati gli altri valori. Questo permette al nodo di sospendere temporaneamente le altre misure di ranging, ed ignorare le richieste da parte di altri nodi. Il permesso viene programmato via software, ed in questa fase viene letto da B.

### 2.3.3 SDS-TWR, Passo 3: Eliminazione dell'Errore di Clock, generazione della seconda metà dei valori

Arrivati a questo punto, si procede con la parte speculare dell'algoritmo. Il principio di questa seconda metà della procedura, è lo stesso dell'algoritmo

di sincronizzazione two-way, infatti serve a sincronizzare i due Peer sullo stesso riferimento di tempo. In questa fase vengono generati i valori di tempo  $T_3$  e  $T_4$  in modo esattamente simmetrico a quanto fatto per  $T_1$  e  $T_2$ :

$T_3$

- Quando l'applicazione su B fa una richiesta di ranging, viene inviato un pacchetto ad A che risponde automaticamente con un Ack.
- B genera  $T_3$  usando l'istante in cui il pacchetto è stato spedito e l'istante in cui l'Ack è stato ricevuto.
- Questo valore viene tenuto in memoria da B.

$T_4$

- $T_4$  è il valore del tempo impiegato a processare un Ack, esso viene tenuto in memoria da A.

#### 2.3.4 SDS -TWR, Passo 4: scelta del modo di ranging

I quattro valori di tempo generati fin ora sono necessari per calcolare la distanza tra i terminali, due di questi valori ( $T_1$  e  $T_2$ ) sono sul Peer A, mentre gli altri due ( $T_3$  e  $T_4$ ) sono sul peer B. Per completare il ranging, è necessario che questi valori vengano raccolti sullo stesso terminale. Per permettere una maggiore flessibilità e versatilità al sistema, il metodo SDS-TWR permette di scegliere tra tre possibili modi di ranging:

- SDS-TWR 3W\_A, i risultati vengono consegnati al terminale locale (Peer A);
- SDS-TWR 3W\_B, i risultati vengono consegnati al terminale remoto (Peer B);
- SDS-TWR 2W\_PP, non viene scambiato un terzo pacchetto, e vengono utilizzati i risultati del precedente ranging, memorizzati dal Peer A, mentre il Peer B conserva i parametri ottenuti, per il ranging successivo, ciò consente un ranging più veloce e un minore consumo di energia;

### 2.3.5 SDS-TWR, Passo 5: calcolo di $T_{of}$ e $d$

In questa fase viene effettuato il vero e proprio calcolo della distanza, una volta ottenuti tutti i quattro parametri, è facile trovare il ToF tra il Peer A ed il Peer B:

$$T_{of} = \frac{(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)}{4}, \quad (2.6)$$

ottenuto questo, sapendo che si tratta del tempo che impiega il segnale a viaggiare dal Peer A al Peer B, è semplice ottenere la distanza in metri, data  $c$  velocità della luce, si ha infatti:

$$d[m] = c[m/s] \cdot T_{of}[s]. \quad (2.7)$$



# Capitolo 3

## Attività svolta

Dopo una fase di approccio al sistema nanoPAN 5375 DK, la quale consisteva nel programmare i nodi forniti, utilizzando le applicazioni dimostrative del kit, analizzandole e testandole, si è messo mano al codice utilizzando le librerie fornite, in particolare l'ambiente di sviluppo utilizzato è AVR Studio. Sono state analizzate le principali strutture dati e le procedure necessarie al funzionamento del sistema. L'attività svolta si è inserita in un progetto più ampio, portato avanti dal gruppo di ricerca del CIRI ICT, Università di Bologna, nell'ambito di reti di sensori avanzate per la localizzazione.

### 3.1 Le applicazioni dimostrative

Sono state utilizzate due applicazioni, una per il ranging tra due nodi, che si limitasse a stimarne la distanza, un'altra più sofisticata per la localizzazione vera e propria del Tag, con tracciamento dello stesso su interfaccia grafica. Prima di utilizzare ogni applicazione dimostrativa è necessario programmare i nodi con i codici forniti dal kit stesso, per ogni applicazione, il programma da installare sui vari nodi è diverso. La prima applicazione nanoLOC Ranging Demo, prevede la programmazione di due soli nodi (un Tag ed un'Ancora). Essa si presenta molto semplicemente con una finestra, che comunica ciò che uno dei due nodi collegato al terminale (Ancora), stampa sulla porta seriale, nella colonna di destra infatti sono elencate le varie misure di ranging (Fig. 3.1). La seconda applicazione nanoPAN Location Demo utilizza tutti i sei nodi forniti dal kit: un Master, quattro Ancore, ed un Tag e serve a localizzare quest'ultimo. La si utilizza interamente da



Figura 3.1: Finestra principale nanoLOC Ranging Demo

interfaccia grafica, vi è un menù a finestra che si deve usare per indicare la posizione ed il numero delle ancore riferendosi ad un sistema arbitrario scelto dall'utente (Fig. 3.2). In un'altra scheda dello stesso menù si indica invece il numero di Tag, il nome di essi, oltre al colore e la forma con il quale li si vorrà visualizzare (Fig. 3.3). Nella finestra principale, appare una griglia che rappresenta la mappa del luogo in cui si trova il sistema. Infatti dopo l'inserimento delle Ancore, si vedranno comparire dei simboli in corrispondenza delle loro posizioni, mentre quando si fa partire la localizzazione, comparirà un altro simbolo, il quale verrà posto nella posizione stimata dall'algoritmo di localizzazione (Fig. 3.4). Nella colonna di destra appariranno infine tutte le stime calcolate, scritte sotto forma di coordinate cartesiane X e Y e riferite al sistema precedentemente scelto.

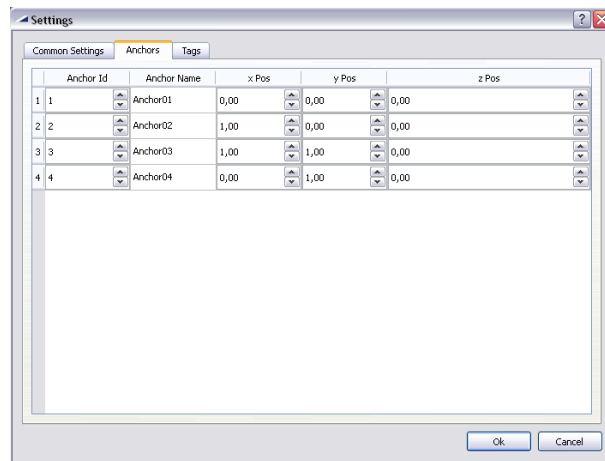


Figura 3.2: Finestra dell'applicazione nanoPAN Location DEMO, per l'inserimento di Ancore

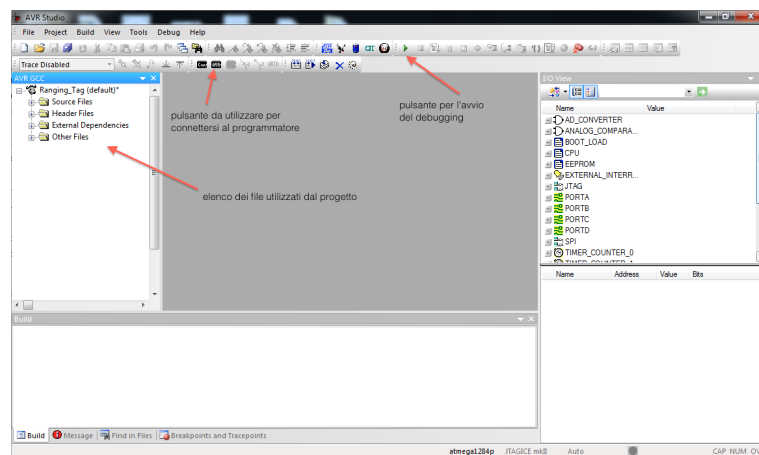


Figura 3.3: Finestra dell'applicazione nanoPAN Location DEMO, per l'inserimento di Tag

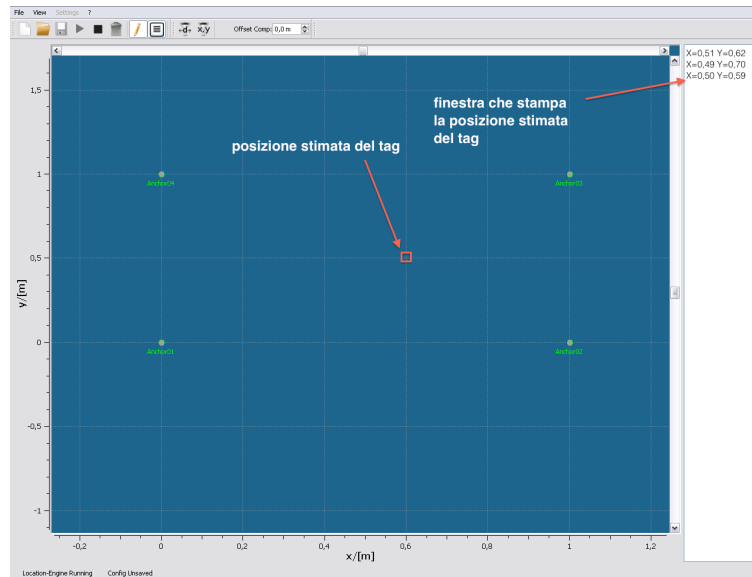


Figura 3.4: Schermata principale dell'applicazione nanoPAN Location DEMO

## 3.2 Obiettivi

L'obiettivo centrale di questo lavoro è far funzionare un sistema formato da un nodo Master, un nodo Tag, ed un numero variabile di ancore (Fig. 3.5). In questo sistema si deve riuscire ad effettuare misure di ranging tra Tag e Ancore, e tra Tag e Master, al fine di localizzare il Tag stesso (le posizioni di Master e Ancore si assumono note). Si intende eseguire la seguente successione di azioni:

- la stazione base (Master) deve mandare un pacchetto al tag, contenente talune informazioni tra cui gli indirizzi fisici di tutte o parte delle ancore. Oltre ai dati, il pacchetto che il Master invia al Tag costituisce esso stesso una richiesta di ranging;
- il tag, ricevuto il pacchetto del Master e letto il contenuto, deve inviare pacchetti ad un numero programmabile di ancore per ottenere le corrispondenti informazioni di ranging;

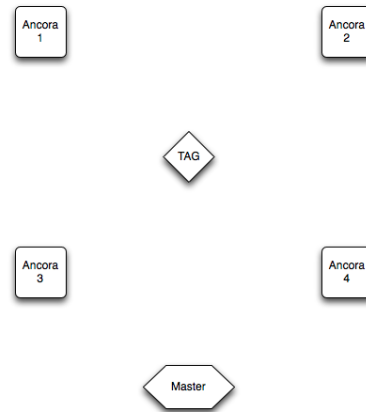


Figura 3.5: Rappresentazione della topologia del sistema

- ognuna delle ancore dovrà rispondere al tag, comunicandogli il ranging Tag-Ancora, utilizzando un metodo SDS-TWR-3W\_A;
- il Tag memorizzerà le risposte delle ancore e, una volta ricevute tutte le misure, costruirà un pacchetto dati per il Master contenente tutti i ranging Tag- Ancora.

La procedura appena descritta, deve essere eseguita in un preciso slot temporale, all'interno di un frame che verrà ripetuto periodicamente. Per questo motivo, un altro punto fondamentale, è il calcolo del tempo necessario ad eseguire l'intera procedura. I risultati ottenuti serviranno sostanzialmente al dimensionamento dello slot temporale. Al termine delle operazioni, una volta testato il corretto funzionamento, si utilizzerà l'applicazione sviluppata, per analizzare le misure, e le stime di posizione fatte. I risultati ricavati verranno confrontati con le posizioni reali note, al fine di fare una stima dell'incertezza, cercando un modello, o una caratterizzazione sperimentale dell'errore di localizzazione.

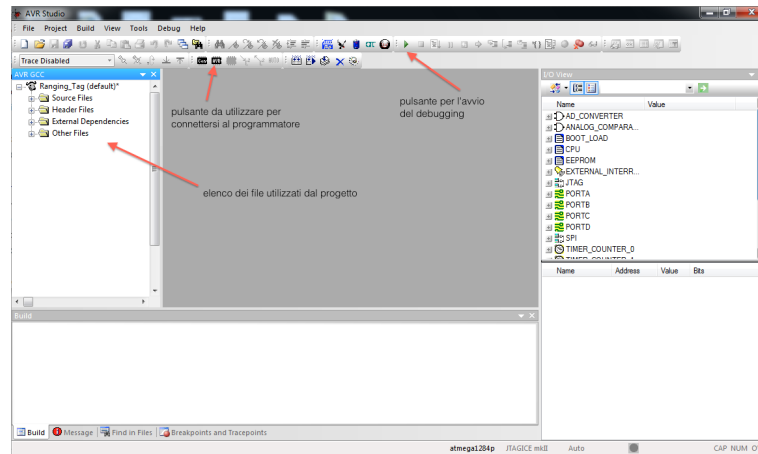


Figura 3.6: Finestra principale ambiente di sviluppo AVR Studio

### 3.3 L'ambiente di sviluppo: AVR Studio

L'ambiente di sviluppo utilizzato è AVR Studio, esso contiene gli elementi classici di ogni ambiente di sviluppo: un editor di testo per la stesura di codice in C, uno strumento di debugging, un compilatore, ed un programmatore per scrivere il software sviluppato sull'hardware. La finestra principale è la seguente (Fig. 3.6). nella colonna di sinistra vi sono elencati i file utilizzati nel progetto, suddivisi in file da includere \*.h e file per i programmi veri e propri \*.c (Fig. 3.7). La finestra che compare quando si vuole connettere il programmatore AVR tramite USB è riportata in Fig. 3.8. In essa viene scelta la piattaforma, nella colonna di sinistra, e la porta di comunicazione del programmatore. Dopo aver connesso il programmatore, appare un'altra finestra che permette di scegliere il file da programmare, o di cancellare il contenuto della memoria del nodo. Il formato del file può essere scelto tra \*.hex (formato utilizzato per programmare i nodi per le applicazioni demo) e \*.elf formato invece usato in fase di progetto e debug (Fig. 3.9).

### 3.4 Strutture dati e funzioni utilizzate

Le strutture dati maggiormente usate, sono state `MsgT` e `RangingMsgT` definite nelle librerie software fornite con il kit di sviluppo: la prima delle

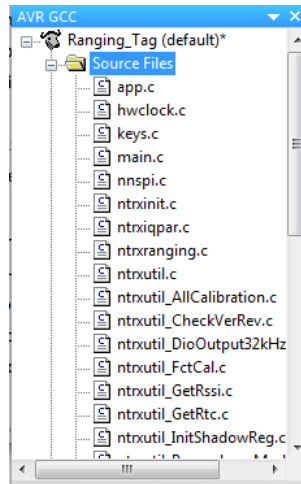


Figura 3.7: Elenco nomi dei file utilizzati dal progetto

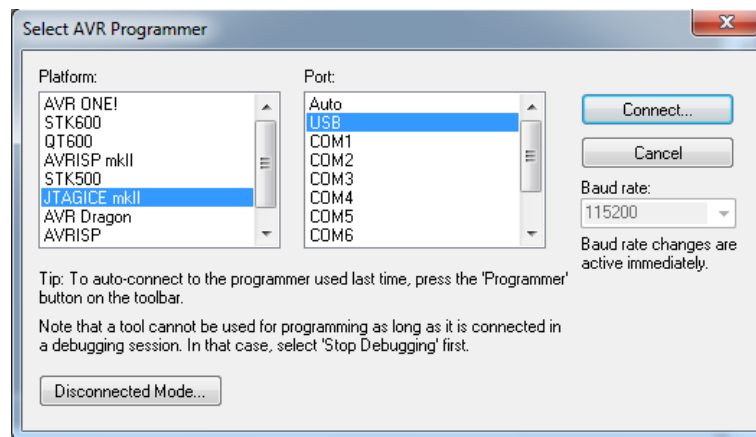


Figura 3.8: Elenco nomi dei file utilizzati dal progetto

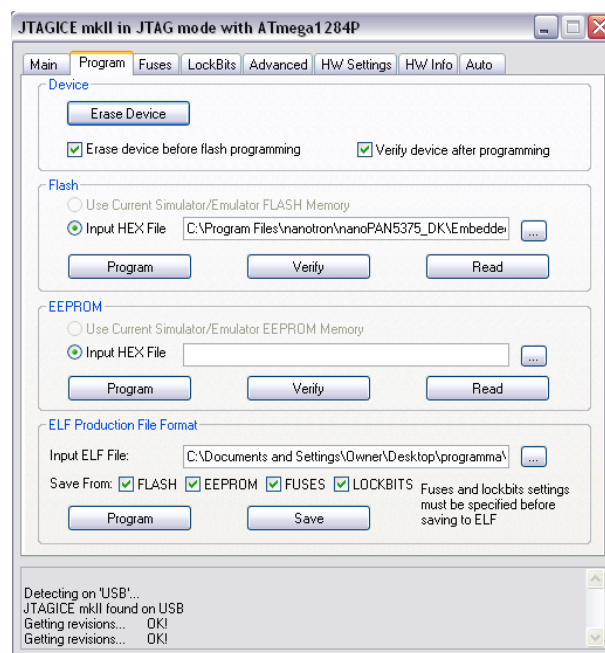


Figura 3.9: Finestra di programmazione de nodi



due si usa per rappresentare un pacchetto scambiato tra i nodi, la seconda invece, fa riferimento al contenuto di un MsgT, e contiene le vere e proprie distanze in metri ottenute dal ranging. La tabella seguente descrive la struttura MsgT e i suoi campi principali:

Campo	Descrizione
uint8_t prim	Tipo di messaggio, etichetta che rappresenta il contenuto del messaggio. I pacchetti usati durante l'attività sono stati: PD_RANGING_REQUEST e PD_DATA_REQUEST
AddrT addr	Indirizzo destinatario del pacchetto
uint8_t len	Lunghezza del campo dati del pacchetto
uint8_t *pdu	Puntatore, al primo elemento del campo data
uint8_t data[MAX_PACKET_SIZE]	Contenuto informativo del pacchetto
uint8_t status	Stato, usato da alcune funzioni che maneggiano la struttura
uint16_t value	Valore da usare in taluni casi, ad esempio per impostare o conoscere la configurazione del chip radio
uint8_t attribute;	Attributo da usare in taluni casi, ad esempio per impostare o conoscere la configurazione del chip radio

La tabella seguente descrive invece la struttura RangingMsgT usata come campo data della struttura MsgT per i messaggi di risposta alle richieste di ranging: i PD\_RANGING\_INDICATION:

Campo	Descrizione
uint8_t error;	Tipo di errore generato dopo la richiesta di ranging.
double distance;	Distanza indicata in metri
AddrT addr;	Indirizzo del nodo che ha risposto

Il tipo uint8\_t, indica semplicemente una variabile della dimensione di un byte, mentre il tipo AddrT, si usa per un indirizzo MAC (sei byte), ed è semplicemente un array di 6 uint8\_t. Illustrazione del metodo SDS-TWR (3.4).

### 3.5 Algoritmi sviluppati e diagrammi di flusso

Per il funzionamento del sistema, sono stati sviluppati due algoritmi per programmare il Tag, ed il Master. Le ancore si limitano a rispondere alle richieste di ranging quando ricevute. Per la descrizione degli algoritmi, si è deciso di utilizzare due diagrammi di flusso, il primo indicante le operazioni compiute dal Master, il secondo invece quelle del Tag (rispettivamente Fig. 3.10 e Fig. 3.11).

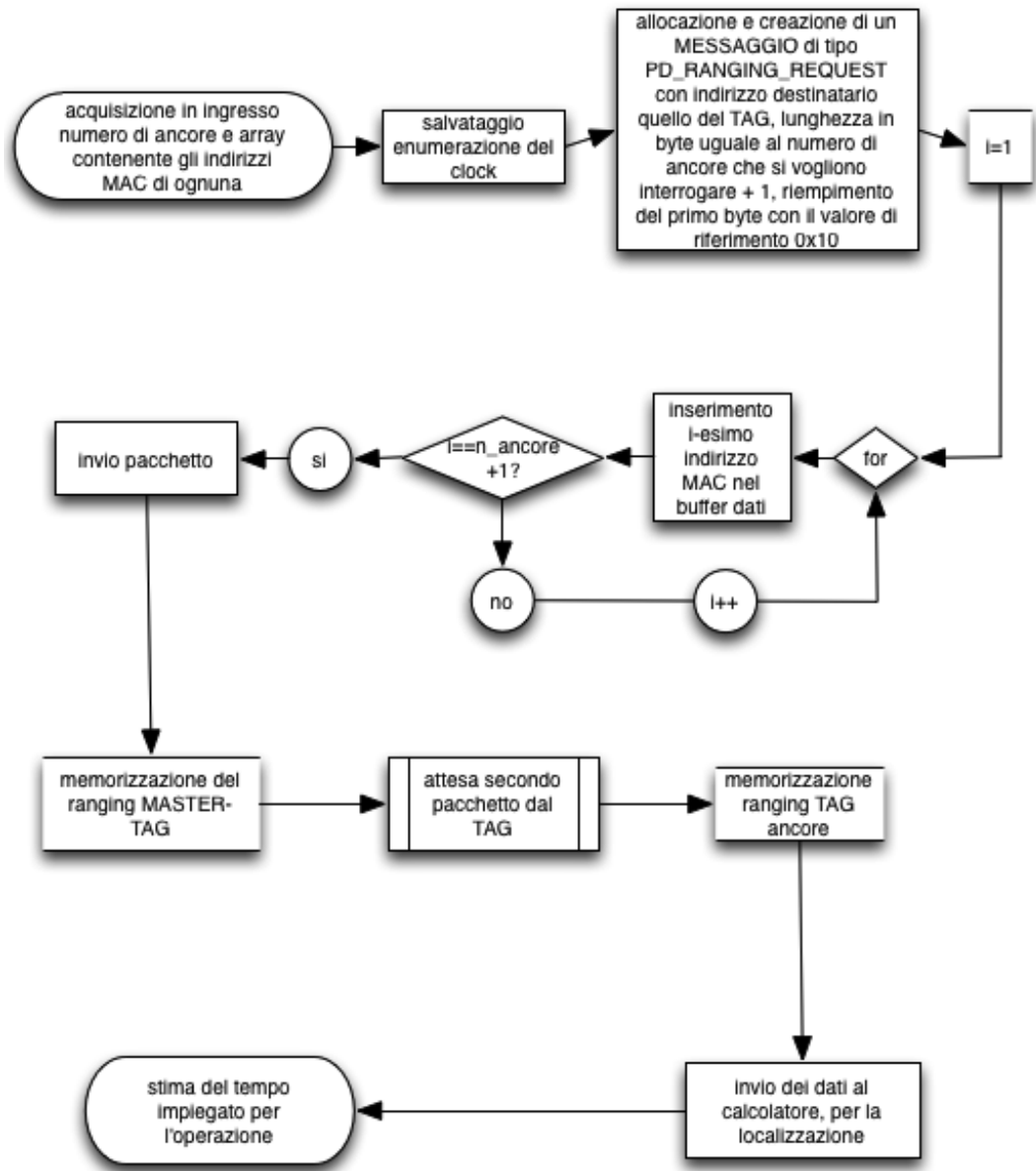


Figura 3.10: Flusso di operazione del Master

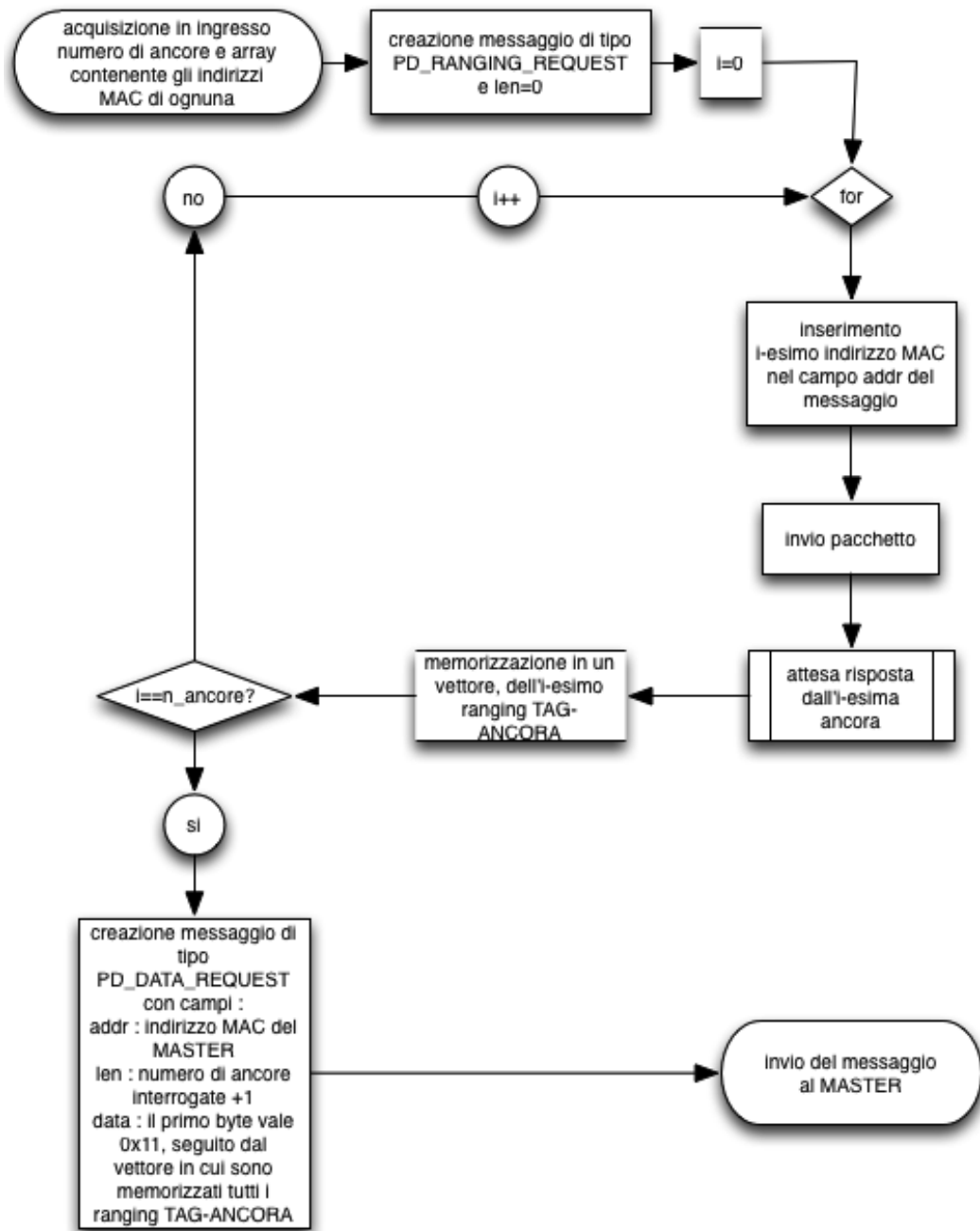


Figura 3.11: Flusso di operazione del Tag

## Capitolo 4

# Risultati numerici, descrizione tecnica dell'hardware utilizzato

Prima di procedere con lo sviluppo dell'algoritmo di localizzazione, sono state effettuate una serie di misure di ranging per verificare quali fossero gli intervalli di distanze che permettessero un'accuratezza maggiore. Di seguito verranno riportati una serie di grafici da cui si evince che distanze inferiori ai 2 metri, e superiori agli 8, oltre a dare un'incertezza maggiore, tendono a far scostare anche il valor medio delle misure dal valore atteso. Per poter procedere alla vera e propria localizzazione, si è scelta una cella di dimensioni compatibili con le caratteristiche dei nodi, ovvero di 4x6 m. I ranging effettuati dal sistema, sono stati trasferiti al calcolatore attraverso comunicazione seriale, salvati su file, ed importati in un file MATLAB, scritto appositamente per determinare le coordinate del Tag, rispetto ad un sistema cartesiano di riferimento, conoscendo le distanze da ogni ancora, e le coordinate delle ancore stesse.

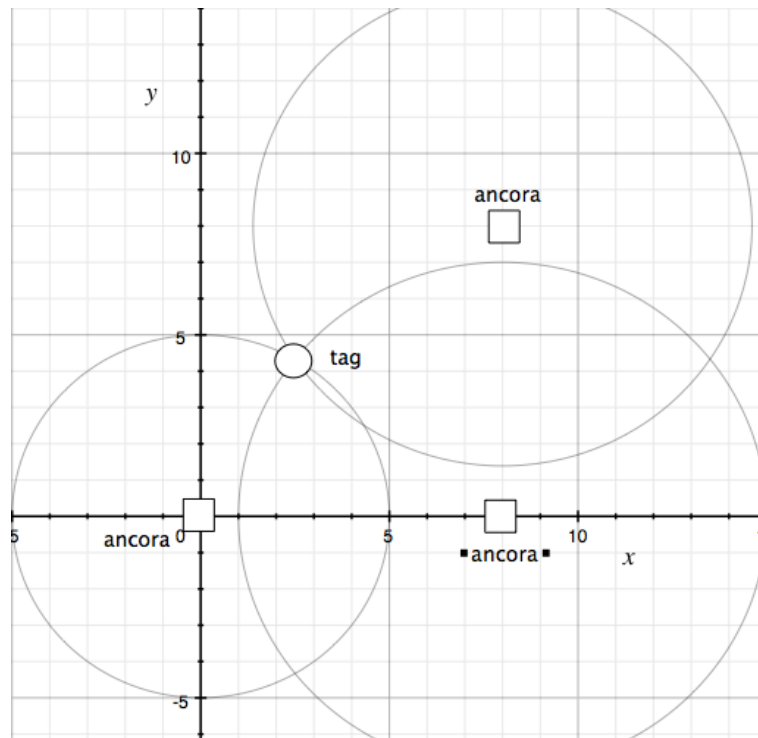


Figura 4.1: Intersezione di circonferenze per la localizzazione a partire dal ranging

## 4.1 Programma MatLab

La funzione sviluppata in MATLAB presenta il seguente header:

```
function [ x, y ] = location( rang, ancposx, ancposy, toll )
```

la funzione considera tre ancore per volta, e viene chiamata iterativamente per coprire eventuali ancore aggiuntive, (le ancore vengono considerate sempre a gruppi di tre e nel caso di numero di ancore maggiore, vengono mediati tutti i risultati calcolati). L'operazione svolta altro non è che l'intersezione di tre circonferenze aventi per raggio le misure di ranging, e per centro le coordinate delle ancore(Fig. 4.1). I parametri in ingresso sono:

*rang*

un vettore ordinato contenente ogni ranging tag-ancora;

*ancposx*

un vettore ordinato che contiene la coordinata X di ogni ancora

*ancposy*

un vettore ordinato che contiene la coordinata Y di ogni ancora

*toll*

rappresenta la distanza minima che devono avere due punti appartenenti a due curve distinte affinché il programma le consideri intersecanti. Questo parametro è stato inserito principalmente per l'incertezza nel ranging: può capitare infatti che una misura particolarmente sfortunata restituisca valori tali che le circonferenze costruite con i corrispondenti raggi e centri, non abbiano intersezione. In tal caso il programma ciclicamente raddoppia il parametro *toll*, fino a trovare un risultato. Questa procedura può essere vista come una sostituzione delle circonferenze con corone circolari, il cui spessore va man mano aumentando all'aumentare del parametro *toll*. (Fig. 4.2 e Fig. 4.3).

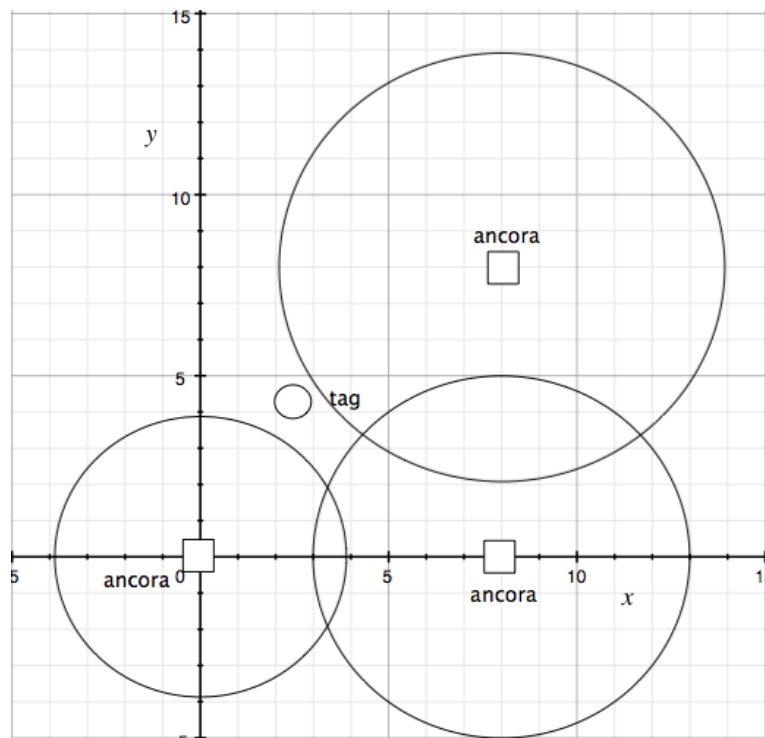


Figura 4.2: Circonferenze prive di intersezione per errori sul ranging



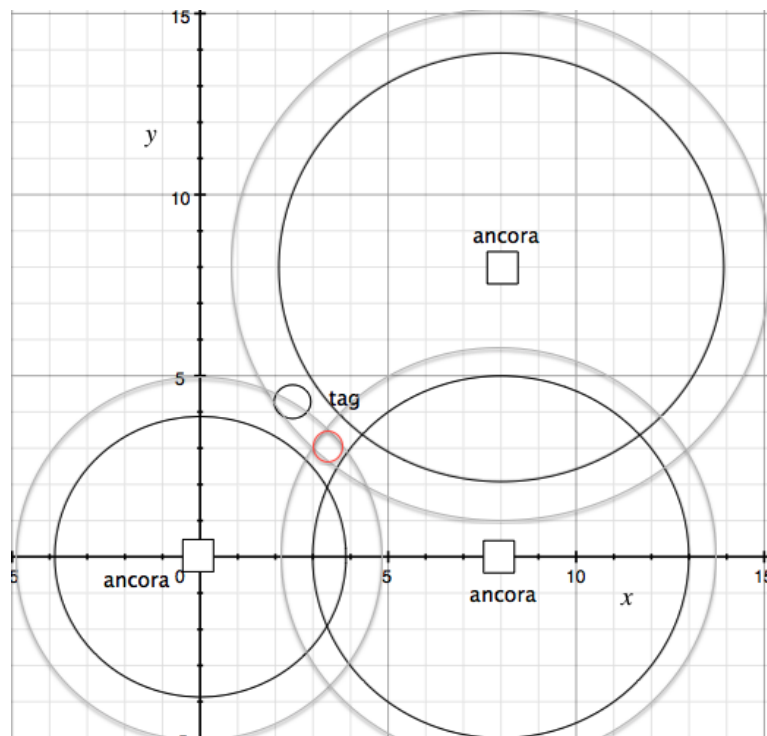


Figura 4.3: Intersezione tra corone circolari costruite a partire dalle circonferenze iniziali



Figura 4.4: Legenda

## 4.2 Valutazione ed analisi dei ranging

Sono stati effettuati diversi ranging a diverse distanze, si è notato che per distanze brevi, il ranging tende a commettere errore negativo, mentre per distanze maggiori l'errore è positivo, di seguito vengono riportati i risultati numerici ed i grafici che rappresentano le singole misure di ranging:

Fig.	Valore Atteso [m]	Valor Medio [m]	Differenza [m]	RMSE
4.5	0	-1.7	1.7	0.24
4.6	2	-0.25	2.25	0.11
4.7	3	1.15	1.85	0.14
4.8	4	3.85	0.15	0.24
4.9	5	4.44	0.56	0.43
4.10	6	6.02	-0.2	1.26
4.11	7	7.59	-0.59	1.15
4.12	8	10.02	-2.02	0.93

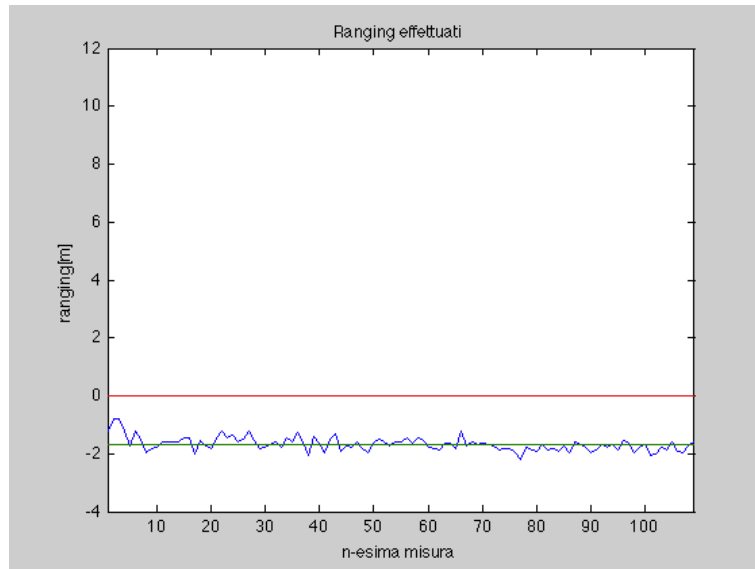


Figura 4.5: Andamento di risultati di ranging per distanza di 0 metri

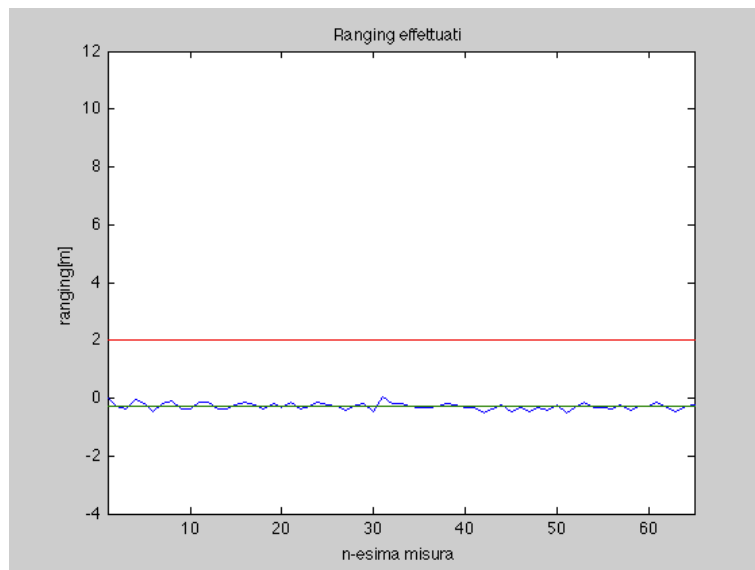


Figura 4.6: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 2 metri

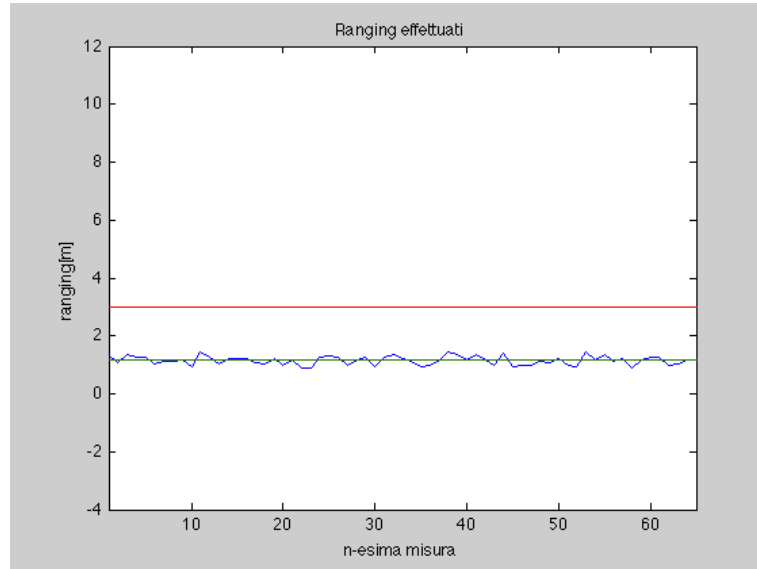


Figura 4.7: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 3 metri

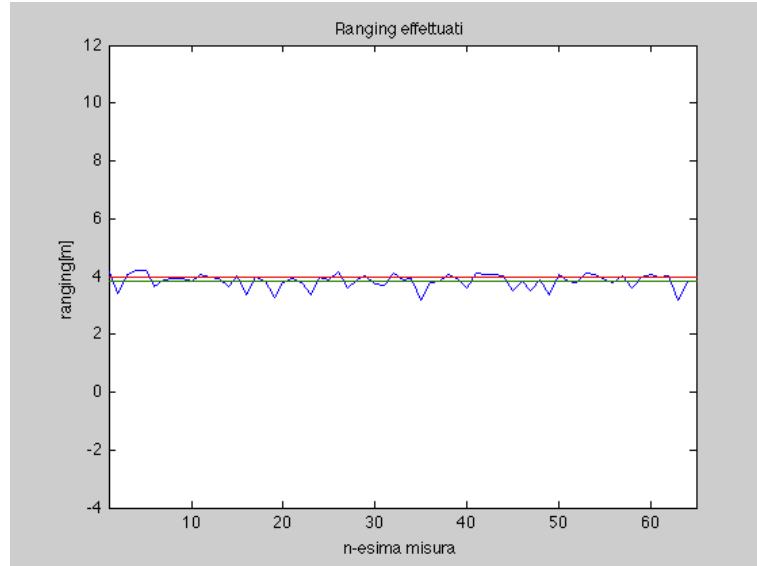


Figura 4.8: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 4 metri

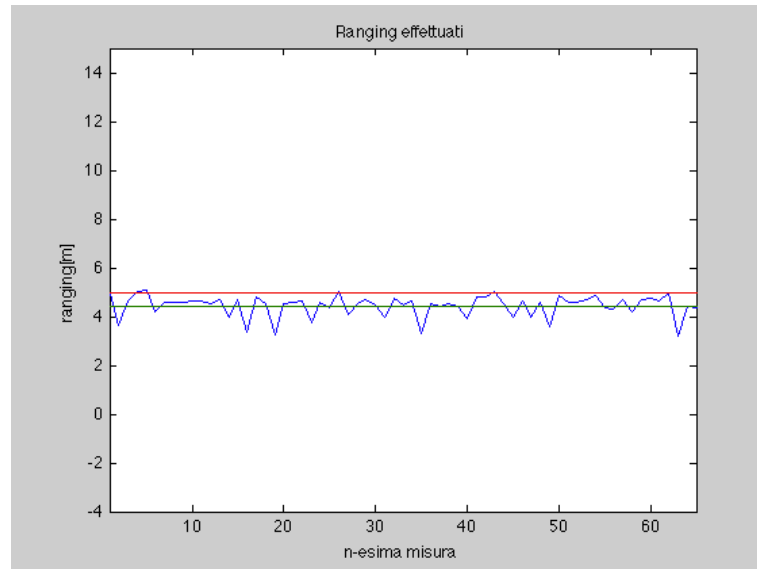


Figura 4.9: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 5 metri

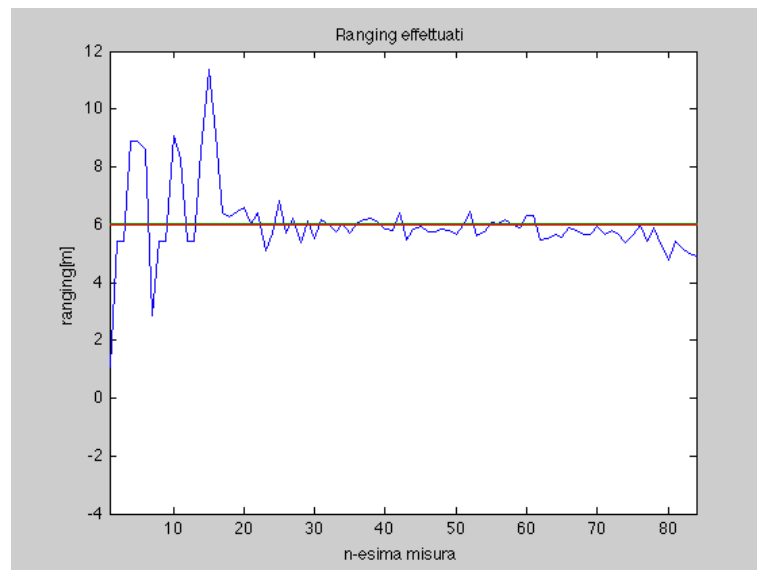


Figura 4.10: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 6 metri

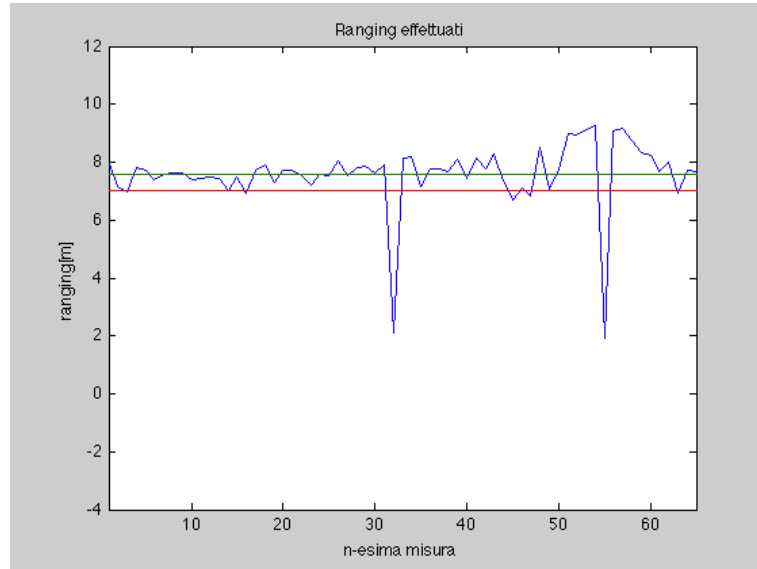


Figura 4.11: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 7 metri

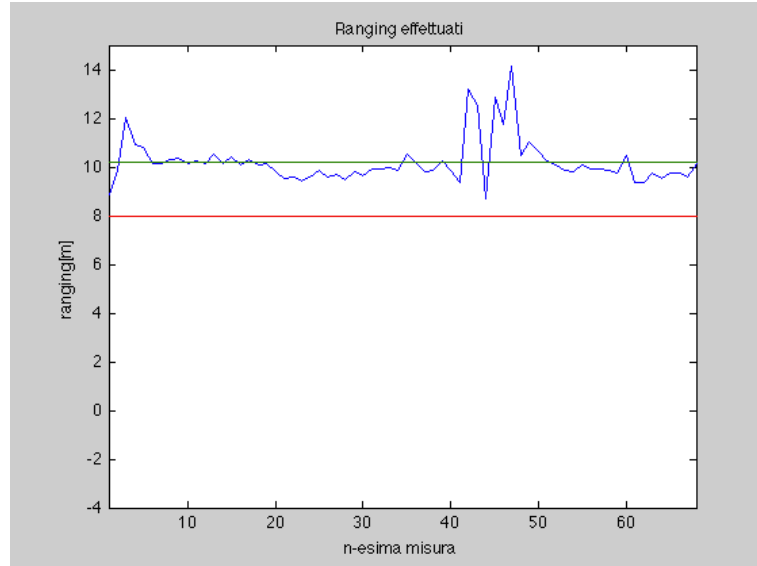


Figura 4.12: Andamento dei risultati di ranging per distanza di 8 metri

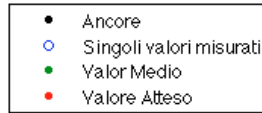


Figura 4.13: Legenda

### 4.3 Valutazione ed analisi delle localizzazioni

Durante questa fase è stato possibile stimare il tempo necessario per compiere il processo di localizzazione. Il risultato è stato che tutte le operazioni vengono compiute in un tempo inferiore o uguale a 10 millisecondi. Si è scelto come sistema di riferimento un rettangolo di 5mx4m, e le ancore sono state disposte come indicato in tabella, ai vertici del rettangolo. Il tag è stato disposto in diversi punti del sistema, e lo si è localizzato ottenendo i risultati seguenti:

Punto	$x$ [m]	$y$ [m]	$\hat{x}$ [m]	$\hat{y}$ [m]	RMSE
Ancora 1	0	0			
Ancora 2	5	0			
Ancora 3	5	4			
Ancora 4	0	4			
P1(Fig. 4.14)	2.5	2	2.31	1.71	0.36
P2(Fig. 4.15)	0	0	0.32	0.09	0.33
P3(Fig. 4.16)	5	2	4.48	1.31	1
P4(Fig. 4.17)	0	3	0.36	2.33	0.75
P5(Fig. 4.18)	4	3	4.11	3.2	0.23

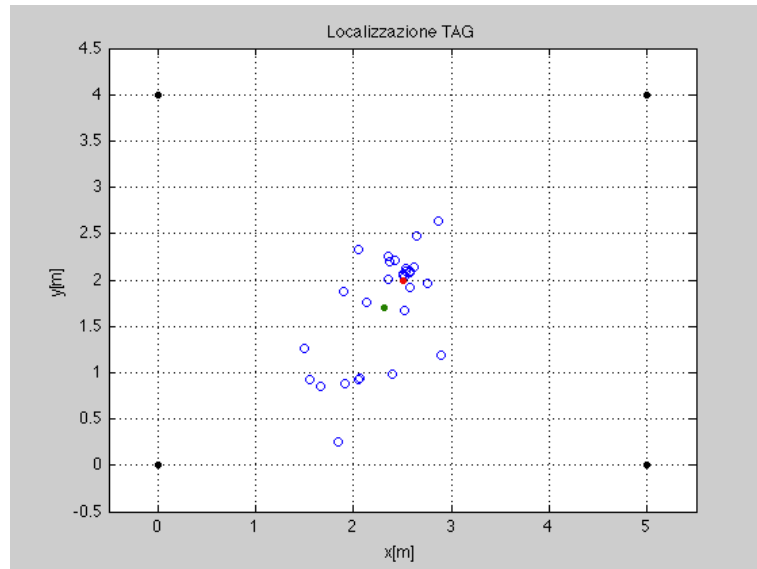


Figura 4.14: Localizzazione del Tag in P1

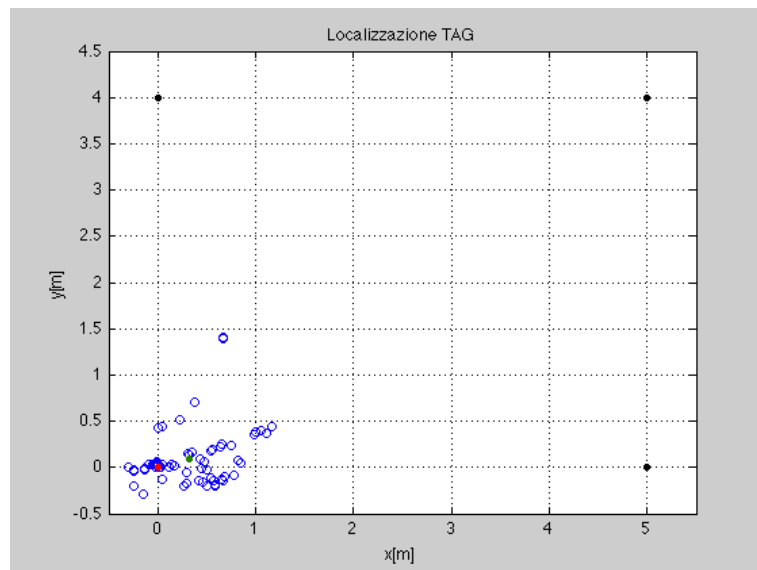


Figura 4.15: Localizzazione del Tag in P2



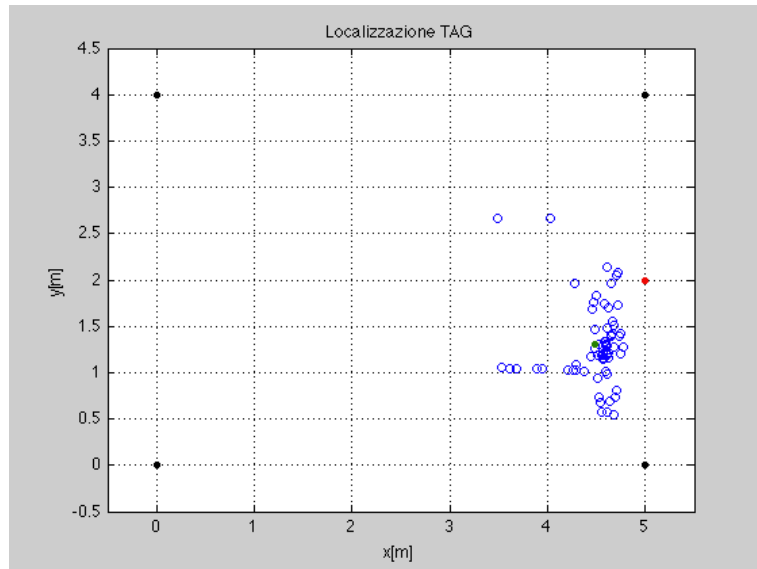


Figura 4.16: Localizzazione del Tag in P3

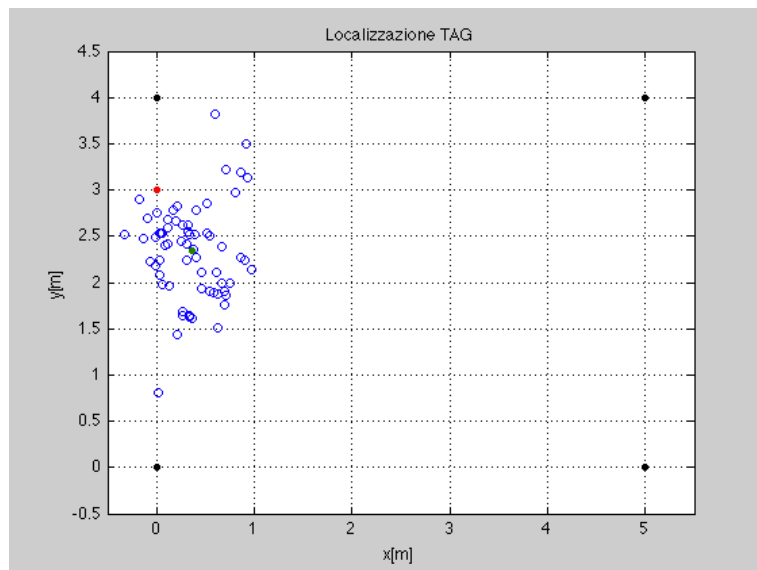


Figura 4.17: Localizzazione del Tag in P4

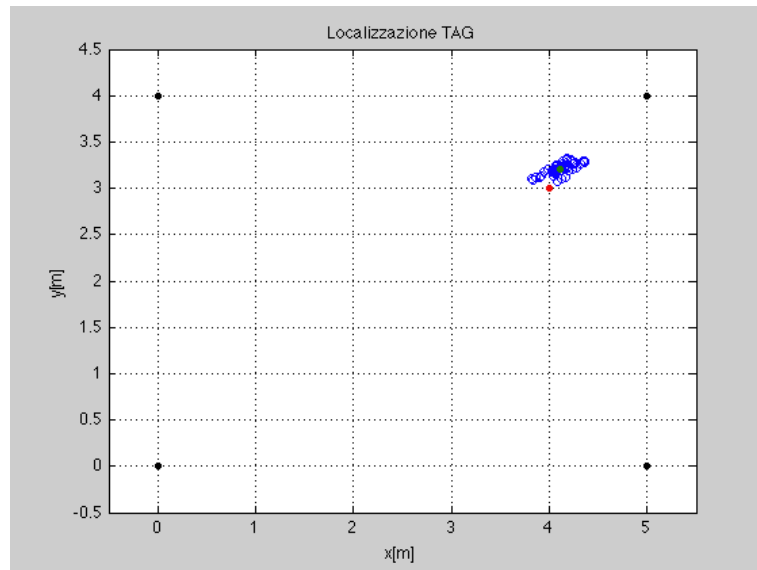


Figura 4.18: Localizzazione del Tag in P5

## 4.4 Descrizione dell'Hardware

Il sistema utilizzato, il nanoPAN 5375 DK, è composto da sei dispositivi (Fig. 4.19), identici tra loro, programmabili in maniera arbitraria attraverso il programmatore (Fig. 4.20) che comunica tramite USB con un terminale. Ogni nodo è dotato di un modulo RF nanoPAN 5375 RF e di un microcontrollore ATmega 1284P che viene usato per la programmazione (Fig. 4.21).

### 4.4.1 Caratteristiche Tecniche nanoPAN DK Board

- Modulo RF : nanoPAN 5375 RF Module
- Tecnica di modulazione : CSS (Chirp Spread Spectrum)
- Frequenza di funzionamento : 2.4 Ghz
- Precisione : 2m indoor/1m outdoor
- Tensione di alimentazione : 5V USB



Figura 4.19: Il programmatore dei nodi usato dal terminale tramite USB



Figura 4.20: Uno dei sei nodi disponibili nel sistema nanoPAN 5375 DK



Figura 4.21: Dettaglio microcontrollore ATmega 1284P

- Potenza in uscita (programmabile) : -15dBm 20 dBm
- Data rate (programmabile) : 250 kbps 1 Mbps
- Sensibilità del ricevitore : fino a -97 dBm
- Consumo in corrente : 500 mA

#### **4.4.2 Caratteristiche Tecniche nanoPAN 5375 RF Module**

- Data Rates : 250 kbps, 1Mbps
- Range di temperatura tollerato : [-40°;+70°]
- Tensione di Alimentazione : 2,5 V
- Consumo in Corrente TX (typ.): 210 mA
- Impedenza di carico dell'antenna nominale : 50 ?
- Frequenza SPI : 0-24 Mbps
- Frequenza di Clock Real Time : 32,768 kHz
- Dimensioni (L x W x H) [mm]: 29 x 15 x 3,8
- Certificazioni : FCC

#### **4.4.3 Caratteristiche Tecniche ATmega 1284P**

**Microcontrollore a 8 bit ad alte performance e basso consumo**

**Architettura RISC Avanzata**

- 131 Istruzioni, di cui gran parte a singolo clock
- 32 x 8 Registri per uso generico

**Memoria non-volatile a lunga durata**

- 128 KB di memoria Flash autoprogrammabile
- 4 KB EEPROM
- 16 KB SRAM interna
- Cicli di Scrittura/Cancellazione : 10000 Flash/ 100000 EEPROM
- Durata Dati : 20 anni a 85°C/100 anni a 25°C

**Interfaccia JTAG(IEEE std. 1149.1)**

- Supporta il Debug On-chip
- Programmazione della memoria Flash, EEPROM attraverso JTAG

**Altro**

- 32 Linee programmabili per l'I/O
- Tensione di lavoro: 1.8 - 5.5 V
- Velocità:
  - 0-4 MHz @ 1,5 - 5,5 V
  - 0-10 MHz @ 2,7 - 5,5 V
  - 0-20 MHz @ 4,5 - 5,5 V





# Conclusione

Dopo aver spiegato in modo sintetico cosa si intende per localizzazione, e quali siano i requisiti di tale processo, si è proceduto con una classificazione dei sistemi esistenti. Nel primo Capitolo, è stata fatta una panoramica delle tecniche di localizzazione sulla base del metodo usato e della quantità fisica misurata. Si è poi proposto un altro tipo di classificazione, fatto sulla base della configurazione di rete e, in seguito, si è dato qualche cenno sugli strumenti per l'analisi dei risultati ottenuti e delle performance di un sistema. Sono stati evidenziati poi i limiti ed i vantaggi di alcune tecnologie di localizzazione terrestre e satellitare, e si è brevemente accennato al loro dualismo e complementarietà. Si è data la definizione di ranging e si è illustrato quali algoritmi esistano per passare da ranging a localizzazione. Infine si è descritto come si possano affrontare le non idealità che affliggono le misure (in particolare le misure di tempo). Il Capitolo 3 ed il Capitolo 4 hanno trattato rispettivamente l'esposizione del lavoro portato avanti e la valutazione dei dati ottenuti. Si è svolto un lavoro su un sistema preesistente, aggiungendo tra le funzionalità, quella di poter localizzare un Tag in ambiente indoor, note le posizioni di tre o più antenne. Si inoltre è stimato il tempo necessario a compiere questa operazione. Dopo aver illustrato brevemente l'ambiente di sviluppo, sono stati esposti in maniera astratta le strutture dati e gli algoritmi implementati via linguaggio di programmazione C. Sono stati selezionati e raccolti i risultati più significativi delle misure eseguite, e sono stati esposti attraverso tabelle e grafici. I dati, seppur affetti da errori ed incertezza, hanno soddisfatto i valori attesi, in quanto in linea con le specifiche indicate nel datasheet del sistema.



# Bibliografia

- [1] Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques, Davide Dardari, Marco Luise, Emanuela Falletti, Davide Dardari, Marco Luise, Emanuela Falletti, Academic Press, 2011
- [2] Wireless Sensor and Actuator Networks, Roberto Verdone, Davide Dardari, Gianluca Mazzini, Andrea Conti, Academic Press, 2008
- [3] Real Time Location Systems White Paper, Nanotron Technologies GmbH, Berlin (Germany), 2007
- [4] nanoPAN 5375 DK User Guide Version 1.1, Nanotron Technologies GmbH, Berlin (Germany), 2007
- [5] ATmega 1284P Datasheet, Atmel Corporation, San Jose (USA), 2010
- [6] Target Detection Metrics and Tracking for UWB Radar Sensor Networks, Marco Chiani, Andrea Giorgetti, Matteo Mazzotti, Riccardo Minutolo and Enrico Paolini, in Proc. of the IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB2009), Vancouver (Canada), Sep. 2009.
- [7] Effect of State Space Partitioning on Bayesian Tracking for UWB Radar Sensor Networks, B. Sobhani, M. Mazzotti, E. Paolini, A. Giorgetti, and M. Chiani, IEEE International Conference on Ultra-Wideband 2013 (ICUWB2013), Sydney, Australia, Sep. 2013.