

Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Telecomunicazioni e Microelettronica

Tutor Prof. Francesco Vatalaro

ALGORITMI DI LOCALIZZAZIONE PER RETI DI
SENSORI WIRELESS

di
Paolo Sperandio

Correlatore
Prof. Pierpaolo Loreti

Revisore
Prof. Giuseppe Bianchi

UNIVERSITÁ DI ROMA "TOR VERGATA"

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA ELETTRONICA

ROMA, ITALIA
MARZO 2007

Questo lavoro nasce grazie all'aiuto di moltissime persone che mi sono state vicine nei momenti più difficili di questa mia avventura. Ringraziarle tutte richiederebbe altre cento pagine, ma alcune di loro meritano di essere ringraziate esplicitamente.

Primi fra tutti i miei genitori, grazie al loro aiuto ho saputo affrontare al meglio tutte le difficoltà che mi si sono presentate fino ad oggi.

Mio fratello Massi, grazie alla sua complicità è stato sempre tutto più semplice.

Remo, con il quale nessun progetto sembra irrealizzabile.

Annalisa, grazie alla sua contagiosa allegria e forza di volontà sono cambiato in quello che sono oggi.

Grazie a tutti per quello che avete fatto.

....second to the right and straight on till morning

P. Pan

A mia Madre

Sommario

Abstract	vi
1 Wireless Sensor Networks	1
1.1 Localizzazione nelle WSN	4
1.2 Limiti della Localizzazione	6
2 Overview sui Sistemi di Localizzazione	8
2.1 Algoritmi e sistemi di Localizzazione	8
2.1.1 Anchor Based e Anchor Free	9
2.1.2 Stima della Distanza	10
2.1.3 Calcolo della Posizione	14
2.1.4 Potenzialità di Calcolo	15
2.1.5 Accuratezza	16
2.1.6 Consumo Energetico	16
2.2 Overview sui Sistemi	17
2.2.1 APS Algorithm	17
2.2.2 Convex Position Estimation	19
2.2.3 GPS Less	19
2.2.4 GPS Free	20
2.2.5 Iterative Multilateration	20
2.2.6 Collaborative Multilateration	21
2.2.7 Radar	22
3 Pangaea Algorithm	23
3.1 Rigidità nei Grafi	25
3.1.1 Grafo Rigido	26
3.1.2 Rigidità Globale	27
3.2 Creazione dei Sistemi di Riferimento Locali	31

3.3	Localizzazione dei Nodi nella Sottorete	32
3.4	Creazione delle Isole	36
3.5	Nascita della Pangaea	38
3.6	Simulazioni	42
3.6.1	Propagazione dell'Errore nella WSN	43
3.6.2	Propagazione dell'Errore all'interno di un Isola	44
3.6.3	Isole di Differenti Dimensioni	46
4	Digital Bounding Box (DBB)	48
4.1	Linearizzazione	48
4.2	Obiettivo del DBB	50
4.3	Scelte sulla realizzazione del DBB	50
4.4	Implementazione del DBB	53
5	UWB	57
5.1	Tecnologia UWB	58
5.2	Specifiche Tecniche	59
5.3	Prestazioni dell'UWB nella Localizzazione	65
6	Conclusioni	74

Abstract

Durante questi anni di Dottorato il mio lavoro è stato incentrato sull'analisi e sulla progettazione di algoritmi di localizzazione per Reti di Sensori Wireless (WSN).

I problemi inerenti la localizzazione di oggetti e persone, in ambienti Indoor o sulla superficie terrestre (Outdoor), coinvolgono tematiche riguardanti non solo il mondo delle telecomunicazioni, sono infatti molteplici le tecnologie utilizzate per questi scopi, dal GPS allo UWB, dalle WLAN al Bluetooth, etc., e innumerevoli sono le soluzioni utilizzate per mitigare gli errori dovuti alla natura radio del loro segnale, Multipath, Shadowing, Fading, etc.; ma senza ombra di dubbio le difficoltà maggiori sono da identificarsi nei metodi matematici per la soluzione delle equazioni che caratterizzano il problema.

La localizzazione è per sua natura un problema di tipo non lineare, la dipendenza delle coordinate dell'oggetto a cui si vuole associare una posizione, vanno come una radice quadrata (Cap. 3 e 4), e la soluzione di un tale sistema di equazioni mediante l'uso di calcolatori dalle discrete capacità di calcolo, microcontrollori o FPGA, viene ottenuta per mezzo di una sua linearizzazione.

In questo lavoro non ci siamo posti come obiettivo di realizzare una procedura matematica in grado di fornire una soluzione non lineare del problema ma abbiamo preferito percorrere una strada che ci permettesse di raggiungere risultati significativi utilizzando criteri che, non procedendo a priori con questa linearizzazione, portassero comunque a soluzioni affidabili (Cap. 4). Questo lavoro è stato organizzato nel modo seguente:

- breve dissertazione su cosa sono e come funzionano le WSN, con particolare attenzione alle caratteristiche che queste reti devono possedere per risolvere problemi di localizzazione (Cap. 1)
- overview sui sistemi e sulle tecnologie sviluppate fino ad oggi (Cap. 2)
- analisi e progettazione di un algoritmo di ottimizzazione sviluppato da noi per calcolare le coordinate dei nodi di una WSN, il cui obiettivo è quello di ridurre l'effetto della propagazione dell'errore all'interno della rete (Cap. 3)
- studio e implementazione di una tecnica di stima che produca risultati efficienti non solo in termini di stima iniziale della posizione ma anche in termini di accuratezza sulla posizione finale, senza introdurre linearizzazioni all'interno del problema (Cap. 4)
- l'analisi del comportamento di alcune tecniche di localizzazione, con i propri limiti matematici, applicate alla tecnologia Ultra Wide Band (UWB) (Cap. 5)

Capitolo 1

Wireless Sensor Networks

I recenti passi in avanti nel mondo della Microelettronica e delle Telecomunicazioni hanno reso possibile lo sviluppo di dispositivi dalle notevoli capacità di calcolo e dalle sorprendenti capacità di comunicazione. L'idea di sensori che la microelettronica ha fornito fino alla fine del vecchio millennio è stata quella di dispositivi in grado esclusivamente di percepire grandezze e fenomeni di interesse. La miniaturizzazione dei dispositivi, confermata dalla ancor valida legge di Moore [1], ha reso possibile la realizzazione di dispositivi in grado non solo di fornire informazioni grezze del fenomeno osservato ma anche una sua preliminare analisi e valutazione.

Una WSN è formata da milioni di questi dispositivi, costituiti da un'unità di rilevamento dati (il vero e proprio sensore), un'unità per il processamento dei dati (un microcontrollore o una FPGA), ed un dispositivo di comunicazione (Bluetooth, UWB, dispositivi Ad-Hoc).

Le ridotte dimensioni, che i nodi costituenti una WSN possono raggiungere, permettono di distribuire in modo del tutto casuale questi dispositivi giun-

gendo anche molto vicini al fenomeno da osservare. A causa di questo però la posizione dei sensori deve essere nota a priori poichè avendo a disposizione un dato riguardante un determinato effetto ma ignorando da dove questo venga generato, è di poca utilità. Questo vuol dire che ogni protocollo e/o algoritmo di comunicazione sviluppato per reti di questo tipo deve possedere capacità di localizzazione.

Altra peculiarità delle reti di sensori è la cooperazione tra i suoi nodi. Il possedere delle unità di elaborazione permette ai nodi della rete, non solo di comunicare i singoli dati grezzi, come già detto in precedenza, ma di fornire informazioni complete sull'osservazione unendo i diversi risultati provenienti da diversi sensori producendo un'informazione più completa, Data Fusion [2]. Queste caratteristiche consentono l'impiego delle WSN in molteplici campi di applicazione quali [3]:

1. il militare - la velocità nel posizionamento dei sensori, le capacità di autorganizzazione e la tollerabilità dei guasti fanno di queste reti una promessa per la realizzazione di sistemi di comando, controllo, comunicazione, processamento, sorveglianza, riconoscimento e puntamento
2. l'ospedaliero - monitorare continuamente le condizioni di pazienti che richiedono rapidi interventi da parte del personale medico nel caso in cui si presentino delle situazioni pericolose
3. il quotidiano - monitorare la qualità di prodotti, sorvegliare aree disastrose, oppure essere impiegate in applicazioni basate sulla realtà

virtuale o sull'immersività virtuale [4]

Per realizzare dei protocolli di comunicazione per queste reti, e/o di routing è stato necessario implementare dei protocolli Ad-Hoc. Proprio per questo il più delle volte si tende ad identificare le WSN con la più ampia famiglia delle reti Ad-Hoc. In realtà questa è una "parentela alla lontana", in quanto una WSN è per molti versi molto diversa da una rete Ad-Hoc. Di seguito elenchiamo alcune delle differenze più rilevanti [3]:

- il numero dei nodi che compongono una WSN è diversi ordini di grandezza più elevato rispetto a quello di una rete Ad-Hoc
- la topologia di una WSN può cambiare molto più frequentemente di quella di una rete Ad Hoc
- una WSN usa in generale protocolli di comunicazione broadcast, mentre nelle reti Ad-Hoc viene preferita una comunicazione point to point
- i nodi di una WSN hanno limitate capacità energetiche, computazionali e mnemoniche, mentre le reti Ad Hoc, i cui nodi in genere sono dei veri e propri PC, non soffrono di alcuna di queste limitazioni
- i nodi che compongono una WSN possono non avere la necessità di un identificativo globale a causa del loro elevato numero
- i nodi di una WSN hanno capacità autorganizzative mentre ai nodi di una rete Ad Hoc tale capacità non viene richiesta

Tutte queste caratteristiche devono essere tenute in considerazione quando si vogliono realizzare algoritmi e/o protocolli per una WSN.

1.1 Localizzazione nelle WSN

I nodi di una WSN possono essere disposti nell'ambiente in maniera del tutto casuale, per mezzo di aerei, colpi di cannone, oppure in maniera metodologica, cioè manualmente grazie all'intervento di uomini o di robots; ovviamente per entrambi gli scenari si rende indispensabile sapere dove sono effettivamente dislocati i nodi della rete.

Se il deploy di una WSN viene eseguito:

- metodologicamente - le coordinate dei suoi nodi possono essere programmate all'interno dei dispositivi
- casualmente - i nodi devono essere in grado di calcolare automaticamente la propria posizione

Conoscere la posizione dei nodi della rete permette di sapere dove è localizzato il fenomeno di interesse, sicuramente nelle vicinanze del nodo che lo ha rilevato, e permette la comunicazione tra i nodi della rete per mezzo di procedure di routing che consentono il minimo dispendio energetico da parte dei nodi stessi.

Queste sono solo alcune delle applicazioni in cui possono essere impiegate le informazioni relative alla localizzazione dei nodi in una WSN. Progettare un

algoritmo di localizzazione per WSN implica il rispetto dei requisiti seguenti [3]:

- Scalabilità - una WSN, formata da migliaia di dispositivi che comunicano utilizzando protocolli di broadcast possono produrre fenomeni di flooding che potrebbero devastare l'intera rete quindi, un algoritmo di localizzazione deve essere progettato in modo da evitare una tale situazione
- Consumi di Potenza, i dispositivi che formano una WSN hanno limitate capacità energetiche, il più delle volte sono delle semplici batterie, quindi i loro periodi di vita sono molto limitati. I maggiori consumi energetici si hanno con la continua comunicazione tra nodi; un algoritmo di localizzazione ideale deve riuscire a implementare metodologie che impediscano continui periodi di comunicazione tra nodi che non hanno bisogno di comunicare o che hanno già scambiato tutte le informazioni necessarie
- Topologia della rete - una WSN è soggetta a continui cambiamenti di struttura, sia quando il suo obiettivo è quello di monitorare dei soggetti in movimento sia quando essa cambia struttura a causa di inevitabili malfunzionamenti dei dispositivi; un algoritmo di localizzazione deve possedere quindi capacità autorganizzative
- Accuratezza - un buon algoritmo di localizzazione deve essere in grado di fornire informazioni sulla posizione dei nodi il più possibile pre-

cise; sapere che è scoppiato un incendio, in un area di $10km^2$ con un'indeterminazione di $5km^2$ è come non sapere che tale fenomeno sta avvenendo

Un algoritmo di localizzazione, per svolgere al meglio il suo lavoro, deve soddisfare i requisiti appena elencati e fornire un giusto equilibrio tra quelle che sono le specifiche di progetto ed i costi necessari a realizzarlo. In termini di costi le WSN vantano bassissimi costi di realizzazione, esempio lampante di tale affermazione è rappresentato dal GPS (Global Positioning System), un sistema di localizzazione su scala mondiale, i cui livelli di precisione e accuratezza si attestano intorno alle centinaia di metri. Montare ricevitori di questo sistema su migliaia di sensori sarebbe stata la soluzione più comoda, ma sicuramente meno conveniente sul mercato; inoltre anche applicare complessi algoritmi di ottimizzazione, per ridurre l'errore sull'informazione di posizione fornita dal GPS, non avrebbe comunque portato alla soluzione di uno dei più grandi inconvenienti del sistema GPS, il funzionamento in ambienti indoor [5], [20].

1.2 Limiti della Localizzazione

La localizzazione di oggetti e persone è soggetta a molti limiti che possiamo dividere in due grandi categorie:

- limiti tecnologici

- limiti matematici

I limiti tecnologici sono identificati dalla natura del sistema scelto per implementare l'algoritmo di localizzazione: radio, ultrasuoni, laser, infrarossi, etc.. Quindi un limite tecnologico viene identificato come un errore commesso non dall'algoritmo ma come un errore proprio della tecnologia utilizzata. In base al tipo di tecnologia impiegata sono stati identificati problemi tecnologici sempre diversi, ad esempio:

- per le onde radio questi dipendono dalla frequenza e dalla larghezza di banda utilizzata
- per gli ultrasuoni questi dipendono dalla natura meccanica dell'onda sonora
- per i sistemi ottici questi dipendono dalla necessità di mantenere in linea di vista trasmettitori e ricevitori

I limiti matematici invece sono identificati come tutti quei problemi la cui causa è rappresentata dalla complessità dei calcoli da eseguire, producendo effetti sulla precisione della posizione dei nodi, che in algoritmi di tipo iterativo portano ad una distruttiva propagazione dell'errore.

Il limite che in questo lavoro è stato considerato come il più autorevole è quello di Cramer Rao (CRB), definito come il minimo errore che un sistema può commettere, nello stimare un parametro, fissata un'incertezza sulle misure eseguite per stimarlo quando lo stimatore è non polarizzato [6] [7] [8].

Capitolo 2

Overview sui Sistemi di Localizzazione

La localizzazione per mezzo di WSN è un argomento di ricerca molto dibattuto e sul quale molti ricercatori, negli ultimi anni, stanno spendendo molte delle loro risorse. In questo Capitolo abbiamo presentato alcuni dei lavori fino ad oggi realizzati, soffermandoci sulle loro novità e sulle loro limitazioni senza però entrare nei particolari di ogni singola procedura. Per ogni altra più ampia trattazione si rimanda alla più esauriente letteratura

2.1 Algoritmi e sistemi di Localizzazione

Fino ad ora sono stati realizzati diversi sistemi di localizzazione, ognuno dei quali sfrutta diverse tecniche e tecnologie per fornire informazioni sulla posizione di ogni suo nodo. In questo capitolo abbiamo analizzato questi differenti sistemi siano essi riferiti a WSN o a reti di altra natura.

Prima di affrontare questa analisi presentiamo una panoramica su quelle che

sono le scelte implementative che caratterizzano un sistema di localizzazione.

2.1.1 Anchor Based e Anchor Free

La prima grande distinzione tra WSN che offrono un servizio di localizzazione è quella basata sulla presenza di nodi di riferimento, chiamati Anchors. Una rete formata in parte da Anchors viene chiamata Anchor Based mentre una rete in cui tutti i nodi non conoscono la propria posizione viene chiamata Anchor Free.

Come già visto nel Capitolo 1 le informazioni in una WSN vengono trasmesse in broadcast ed anche in questo caso gli Anchors trasmettono la loro posizione a tutti i nodi all'interno del loro raggio di copertura; i nodi che ricevono questa informazione e non hanno delle proprie coordinate vengono chiamati Unknowns.

Algoritmi pensati per funzionare su WSN Anchor Based localizzano gli Unknowns all'interno del sistema di riferimento assoluto, un sistema di riferimento che associa, in maniera univoca, un nodo ad una posizione.

Anche in una rete Anchor Free le informazioni tra i nodi vengono trasmesse in broadcast, con la differenza che ora non sono degli Anchors a comunicare con gli Unknowns ma dei particolari Unknowns, eletti ad Anchors relativi, che trasmettono quella che è la loro posizione in un sistema di riferimento creato da essi.

Algoritmi pensati per funzionare su WSN Anchor Free localizzano i nodi della rete all'interno di un sistema di riferimento relativo, un sistema di rife-

rimento che associa, in maniera non univoca, un nodo ad una posizione. Entrambe queste due "famiglie" presentano i loro vantaggi e svantaggi; prima fra tutti una rete Anchor Based ha l'indiscusso vantaggio di determinare la posizione in modo univoco di un nodo in una rete e quindi comunicare questa informazione anche ad altri sistemi di localizzazione, ma allo stesso tempo presenta degli svantaggi dal punto di vista implementativo, tutti gli Anchors devono essere a conoscenza della propria posizione, quindi questi nodi devono essere posizionati correttamente all'interno della rete ed allo stesso tempo gli Unknowns devono essere posizionati vicini a questi Anchors per essere localizzati. Una rete Anchor Free invece non ha problemi di disposizione dei nodi, i dispositivi che la costituiscono possono essere posizionati casualmente all'interno di un area; ovviamente hanno lo svantaggio che tale posizione resta valida solamente all'interno della rete stessa e tale informazione non può essere utilizzata al di fuori, inoltre l'assenza di Anchors nella rete produce una propagazione dell'errore maggiore rispetto ad una rete Anchor Based.

2.1.2 Stima della Distanza

Il calcolo della posizione all'interno di una qualsiasi rete, sia essa una rete Ad Hoc, una WSN o una rete satellitare, viene fatta in base alla conoscenza della distanza che separa i diversi nodi che la compongono.

In [13] viene proposta una tassonomia secondo la quale le diverse tecniche di stima della distanza possono essere raggruppate in due grandi famiglie:

1. Range Based
2. Range Free

Le tecniche appartenenti alla prima famiglia dipendono dalla distanza euclidea che separa i diversi nodi mentre la seconda, a causa della presenza della propagazione dell'errore, dovuto in parte ad una pessima capacità di stimare la distanza tra i nodi, è basata sull'indipendenza da tale informazione.

Range Based

Le metodologie più conosciute di stima della distanza, appartenenti alla famiglia Range Based sono:

- Time Based Methods - divisi a loro volta in due sottogruppi, Time of Arrival (ToA) [28] [29] e Time Difference of Arrival (TDoA) [27], sono basati rispettivamente sui tempi di arrivo e sulla differenza dei tempi di arrivo dei segnali trasmessi dagli Anchors, assoluti o relativi. Per impiegare tali metodi bisogna conoscere a priori la velocità di propagazione del segnale che si vuole utilizzare; queste metodologie sono implementate su tecnologie radio, sonore e ottiche
- Angle of Arrival Methods - basati sulla determinazione dell'angolo di arrivo del segnale trasmesso dai nodi Anchors, assoluti o relativi, ricorrono a formulazioni trigonometriche per stimare la distanza dello Unknown [22]. Per impiegare questi metodi è necessario montare array

di antenne sui nodi della rete; queste metodologie sono implementate su tecnologie radio e sonore

- Received Signal Strength Indicator (RSSI) Methods - basati sulla misura della potenza del segnale ricevuto dall'Unknown associano, conoscendo anche la quantità di potenza trasmessa dagli Anchors assoluti o relativi, la perdita di potenza del segnale trasmesso ad una distanza; queste metodologie sono implementate su tecnologie radio [23]

Range Free

Le metodologie più conosciute di stima della distanza, appartenenti alla famiglia Range Free sono:

- Centroid - la posizione degli Unknowns è determinata conoscendo unicamente le coordinate degli Anchors vicini, indipendentemente dalla loro distanza. Quando un Unknown è all'interno del raggio di copertura di più Anchors, esso assumerà come sue coordinate le coordinate del centroide della figura geometrica avente per vertici gli Anchors stessi [14]
- DV-Hop - la distanza che separa un Unknown da un Anchor non è espressa in termini di distanza euclidea ma in numero di hops che dividono i due nodi. La lunghezza di tali Hops viene determinata a priori dagli Anchors della rete; calcolando il valore della distanza euclidea

che li separa e dividendola per il numero di salti che il pacchetto ha compiuto [18]

- Amorphous - basato sugli stessi concetti del DV-Hop ma a differenza del primo la lunghezza dell'Hop dipende dalla densità della rete [15]. L'equazione 2.1 indica la dimensione dell'Hop per questa metodologia (n_{local} indica la densità della rete)

$$HopSize = 1 + e^{-n_{local}} - \int_{-1}^{+1} e^{\frac{n_{local}(\arccos t - t\sqrt{1-t^2})}{\pi}} dt \quad (2.1)$$

- Point in Triangulation (PiT) - l'Unknown che vuole calcolare la sua posizione sceglie tre Anchors tra quelli che sono all'interno del raggio di copertura e verifica se si trova all'interno o all'esterno del triangolo formato dai tre Anchors simulando uno spostamento. Se l'Unknown si trova all'interno del triangolo simulando uno spostamento in qualsiasi direzione si avvicinerà ad uno dei tre vertici allontanandosi dagli altri; in tal caso assumerà come coordinate il baricentro del triangolo scelto. Se invece l'Unknown simulando uno spostamento in qualsiasi direzione si allontana da tutti e tre gli Anchors vuol dire che il nodo si trova all'esterno del triangolo e dovrà scegliere altri tre nuovi Anchors [15] [16].
- Approximate Point in Triangulation (APiT) - basato sui concetti del PiT, nasce come soluzione al più grande problema che si ha nella prima

metodologia: i nodi non si muovono. Per simulare tale movimento vengono utilizzate le informazioni dei nodi vicini, in particolare nell'APiT viene utilizzato lo RSSI [15]

2.1.3 Calcolo della Posizione

Combinando tra loro le differenti metodologie di stima della distanza sono stati realizzati diversi algoritmi per calcolare la posizione dei nodi all'interno di una rete. I più conosciuti sono:

- Triangolazione, noto l'angolo di arrivo di almeno tre impulsi provenienti da tre Anchors differenti, e grazie all'utilizzo di formule trigonometriche quali il teorema di Carnot, può calcolare le coordinate del nodo
- Trilaterazione, nota la distanza alla quale si trovano tre Anchors, traccia tre circonferenze aventi per centro gli stessi Anchors. La posizione dell'Unknown è data dall'intersezione delle tre circonferenze
- Multilaterazione, estensione della Trilaterazione, invece di ricevere informazioni esclusivamente da tre Anchors utilizza tutti i nodi presenti nel suo raggio di copertura
- Prossimità, nota la presenza di un Anchor nel raggio di copertura dell'Unknown, assegna direttamente le coordinate dell'Anchor allo Unknown stesso. Nel caso in cui all'interno del raggio di copertura dell'Unknown vi fossero più Anchors, assegna all'Unknown coordinate

pari al valor medio delle coordinate degli Anchors

2.1.4 Potenzialità di Calcolo

Esistono due tipologie di reti che caratterizzano il deploy di una WSN; entrambe sviluppate per raggiungere finalità diverse vengono di seguito confrontate per evidenziarne vantaggi e svantaggi nell'impiego di algoritmi di localizzazione:

- Centralized - i nodi della rete sono dotati di minime capacità di calcolo, a volte sono esclusivamente dotati di sensori in grado di percepire e di tramettere il fenomeno monitorato. Questi nodi sono direttamente collegati ad un nodo speciale chiamato *Sink* in grado di raccogliere le informazioni provenienti dal resto dei nodi sparsi per la rete e ricavare da esse l'informazione da trasmettere all'utente finale
- Distributed - i nodi della rete sono dotati delle stesse capacità di calcolo, collegati tra di loro sono in grado non solo di percepire il fenomeno ma anche di elaborare un'informazione completa da fornire direttamente all'utente finale

I principali vantaggi e svantaggi di tali strutture ricadono in quelli che sono i vantaggi e gli svantaggi di reti progettate con la stessa topologia. In particolare una rete centralizzata ha una minore resistenza ai guasti (guasti che se coinvolgessero il nodo centrale causerebbero il malfunzionamento dell'intera rete) ma sono molto più pratiche da disporre e gestire; una rete distribuita

viceversa presenta una maggiore resistenza ai guasti ma anche una maggiore difficoltà realizzativa.

2.1.5 Accuratezza

Utilizzare una WSN per localizzare persone e oggetti significa riuscire a fornire coordinate, nel sistema di riferimento che la WSN riesce a costruire, affette dal minimo errore possibile. Uno dei fattori che maggiormente caratterizza un tale parametro è, indipendentemente dal tipo di WSN che si vuole realizzare (Anchor Based, Anchor Free, Range Based o Range Free), la densità dei nodi che compongono la WSN [22].

2.1.6 Consumo Energetico

I nodi di una WSN sono alimentati da batterie e la loro durata condiziona la vita dei nodi.

In [17] non si cerca di ottimizzare i consumi energetici per mezzo di particolari algoritmi di gestione della potenza ma si identificano le cause del maggior dispendio energetico nei nodi di una WSN.

La vita di un sensore è caratterizzata dall'acquisizione di dati, dalla loro elaborazione e dalla loro trasmissione, [17] ha dimostrato che proprio quest'ultimo passo nell'attività di un sensore rappresenta la causa dei maggiori consumi di potenza.

2.2 Overview sui Sistemi

Il resto del Capitolo è una breve descrizione dei diversi sistemi di localizzazione ideati per le WSN.

Vengono di seguito elencati vantaggi e svantaggi di ogni singolo sistema e come ognuno di essi raggiunga un'accuratezza sulla posizione dei singoli nodi sfruttando metodologie matematiche o basandosi su tecnologie più onerose ma anche più raffinate.

2.2.1 APS Algorithm

APS, Ad hoc Positioning System, appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Free, Distributed.

Individuati a coppie gli Anchors all'interno della rete, e calcolata la distanza euclidea ed il numero di Hops che li divide, l'algoritmo determina una media per identificare la dimensione di un singolo Hop. In [18] vengono individuate tre differenti tipologie dello stesso algoritmo, incentrate su differenti modi di calcolare la lunghezza dell'Hop:

- **DV-Hop Propagation Method** - basato sul principio di Multilaterazione visto nel Paragrafo 2.2.3, un Unknown per determinare la propria posizione deve avere all'interno del suo raggio di copertura almeno tre Anchors. Una volta nota la posizione degli Anchors l'Unknown calcola la distanza e il numero di Hops che li separano per mezzo dell'equazione

2.2

$$\frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_j} \quad (2.2)$$

dove i pedici i e j distinguono i due Anchors mentre h_j indica il numero di salti che li dividono

- **DV-Distance Propagation Method** - basato sul principio di Multilaterazione visto nel Paragrafo 2.2.3, un Unknown per determinare la propria posizione deve avere all'interno del suo raggio di copertura almeno tre Anchors. L'informazione della distanza che separa i nodi all'interno della rete viene propagata in termini di distanza e non di Hops
- **Euclidian Propagation Method** - basato sul principio di Multilaterazione visto nel Paragrafo 2.2.3, un Unknown per determinare la propria posizione deve avere all'interno del suo raggio di copertura almeno tre Anchors. Considerando la Figura 2.1 i nodi A, B e C sono Unknowns mentre il nodo L è un Anchor, nel raggio di copertura solo di B e C. Note le distanze tra L, B, e C vogliamo calcolare la distanza tra A ed L, e dalla Figura 2.1 si può notare come il nodo A possa assumere due possibili posizioni. Per ridurre questa indeterminazione entrano in gioco le distanze dei nodi che si trovano vicini ad A e nel raggio di copertura di L, oppure i nodi che sono vicini a B e C. Una volta compiuta un'opportuna scelta per A viene calcolata la distanza tra A ed L applicando il teorema di Carnot ai tre triangoli ACB, BCL e ACL.

Combinando questa informazione di distanza con altri due Anchors si determinano le coordinate di A

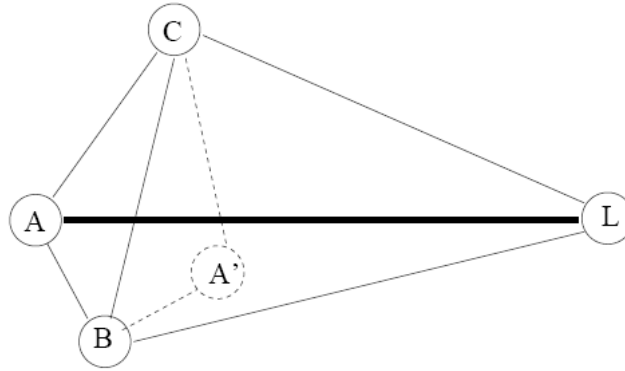


Figura 2.1: Euclidian Propagation Method

2.2.2 Convex Position Estimation

Appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Free, Centralized.

Basato sul concetto di connettività della rete utilizza vincoli geometrici risolvibili per mezzo di ottimizzazioni [19].

L'accuratezza raggiungibile con un tale sistema è strettamente dipendente dal numero di Anchors che vengono disposti nella rete.

2.2.3 GPS Less

Appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Based, Distributed.

Basato sul concetto di connettività tra i nodi è realizzato per mezzo di una griglia di Anchors ed ogni Unknown calcola la propria posizione come centroide dell'insieme degli Anchors che si trovano all'interno del proprio raggio

di copertura.

L'accuratezza di tale sistema dipende dalla densità degli Anchors, in condizioni ottimali tale accuratezza, è pari ad un terzo del passo della griglia sulla quale sono disposti gli Anchors [20].

2.2.4 GPS Free

Appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Free, Distributed.

Realizzato per valutare l'impatto del movimento dei nodi sull'accuratezza del calcolo della loro posizione [21] è diventato la base per lo sviluppo del nostro lavoro.

Come tutti i sistemi Anchor Based, Range Free, anche il GPS Free crea un sistema di riferimento relativo tra tutti i nodi che si trovano ad un singolo hop dal nodo che ha iniziato la procedura e per mezzo di operazioni basate sui concetti di *trilaterazione* ne calcola le coordinate.

2.2.5 Iterative Multilateration

Appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Based, Distributed.

Basato sul principio di Multilaterazione visto nel Paragrafo 2.2.3, un Unknown per determinare la propria posizione deve avere all'interno del suo raggio di copertura almeno tre Anchors. Una volta ottenute delle coordinate l'Unknown diventa Anchor e aiuta i restanti Unknowns della rete a calcolare la loro posizione.

Il maggiore svantaggio della *Iterative Multilateration* è la propagazione dello errore causata dalla trasformazione di Unknowns in Anchors [22]. Quando ad un Unknown vengono assegnate delle coordinate gli viene assegnata anche un'incertezza, dipendente dal numero di Anchors che hanno partecipato alla localizzazione del nodo. Diventato Anchor il nodo trasmette la sua posizione e la sua incertezza a tutti gli altri nodi della rete, causando una propagazione dell'errore di posizionamento.

2.2.6 Collaborative Multilateration

Appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Based, Distributed.

Utilizzato quando un Unknown è nel raggio di copertura di meno di tre Anchors è un'estensione della *Iterative Multilateration*.

È articolato in tre fasi [22]:

1. Formazione di un albero collaborativo
2. Stima della posizione iniziale dell'Unknown
3. Ottimizzazione del risultato per mezzo di algoritmi come il Filtro di Kalman

Viene impiegato in reti in cui la densità di Anchors è minima.

2.2.7 Radar

Appartiene alla famiglia Anchor Based, Range Based, Distributed.

Formato da Base Stations in grado di coprire ampi spazi, questo sistema è basato sul calcolo dello RSSI e su modelli di canale teorici [23].

L'accuratezza con la quale vengono calcolate le posizioni degli Unknowns, equipaggiati con tecnologia 802.11b, è dell'ordine dei $2 - 3m$ per reti formate da nodi statici mentre è dell'ordine dei $3 - 4m$ per reti formate da nodi dinamici.

Capitolo 3

Pangaea Algorithm

In questo Capitolo esponiamo quelle che sono state le nostre scelte implementative per la realizzazione di un algoritmo di localizzazione per WSN.

L'algoritmo sviluppato appartiene alla famiglia Anchor Free, Range Based, Distributed e fonda le sue radici sui principi della *Iterative Multilateration* vista nel Paragrafo 2.3.5 migliorando, in termini prestazionali, i punti deboli di questa metodologia come la:

- propagazione dell'errore
- elevata densità di Anchors

L'algoritmo è stato diviso in sei fasi principali:

1. Realizzazione di un sistema di riferimento relativo
2. Stima della distanza tra i nodi all'interno del sistema
3. Stima della posizione dei nodi del sistema

4. Ottimizzazione della posizione dei nodi del sistema
5. Ottimizzazione del sistema di riferimento
6. Unione dei differenti sistemi di riferimento

Gli obiettivi che si sono raggiunti sviluppando questa procedura sono:

- Indipendenza dalla Tecnologia di Realizzazione, partendo dall'informazione della distanza e non dai meccanismi su come ottenerla abbiamo realizzato una procedura applicabile alla maggior parte delle tecnologie
- Decentralizzazione della Procedura, tutti i nodi hanno le stesse capacità, non è necessaria la presenza di nodi particolari che elaborino le informazioni
- Risparmio Energetico, ogni nodo comunica esclusivamente con i nodi a lui più vicini

Il resto del Capitolo è strutturato secondo gli argomenti seguenti:

1. Cenni sulla rigidità dei grafi, Paragrafo 3.1; mantenendo sempre vivo il confronto con le WSN, verranno trattati i teoremi e le condizioni necessarie per creare grafi globalmente rigidi
2. Realizzazione di sistemi di riferimento locali, Paragrafo 3.2, ogni nodo diventa l'origine di un sistema di riferimento, costruito per mezzo della collaborazione dei suoi vicini, sfruttando requisiti di rigidità

3. Creazione di sottoreti, Paragrafo 3.4, di seguito chiamate Isole
4. Creazione di un unico sistema di riferimento, Paragrafo 3.5, le diverse Isole vengono unite per formare un unico sistema di riferimento, da cui il nome Pangaea Algorithm

3.1 Rigidità nei Grafi

Un grafo è un insieme di nodi connessi tra loro per mezzo di archi. Queste strutture possono essere rappresentate da alberi, nel caso in cui si abbia a che fare con dei grafi infrastrutturati, cioè tutti i nodi fanno capo, grazie ad un numero imprecisato di salti, ad un unico nodo detto radice, oppure possono formare strutture in cui nessun nodo può essere considerato radice del grafo dato che i nodi che lo compongono sono collegati tra loro senza una precisa struttura.

La teoria della rigidità è un insieme di teoremi che, se soddisfatti, permettono di risalire in modo univoco alla topologia di un grafo, in altri termini possono essere utilizzati per classificare ma soprattutto per caratterizzare queste strutture, grazie a particolari proprietà e in base al numero di connessioni esistenti tra i nodi.

Nell'ambito delle WSN una rete può essere facilmente riconducibile alla definizione di grafo, in particolare in problemi riguardanti la localizzazione, l'univocità della posizione dei suoi nodi è un vincolo fondamentale.

In questo panorama abbiamo concentrato la nostra attenzione su particolari

grafi rigidi, la cui caratteristica è quella di possedere un numero di nodi le cui posizioni, rispetto a tutti gli altri, siano prive di ambiguità.

3.1.1 Grafo Rigido

Un grafo rigido è una struttura priva di ambiguità all'interno dell'universo da esso definito, in altri termini un grafo è detto rigido se i nodi che lo compongono mantengono costante la distanza che li separa; questa caratteristica però non impedisce al grafo di avere comunque un'infinità di configurazioni, vedi Figura 3.1, oppure una quantità numerabile di esse, vedi Figura 3.2. In entrambi i casi ci troviamo di fronte a grafi rigidi [24], [25], [26]. Alla luce di

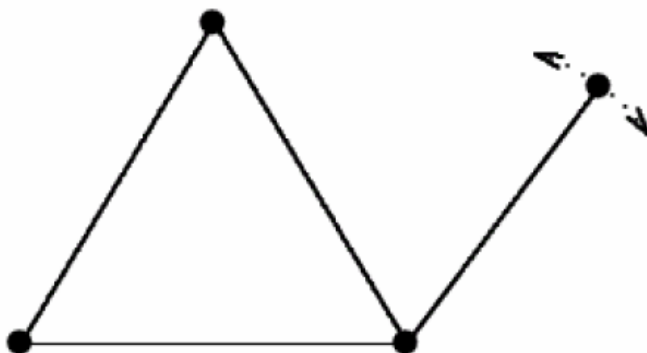


Figura 3.1: Grafo Rigido

quanto appena detto risulta immediato che applicare il semplice concetto di rigidità a tematiche di localizzazione risulta controproducente; per ottenere una posizione univoca dei nodi di un grafo dobbiamo estendere la definizione di rigidità a quella di rigidità globale.

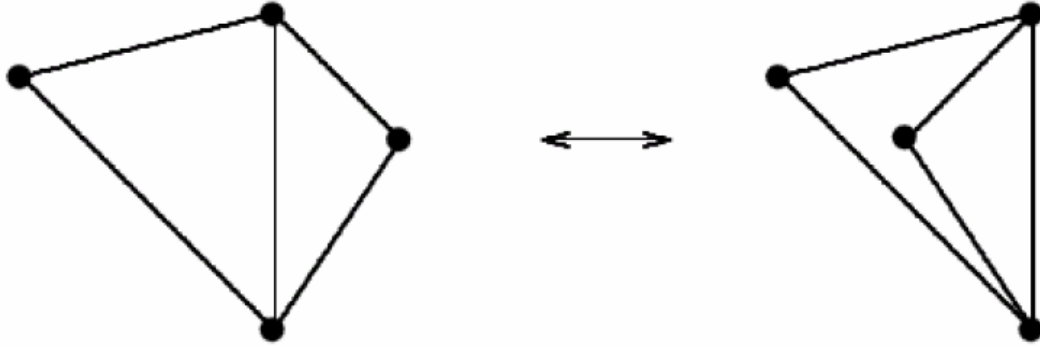


Figura 3.2: Grafo Rigido

3.1.2 Rigidità Globale

Prima di addentrarci nelle molteplici condizioni che bisogna soddisfare per realizzare un grafo globalmente rigido, soffermiamoci su quelle che sono le condizioni da soddisfare per realizzare un grafo rigido; per semplicità abbiamo preferito riferirci a grafi in due dimensioni.

In Figura 3.3 è rappresentato un insieme di nodi in grado di muoversi lungo le direzioni del piano, i loro due gradi di libertà vengono indicati dalle frecce che hanno origine in ciascun nodo. Collegando due nodi tra di loro, vedi Figura 3.4, si nota come questo vincolo privi la coppia di un grado di libertà, costringendo ciascun nodo alle condizioni dell'altro. Quindi il numero di gradi di libertà di un insieme di nodi è proporzionale al numero di connessioni che questi nodi possono realizzare. Generalizzando il discorso ad una rete formata da N nodi in uno spazio d dimensionale otteniamo che il numero di

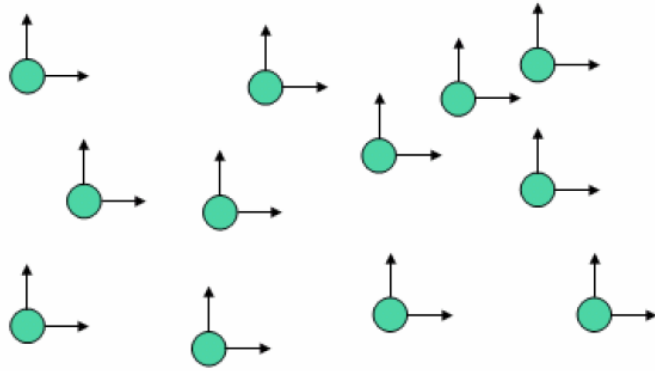


Figura 3.3: Gradi di Libertà dei Nodi di una WSN nel Piano

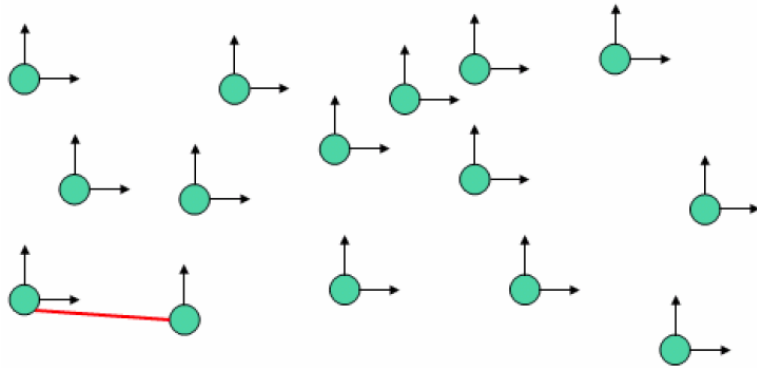


Figura 3.4: Gradi di Libertà dei Nodi di una WSN nel Piano

gradi di libertà totale di un grafo rigido è quello indicato dalla equazione 3.1.

$$S(N, d) = \begin{cases} Nd - d(d + 1)/2 & \text{Se } N \geq d \\ N(N - 1)/2 & \text{Altrimenti} \end{cases} \quad (3.1)$$

Dove Nd indica il numero dei gradi di libertà che avrebbe l'intera rete se ogni nodo non fosse collegato a nessun altro, mentre $d(d - 1)/2$ sono il numero di movimenti permessi al corpo rigido [24].

Il numero di movimenti permessi al corpo rigido sono tutti quei movimenti che non pregiudicano la sua esistenza [24], ossia la Rotazione, $d(d-1)/2$ gradi di libertà, e la Traslazione, d gradi di libertà. Quindi, se ogni arco aggiunge un vincolo indipendente allora sono necessari $S(N, d)$ archi per eliminare tutti i movimenti che pregiudicano la rigidità del grafo [24].

Per i nostri scopi possiamo ritenere rigido un grafo che abbia $S(N, d)$ archi ben distribuiti, dove per ben distribuiti si intende che ogni altro sottografo con N' nodi abbia al più $S(N', d)$ archi.

Questa condizione risulta sufficiente per $d = 1$, infatti otteniamo $S = N$, e Laman ha dimostrato che questa condizione continua a valere anche per $d = 2$, ottenendo $S = 2N - 3$, con il seguente Teorema (*Laman's Theorem*):

In uno spazio bidimensionale i rami di un Grafo G sono indipendenti se e solo se ogni Sottografo G' ha $2N'-3$ rami

da cui discende il Corollario:

In uno spazio bidimensionale un Grafo con N nodi e $2N-3$ rami è rigido se e solo se ogni suo Sottografo con N' nodi ha $2N'-3$ rami

Trovare un analogo di questo Teorema per dimensioni maggiori di due è tutt'altro che semplice, infatti per tali dimensioni il problema diventa *NP-Completo*. Determinati il numero degli archi necessari a stabilire la rigidità di un grafo, possiamo procedere a come identificare se questo grafo rigido è anche globalmente rigido.

Un grafo per essere globalmente rigido deve essere:

- $(d + 1)$ connesso, cioè ogni nodo deve avere un numero di connes-

sioni maggiore di una unità rispetto al valore della dimensione in cui è definito

- ridondante, cioè ogni nodo deve garantire un numero di connessioni tali da impedire al grafo di deformarsi, vedi Figura 3.5 e Figura 3.6

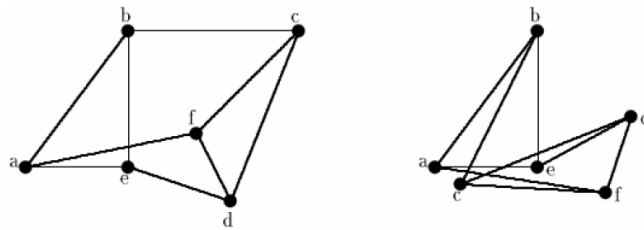


Figura 3.5: Grafo Rigido Deformato

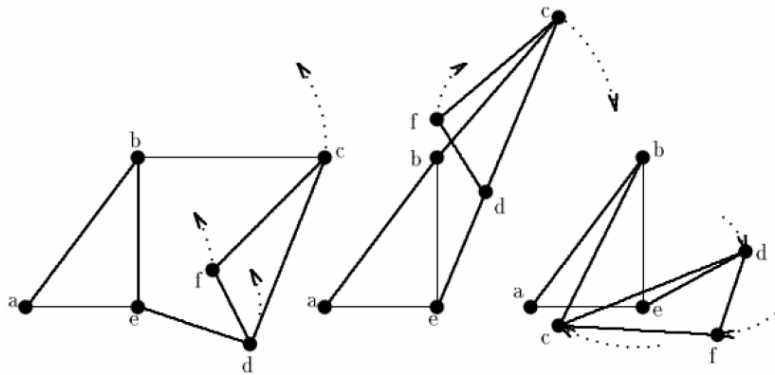


Figura 3.6: Deformazioni di un Grafo Rigido non Ridondante

Queste deformazioni possono verificarsi a causa di temporanei malfunzionamenti dei nodi della rete, producendo ancora un grafo rigido come risultato ma con le coordinate di alcuni nodi mutate rispetto alla configurazione precedente.

Un Grafo Rigido che soddisfa anche le condizioni di $(d+1)$ *connettività* e *ridondanza*, è detto Grafo Globalmente Rigido, vedi Figura 3.7.

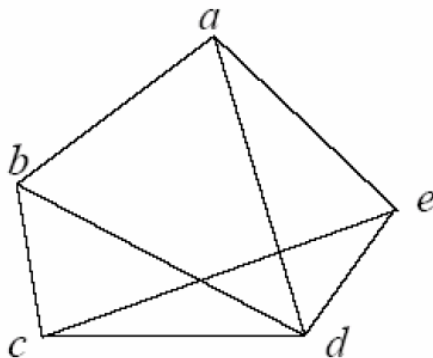


Figura 3.7: Grafo Globalmente Rigido

3.2 Creazione dei Sistemi di Riferimento Locali

Il Pangaea Algorithm ha inizio con la realizzazione di diversi Grafi Rigidi, ogni nodo della rete individua quali sono i nodi all'interno del proprio raggio di copertura. Ottenute queste informazioni l'Algoritmo determina quali insiemi formano Grafi Globalmente Rigidi e su di questi inizia a costruire dei sistemi di riferimento indipendenti.

Viene eletta come origine di ciascun sistema di riferimento il nodo con il maggior numero di connessioni nell'insieme, *nodo 1* in Figura 3.8, in seguito viene scelto un secondo nodo, *nodo 2* in Figura 3.8, a distanza d_{12} dal precedente, con il quale realizza l'asse delle ascisse e al quale vengono assegnate le

coordinate $(d_{12}, 0)$. L'asse delle ordinate viene creato per mezzo di un terzo nodo, *nodo 3* in Figura 3.8, a distanza d_{13} dal nodo 1 e a distanza d_{23} dal nodo 2. Sfruttando il teorema di Carnot, noto l'angolo α , vedi Figura 3.8, al nodo 3 vengono assegnate le coordinate $(d_{13} \cos \alpha, d_{13} \sin \alpha)$.

In questo ragionamento i nodi 1, 2 e 3 sono stati eletti a Anchors relativi dell'insieme, che possiamo chiamare più propriamente sottorete, e possono ora comunicare la loro posizione al resto degli Unknowns nella sottorete.

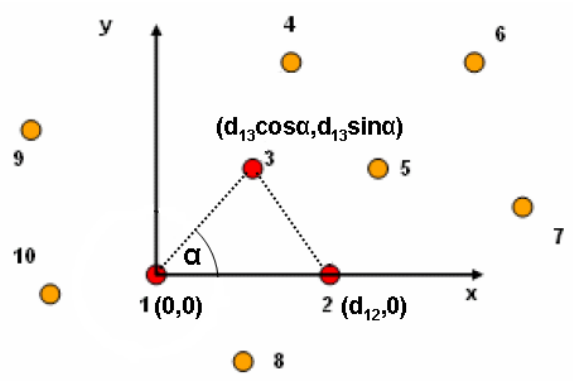


Figura 3.8: Creazione di un Sistema di Riferimento Locale

3.3 Localizzazione dei Nodi nella Sottorete

Una volta identificato e realizzato il sistema di riferimento, i tre Anchors relativi trasmettono in broadcast la loro posizione all'interno della sottorete. Tutti i nodi che si trovano all'interno del raggio di copertura dei tre Anchors relativi stimano la propria posizione.

Una stima iniziale delle loro posizioni viene fatta utilizzando la tecnica del

Bounding Box, dove si assume che le aree di copertura generate dagli Anchors relativi non siano dei cerchi ma dei quadrati. In questo modo l'intersezione di queste aree ha una forma regolare, pari cioè ad un quadrato o un rettangolo di cui è molto semplice calcolare il centro, in Figura 3.9 il centro è indicato dalla sigla *est. pos.*. Le coordinate di questo punto vengono assunte come le

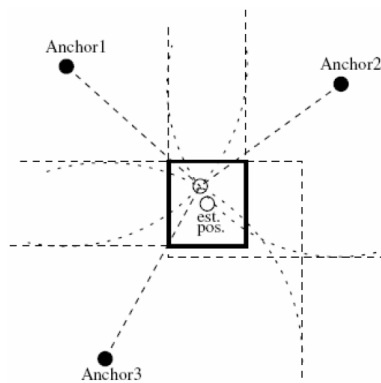


Figura 3.9: Bounding Box

coordinate iniziali dell'Unknown che ha rilevato i tre Anchors relativi.

Avendo a che fare con aree molto grandi e reti poco dense, il punto stimato con il *Bounding Box* raramente coincide con la posizione dell'Unknown. Per fare in modo che tale punto si avvicini a quelle che sono le reali coordinate dell'Unknown bisogna *ottimizzare* questa posizione, cioè ridurre l'errore quadratico medio sulle distanze stimate.

In letteratura ci sono molti metodi per ridurre questo errore e si differenziano tra loro a seconda della natura della rete e della mobilità dei nodi. Il metodo più usato è il Filtro di Kalman [9], ottimo sia per reti formate da nodi in movimento, dato che tiene memoria delle posizioni occupate dal nodo du-

rante tutta la sua storia, ma anche per reti formate da nodi immobili, dato che in questo caso i suoi risultati vengono a coincidere con quelli dello MMSE (Minimum Mean Square Error).

Indicando con $f_{U,i}$ la differenza tra:

- $r_{U,i}$, distanza misurata dall'Unknown rispetto agli Anchors relativi
- $\sqrt{(x_i - \hat{x}_U)^2 - (y_i - \hat{y}_U)^2}$, distanza calcolata dal punto ottenuto con il *Bounding Box* (\hat{x}_U, \hat{y}_U) e dagli Anchors relativi (x_i, y_i)

l'obiettivo è quello di trovare quei valori di (\hat{x}_U, \hat{y}_U) tali per cui vengano minimizzate tutte le distanze dell'Unknown rispetto agli Anchors relativi, equazione 3.2

$$F(x_U, y_U) = \min \sum_i f_{U,i} \quad (3.2)$$

La procedura di ottimizzazione sviluppata è di tipo iterativo, tramite continue ripetizioni della minimizzazione di 3.2 l'algoritmo trova soluzioni sempre più prossime alle coordinate reali dell'Unknown. Ovviamente se al primo passo della iterazione della minimizzazione le coordinate (\hat{x}_U, \hat{y}_U) erano quelle prodotte con il *Bounding Box*, ai passi successivi queste coordinate vengono sostituite dai risultati prodotti dalla minimizzazione eseguita al passo precedente.

L'esistenza di questo ciclo, se da un lato può portare ad una soluzione più fine delle coordinate dell'Unknown, dall'altro può anche avere durata infinita oppure portare a dei valori che, pur soddisfacendo tutti i vincoli imposti dalle distanze tra i nodi della sottorete, purtroppo non coincidono con la posizione

reale dei nodi.

Per il primo problema, quello dei cicli infiniti, la soluzione è stata quella di inserire una soglia oltre la quale il risultato ottenuto può essere considerato accettabile, questa soglia è stata impostata pari alla distanza euclidea calcolata tra i due punti ottenuti per mezzo di due iterazioni successive, se questa distanza risulta minore di $10^{-4}m$ si può interrompere la procedura e ritenere il nodo localizzato.

Per il secondo problema, identificato come un problema di minimi locali, la soluzione è stata un pò più complicata. In un primo momento si era pensato di poter uscire da questa situazione utilizzando algoritmi come il *Simulated Annealing* [12], i quali però non portavano ai risultati sperati, in quanto, basati sulla conoscenza a priori dell'energia, nel nostro caso dello spostamento, che dobbiamo fornire ad una particella, nel nostro caso un nodo, per uscire da una buca di potenziale, nel nostro caso un minimo locale. Infatti questa quantità in un problema di localizzazione non può essere nota a priori; provando ad applicare alcuni spostamenti casuali ciò che abbiamo ottenuto sono stati dei fallimenti, in quanto se lo spostamento prodotto fosse stato troppo piccolo il nodo non riusciva a uscire dal minimo locale, mentre se lo spostamento fosse stato troppo grande il nodo rischiava di finire in un ulteriore minimo locale.

La soluzione trovata è stata quindi quella di ricorrere a Grafi Globalmente Rigidi, come visto nel Paragrafo 3.2.2.

Una volta conclusa la localizzazione di un Unknown, quest'ultimo si trasforma

in un Anchor relativo, vedi Paragrafo 2.3.5, per aiutare gli altri Unknowns della sottorete a ottenere delle coordinate, vedi Figura 3.10.

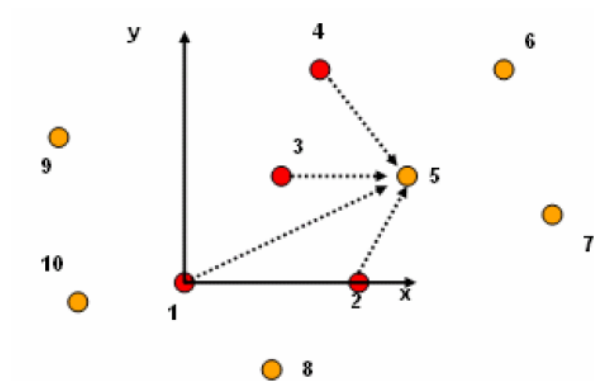


Figura 3.10: Completamento della Localizzazione dei Nodi della Sottorete

3.4 Creazione delle Isole

Fino a questo momento abbiamo parlato del Pangaea Algorithm riferendoci ad un'unica sottorete, composta per semplicità da tre Anchors relativi e un solo Unknown; in realtà questo ragionamento va esteso a tutti gli Unknowns della sottorete e della rete in modo da garantire una posizione a tutti i nodi che fanno parte della WSN.

In Figura 3.11, anche se non perfettamente in accordo con i criteri descritti nei paragrafi precedenti, è rappresentata la WSN divisa in tre sottoreti, rappresentate da colori diversi, a ognuna delle quali è stato dato il nome di *Isla*. Come già accennato nel Paragrafo 2.3.5, la trasformazione di Unknowns in Anchors relativi causa una propagazione dell'errore ottenuto as-

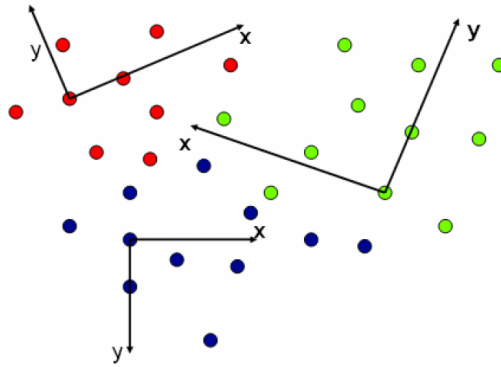


Figura 3.11: WSN e Relative Sottoreti

segnando all'Unknown delle coordinate affette da un'incertezza; avendo considerato esclusivamente delle Isole invece che l'intera rete, abbiamo limitato questa propagazione all'interno della sola Isola. Nonostante questo accorgimento, all'interno dell'Isola, si verificano comunque fenomeni di propagazione dell'errore, per ridurli abbiamo pensato di lavorare con dei sistemi di riferimento mobili. Una volta localizzati, con una certa incertezza, i nodi di una Isola, l'Algoritmo predispone l'Isola per la realizzazione di un nuovo sistema di riferimento con una terna di nodi diversi da quella precedente. I nodi dell'Isola calcolano nuovamente la loro posizione nel nuovo sistema di coordinate. Il numero di riferimenti realizzabili in questo modo è pari al numero di combinazioni semplici che N nodi possono realizzare formando gruppi di 3, vedi equazione 3.3.

In Isole formate da pochi nodi non ci sono molte difficoltà nel calcolare tutti i diversi riferimenti ma quando si ha a che fare con reti molto dense questi calcoli diventano molto onerosi, per questo motivo si è deciso di fissare una

soglia per un massimo di 10 riferimenti per ogni Isola.

$$\binom{N}{3} = \frac{N!}{3!(N-3)!} = \frac{N(N-1)(N-2)}{6} \quad (3.3)$$

Realizzati i 10 sistemi di coordinate l'Algoritmo sovrappone tutti i sistemi di riferimento per mezzo di operazioni di Rotazione, Traslazione e Riflessione, come vedremo più avanti. In questo modo i nodi con lo stesso identificativo sono sovrapposti l'uno sull'altro e eseguendo una media sulle coordinate dei nodi in ciascuna di queste sovrapposizioni, quello che si ottiene è un abbattimento dell'errore sull'Isola.

Un'ultima osservazione da fare sui nodi che compongono le Isole che si sono andate a creare dalla divisione della WSN è che esistono alcuni nodi che si trovano in comune a diverse Isole, quindi hanno più coppie di coordinate, ognuna per una diversa Isola. Sfruttando questi particolari nodi giungiamo alla fine del nostro algoritmo di localizzazione, l'unificazione dei diversi sistemi di riferimento.

3.5 Nascita della Pangaea

Il titolo così colorito di questo Paragrafo ci serve per riassumere in un'unica parola il concetto di localizzazione su di un sistema di riferimento globale. Fino a questo punto quel che abbiamo fatto è stato realizzare dei sistemi di riferimento indipendenti gli uni dagli altri, il che comporta il passaggio da

un insieme di coordinate ad un altro per un nodo che si vuole spostare da un Isola in un'altra, oppure una mancanza di localizzazione per tutti quei nodi che si trovano vicini a più di tre nodi ma che non appartengono alla stessa Isola. In termini prestazionali una tale mancanza si traduce in una rete non del tutto localizzabile.

Per unire le diverse Isole in un unico grande *continente*, per questo *Pangea*, abbiamo pensato di usare quei nodi in comune alle varie Isole, di cui abbiamo accennato nel Paragrafo 3.5. Unire differenti sistemi di riferimento comporta fondamentalmente tre operazioni:

1. **Traslazione**
2. **Rotazione**
3. **Riflessione**

Affinchè due sistemi di riferimento si possano fondere è necessario che essi abbiano almeno tre nodi in comune, vedi Figura 3.12.

- le due origini, i e k
- un altro punto j

Verificato che i due sistemi abbiano soddisfatto queste condizioni, bisogna conoscere l'orientazione degli assi di ciascun sistema, per valutare se sia necessaria solo una rotazione oppure anche una riflessione di uno dei due sistemi. Per verificare questo abbiamo implementato un algoritmo per calcolare

il valore degli angoli α e β riportati in Figura 3.12.

Di seguito riportiamo il metacodice implementato sul simulatore:

if($(\alpha_j - \alpha_k < \pi)$ and $(\beta_j - \beta_i > \pi)$)

or $(\alpha_j - \alpha_k > \pi)$ and $(\beta_j - \beta_i < \pi)$)

\Rightarrow non è necessaria una riflessione

\Rightarrow l'angolo di correzione è $(\beta_i - \alpha_k + \pi)$

else

if($(\alpha_j - \alpha_k < \pi)$ and $(\beta_j - \beta_i < \pi)$)

or $(\alpha_j - \alpha_k > \pi)$ and $(\beta_j - \beta_i > \pi)$)

\Rightarrow è necessaria una riflessione

\Rightarrow l'angolo di correzione è $(\beta_i + \alpha_k)$

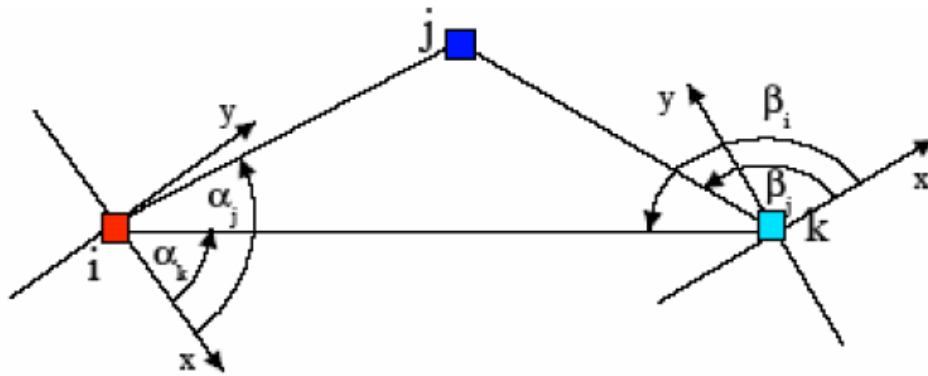


Figura 3.12: Condizione per la Sovrapposizione di due Sistemi di Riferimento

Una volta determinato l'angolo di correzione necessario alla sovrapposizione dei due sistemi, l'Isola con il minor numero di nodi eseguirà le operazioni illustrate in Figura 3.13.

Ora che i due sistemi hanno non solo gli assi equiversi ma anche corrispon-

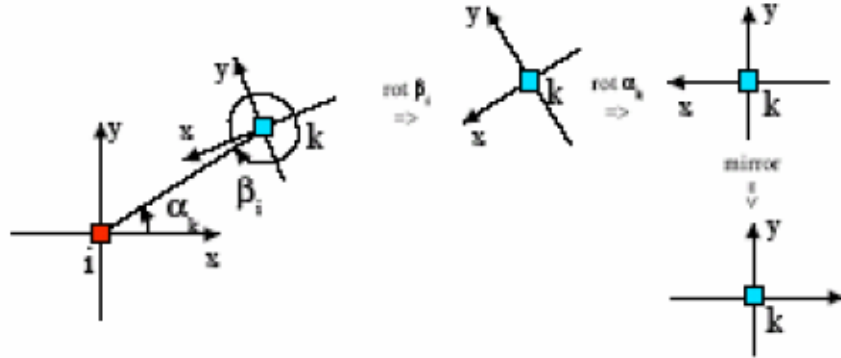


Figura 3.13: Rotazione e Riflessione di un Sistema di Riferimento

enti, applicando una traslazione all'Isola meno densa si è realizzata l'unione dei due diversi sistemi di riferimento.

Per realizzare una tale unione, anche quando la densità dei nodi è bassa oppure quando le origini dei due diversi sistemi di riferimento non sono in visibilità, abbiamo dovuto rilassare alcune condizioni, come lo spostamento dell'origine di un'Isola, non più coincidente con il nodo maggiormente connesso ma con quello più vicino ad un'altra Isola, per consentire così la nascita della Pangea.

Inoltre nella realizzazione finale della Pangea abbiamo dovuto abbandonare le condizioni di rigidità globale che ci hanno accompagnato nella formazione di un'Isola. Questa è stata una scelta dettata dal buon senso, in quanto è impensabile riuscire ad ottenere una rete in cui le connessioni tra tutti i nodi permettano di realizzare un Grafo Globalmente Rigido, perciò una volta formate le Isole le condizioni di rigidità globale vengono a cadere e si cerca unicamente di trovare i nodi in comune tra le diverse Isole.

Realizzata la Pangea, l'ultimo passo è quello di localizzare quei nodi di cui abbiamo accennato ad inizio Paragrafo, quei nodi che si trovano cioè vicino ad altri tre nodi appartenenti però a Isole differenti. Avendo unificato tutte le Isole questa situazione non ha più motivo di esistere e tutti i nodi in questa condizione possono essere finalmente localizzati.

3.6 Simulazioni

Nei Paragrafi precedenti abbiamo descritto tutte le fasi che hanno coinvolto lo sviluppo del nostro Algoritmo, dalla determinazione dei nodi formanti il Grafo Globalmente Rigido, che è poi diventato la nostra Isola, alla tecnica del Bounding Box per stimare la posizione iniziale di ogni nodo, dall'ottimizzazione per ridurre l'errore quadratico medio sulla distanza stimata, alla riduzione della propagazione dell'errore all'interno di ciascuna Isola fino ad arrivare alla creazione della Pangea, il sistema di riferimento globale della nostra WSN.

In questo capitolo riportiamo infine i risultati delle simulazioni svolte per questo lavoro.

L'ambiente utilizzato per le simulazioni è un ambiente Indoor, dalle dimensioni variabili, dai $15m^2$ ai $900m^2$ mentre i nodi hanno un raggio di copertura pari a $7m$ con un errore sulla stima della distanza pari al 5% della distanza euclidea esistente tra i nodi coinvolti. In particolare si sono voluti evidenziare gli errori commessi:

- dalla propagazione dell'errore nell'intera WSN
- dalla propagazione dell'errore all'interno di un'isola
- dall'utilizzo di Grafi Globalmente Rigidi con differenti dimensioni

3.6.1 Propagazione dell'Errore nella WSN

In questi paragrafi riportiamo esclusivamente i risultati inerenti una rete formata da 130 nodi disposti casualmente in un'area di $900m^2$, confrontando i risultati ottenuti con l'algoritmo da noi sviluppato e quello della Iterative Multilateration, visto nel Paragrafo 2.3.5, sul quale esso si basa.

In Figura 3.14 è riportato l'andamento dell'errore quadratico medio sia per l'Algoritmo sviluppato che per quello della Iterative Multilateration.

Si può notare come per entrambi gli algoritmi rappresentati si abbia un andamento decrescente dell'errore, fino alla stabilizzazione verso un valore fisso, ciò ad indicare come un aumento della densità degli elementi di una rete contribuisca notevolmente nell'accuratezza dei suoi risultati. La differenza lampante tra i due grafici è data dal gap che separa le due curve, la spiegazione di questa differenza è da trovare nella soluzione impiegata di restringere il problema della localizzazione ad Isole piuttosto che all'intera rete, così facendo siamo riusciti a limitare la propagazione dell'errore esclusivamente all'interno dell'Isola.

In Figura 3.15, è rappresentato il confronto delle percentuali di nodi localizzati, qui l'andamento dell'Algoritmo sviluppato si mostra un pò meno

performante di quello sviluppato nella Iterative Multilateration in quando le condizioni di rigidità globale imposte dal Pangaea Algorithm rallentano, soprattutto per le basse densità, il processo di localizzazione.

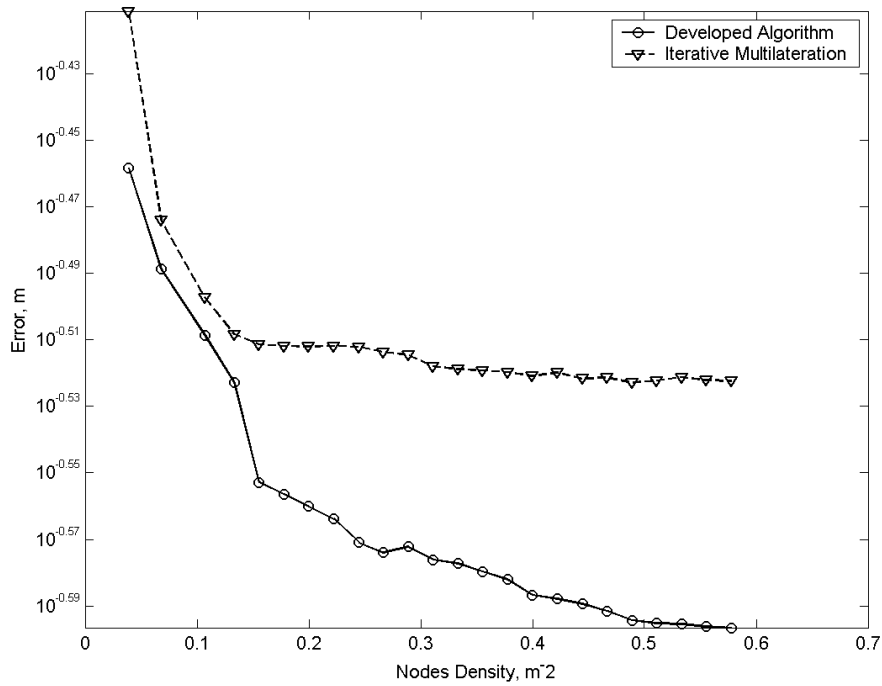


Figura 3.14: Andamento dell'Errore nella WSN

3.6.2 Propagazione dell'Errore all'interno di un Isola

Avendo diviso la rete in tante Isole è sembrato opportuno dedicare una piccola analisi anche al comportamento dell'errore all'interno di una singola Isola, in particolare in Figura 3.16 è riportato l'andamento dell'errore quadratico medio per i nodi di una particolare Isola.

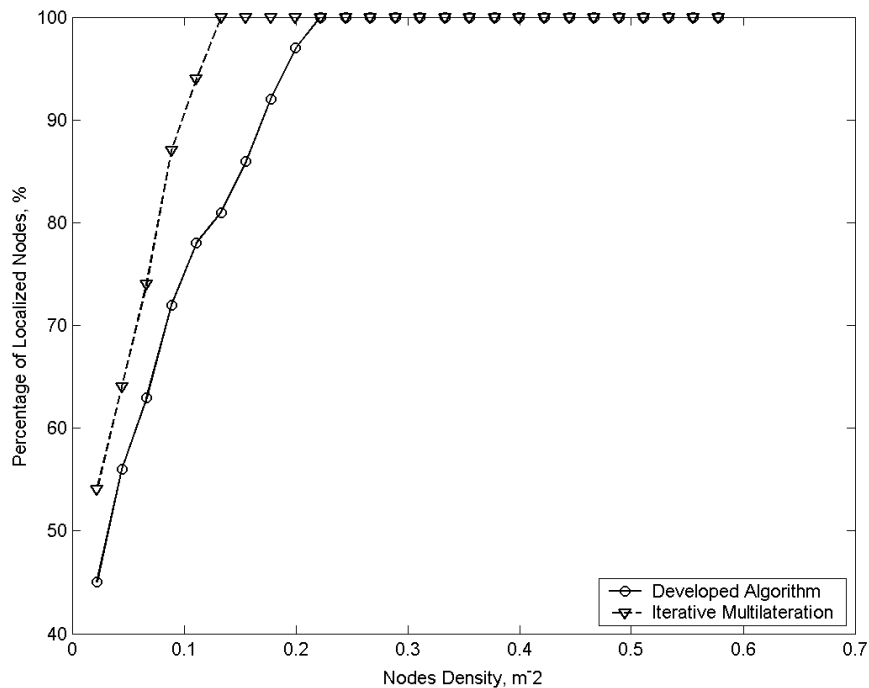


Figura 3.15: Percentuale di Nodi Localizzati nella WSN

Nonostante l'utilizzo dei sistemi di riferimento mobili, all'interno di ogni singola Isola continua a persistere un'incertezza sulla posizione dei nodi dovuta alla propagazione dell'errore di localizzazione. Questo inconveniente si rende più evidente al momento della formazione della Pangea, andando a sommare l'indeterminazione di ciascun Isola, nel processo di localizzazione di tutti quei nodi che possono essere localizzati solo dopo la sua formazione.

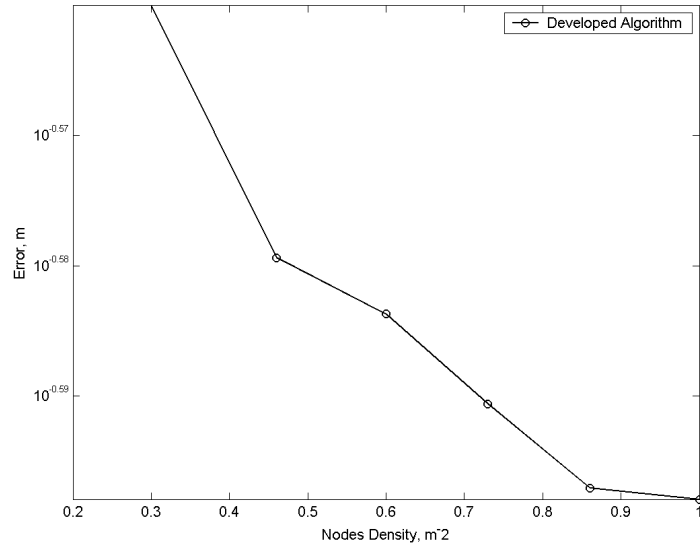


Figura 3.16: Andamento dell'Errore all'Interno di un'Isola

3.6.3 Isole di Differenti Dimensioni

In questo ultimo paragrafo si è analizzato l'andamento dell'errore quadratico medio del Pangaea Algorithm confrontandolo, ancora una volta, con l'andamento dell'errore quadratico medio della Iterative Multilateration, questa volta però sull'asse delle ascisse abbiamo riportato non la densità della rete, bensì la dimensione delle Isole. In altri termini abbiamo tracciato un grafico facendo variare il numero di nodi costituenti le Isole, da un minimo di tre ad un massimo dell'intera rete.

L'andamento della curva dell'Algoritmo sviluppato indica la tendenza che esso ha nel raggiungere risultati simili a quelli ottenibili con la Iterative Multilateration quando cioè le dimensioni delle Isole diventano così grandi

da essere paragonabili a quelle dell'intera rete. Mentre per dimensioni molto piccole delle Isole, in particolare per Isole formate da 5 elementi si raggiunge un minimo dell'errore quadratico medio.

Il buon senso suggerisce che questo minimo debba essere uguale a 3 e non a 5 ma questo valore è obbligato dalle condizioni di rigidità globale imposte per la realizzazione delle Isole stesse.

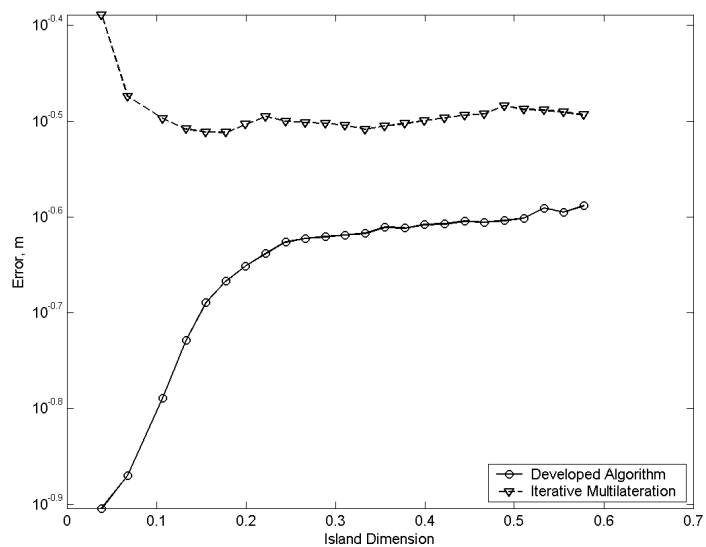


Figura 3.17: Andamento dell'Errore al Variare delle Dimensioni dell'Isola

Capitolo 4

Digital Bounding Box (DBB)

Nel Capitolo 3 abbiamo visto come, partendo dalla stima iniziale di un punto e proseguendo con una riduzione dell'errore quadratico medio sul valore della distanza stimata, si giunge alla determinazione di coordinate molto accurate. L'Algoritmo esposto nel precedente Capitolo è molto efficace anche su reti molto sparse, come visto dai risultati delle simulazioni realizzate ma come tutti gli algoritmi di ottimizzazione [9] [10] [11] non può evitare di compiere un errore comune a tutte le metodologie di localizzazione: la linearizzazione di un problema non lineare.

In questo capitolo spiegheremo come poter affrontare la localizzazione dei nodi di una WSN senza ridurre il problema ad una sua semplificazione.

4.1 Linearizzazione

La localizzazione è un problema di natura non lineare [22], per stimare con maggiore precisione la posizione di un nodo all'interno di una rete nel Capi-

tolo 3 risolvevamo ciclicamente l'equazione 4.1:

$$f_{U,i} = r_{U,i} - \sqrt{(x_i - \hat{x}_U)^2 - (y_i - \hat{y}_U)^2} \quad (4.1)$$

Risolvere questa equazione, o meglio il sistema di equazioni non lineari indicato dal sistema 4.2, è un lavoro molto impegnativo sia in termini di tempo sia in termini di calcolo.

$$F(x_U, y_U) = \min \sum_i f_{U,i} \quad (4.2)$$

Quindi quello che è stato fatto è stato ricorrere ad una sua linearizzazione utilizzando lo sviluppo in serie di Taylor 4.3.

$$f_{U,i}^2 = r_{U,i} - \Delta x_i \delta_x - \Delta y_i \delta_y + O(\Delta^2) \quad (4.3)$$

dove:

$$\Delta x_i = \frac{x_i - \hat{x}_U}{r_i}, \Delta y_i = \frac{y_i - \hat{y}_U}{r_i} \quad (4.4)$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_U)^2 + (y_i - \hat{y}_U)^2}$$

Questa linearizzazione aggiunge, implicitamente, un'indeterminazione in un problema che di indeterminazione ne ha fin troppa.

4.2 Obiettivo del DBB

L'Algoritmo descritto nel Capitolo 3, basato sui principi della Iterative Multilateration, ha il suo punto di forza in un processo di ottimizzazione che tende ad abbattere la propagazione dell'errore all'interno della rete.

L'approccio che abbiamo utilizzato in questa seconda parte del nostro lavoro è stato quello di trovare una soluzione a monte del processo di ottimizzazione, anche perchè proprio all'interno di esso ha luogo quel fenomeno di linearizzazione descritto nel Paragrafo 4.2. In altre parole quello che abbiamo fatto è stato sviluppare un algoritmo per una stima iniziale della posizione del nodo. Questa scelta è stata dettata dalla presenza in letteratura di algoritmi di localizzazione molto robusti, primo fra tutti la Trilaterazione Iperbolica [27], i quali manifestano i loro punti deboli quando la stima iniziale della posizione del nodo è poco accurata.

Sotto queste premesse abbiamo modificato la procedura di Bounding Box per fornire, in pasto ad un generico algoritmo di localizzazione, una stima iniziale il più vicino possibile alle coordinate del nodo.

4.3 Scelte sulla realizzazione del DBB

Nel Paragrafo 3.4 abbiamo già spiegato come funziona il Bounding Box: il centro dell'area di intersezione dei quadrati, aventi per centro uno degli Anchors all'interno del raggio di copertura dell'Unknown, viene assunto come posizione iniziale dell'Unknown stesso.

La realtà però è ben diversa, è infatti assai scarsa la probabilità che la posizione reale dell'Unknown sia prossima al centro di questa area, infatti la scelta di questo punto come stima iniziale è di puro comodo, in quanto è banale calcolare il centro di questa zona.

In un primo momento si era pensato di dividere l'area ottenuta dal Bounding Box in altre quattro sottoaree e confrontare la distanza, misurata dallo Unknown rispetto agli Anchors, con quella esistente tra ciascuno dei punti ottenuti con la divisione dell'area del Bounding Box, e gli Anchors. Sebbene di immediata realizzazione erano ben poche le volte in cui questo metodo giungeva a convergenza, a causa degli ∞^2 minimi locali in cui tale metodologia portava, cioè tutti i possibili punti che si trovavano nell'area avente come centro il nuovo punto di riferimento. Ovviamente questo nella migliore delle ipotesi, infatti si sono verificate situazioni in cui più punti potevano essere assunti come posizione iniziale, vedi Figura 4.1.

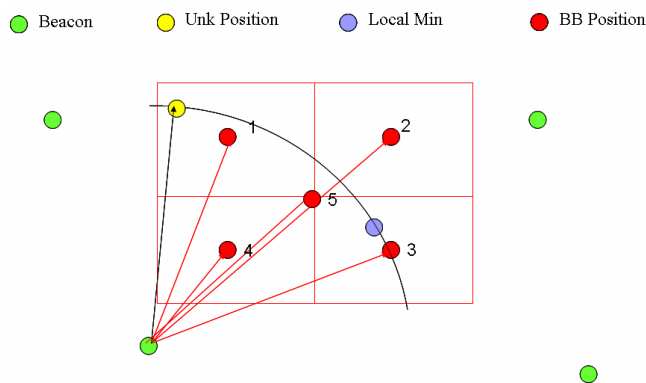


Figura 4.1: Sottoaree del Bounding Box

La soluzione a questo problema è stata trovata non all'interno dell'area del

Bounding Box, bensì sul suo perimetro. Il ragionamento seguito è di immediata comprensione: tracciando attorno a ciascun Anchor un quadrato di lato pari al doppio della distanza esistente tra Anchor e Unknown abbiamo implicitamente assunto che il nodo occupi una delle infinite posizioni sul perimetro di questo quadrato; tracciando quindi l'intersezione dei diversi quadrati di lato pari al doppio della distanza Anchors-Unknown, andiamo a restringere l'area del parallelogramma che contiene la posizione del nodo ma la posizione del punto da calcolare resta sempre vincolata sul perimetro di questa area; quindi quel che abbiamo pensato è stato di campionare il perimetro del Bounding Box su 8 punti, aggiungendo anche un ulteriore punto, il centro del vecchio Bounding Box, per tutti quei casi in cui l'area delimitata dalle intersezioni è talmente piccola che il suo centro può essere assunto come il più probabile dei nove punti, vedi Figura 4.2.

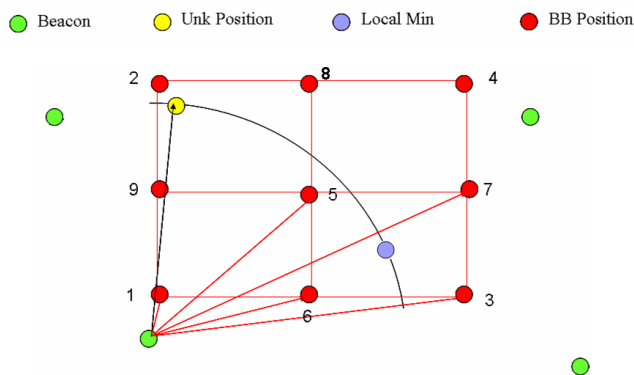


Figura 4.2: Campionamento del Bounding Box

4.4 Implementazione del DBB

La procedura ha inizio seguendo lo schema generale del Bounding Box, una volta individuato il perimetro che delinea questa regione vengono selezionati nove punti, disposti come in Figura 4.2. Per ognuno di questi punti viene calcolata la distanza euclidea che li divide dagli Anchors nel raggio di copertura dell'Unknown. Queste distanze vengono ordinate, in ordine crescente, all'interno di una matrice, che abbiamo chiamato D (Distance), dove il numero delle colonne è pari al numero degli Anchors coinvolti mentre il numero delle righe è pari al numero dei punti campionati. Nella matrice D , vedi 4.5, per semplicità non abbiamo riportato il valore della distanza ma l'identificativo del punto campionato che si trova ad una certa distanza dall'Anchor i -simo.

$$D = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 8 & 4 \\ 1 & 7 & 7 & 2 \\ 8 & 9 & 1 & 3 \\ 7 & 8 & 3 & 9 \\ 9 & 2 & 9 & 6 \\ 2 & 4 & 2 & 1 \\ 4 & 1 & 4 & 7 \\ 6 & 3 & 6 & 8 \\ 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 8 & 4 \\ 1 & 7 & 7 & 2 \\ 8 & 9 & 1 & 3 \\ 7 & 8 & 3 & 9 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$F = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 4 & 7 \\ 6 & 3 & 6 & 8 \\ 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Dalla matrice D ricaviamo altre due matrici: la prima, indicata con la lettera C (Closest), vedi 4.6, è formata dalle prime quattro righe della matrice D , indica i minimi locali in cui può cadere la nostra soluzione. La seconda matrice, indicata con la lettera F (Farest), vedi 4.7, è formata dalle ultime tre righe della matrice D , indica i punti campionati sul perimetro del Bounding Box più distanti dall'Unknown da localizzare.

Sostituendo con uno zero tutti gli elementi di C che compaiono anche in F , otteniamo una quarta matrice O (Output), vedi 4.8, dove i valori diversi da zero sono gli identificativi dei punti campionati più vicini all'Unknown da localizzare.

Il punto campionato che viene scelto è il primo identificativo non nullo che

compare nella matrice O ; nel caso in cui su di una stessa riga della matrice O compaiono più identificativi diversi tra loro, il punto finale viene scelto calcolando una media pesata delle coordinate dei punti campionati.

I risultati di quest'approccio sono visibili in Figura 4.3, dove sulle ordinate è stato riportato l'errore, inteso come distanza tra la posizione reale dell'Unknown e la posizione stimata, con il pallino rosso, dal Bounding Box mentre, con la stellina blu, dal DBB. Sull'asse delle ascisse sono stati invece riportati gli identificativi dei nodi di una rete formata da 100 elementi.

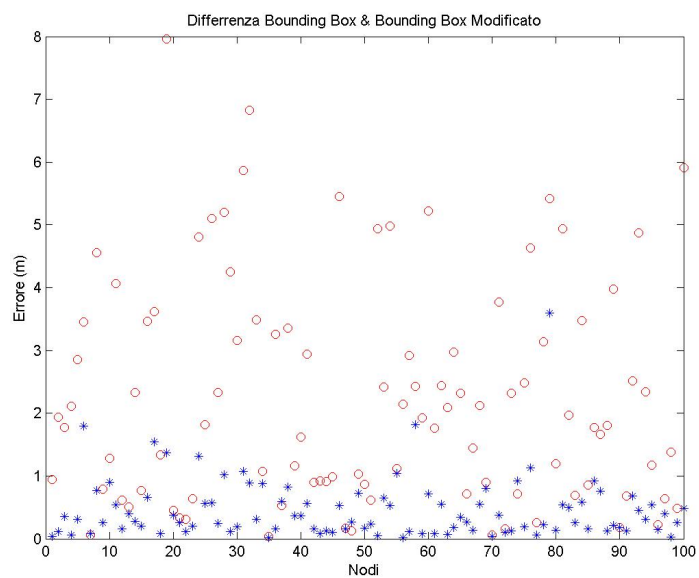


Figura 4.3: Confronto tra DBB e Bounding Box

Come ultima analisi abbiamo provato a trasformare questa procedura di stima in una procedura di ottimizzazione iterando il DBB. Come era già evidente in Figura 4.3 il DBB produce una stima iniziale con un errore molto

minore di quello prodotto dalla stima eseguita con il Bounding Box ma in alcuni casi, e.g. il punto 79 in Figura 4.3, non molto prossima alla posizione reale dell'Unknown.

Per iterare la procedura, una volta individuato il punto campionato più vicino all'Unknown, tracciamo un quadrato centrato nel punto ottenuto e di lato pari alla metà del lato maggiore del Bounding Box precedente. In questo modo, per mezzo di *esplosioni successive* del punto campionato, giungiamo a valori molto prossimi a quelli delle coordinate reali degli Unknowns, come indicato in Figura 4.4, con il vantaggio di non aver introdotto alcun errore dovuto alla linearizzazione di un problema non lineare.

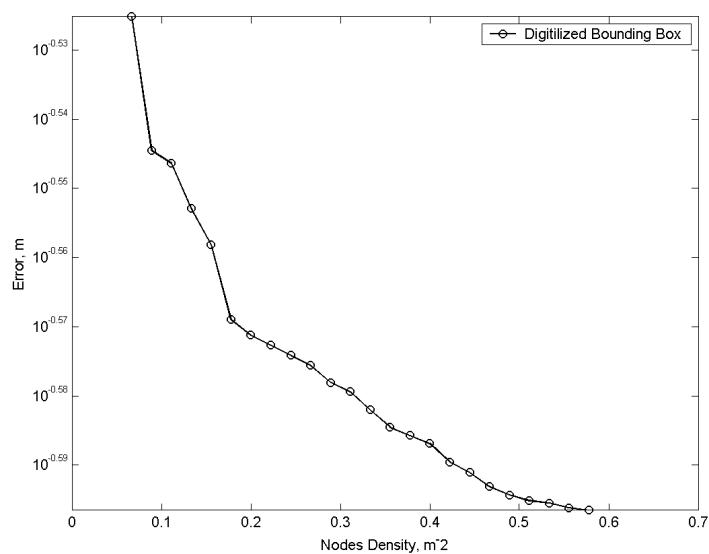


Figura 4.4: DBB come Ottimizzazione: Andamento dell'Errore Quadratico Medio

Capitolo 5

UWB

Tutti gli scenari descritti nei precedenti Capitoli sono stati realizzati basandosi sui dati provenienti da sensori dotati di tecnologia ad ultrasuoni [28], in questo ultimo Capitolo vogliamo invece applicare quanto detto precedentemente ad una tecnologia radio emergente per la quale le caratteristiche di precisione trovate negli ultrasuoni sono state ottenute per mezzo di onde radio ad alta frequenza e ampia banda, l'UWB (Ultra Wide Band). Di seguito daremo un accenno su cosa sono e come funzionano gli UWB, concentrandoci infine sull'implementazione di una tecnica di multilaterazione, evidenziandone l'accuratezza dei risultati e la bassa densità dei nodi componenti la rete.

Resta inteso che obiettivo di questo Capitolo è quello di descrivere i risultati raggiunti con le simulazioni di una WSN i cui dispositivi utilizzano come tecnologia radio gli UWB, quindi si rimanda alla molto più esauriente letteratura per ulteriori chiarimenti sulla tecnologia in se.

5.1 Tecnologia UWB

Nata in ambito militare per applicazioni radar negli anni '60 [30] ed utilizzata per comunicazioni radio, di tipo sperimentale, solo negli ultimi anni, soprattutto dopo che la U.S. Federal Communications Commission (FCC), ha concesso l'utilizzo "unlicensed" dell' UWB per le comunicazioni [31]; per avvalersi di tale tecnologia occorre generare, trasmettere e ricevere impulsi estremamente brevi, nell'ambito delle radio frequenze (RF), tipicamente di durata compresa tra i nanosecondi e i picosecondi. In difformità dalle convenzionali tecnologie "Narrow-Band", le quali trasmettono informazioni su segnale continuo modulato, l'UWB trasmette informazioni attraverso impulsi di breve durata, occupando una banda di gran lunga più grande della banda di un tradizionale sistema. Utilizzare tecnologie "Wide-Band", piuttosto che tecnologie "Narrow-Band", conduce a significativi vantaggi:

1. I ricetrasmittenti constano di un'architettura quasi del tutto digitale, ideale per la miniaturizzazione nei chipset e per ottenere una diversità in frequenza con minime modifiche hardware
2. I trasmettitori UWB necessitano di una bassa potenza di trasmissione, a vantaggio di un minor consumo energetico
3. La larghissima ampiezza di banda rende la rivelazione del segnale alquanto difficile per ricevitori non designati. Ciò grazie alla bassissima potenza dei segnali "UWB" ed alla radicale differenza dei convenzionali ricevitori a banda stretta

4. Il bit-rate ottenuto, di qualche centinaia di Mbps, è significativamente maggiore rispetto ai sistemi a largo spettro tradizionali

Inoltre la tecnologia UWB utilizza un sistema di temporizzazione estremamente preciso per emettere impulsi elettromagnetici ad intervalli di tempo "pseudocasuali". In tal modo il segnale UWB appare con uno spettro molto simile al rumore rendendo il sistema molto sicuro e difficile da intercettare. Tali peculiarità vengono sfruttate sia nell'ambito delle comunicazioni sia all'interno delle WSN per la localizzazione, rispettivamente perchè l'UWB, come è stato già introdotto, è una tecnologia wireless rivoluzionaria che consente trasmissioni ad alta velocità e bassa potenza utilizzando una banda estremamente larga e perchè garantisce un'accuratezza centimetrica nella stima della posizione di un sensore.

5.2 Specifiche Tecniche

L'UWB utilizza brevi impulsi in modo tale da espandere l'energia dello spettro su un'ampia banda. Gli impulsi sono irradiati da specifiche antenne a banda larga e trasmessi ad alta velocità: dalle decine alle centinaia di mega-impulsi al secondo. I trasmettitori UWB emettono piccole onde con un monociclo molto stretto dell'ordine dei ns ad intervalli controllati [33]. L'intervallo da impulso ad impulso è variato tenendo in considerazione sia il segnale d'informazione che il codice di canale. Gli impulsi non sono necessariamente spazati nel tempo in maniera uniforme, ma piuttosto potrebbero

essere spazati ad intervalli di tempo casuali o pseudo-casuali attraverso il Time Hopping, un procedimento che produce un segnale simile a rumore sia nel dominio del tempo che della frequenza. Un singolo bit di informazione è generalmente trasmesso con più monocicli. Il ricevitore somma coerentemente il corretto numero di impulsi per recuperare l'informazione trasmessa. L'elemento base di un sistema UWB è l'onda a monociclo, ad esempio si può utilizzare un monociclo Gaussuiano o sue derivate. In Figura 5.1 è mostrato un monociclo. Tale monociclo ha una durata di 0.5 nanosecondi. La Figura 5.2 mostra invece il monociclo nel dominio della frequenza. Il centro frequenza è 2 GHz e la banda a $3dB$ è approssimativamente di $2GHz$ (nella pratica non si ha mai un perfetto monociclo e questo comporta una banda leggermente inferiore). Per trasmettere informazione, infatti, è necessario

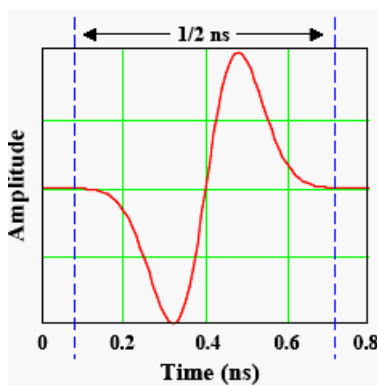


Figura 5.1: Monociclo nel Dominio del Tempo

modulare il treno d'impulsi a monociclo. Le principali tecniche di modulazione sono la PPM (Pulse Position Modulation) e la PAM (Pulse Amplitude Modulation). L'approccio più comune prevede l'utilizzo della PPM.

Come illustrato in Figura 5.3 e in Figura 5.4, attraverso questa modulazione

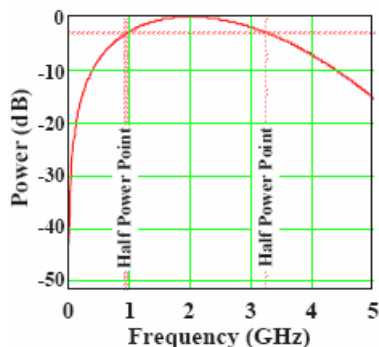


Figura 5.2: Densità Spettrale di un Monociclo

viene modificato il tempo di trasmissione di un monociclo intorno alla sua posizione nominale. Per esempio, in un sistema a 10 milioni di impulsi al secondo (Mpps), i monocicli dovrebbero essere trasmessi nominalmente ogni 100 nanosecondi (rappresentato in Figura 5.3 come il periodo di tempo PRI, Pulse Repetition Interval. In tale sistema, si può rappresentare un bit pari a 0 trasmettendo l'impulso 100 picosecondi prima, un bit pari ad 1 trasmettendo l'impulso 100 picosecondi dopo, la sua posizione nominale.

In genere, i sistemi UWB effettuano una modulazione o attraverso la variazione del tempo di trasmissione dell'impulso collocando ad esempio, l'impulso un quarto di ciclo (125 ps per un impulso di 500 ps) prima o dopo (PPM), o in base alla polarità dell'impulso attraverso la Pulse Amplitude Modulation. Per le comunicazioni vengono utilizzate lunghe sequenze di monocicli. La modulazione e la canalizzazione dei dati sono determinate dalla variazione degli intervalli di tempo tra impulso e impulso. Alternativamente i dati

potrebbero essere codificati dalla polarità degli impulsi. Quando si trasmettono tali sequenze, l'obiettivo è quello di assicurare che la qualità e l'integrità spettrale delle trasmissioni rimanga intatta. Se gli impulsi venissero mandati ad intervalli regolari, lo spettro risultante dovrebbe contenere delle indesiderate "comb lines" (spikes d'energia) separate dal rate dell'impulso di ripetizione; così la bassa potenza è distribuita tra le comb lines. Questo

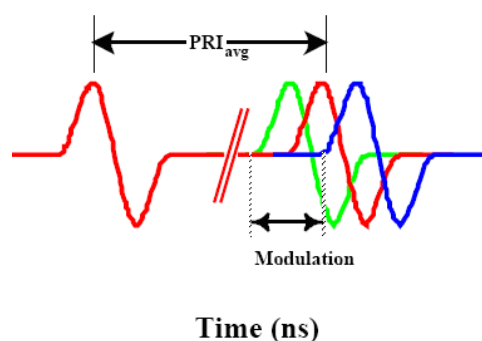


Figura 5.3: Pulse Position Modulation nel Tempo

treno di impulsi non porta informazione e, a causa della regolarità degli spike d'energia, potrebbe interferire con i comuni sistemi radio posti a breve distanza dal trasmettitore d'impulsi. Invece, al fine di appiattire lo spettro e renderlo più simile al rumore e per stabilire la canalizzazione, gli impulsi a monociclo vengono impiegati utilizzando una sequenza di rumore (sequenza PN o pseudo noise sequence). Tale tecnica viene detta Time Hopping. La Figura 5.5 mostra una sequenza di onde, o "treno d'impulsi", codificato nel tempo con una sequenza PN e la Figura 5.6 illustra, nel dominio della frequenza, le caratteristiche risultanti, della sequenza di impulsi codificata nel

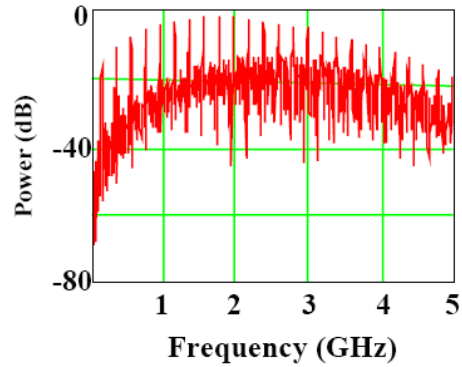


Figura 5.4: Pulse Position Modulation in Frequenza

tempo, simili a rumore. In un sistema ad accesso multiplo, ciascun utente

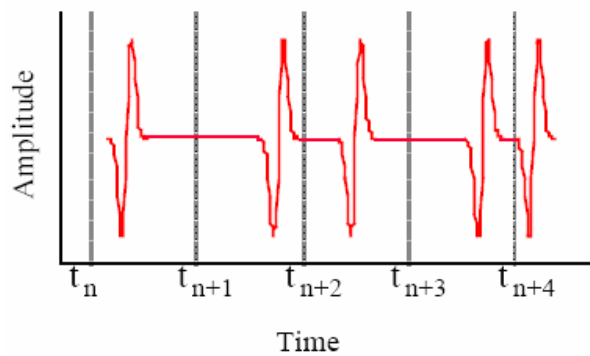


Figura 5.5: Treno di Impulsi Pseudo Noise

deve avere un'unica sequenza di codici PN. Solo un ricevitore che opera con la stessa sequenza di codici PN può decodificare la trasmissione. Senza la conoscenza di una ben precisa sequenza di codici, il segnale è virtualmente irrilevabile, anche se si è in prossimità del trasmettitore. Questo rende molto difficile l'intercettazione di tale segnale. Per concludere, si può riassumere che con la Pulse Position Modulation, trasmettendo l'informazione attraverso

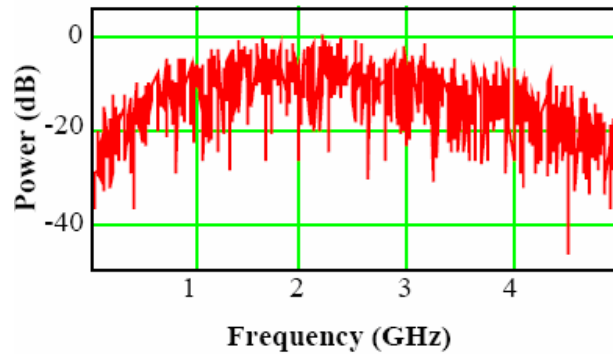


Figura 5.6: Sequenza di Impuulsi nel Dominio della Frequenza

il Time Hopping, si ha il duplice vantaggio di consentire un accesso multiplo e di rendere lo spettro trasmesso molto simile a rumore di fondo.

In un eventuale ricevitore UWB il blocco "baseband signal processing" ha il compito di estrarre la modulazione e controllare l'acquisizione e l'inseguimento del segnale. La modulazione è effettuata tramite emissione di un impulso in anticipo o in ritardo rispetto ad una posizione nominale, nel caso della modulazione nel tempo, o tramite un impulso positivo o negativo, nel caso della modulazione in polarità. Per la canalizzazione sono usati differenti codici PN.

Il correlatore invece, moltiplica il segnale ricevuto con una forma d'onda sagomata, replica del segnale impiegato in trasmissione. Con la forma d'onda opportunamente sagomata, l'uscita del correlatore è una misura delle relative posizioni temporali del monociclo ricevuto e della forma d'onda sagomata. Quando un monociclo è sopraffatto dal rumore degli altri segnali, è impossibile rilevare la ricezione di un singolo impulso. Comunque, mettendo insieme

numerosi correlatori, è possibile ricevere i segnali trasmessi. Tale processo di "pulse integration", consente al nostro ricevitore di acquisire, inseguire e demodulare trasmissioni UWB che sono significativamente al di sotto del rumore di fondo.

5.3 Prestazioni dell'UWB nella Localizzazione

L'ambiente che si è scelto per realizzare le simulazioni di una WSN attrezzata con UWB ha dimensioni 1m x 1m e gli Anchors, con raggio di 60cm, si trovano agli angoli della stanza, nelle posizioni (0,0), (0,1), (1,0), (1,1) come indicato in Figura 5.7. Si è ipotizzato un σ_d , ossia la percentuale di errore sulla distanza, minore rispetto a quello che si ha impiegando una normale tecnologia Wideband DS-SS (in genere pari al 20%) poichè la deviazione standard per il tempo di arrivo, indicata con σ_T , è 1.9 ns [32] (quindi $c\sigma_T = 0.57m$ con c , velocità della luce, pari a $3 \cdot 10^8(m/s)$), mentre per una normale tecnologia Wideband DS-SS $\sigma_T = 6.1ns$ (quindi $c\sigma_T = 1.83m$).

Nelle simulazioni realizzate, il σ_d è stato fatto variare da un valore massimo di 0.2 ad un valore minimo di 0.06, supposto ottenibile mediante l'impiego appunto della tecnologia UWB.

Si è potuto così dimostrare come il valore dell'errore commesso sulla stima della posizione diminuisca al diminuire della deviazione standard impiegata, si è cioè dimostrato come la tecnologia UWB sia la più performante per una localizzazione indoor. La risposta a queste variazioni è stata analizzata in

termini di RMS error.

Settando il valore del σ_d a 0.2, in 20 prove, sono state stimate le coordinate di tutti gli Unknowns, massimizzando la funzione di massima verosimiglianza (MLE). È stato graficato in Figura 5.7 quanto ottenuto (puntini azzurri) con il relativo centro di massa (il triangolino nero). Si visualizza facilmente l'errore di localizzazione commesso confrontando la posizione vera (pallini rossi) con il centro di massa delle varie prove. I puntini azzurri di Figura 5.7

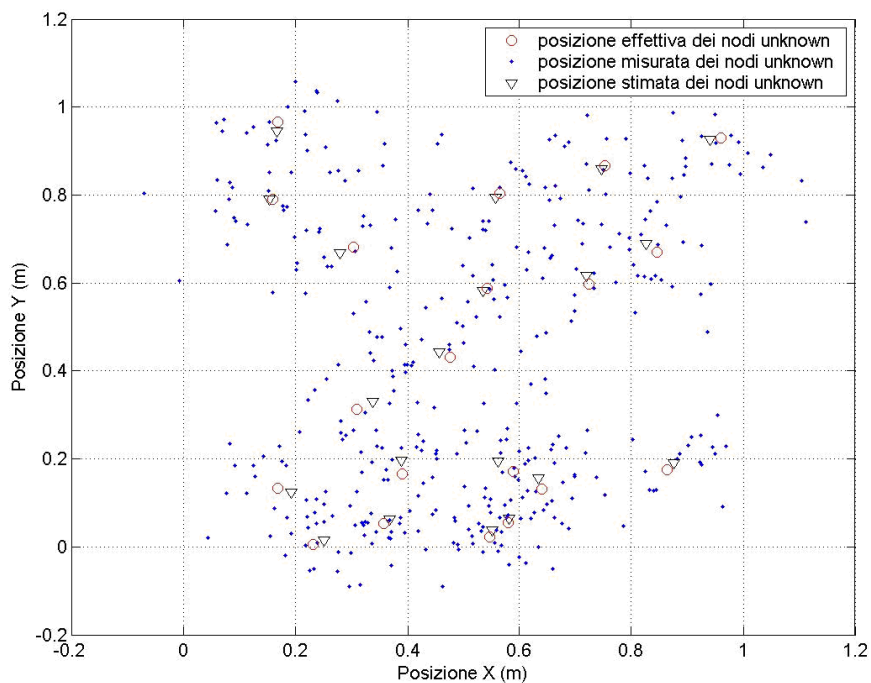


Figura 5.7: Stima (tecnica MLE) delle coordinate dei nodi unknown con $\sigma_d = 0.2$

rappresentano i risultati di ogni multilaterazione atomica.

Fissando poi il σ_d ad un valore di 0.06, supposto per l'UWB, si può notare dalla Figura 5.8 come la stima risulti più accurata, cioè come le misure stimate e le misure effettive siano più ravvicinate. Variando successivamente

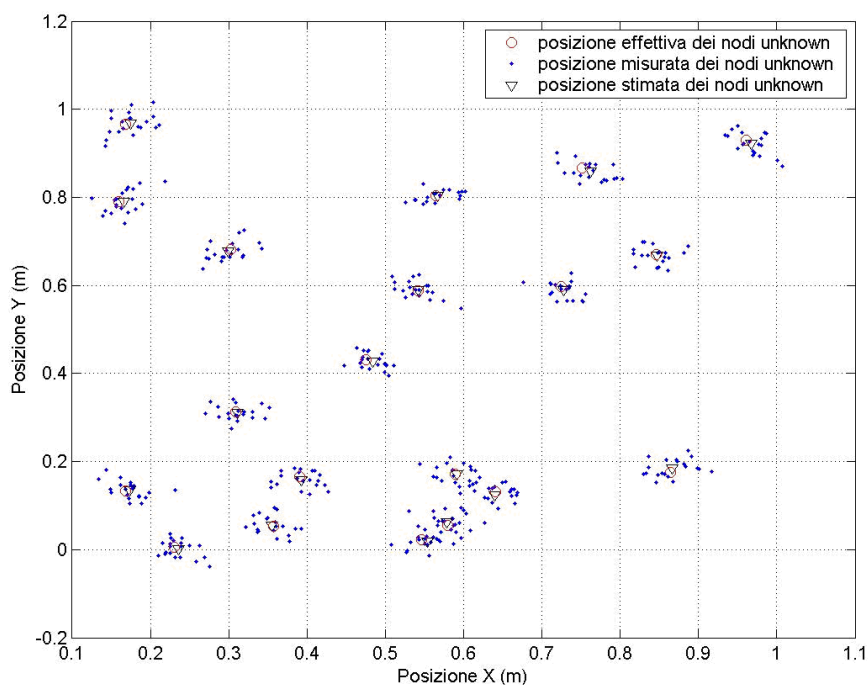


Figura 5.8: Stima (tecnica MLE) delle coordinate dei nodi unknown con $\sigma_d = 0.06$

il numero di sensori nella rete, si è studiato l'andamento dello RMS error della distanza che intercorre tra le coordinate reali e le coordinate stimate (distacco tra pallino rosso e triangolino nero in Figura 5.7).

La Figura 5.7 mostra che aumentando il numero di nodi Unknowns nella rete, il RMS diminuisce, cioè la posizione stimata si avvicina alla posizione vera.

Giunti però ad un numero di Unknowns maggiore di 40, il RMS error sulla posizione rimane stabile ad un valore poco inferiore a 0.005 per $\sigma_d = 0.06$ e satura ad un valore compreso tra 0.01 e 0.015 per $\sigma_d = 0.2$. Inoltre la procedura non garantisce sempre prestazioni migliori aumentando il numero degli Unknowns. Come si può notare dalla Figura 5.9, infatti, il RMS error per 30 Unknowns è maggiore dello RMS error per 20 nodi. Ciò è dovuto al fenomeno della propagazione dell'errore. Gli Unknowns divenuti Anchors hanno cioè, un errore intrinseco, distruttivo, dovuto al processo di stima delle loro coordinate spaziali. Questo errore viene trascinato ad altri Unknowns, inficiando per essi il processo di localizzazione.

Al fine di visualizzare l'incertezza associata alla localizzazione si considerano le aree di indeterminazione per le coordinate degli Unknowns della rete ottenute tramite algoritmo di stima MLE e le aree di indeterminazione minime (attraverso la minima covarianza di Cramer-Rao), fissando $\sigma_d = 0.2$. L'area di indeterminazione per ciascun Unknown della rete è rappresentata da un'ellisse di incertezza il cui centro coincide con la posizione effettiva dei sensori (per CRB) o con la posizione stimata (tramite MLE). Per visualizzare l'incertezza associata alla localizzazione si deve disporre dell'informazione sulla densità di probabilità che descrive l'incertezza della posizione considerata. Questa statistica è contenuta nella matrice di covarianza R . Tale matrice, per la covarianza minima stimata con il CRB è data dalla relazione 5.1 (valida in uno spazio bidimensionale) e la indichiamo con R_{CRB} , essa permette di disegnare l'ellisse tratteggiata in Figura 5.10; invece per le coor-

dinate stimate tramite MLE tale matrice sarà maggiore e la indichiamo con R_{MLE} , essa invece permette di ottenere l'ellisse a linea continua in Figura 5.10.

$$\begin{aligned}
\sigma_i &= tr\{cov_\theta(\hat{x}_i\hat{y}_i)\} = \\
&= Var_\theta(\hat{x}_i) + Var_\theta(\hat{y}_i) \geq ([F_{xx} - F_{xy}F_{yy}^{-1}F_{xy}^T]^{-1})_{i,i} + ([F_{yy} - F_{xy}F_{xx}^{-1}F_{xy}^T]^{-1})_{i,i} \\
\sigma_i^2 &\geq (F^{-1})_{i,i} + (F^{-1})_{i+n,i+n}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Gli assi di tale ellisse sono paralleli agli autovettori della matrice R mentre la loro lunghezza è data dagli autovalori di R moltiplicati per un fattore di scala determinato seguendo [34]. Per tale motivo la dimensione dell'area di indeterminazione dipende da σ_d in quanto la lunghezza degli assi dipende da R i cui termini sono proporzionali al quadrato di σ_T . I risultati ottenuti sono riportati in Figura 5.10. Analogamente, diminuendo il σ_d ad un 6%, si possono ottenere le aree di indeterminazione per i nodi della rete.

Anche in questo caso si può osservare che diminuire la σ_d comporta maggiore accuratezza (Figura 5.11) infatti l'area di indeterminazione si è ridotta notevolmente.

Per mostrare come l'impiego di impulsi UWB possa migliorare le prestazioni della rete, si riporta un grafico che descrive l'andamento di σ_{2D}^2 all'aumentare degli Unknowns ed al variare di σ_d . Si considerano valori di σ_d nell'insieme 0.06, 0.08, 0.15, 0.2. Aumentando il numero degli Unknowns da 4 a 50, quello

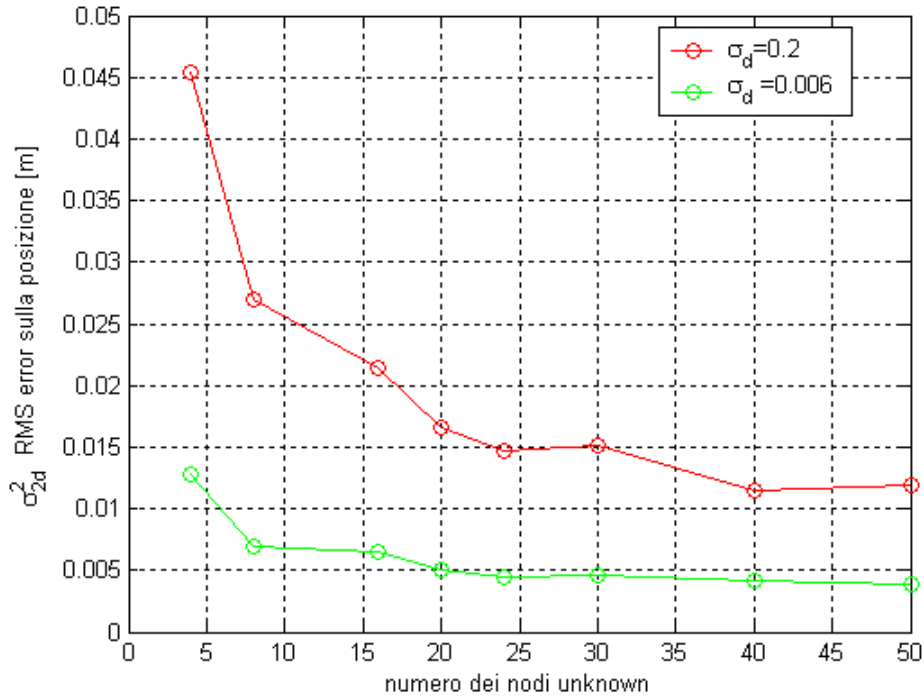


Figura 5.9: σ_{2D}^2 , errore quadratico medio sulle posizioni al variare del numero di unknown

che si ottiene è una riduzione di σ_{2D}^2 . I risultati sperimentali sono riportati nel grafico di Figura 5.12. Al diminuire di σ_d l'errore che si commette diminuisce considerevolmente. Aumentando il numero di Unknowns, l'errore tende a diminuire anche se, sempre a causa della propagazione dell'errore, quando il numero di nodi supera 50, il valore dell'errore sulle coordinate stimate, tramite il metodo MLE, satura intorno a valori ben precisi, circa 0.06 per un $\sigma_d = 0.2$ e circa 0.02 per un $\sigma_d = 0.06$. Viene anche stimato σ_{2D}^2 ottenuto applicando il limite di Cramer-Rao sempre al variare della percentuale di errore σ_d che si ha sulla distanza ed al variare del numero degli

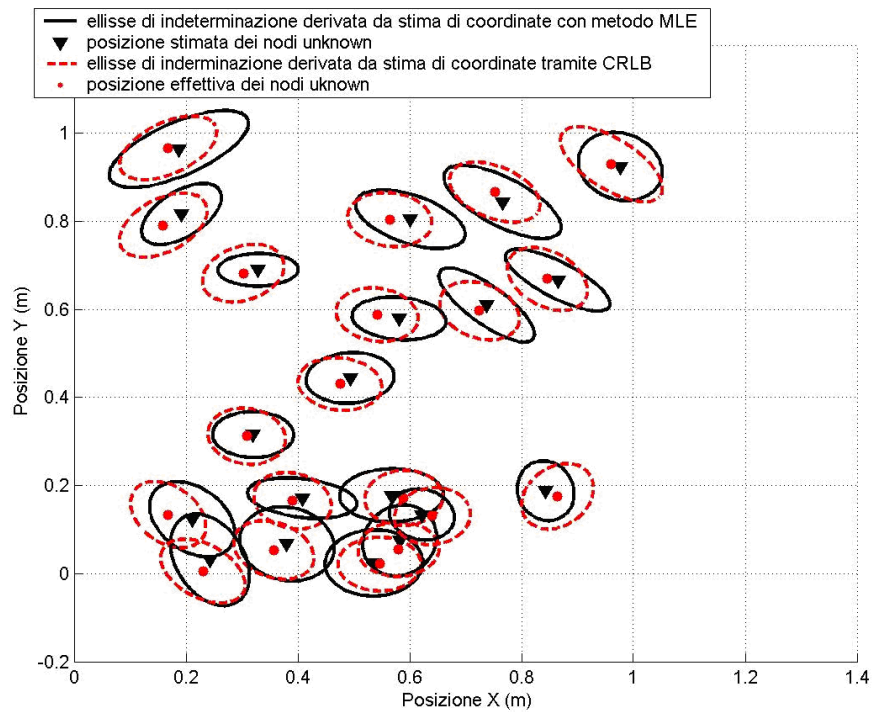


Figura 5.10: Confronto tra la stima delle coordinate dei nodi unknown effettuata con metodo MLE (linea continua) e con il limite di Cramér-Rao (linea tratteggiata), fissato $\sigma_d = 0.2$

Unknowns. I risultati ottenuti sono stati riportati in Figura 5.13. Il limite inferiore di Cramer-Rao indica un errore quadratico medio inferiore rispetto a quello realmente ottenibile tramite il metodo MLE. Anche con il Cramer-Rao, però, ci si trova dinanzi ad una saturazione del valore di σ_{2D}^2 per un numero di Unknowns superiore a 50, dovuta alla propagazione dell'errore.

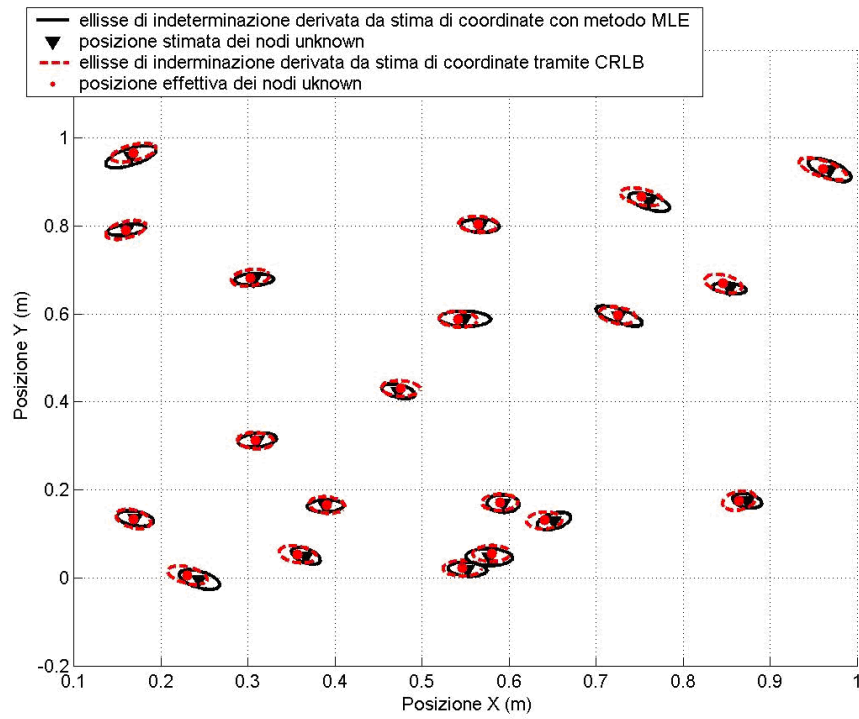


Figura 5.11: Confronto tra la stima delle coordinate dei nodi unknown effettuata con metodo MLE (linea continua) e con il limite di Cramér-Rao (linea tratteggiata), fissato $\sigma_d = 0.06$

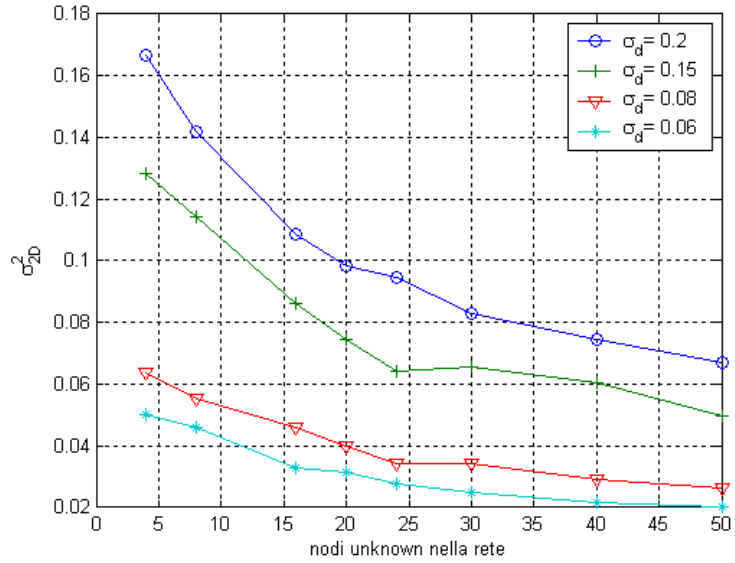


Figura 5.12: σ_{2D}^2 delle coordinate, stimate tramite metodo MLE, al variare di σ_d e del numero di nodi unknown

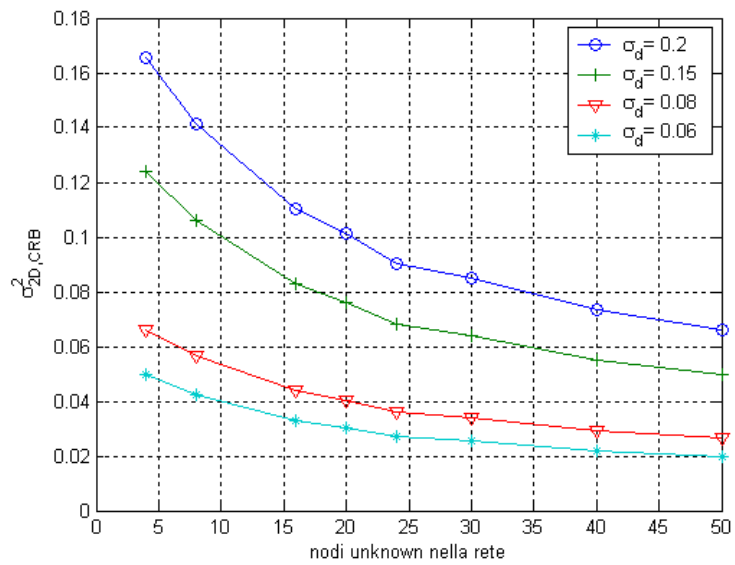


Figura 5.13: σ_{2D}^2 delle coordinate, stimate tramite CRLB, al variare di σ_d e del numero di nodi unknown

Capitolo 6

Conclusioni

In questi anni di dottorato abbiamo affrontato i diversi problemi che affliggono il mondo della localizzazione, ed in questa tesi abbiamo trattato quelli che a nostro parere possono essere considerati come i più rilevanti.

Abbiamo incentrato le nostre attività sulla progettazione e sullo sviluppo di algoritmi basati sul concetto di *Iterative Multilateration*, visto nel Paragrafo 2.3.5, nonostante in letteratura molti lavori erano più indirizzati verso l'utilizzo della più "affascinante" *Collaborative Multilateration*, vista nel Paragrafo 2.3.6. La scelta che ha condizionato fortemente il nostro studio è stata quella di implementare algoritmi incentrati sulla localizzazione di nodi in reti prive di Anchors e composte da un basso numero di elementi, requisiti questi molto distanti dai concetti della *Collaborative Multilateration*, questa infatti richiede la presenza costante di Anchors assoluti, o Anchors relativi appartenenti allo stesso sistema di riferimento, vedi Capitolo 3.

Ciò che abbiamo voluto studiare è stato il comportamento, in reti poco dense disposte in spazi molto ampi, della propagazione dell'errore sulla posizione

dei nodi di una WSN, siano essi dotati di tecnologia ad Ultrasuoni, vedi Capitolo 3 e Capitolo 4, o di tecnologia radio come l'UWB, vedi Capitolo 5. E proprio rivolti a quest'ultimo Capitolo saranno incentrati i nostri sforzi futuri: riuscire ad applicare a dispositivi UWB reali, non più simulati, i nostri algoritmi di localizzazione, applicati finora alla limitante tecnologia ad Ultrasuoni (onda meccanica, scarsa copertura, necessità della linea di vista tra i dispositivi) [28], analizzare il loro comportamento in funzione del movimento di questi dispositivi e non per ultimo riuscire a realizzare e ad applicare, in maniera semplice, soluzioni non lineari ad un problema non lineare, evitando così di aggiungere indeterminazione ad un problema che di errori ne introduce già abbastanza.

Bibliografia

- [1] Marcos Augusto M. Vieira and Diógenes Cecilio da Silva Junior, *Survey on Wireless Sensor Network Devices* IEEE 2003
- [2] Alexei Makarenko and Hugh Durrant-Why *Decentralized Data Fusion and Control in Active Sensor Networks*
- [3] Ian F. Alkyidiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, *A Survey on Sensor Networks* IEEE Communication Magazine, August 2002
- [4] www.vicom-project.it
- [5] Jorge Rafael Nogueras, *A Stream Redirection Architecture for Pervasive Computing Environments* M.I.T. June 2001
- [6] L. L. Scharf, *Statistical Signal Processing* Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1991
- [7] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory* John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991
- [8] H. W. Sorenson, *Parameter Estimation* Marcel Dekker, Inc., New York, 1980
- [9] Greg Welch and Gary Bishop, *An Introduction to Kalman Filter*, July 24, 2006
- [10] W. Greene, *Econometric Analysis* Third Edition, Prentice Hall 1997
- [11] R. L. Moses, D. Krishnamurthy, and R. M. Patterson, *A self-localization method for wireless sensor networks* EURASIP Journal on Applied Signal Processing, vol. 3, no. 4, pp. 348-358, 2003.

- [12] Anushiya A Kannan, Guoqiang Mao and Branka Vucetic, *Simulated Annealing based Wireless Sensor Network Localization* JOURNAL OF COMPUTERS, VOL. 1, NO. 2, MAY 2006
- [13] Brandon Rioja, *Range Free Localizzazione Schemes For Large Scale Sensor Networks*
- [14] Loukas Lazos and Radha Poovendran, *SeRLoc: Secure Range-Independent Localization for Wireless Sensor Networks*
- [15] T.He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic and T. Abdelzaher, *Range Free Localizzazione Schemes in Large Scale Sensor Networks*, 2003
- [16] Vijay Chandrasekhar, Winston KG Seah, Yoo Sang Choo, How Voon Ee, *Localizzazione in Underwater Sensor Network-Survey and Challenges*, 2003
- [17] Seung Jun Baek, Gustavo de Veciana and Xun Su, *Minimizing Energy Consumption in Large-Scale Sensor Networks Through Distributed Data Compression and Hierarchical Aggregation* IEEE 2004
- [18] Dragos Niculescu and Badri Nath, *Ad Hoc Positioning System (APS)*, April 12, 2001
- [19] Lance Doherty, Kristofer S. J. Pister, Laurent El Ghaoui, *Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks*, IEEE INFOCOM 2001
- [20] Nirupama Bulusu, John Heidemann, Deborah Estrin, *GPS Less Low Cost Outdoor Localizzazione For Very Small Devices*
- [21] Srdjan Capcun, Maher Hamdi, Jean Pierre Hubaux, *GPS free positioning in a mobile ad hoc network*
- [22] Andreas Savvides, ChihChieh Han and Mani B. Strivastava, *Dynamic FineGrained Localization in AdHoc Networks of Sensors*
- [23] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan, *RADAR: An In Building RF Based User Location and Tracking System*, IEEE INFOCOM 2000
- [24] Bruce Hendrickson, *Condition for Unique Graph Realizations*, Mathematics and Computational Science Department India National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, February 1992

- [25] J. Aspnes, T. Eren, D.K. Glddenberg, A.S. Morse, W. Whitely, Y.R. Yang, B.D.O. Anderson, P.N. Belhumeur, *A theory of Network Localization*
- [26] T. Eren, D.K. Glddenberg, W. Whitely, Y.R. Yang, A.S. Morse, B.D.O. Anderson, P.N. Belhumeur, *Rigidity, Computation and Randomization in Network Localizzation*
- [27] Y. T. Chan and K. C. Ho, *A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location*, IEEE Transaction on Signal Processing
- [28] N.B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, *The Cricket Location-Support System* in Proc. of the 6th ACM MobiCom, 2000
- [29] B. H. Wellenhoff, H. Lichtenegger and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice* Fourth Edition, Springer Verlag, 1997
- [30] J.D. Taylor, *Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems* Boca Raton, FL: CRC Press, 1995
- [31] *First Report and Order 02-48*, Federal Communications Commission, Washington, DC, 2002
- [32] N. Patwari, J.N.Ash, S. Kyperountas, A.O. Hero, R.L.Moses e N.S.Correal, *Locating the nodes: Cooperative localization in Wireless Sensor Networks*
- [33] K. Siwiak, *Ultra-Wide Band Radio: Introducing a New Technology*, Time Domain Corporation
- [34] P. Kontkanen, P. Myllymaki, T. Rooss, *Topics in probabilistic location estimation in wireless network*, Spain, IEEE Press, 2004