

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE



RELAZIONE DI TIROCINIO LUNGO

LOCALIZZAZIONE INDOOR CON APPARATI ZIGBEE

RELATORE: *Chia.mo Prof. Lorenzo Vangelista*

CORRELATORE: *Franchin Ing. Stefano*

LAUREANDO: *Damiano Patron*

Padova, 26 aprile 2010

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

A.A. 2009/2010

Troppe parole generano confusione

anonimo

Indice	iv
Introduzione	v
1 Reti di sensori	1
1.1 Classificazioni e applicazioni	2
1.2 Hardware	5
2 ZigBee e localizzazione	7
2.1 Lo standard IEEE 802.15.4/ZigBee	7
2.2 Aspetti generali della localizzazione	11
2.3 Potenza del segnale ricevuto	15
2.4 Protocolli RF di rete	18
2.5 Il kit CC2431ZDK di Texas Instruments	19
3 I test di localizzazione	25
3.1 Misure di accuratezza con il modulo CC2431	26
3.2 Esperimenti bidimensionali	30
3.3 Esperimenti tridimensionali	37
4 Un software per la localizzazione bidimensionale	39

5	Soluzioni di localizzazione tridimensionale	45
5.1	Algoritmo 3D	45
5.2	Filtraggio dei pacchetti dati	47
6	Conclusioni	51
A	Appendice	53
A.1	La comunicazione seriale tra <i>SmartRF04EB</i> e PC	53
	Bibliografia	58

Introduzione

Da diverso tempo l'uomo studia soluzioni tecnologiche per localizzare mezzi o persone all'interno di un area, prima tra tutti la tecnologia GPS, che però può risultare troppo costosa in alcuni tipi di applicazioni.

I recenti progressi tecnologici hanno permesso lo sviluppo di sensori radio a basso costo e basso consumo che consentono di realizzare reti autonome multifunzionali. Con questi sviluppi si è rafforzato un diverso modo di localizzare, sfruttando reti di sensori entro le quali riconoscere la posizione di una persona o di un oggetto in movimento.

I sistemi realizzati fino ad ora consentono la localizzazione in due dimensioni, in un area aperta o all'interno di un singolo piano di un edificio. Un esempio di soluzione che si presta per queste applicazioni è il modulo *CC2431 di Texas Instruments*, il quale, utilizzando lo standard ZigBee 802.15.4, integra al suo interno un hardware di localizzazione basato sul metodo *RSSI (Received Signal Strength Indicator)*.

Lo scopo di questo lavoro è di capire se questo sistema, attualmente disponibile sul mercato, sia utilizzabile per localizzare persone in movimento all'interno di un edificio a più piani. In altre parole, riconoscere non solo il movimento orizzontale di una persona, ma avere informazioni anche sull'altezza: ovvero conoscere il piano in cui si sta muovendo.

Dopo una panoramica sulle tecnologie utilizzate, saranno esposti i test di localizzazione indoor eseguiti, successivamente verranno spiegati i risultati ottenuti con

un esempio di applicazione software per la localizzazione a piani bidimensionale. In fine verrà proposto un algoritmo per realizzare un sistema di localizzazione tridimensionale completo.

CAPITOLO 1

Reti di sensori

Una rete di sensori wireless (*WSN: wireless sensors network*) è un insieme di piccoli dispositivi autonomi, chiamati nodi sensori, in grado di elaborare informazioni sull'ambiente circostante e di comunicare tra di loro.

La comunicazione avviene attraverso un canale wireless e lo scambio di informazioni tra i nodi può arrivare fino ad un unità centrale, nella quale un applicazione ha il compito di elaborare le informazioni ricevute.

Questi nodi sensori sono provvisti di un processore on-board, il quale consente di effettuare semplici elaborazioni e trasmettere solo i dati richiesti e già elaborati. La topologia della rete di sensori consente agli stessi di collaborare tra di loro, da qui l'importanza di mantenere una determinata topologia anche nell'eventualità che venga perturbato l'ambiente circostante. Tipico esempio di tale fenomeno è il passaggio di persone o l'apertura di porte metalliche, le quali creano riflessioni e schermi per le onde RF.

La realizzazione di una rete di sensori wireless richiede quindi l'utilizzo di tecniche di rete specifiche, alcune delle quali utilizzate nelle reti wireless ad hoc (si definisce rete ad hoc una infrastruttura che non richiede un coordinatore e in cui ogni nodo funziona anche da router), ma con requisiti diversi. I principali sono:

- I nodi sensori hanno una capacità di calcolo e una capacità di memoria

limitata. Inoltre possono non avere un identificatore globale (ID).

- Il numero di nodi che compongono una WSN può essere di alcuni ordini di grandezza superiore rispetto ad una rete ad hoc. Quindi un algoritmo di scalabilità è parte fondamentale di una rete wireless.
- I nodi sensori sono generalmente disposti con un alta densità nell'area di interesse. E' necessario che l'informazione, nel routing tra i diversi nodi, arrivi fino alla stazione fissa.
- La topologia di una rete è soggetta a cambiamenti frequenti, quindi l'applicazione richiede un certo grado di tolleranza e la capacità di auto-riconfigurazione nella topologia.
- L'estesa area da coprire spesso non consente la comunicazione tipo punto-punto tra i nodi, ma è necessario usare un paradigma di comunicazione di tipo broadcast.

Come verrà discusso in seguito, l'alta densità con la quale sono disposti i nodi è un fattore particolarmente importante anche nella localizzazione: maggiore è il numero di nodi fissi installati, maggiore sarà l'accuratezza con la quale viene calcolata la posizione di un nodo mobile.

Un altro vantaggio derivante dall'alta densità di nodi risiede nella bassa potenza necessaria alla comunicazione. Il requisito di potenza risulta essere infatti una delle caratteristiche più stringenti poichè i nodi utilizzano delle sorgenti di potenza che non possono essere in generale sostituite, o quantomeno non possono essere sostituite frequentemente. Per questo motivo un'efficace implementazione di WSN deve prevedere una scelta del compromesso migliore fra prestazioni e durata delle batterie.

1.1 Classificazioni e applicazioni

La classificazione delle reti avviene in funzione dell'area coperta, considerando che anche in aree ristrette la densità di nodi sarà comunque elevata, la distinzione avviene sempre in funzione dell'area coperta e non in numero di nodi.

- BAM (*Body Area Network*): 1 m
- PAN (*Personal Area Network*): 10 m
- LAN (*Local Area Network*): 500 m
- MAN (*Metropolitan Area Network*): 20-50 Km
- WAN (*Wide Area Network*): oltre i 50 Km

Questo tipo di classificazione viene in genere ricondotto alla definizione di reti cablate, anche se in generale costituiscono un modello su cui inserire le diverse tipologie di reti wireless ad oggi presenti sul mercato. La Figura 1.1 confronta le diverse tecnologie in base al *data rate* e all'estensione della rete.

Nel caso delle reti di sensori è possibile effettuare ulteriori classificazioni uti-

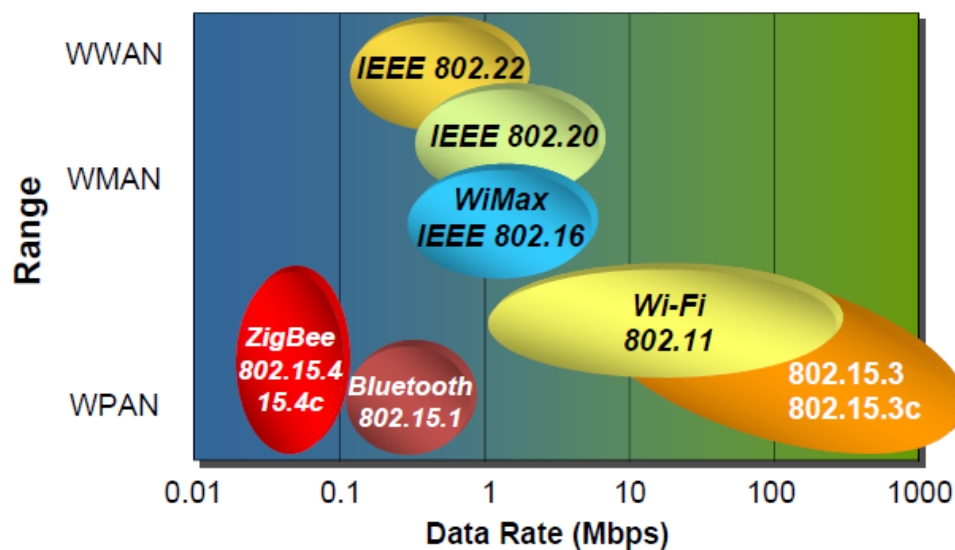


Figura 1.1: Confronto tra tecnologie wireless.[3]

lizzando per esempio la tipologia dell'applicazione (militare, medica, industriale, consumer, ecc.) oppure considerando l'ambiente in cui la rete deve essere utilizzata.

Lo sviluppo delle reti wireless dedicate al mondo dei sensori ha visto l'affermazione delle LR-WPAN *Low Rate Personal Area Network*, queste reti sono caratterizzate da dimensioni contenute ed al contempo da bassi *transfert rate*. Tuttavia molte

applicazioni richiedono semplicemente il trasferimento di pochi kbit/s, ciò porta a considerare di primaria importanza il contenimento dei costi ed i consumi.

E' utile notare come lo scopo dello standard IEEE 802.15.4, che sarà approfondito nel cap. 2.1, non sia quello di competere con altre tecnologie wireless già esistenti, ma di completare lo spettro delle applicazioni wireless con basso *data rate*.

Per distribuire informazioni su una banda maggiore, sono nate applicazioni wireless UWB (*Ultra Wide Band*) che, grazie ad una banda maggiore di 500 Mhz, sono in grado di offrire prestazioni superiori alla tecnologia Bluetooth con consumi contenuti. Dati i limiti attuali sulle emissioni, questa tecnologia è ideale per un utilizzo indoor o a breve raggio.

Applicazioni militari

Le WSN hanno assunto importanza nel campo militare grazie alle capacità di comando, controllo, sorveglianza e riconoscimento. Tipici esempi di applicazioni militari sono il monitoraggio di forze amiche o nemiche, di equipaggiamenti e munizioni, *targeting* e la rilevazione di attacchi chimici, biologici o nucleari.

Distribuendo reti di sensori wireless in aree critiche è possibile avere un tracking dettagliato dei movimenti di truppe e mezzi nemici. I nodi infatti, possono essere programmati per essere attivati e inviare informazioni ogni qualvolta venga rilevato un movimento in una particolare area. Il sensore quindi può essere completamente passivo (*sleep mode*) fino a che non viene rilevato un particolare fenomeno.

Applicazioni ambientali

Integrando una rete di sensori all'interno di un ambiente naturale è possibile raccogliere una serie di misure a lungo termine, come la localizzazione di animali, il controllo di incendi boschivi o monitorare habitat.

Consideriamo uno scenario nel quale si sviluppa un incendio in una foresta. Una rete di sensori distribuita nell'ambiente può immediatamente inviare un segnale di allarme alle autorità prima che l'incendio diventi incontrollabile. La posizione precisa dell'incendio può essere subito raggiunta grazie all'informazione del nodo sensore più vicino.

Applicazioni mediche

Le reti di sensori wireless si rendono potenzialmente utili anche in ambito medico. All'interno di un ospedale, ad esempio, i pazienti possono essere equipaggiati di un sensore wireless che monitorizza le loro funzioni vitali e localizza la loro posizione. In questo modo i pazienti possono muoversi liberamente pur essendo sotto costante controllo. In caso di malore improvviso il sensore, trasmettendo la posizione e la condizione del paziente, allerta immediatamente il personale sanitario e un dottore nelle immediate vicinanze, anche lui dotato di un sensore wireless, può rispondere immediatamente all'emergenza.

Nei pazienti affetti da diabete, che necessitano di un controllo costante, il monitoraggio del livello di glucosio da parte di un nodo sensore può essere un efficace applicazione di una rete di sensori.

1.2 Hardware

Un nodo sensore è caratterizzato dall'essere di piccole dimensioni e a basso consumo. E' provvisto di un microcontrollore RISC con una piccola (circa 100KB) memoria programmabile, ma solitamente può essere aggiunta una memoria flash esterna per alleggerire il carico di calcolo alla memoria del chip. Le più comuni board includono linee seriali come la *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART), convertitori analogico-digitali e timers, inoltre sono presenti sensori e trasduttori in base alla funzione che dovrà svolgere la rete di nodi. I nodi sensori attualmente disponibili sono provvisti di moduli radio con protocolli del tipo *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) *Medium Access Control* (MAC), operano in una banda libera (315/433/868/916 Mhz) e hanno una larghezza di banda tra 20 e 50 Kbps.

I nuovi modelli supportano radio 802.15.4 che operano a 2.4 GHz e offrono una larghezza di banda di 250 Kbps, sono provvisti di un antenna interna o di una piccola antenna verticale isotropica. Il range di trasmissione varia tra un massimo di 300 m (outdoor) per il primo tipo di radio, e di 125 m per le radio 802.15.4. L'alimentazione è solitamente fornita da 2 batterie standard tipo AA.

ZigBee e localizzazione

ZigBee è il nome di una specifica per un insieme di protocolli di comunicazione ad alto livello, basata sullo standard IEEE 802.15.4, il quale definisce i layer fisici e MAC per reti PAN *low-rate* e a basso costo. Per definire le specifiche di network e la programmazione di applicazioni a livello layer è nata *ZigBee Alliance*, un'associazione di compagnie che lavorano insieme per sviluppare e produrre tecnologie ZigBee da integrare in un vasto range di applicazioni consumer, commerciali, industriali e governative.

Nelle seguenti sezioni saranno analizzati in maggior dettaglio gli standard IEEE 802.15.4 e ZigBee, fino ad arrivare all'applicazione di localizzazione. Verrà esposto il metodo basato sulla potenza del segnale radio ricevuto e saranno discusse le differenze tra alcuni protocolli di comunicazione con i quali è possibile programmare i nodi sensori.

L'ultima sezione sarà dedicata al kit *CC2431ZDK* di *Texas Instruments* che, grazie al suo engine interno di localizzazione, è stato utilizzato nei test indoor.

2.1 Lo standard IEEE 802.15.4/ZigBee

IEEE 802.15.4

Lo standard 802.15.4, sviluppato dall'*Institute of Electrical and Electronics En-*

gineers (IEEE), è il primo standard progettato per reti di sensori wireless LR-WPAN. Promosso da ZigBee Alliance, un consorzio di industrie fondato nel 2002, esso è uno standard molto flessibile, utilizzabile in molte topologie di reti wireless e include importanti caratteristiche di basso consumo e implementazione a basso costo.

Le reti IEEE 802.15.4 supportano tre tipi di dispositivi: Coordinatore *PAN* (*Personal Area Network*), Coordinatori, e Dispositivi. Il Coordinatore PAN è il principale controllore della rete, inizializza la rete e opera come gateway per altre reti. I Coordinatori collaborano tra di loro per garantire il routing dei dati e per organizzare autonomamente la rete. I Dispositivi non hanno capacità di routing e possono comunicare solo con i Coordinatori.

Grazie alla bassa necessità di calcolo, i dispositivi possono essere implementati in piattaforme molto semplici e a basso costo. Lo standard definisce due tipi di piattaforme: una a bassa complessità, *Reduced Function Device* (RFDs) ed un'altra avente un insieme completo di servizi MAC chiamata *Full Function Device* (FFD).

Il protocollo MAC può funzionare con beacon o senza, in quest'ultimo caso il protocollo è un semplice *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) e richiede la presenza dei nodi Coordinatori per controllare i possibili dati in arrivo. I dispositivi con beacon possono trasmettere i dati a richiesta e rimanere in modalità *sleep* tra un beacon ed un altro, incrementando l'efficienza energetica.

Lo standard IEEE 802.15.4 supporta indirizzi a 64 e a 16 bit. I primi vengono utilizzati per identificare accuratamente i dispositivi, mentre gli indirizzi più corti a 16 bit servono per comunicare con la rete dopo che il nodo è stato identificato.

ZigBee

La prime specifiche di ZigBee furono annunciate nel dicembre 2004 e una serie di aggiornamenti sono stati lanciati nel dicembre 2006. In quello stesso periodo, oltre 200 compagnie erano entrate nel consorzio *ZigBee Alliance* tra cui società di semiconduttori, società di sviluppo software e di servizi. ZigBee opera nelle

frequenze radio assegnate per scopi industriali, scientifici e medici: 868 MHz in Europa ed Asia, 915 MHz negli Stati Uniti e 2,4 GHz nel resto del mondo.

I protocolli ZigBee sono progettati per l'uso in applicazioni embedded che richiedono un basso transfert rate e bassi consumi, con lo scopo di essere più semplice e più economica di altre WPAN come, ad esempio, *Bluetooth*. L'obiettivo attuale è quello di definire un rete rete wireless economica ed autogestita che possa essere utilizzata per scopi quali il controllo industriale, le reti di sensori, domotica e le telecomunicazioni. Il basso consumo energetico dei nodi ZigBee rende la rete in grado di funzionare per molto tempo sfruttando le sole batterie incorporate nei singoli nodi.

La tecnologia Zigbee definisce tre tipi di dispositivo:

- *ZigBee Coordinator (ZC)*: costituisce la radice di una rete e può collegare più reti. E' ammesso un solo Coordinator in ogni rete. E' in grado di memorizzare informazioni riguardo la sua rete e può agire come deposito per le chiavi di sicurezza.
- *ZigBee Router (ZR)*: la loro funzione è di instradare i dati da e verso altri dispositivi
- *ZigBee End Device (ZED)*: includono solo le funzionalità minime per dialogare con il nodo parente (Coordinator o Router). Non sono abilitati al routing e sono spesso i più economici perchè in loro risiede il minor quantitativo di memoria.

Topologie di rete

La topologia *peer-to-peer* consente la creazione di una rete tipo *mesh*, in cui qualsiasi Router ZigBee può comunicare con qualsiasi altro router presente nel suo range. Utilizzando il routing dei dati attraverso i nodi della rete, la copertura può essere estesa oltre il limite radio dei singoli dispositivi. Questo permette la costruzione di complesse topologie wireless autonome. Inoltre, la topologia *peer-to-peer* possiede una maggiore robustezza contro le interferenze e in caso di fallimento di comunicazione in certi nodi. Uno svantaggio di questa topologia è la maggior latenza dei messaggi dovuta al routing dei dati tra i nodi. Successivamente vedremo come la topologia *peer-to-peer* sia la più indicata nel caso di reti

wireless disposte sui diversi piani di un edificio.

Le reti ibride rappresentano una combinazione ad albero di reti *mesh* e reti a *stella* e le relazioni tra i nodi sono del tipo padre-figlio. La rete consiste di un insieme formato da *router ZigBee* come nodi padre e da numerosi *ZigBee end device* come nodi figlio. Un coordinatore ZigBee inizializza la rete e funziona come radice della topologia, inoltre può fornire le informazioni ad un nodo per diventare il padre di un insieme di nodi figli.

Questa struttura ad albero semplifica il routing multi percorso e consente un risparmio energetico: ogni nodo mantiene la sincronizzazione e lo scambio dei dati solo con il suo nodo padre. Il resto del tempo, il nodo risparmia energia in modalità sleep. Questo non avviene nelle reti *mesh peer-to-peer*, dove il router ha bisogno di essere sempre attivo per poter ricevere dati dagli altri nodi vicini in qualsiasi momento. Uno svantaggio della topologia ad albero è rappresentata dal fatto che in caso di guasto di un nodo padre, restano fuori comunicazione molti nodi figlio, provocando un consistente spreco di energia durante l'auto-ripristino della rete.

Layer ZigBee

I dispositivi ZigBee devono rispettare le norme dello standard IEEE 802.15.4 *Low-Rate Wireless Personal Area Network* (WPAN). Esso specifica il protocollo di livello fisico (PHY), e la parte del livello data link del *Medium Access Control* (MAC). La Figura 2.1 illustra il protocollo stack di un dispositivo 802.15.4/ZigBee. Il layer applicazioni in cima dello stack contiene i profili applicativi che determinano le relazioni, le associazioni e le inizializzazioni della rete. Il profilo definisce quali messaggi vengono inviati nell'etere, le applicazioni nell'ambiente di utilizzo e i tipi di dispositivi utilizzati. Solo i nodi con lo stesso profilo applicativo pubblico possono comunicare tra di loro.

Questo standard opera nella banda non licenziata 2,4 GHz, 915 MHz e 868 MHz. Nella banda 2,4 GHz vengono utilizzati 16 canali ZigBee, da 5 MHz ciascuno. La frequenza centrale per ogni canale può essere calcolata come:

$$f_c = (2400 + 5 \cdot k)\text{MHz}, \text{ con } k = 1, 2, \dots, 16. \quad (2.1)$$

I trasmettitori radio usano una codifica *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). La modulazione utilizzata è una BPSK nelle bande 868 e 915 MHz e una QPSK con offset (O-QPSK) che trasmette 4 bit per simbolo nella banda 2,4 GHz. Il *data rate over-the-air* è di 250 kb/s per canale nella banda 2,4 GHz, 40 kb/s per canale nella banda 915 MHz e 20 kb/s nella banda 868 MHz. Il range di copertura varia tra 10 e 75 metri, dipendente dall'ambiente, e la massima potenza trasmessa è in genere 0 dBm (1 mW).

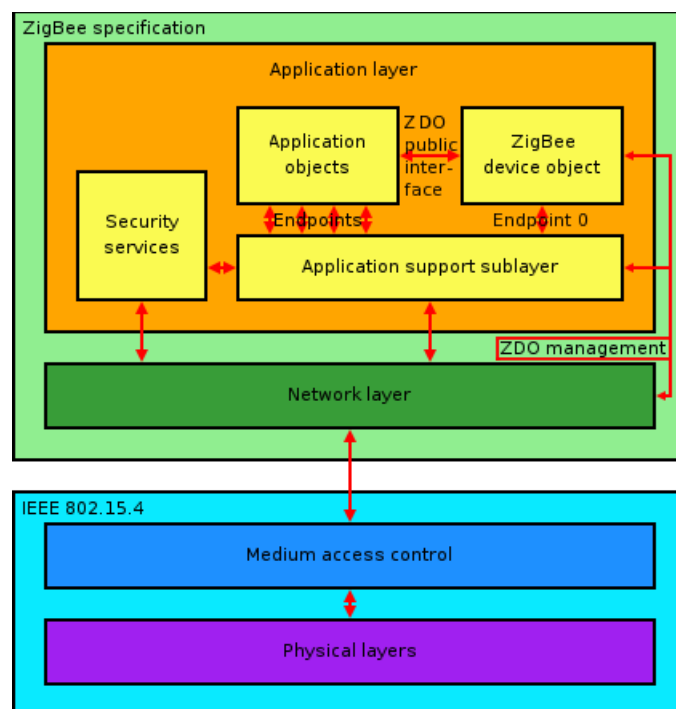


Figura 2.1: Struttura dei layer IEEE 802.15.4/ZigBee.[16]

2.2 Aspetti generali della localizzazione

L'obiettivo della localizzazione è determinare le coordinate fisiche di un gruppo di sensori. Le coordinate devono essere globali ed allineate ad un sistema di riferimento esterno, come ad esempio GPS o con coordinate arbitrarie prefissate.

Il mercato del wireless ha permesso lo sviluppo di diverse tecnologie adatte a coprire aree più o meno vaste ed ogni tecnologia ha sviluppato la propria tecnica di

localizzazione, ognuna distinta per precisione ed area coperta. La figura seguente confronta le varie tecnologie di georeferenziazione in base all'errore stimato e all'area monitorata.

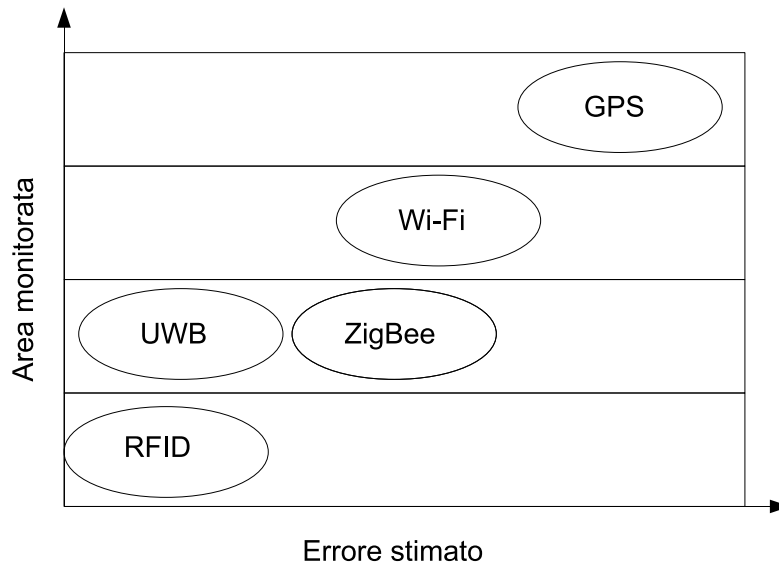


Figura 2.2: Confronto tra tecnologie di georeferenziazione.

Nelle applicazioni emergenti delle reti di sensori è necessario orientare accuratamente i nodi rispettando un sistema di coordinate globali in modo da riportare la propria posizione in modo graficamente significativo. Non esistono algoritmi favoriti nell'ampio spettro disponibile, ognuno va valutato in base alla precisione che realizza e a quanto costoso diventa l'hardware per realizzarlo. Alcuni algoritmi necessitano di eseguire il calcolo della posizione all'interno dei nodi della rete stessa, altri lo eseguono all'esterno; in certe soluzioni si fa affidamento su dei nodi pre-posizionati per ottenere le coordinate globali, in altri invece non serve. Nella localizzazione esistono due rilevanti problemi hardware: il primo è il problema di definire una sistema di coordinate globali, il secondo è la sfida chiave più tecnica del calcolare la distanza tra i sensori. Di seguito vengono esposte alcune tecniche di localizzazione basate sulle reti di sensori.

Nodi Ancora o Beacon

Le coordinate per la localizzazione possono essere globali, ovvero allineate ad un sistema esterno come il GPS, oppure relative, ovvero un sistema arbitrario di co-

ordinate. I nodi beacon (detti anche nodi ancora) sono un prerequisito necessario per localizzare una rete di sensori in un sistema di coordinate globali. I nodi beacon sono semplici nodi ordinari che conoscono a priori le loro coordinate globali. Queste possono essere impostate o acquisite da un sistema addizionale come il GPS. Per localizzazioni bidimensionali servono almeno tre nodi ancora, mentre per localizzazioni tridimensionali ne sono necessari almeno quattro.

Il vantaggio dell'usare in nodi ancora è evidente: la presenza di alcuni nodi pre-localizzati, permette di semplificare il compito di assegnare coordinate ad altri nodi ordinari. Gli svantaggi sono nei costi e nel consumo, nel caso i nodi ancora siano dotati di GPS, e nel fatto che non possono essere utilizzati in ambienti indoor.

Potenza del Segnale Ricevuto

Nelle reti di sensori ogni nodo possiede una radio, necessaria allo scambio di informazioni. E' possibile sfruttare questo dispositivo per localizzare una rete col metodo basato sulla potenza del segnale ricevuto *Received Signal-Strenght Indication* (RSSI). In teoria, l'energia di un segnale radio diminuisce col quadrato della distanza dalla sorgente. Come risultato, un nodo in ricezione di segnali radio dovrebbe essere in grado di usare la potenza del segnale ricevuto per calcolare la distanza dal trasmettitore.

In pratica, le misure di RSSI contengono rumore, dovuto al fatto che la propagazione tende ad essere non uniforme negli ambienti reali; pertanto i segnali radio si propagano in modo diverso attraverso mezzi differenti. Ostacoli fisici come muri, griglie metalliche e oggetti simili, riflettono e assorbono le onde radio. Questi aspetti rendono la precisione della misura RSSI inferiore rispetto ad altri metodi. Comunque, la misura della potenza del segnale ricevuto ha generato molto interesse ed alcune analisi fisiche sulla propagazione radio consentono un miglior uso del metodo RSSI, attraverso un opportuna calibratura delle radio dei nodi sensori.

Radio Hop Count

Essendo il metodo RSSI troppo poco accurato in certe applicazioni, la radio può ancora essere utilizzata per assistere alla localizzazione. L'osservazione chiave è

che se due nodi possono comunicare tra di loro attraverso le radio, la loro distanza reciproca è con grande probabilità minore di R , dove R è il massimo range delle loro radio; non ha importanza quale sia la potenza dei loro segnali. In questo modo semplici dati di connettività possono essere utili alla localizzazione.

Esistono però due problemi principali: l'errore totale è sempre di circa $0,5R$ e può risultare troppo elevato in certe applicazioni, inoltre la presenza di ostacoli può rendere eccessivamente lungo il salto di connettività tra due nodi. Alcuni algoritmi permettono però di migliorare la precisione portandola a circa $0,2R$.

Differenza del Tempo di Arrivo

La differenza del tempo di arrivo, *Time difference of arrival* (TDoA), è una comune tecnica hardware nella quale ogni nodo è equipaggiato con un altoparlante (speaker) ed un microfono. Alcuni sistemi usano gli ultrasuoni, mentre altri sfruttano frequenze udibili. Nella TDoA, il trasmettitore emette per primo un segnale radio, attende alcuni intervalli di tempo prefissati t_{delay} , e produce una sequenza di *chirps* attraverso lo speaker. Quando gli altri nodi in ascolto ricevono il segnale radio, prendono nota dell'istante di tempo t_{radio} , e attivano i loro microfoni. Nel momento in cui ai microfoni arriva la sequenza di chirps, i nodi prendono nuovamente nota del nuovo istante di tempo, t_{sound} . Una volta che sono noti t_{sound} , t_{radio} e t_{delay} il ricevente può calcolare la distanza d tra se stesso e il trasmettitore grazie al fatto che le onde radio viaggiano più velocemente rispetto alle onde sonore in aria.

$$d = (s_{radio} - s_{sound}) \cdot (t_{sound} - t_{radio} - t_{delay}) \quad (2.2)$$

L'aspetto positivo di questo metodo è che la precisione può essere molto buona, facendo attenzione però che l'etere sia libero da echi e che microfoni e speakers siano correttamente calibrati tra di loro. Per contro, un po' di perdita di precisione può avvenire a causa delle variazioni di alcuni parametri dell'aria, come umidità e temperatura, che fanno variare la velocità del suono.

In conclusione, il metodo TDoA è in grado di essere più preciso rispetto al metodo basatato sulla potenza ricevuta, anche se può risentire della presenza di ostacoli o echi all'interno dell'ambiente in cui è installata la rete di sensori.

Angolo di Arrivo, Compassi Digitali

Alcuni algoritmi dipendono dall'angolo di arrivo *Angle of Arrival* (AoA) dei dati. Questi dati sono in genere ricevuti usando array di radio o microfoni, che consentono ad un nodo in ascolto di determinare la direzione del nodo trasmettitore. E' inoltre possibile raccogliere gli angoli d'arrivo attraverso metodi ottici di comunicazione.

In questi metodi, alcuni microfoni (3-4) distanziati ricevono un singolo segnale. Analizzando poi la fase, o la differenza del tempo d'arrivo del segnale tra i diversi microfoni, è possibile ricavare l'angolo d'arrivo del segnale.

Con questi metodi si possono ottenere precisioni di qualche grado, sfortunatamente però l'hardware tende ad essere più grande e più costoso rispetto ad un TDoA. A volte a questi dispositivi viene integrato un compasso digitale che serve a conoscere l'orientamento globale del nodo stesso, informazione che può essere utile in aggiunta all'angolo d'arrivo. [11]

2.3 Potenza del segnale ricevuto

Abbiamo visto nella sezione precedente come il metodo basato sulla misura della potenza del segnale radio sia in grado di fornire una stima della posizione di un nodo all'interno della rete. In accordo con l'equazione sulla trasmissione nello spazio libero di Friis', la potenza del segnale ricevuto diminuisce con il quadrato della distanza dal nodo trasmettitore secondo l'equazione 2.3.

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.3)$$

Dove, P_{TX} è la potenza del segnale trasmesso, P_{RX} è la potenza del segnale ricevuto, G_{TX} guadagno del trasmettitore, G_{RX} guadagno del ricevitore, λ lunghezza d'onda, d distanza tra nodo trasmittente e ricevente.

Nei dispositivi embedded questa misura della potenza ricevuta viene poi convertita in un indice di potenza del segnale ricevuto (RSSI), che è definito come il rapporto tra la potenza ricevuta e la potenza di riferimento (P_{ref}). Tipicamente,

la potenza di riferimento è rappresentata da un valore assoluto di $P_{ref} = 1\text{mw}$.

$$RSSI = 10 \cdot \log \frac{P_{RX}}{P_{ref}} = [dBm] \quad (2.4)$$

Un incremento della potenza ricevuta determina un incremento del valore di RSSI. La Figura 2.3 illustra la relazione tra RSSI e potenza del segnale ricevuto. La distanza d è inversamente proporzionale al valore di RSSI. Nello scenario pratico,

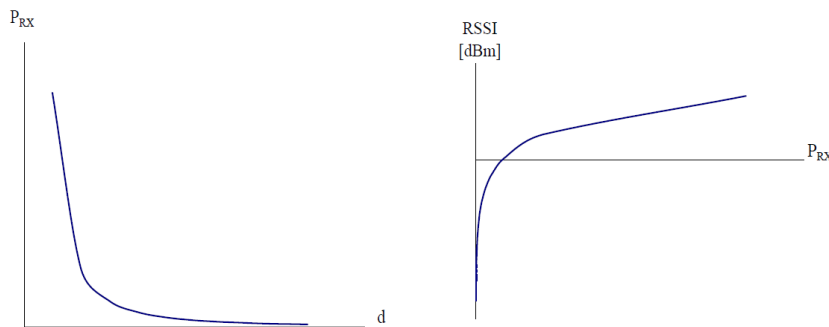


Figura 2.3: a) Potenza ricevuta Vs distanza dal trasmettitore. b) RSSI come indice della potenza ricevuta. [10]

la distribuzione ideale di P_{RX} non è applicabile, poichè la propagazione delle onde radio risente di effetti come la riflessione di oggetti metallici, la sovrapposizione di campi elettromagnetici, attraversamento in diversi mezzi che cambiano l'indice di propagazione, ecc.

Possiamo definire RSSI come una tecnologia metrica di ricezione radio, che solitamente è invisibile all'utente che guarda al singolo dispositivo ma che è conosciuta dall'utente o dall'applicazione finale che gestisce la rete wireless. Essa opera nello stadio di frequenza intermedia (IF) della radio ricevente, prima dell'amplificatore IF. In sistemi a zero-IF RSSI viene fatto in banda base, prima dell'amplificatore. In uscita al sistema RSSI è presente un livello analogico, al quale può seguire un ADC (convertitore analogico-digitale) per campionare e rendere disponibile il dato all'elaborazione digitale. Figura 2.4.

L'utente finale può osservare il valore di RSSI attraverso i software utilizzati per la localizzazione, attraverso la lettura dei messaggi inviati dai nodi alla stazione

base (Appendice A) o attraverso tools di software per monitorare la rete wireless. RSSI può essere utilizzato anche internamente alle reti di sensori per determinare

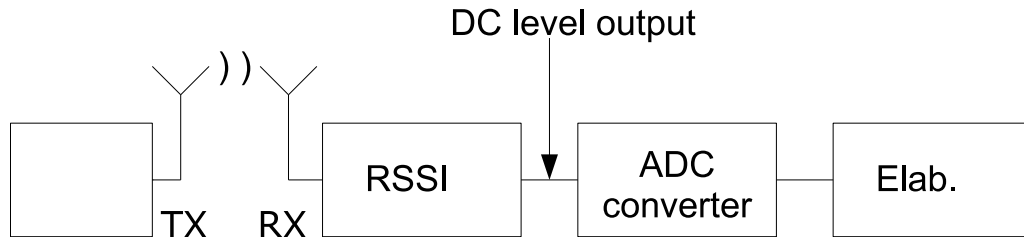


Figura 2.4: Schema a blocchi di un ricevitore con RSSI

quando il livello di energia radio nel canale è sotto ad una certa soglia affinché un nodo possa trasmettere (*CTS: clear to send*).

I valori di RSSI variano in un range tra 0 e 255, espressi con un byte integer senza segno, in alcuni casi il valore massimo di RSSI ($RSSI_{MAX}$) dipende dal produttore del dispositivo. Per quanto riguarda la precisione, maggiore sarà il range di variazione di RSSI, maggiore sarà l'accuratezza che si potrà raggiungere. Questo metodo ha il grande vantaggio di eliminare hardware aggiuntivi ai piccoli dispositivi wireless, rendendo possibile la localizzazione con piccole dimensioni, bassi costi e consumi. Purtroppo questi sistemi non godono della migliore precisione, ma esistono in letteratura numerosi algoritmi basati su RSSI che ottimizzano le misure aumentando la precisione del sistema.[1]

Nei nodi wireless *Texas Instruments* la localizzazione è decentralizzata nei moduli CC2431, i quali contengono un hardware dedicato al calcolo RSSI e della posizione di un nodo mobile (*location engine*). Quando il modulo CC2431 riceve un pacchetto dati da un altro nodo, esso attribuisce automaticamente al messaggio un valore di RSSI, che è sempre la media dei primi 8 periodi di simbolo ($128\mu s$). Questo valore di RSSI, rappresentato da un byte, è presente nel penultimo byte di ogni pacchetto estratto dalla memoria FIFO del modulo.

Il calcolo utilizzato dai moduli CC2431 per l'attribuzione del valore di RSSI è espresso dalla Formula 2.5, in cui n è la costante di propagazione, d la distanza

dal trasmettitore, A potenza del segnale ricevuto ad un metro di distanza.

$$RSSI = -(10n \log_{10} d + A) \quad (2.5)$$

2.4 Protocolli RF di rete

Nella creazione di una rete wireless è necessario scegliere la topologia di rete più adatta in base alle esigenze applicative e in base all'ambiente in cui viene installata. Per fare ciò, sono stati sviluppati protocolli di comunicazione RF adatti ai moduli a basso consumo come il tipo CC2431. Per questo modulo di *Texas Instruments*, sono stati sviluppati tre tipi di protocolli, con i quali si possono programmare i singoli nodi sensori che andranno a comporre l'intera rete wireless. I nodi devono utilizzare tutti lo stesso protocollo per comunicare tra di loro. Nodi con tipi diversi non sono interoperabili.

I protocolli sviluppati per il modulo CC2431 sono: *Z-Stack*, *TiMAC*, *SimpliciTI*. Ognuno di essi realizza una diversa topologia di rete e quindi un diverso scambio d'informazione tra i nodi. Nel seguito vengono esposte le differenze tra questi tre protocolli RF:

- ***Z-Stack***

Z-Stack fu uno dei primi stack ad essere certificato nelle specifiche ZigBee 2006. Esso abilita il routing dei pacchetti creando reti *mesh* nelle quali ogni messaggio viene ritrasmesso tra i vari nodi fino alla stazione base (*location dongle*). Questo crea un vantaggio in termini di estensione della rete. In *Z-Stack* sono già integrate le funzionalità di *location engine*, ed è il miglior protocollo per localizzare in aree estese.

- ***TiMAC***

Questo protocollo implementa una comunicazione di tipo *point-to-point*, la distanza che si può coprire è quindi ridotta. Per estendere la rete si possono utilizzare dei ripetitori di segnale, ma il loro numero è limitato a 4 per ogni topologia. Non è possibile il routing dei messaggi e il massimo *data rate* raggiungibile è di 100Kbps. Con *TiMAC* i nodi devono essere sempre alimentati, affinché siano tutti classificati come *FFD* (*Full Function*

Devices). Anche questo protocollo supporta le funzioni di *location engine*, ma la comunicazione *point-to-point* impone che i nodi fissi (*reference nodes*) siano tutti a portata di collegamento RF tra di loro e il nodo mobile (*blind node*) deve essere nel range della stazione base (*location dongle*).

- ***SimpliCI***

Implementa due tipi di topologie: *star* (ogni nodo deve essere a portata di collegamento RF con il nodo centrale, gateway) o *peer-to-peer* (nodo a nodo), non è quindi possibile il routing dei messaggi. Le dimensioni della rete che può essere sviluppata sono quindi ridotte, ma c'è la possibilità di utilizzare dei *range extender* per coprire aree maggiori. Bisogna però tenere presente che il massimo numero di nodi utilizzabili con *SimpliCI* è di 256. Il *data rate* supportato da questo protocollo è 250Kbps.

2.5 Il kit CC2431ZDK di Texas Instruments

Per i test di localizzazione sui quali vertono i capitoli successivi è stato utilizzato il kit di sviluppo di *Texas Instruments CC2431ZDK*, basato sul modulo ZigBee *CC2431* che include funzionalità di *location engine* attraverso il metodo di misura della potenza del segnale ricevuto (RSSI).

Questo kit dimostrativo consente di avere tutti i dispositivi radio e le applicazioni necessarie a realizzare una rete wireless ZigBee. Esso include:

- 2x *SmartRF04EB*: E' la scheda che, collegata al pc, realizza la stazione base della rete. Essa comunica con l'applicazione software.
- 10x *SOC-BB (Battery Board)*: Sono i moduli, alimentati da batterie, sui quali montare i chip radio CC2431 o CC2430.
- 2x *Evaluation Modules CC2430EM*: Chip radio che includono tutte le funzionalità ZigBee ma che non sono dotati dell'hardware di localizzazione. Possono essere utilizzati solo come nodi fissi o per la stazione base.
- 10x *Evaluation Modules CC2431*: Chip radio ZigBee dotati dell'hardware di *location engine* basato sul metodo RSSI, vengono utilizzati come nodi fissi e mobili. Eventualmente anche per la stazione base.

- 12x Antenne 2.4 Ghz per i moduli radio.
- Cavi seriali ed USB per i collegamenti tra *SmartRF04EB* e PC.

L'interfaccia dell'utente con la rete wireless è realizzata da un software gratuito, *Z-Location Engine CC2431*, attraverso il quale è possibile programmare i nodi mobili e fissi per poi visualizzarne gli spostamenti in una mappa grafica.

I protocolli RF di rete con cui si possono programmare i nodi, disponibili gratuitamente, sono *Z-Stack* e *TiMAC*. Entrambi supportano le funzionalità di *location engine*, pur realizzando topologie diverse (Sezione 2.4).

Il software *Z-Location Engine* comunica con il nodo ZigBee *SmartRF04EB* attraverso un cavo UART/seriale RS232. Il nodo connesso al PC prende il nome di *Location Dongle* (stazione base), ed è un nodo ZigBee a tutti gli effetti che partecipa alla rete wireless complessiva. Sarà poi compito dell'utente decidere se quel nodo sarà coordinatore, router o dispositivo finale. La stazione base ha la funzione di indirizzare i dati tra il PC e i nodi esterni che compongono la rete.

Z-Location Engine include una funzione flash di download con la quale è possibile scaricare e generare file *hex* su di una scheda connessa. La programmazione flash dei nodi è quella che installa il protocollo RF scelto per la rete.

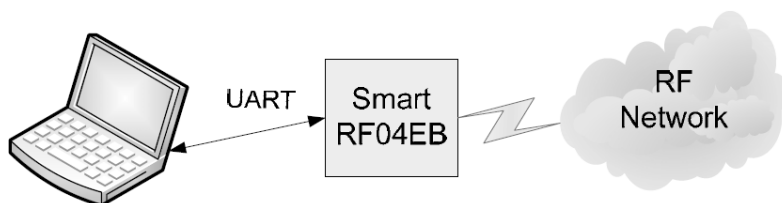


Figura 2.5: Setup di una rete wireless: l'utente dispone di un PC con il software *Z-Location Engine* che comunica attraverso una linea seriale con la scheda *SmartRF04EB*. Quest'ultima garantisce il collegamento radio con i nodi periferici CC2430/31

Il modulo radio CC2431

Il modulo CC2431 è un *System-On-Chip* (SOC) per reti wireless ZigBee/IEEE 802.15.4 a 2,4 Ghz (Figura 2.6). Il chip include un hardware di localizzazione

che viene utilizzato per quei nodi chiamati *Blind Nodes*, ovvero nodi mobili con posizione sconosciuta. Essi utilizzano nodi fissi (*Reference Nodes*) con posizione predefinita per calcolare la propria e inviarla alla stazione base (*Location Dongle*). Il chip CC2431 consente la costruzione di nodi ZigBee con costi di materiale davvero ridotti. Esso unisce le caratteristiche radio di moduli come CC2420 a un microcontrollore 8051 dotato di 128 KB di memoria flash e 8 KB di memoria RAM. Combinato con il protocollo stack ZigBee *Z-Stack*, esso diventa un prodotto molto competitivo nel mercato delle soluzioni ZigBee, anche grazie alla caratteristica di essere adatto a tutti quei sistemi che richiedono bassi consumi.

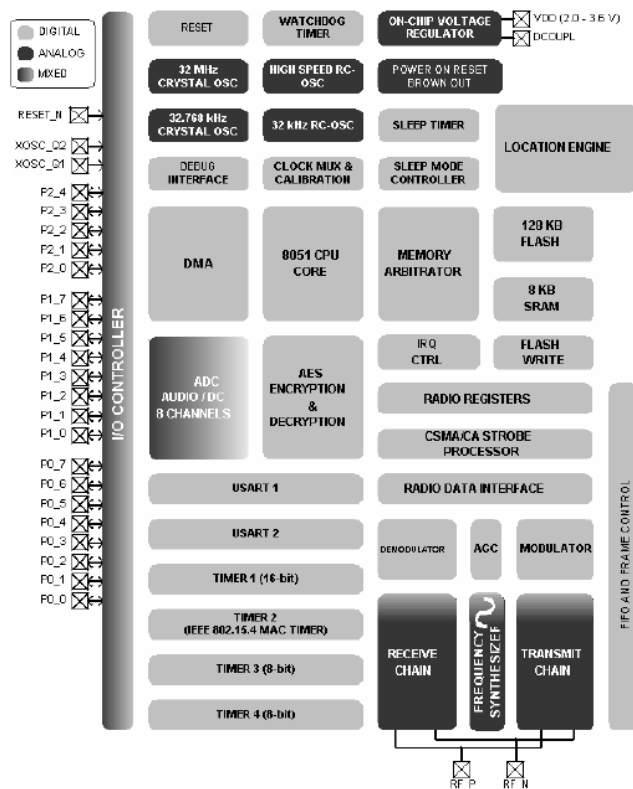


Figura 2.6: Hardware del chip CC2431 [13]

Operazioni di localizzazione

L'hardware di localizzazione (*location engine*) del modulo CC2431, implementa un algoritmo di calcolo che utilizza i valori di potenza del segnale ricevuto (RSSI) provenienti da nodi stazionari. Realizzare i calcoli di localizzazione nel singolo nodo riduce il traffico e i ritardi di rete, altrimenti presenti in soluzioni centraliz-

zate.

Il sistema di localizzazione richiede come ingressi un set che va da 3 a 16 coppie di coordinate che vengono inviate dai nodi fissi assieme a dei parametri misurati (parametri "A" ed "n"). L'uscita è rappresentata da una coppia di coordinate calcolate con il metodo RSSI. La Figura 2.7 evidenzia gli ingressi e le uscite dell'hardware di localizzazione.



Figura 2.7: Dati in ingresso e in uscita nell'hardware di localizzazione CC2431

Il parametro radio "A" è definito come il valore assoluto della potenza media in dBm ricevuta ad un metro di distanza dal nodo trasmettitore, assunto una radiazione di tipo omni-direzionale. L'indice "n" è definito come il coefficiente di attenuazione che descrive la diminuzione della potenza all'aumentare della distanza dal trasmettitore. Questi valori possono essere ricavati sperimentalmente o attraverso i grafici forniti nei manuali TI ([13]).

I valori misurati di RSSI sono corrispondenti ad un insieme di coordinate stazionarie, ovvero quelle dei nodi fissi. Essi sono compresi nell'intervallo $[-40dBm, -95dBm]$, con precisione di $0.5dBm$. I valori presenti nei pacchetti dati provenienti dal nodo mobile sono espressi in valore assoluto.

Per ridurre i consumi, l'hardware di *location engine* viene attivato scrivendo il valore 1 nel bit di *enable*, mentre quando non è in uso viene scritto uno 0. Questo, in fase di off, comporta uno spegnimento del segnale di clock nell'hardware di engine, riducendo i consumi del chip.

Al fine di ottenere la miglior precisione possibile, è necessario utilizzare antenne con caratteristiche di irradiazione isotropica (fornite nel kit). Anche se il produttore indica 0.25 metri l'errore sulla posizione, in realtà esso dipende da molti

fattori come l'ambiente, la densità di nodi fissi, ecc. (Capitolo 3). In linea generale però, una maggiore densità di nodi fissi comporta vantaggi in termini di accuratezza.

CAPITOLO 3

I test di localizzazione

Nel seguente capitolo verranno esposti i test eseguiti negli ambienti indoor, le prime prove sono rivolte a capire le performance di localizzazione bidimensionale in un unico piano, mentre i successivi test mirano a studiare la reazione del sistema disponendo i nodi su piani diversi per una localizzazione che tenga conto dell'altezza dell'edificio nel quale avvengono le misure.

La stazione base è composta dalla scheda *SmartRF04EB* con modulo CC2430, connessa alle porte USB e seriale di un personal computer nel quale è installato il software di interfaccia utente *Z-Location Engine* fornito nel kit. I nodi fissi e mobili sono costituiti da schede provviste di batterie equipaggiate con moduli CC2431.

Durante i test, quando il software è in modalità di acquisizione, il breve intervallo di tempo tra i pacchetti contenenti la posizione dei nodi mobili non consente la registrazione manuale delle coordinate X,Y. Per risolvere questo problema è possibile estrapolare i dati dal file di log che il programma crea automaticamente all'interno della cartella di installazione. Questo file, rinnovato ad ogni apertura dell'applicazione, elenca tutti i pacchetti scambiati tra la stazione base e i nodi periferici, consentendo all'utente di avere tutte le informazioni sulle misure e le richieste di posizione scambiate tra i nodi. In particolare, ogni pacchetto con-

trassegnato con il codice esadecimale 0x0014 contiene tutte le informazioni che il nodo mobile invia alla stazione base, come il numero di nodi fissi utilizzati per i calcoli, il nodo ad esso più vicino con il suo valore di RSSI e le coordinate calcolate. La Figura 3.1 mostra un esempio di tale pacchetto dati.

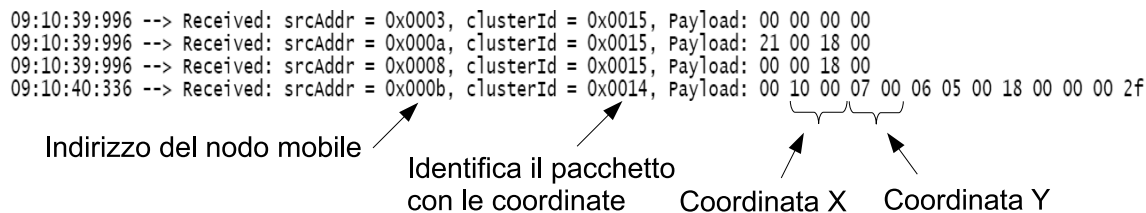


Figura 3.1: Pacchetto di risposta inviato dal nodo mobile CC2431 alla stazione base collegata al PC. Tutti i valori sono espressi in notazione esadecimale.

Dalla lettura di questo file log è possibile quindi raccogliere una serie di misure da elaborare successivamente con calcoli e grafici.

3.1 Misure di accuratezza con il modulo CC2431

Il primo esperimento, volto a stimare l'accuratezza dei moduli Chipcon TI CC2431, è stato eseguito in un ambiente indoor costituito da una stanza ed un corridoio adiacente.

Nella stanza, di dimensioni 3m x 6m, (contentente anche il pc con la stazione base) i nodi fissi sono stati posizionati lungo i quattro angoli dei muri, mentre la disposizione lungo il corridoio (dimensioni 8.2m x 2.8m) è alternata sui due muri ogni 3m. La Figura 3.2 mostra la planimetria dei locali e la collocazione dei nodi. In questo test i nodi mobili sono rimasti fermi in un unico punto, proprio per capire lo scostamento tra le misure di RSSI e la reale posizione precedentemente misurata. Inoltre, così facendo è stato possibile capire come vengono perturbate le misure dal passaggio di persone o dall'apertura di porte.

Nei nodi fissi, installati a circa 2m dal pavimento, gli errori causati da zone di non lettura possono essere risolti orientando l'antenna isotropica in direzione verticale, con l'estremità finale rivolta verso il basso. Viceversa, se l'antenna fosse

rivolta verso l'alto si verrebbero a creare dei “coni d'ombra” sotto i quali il segnale del nodo mobile non verrebbe ricevuto.

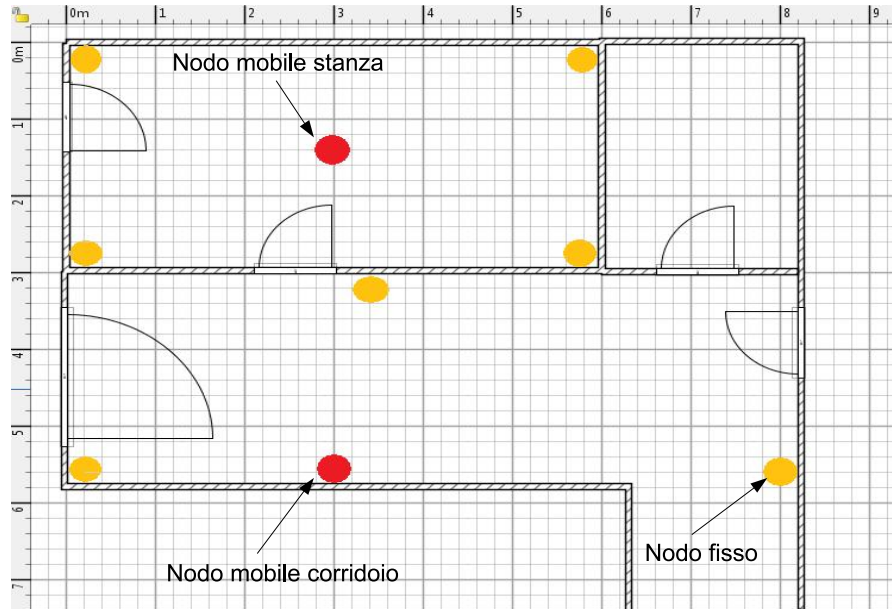


Figura 3.2: planimetria della stanza e del corridoio utilizzati per i test di accuratezza. I cerchi gialli rappresentano i nodi fissi (reference nodes) mentre quelli colorati in rosso sono i nodi mobili (blind nodes)

Il refresh di letture è di 1,5 secondi e le condizioni riproducono una situazione reale di utilizzo, ovvero con persone in movimento attraverso le stanze e lungo il corridoio. Da segnalare che la porta a sinistra nel corridoio è del tipo antincendio, caratterizzata quindi da una spessa struttura metallica che, come vedremo nei grafici, contribuirà ad una sensibile perturbazione delle misure di RSSI.

La procedura per iniziare i test deve tener conto di un piccolo intervallo di tempo nel quale l'insieme di nodi si calibra e le misure si stabilizzano. All'accensione dei nodi il software impiega alcuni secondi a riconoscere e visualizzare tutti i nodi fissi, e le prime misure di posizione dei nodi mobili sono classificate dal programma come “insuccessi”. In particolare, un pacchetto insuccesso si verifica quando il nodo mobile invia alla stazione base i propri dati indicando che non sono stati ricevuti segnali da un numero sufficiente di nodi mobili per poter calcolare la propria posizione. Al nodo mobile serve ricevere minimo tre segnali di RSSI dai nodi

fissi per poter calcolare correttamente la propria posizione e inviare un pacchetto dati completo.

In ogni misura è stato quindi necessario selezionare le misure dopo un opportuno intervallo di tempo nel quale le letture iniziavano ad essere regolari.

La prima serie di misure è riferita al nodo mobile posto all'interno della stanza, il quale si trova nella posizione di 3m x 1.5m. La Figura 3.3 mostra i grafici delle delle misurazioni eseguite in un intervallo di 80 secondi. L'accuratezza del sistema è valutata confrontando la posizione stimata dai nodi con quella misurata e conosciuta preventivamente.

L'errore medio per la coordinata X è di circa 75cm, mentre per la coordinata Y è di 30cm. La stanza, essendo di dimensioni ridotte, consente una buona precisione con soli 4 nodi fissi agli angoli. Anche se alcune misure si discostano molto dalla posizione reale l'errore medio è abbastanza basso, considerando che la precisione è uno dei limiti della tecnologia RSSI.

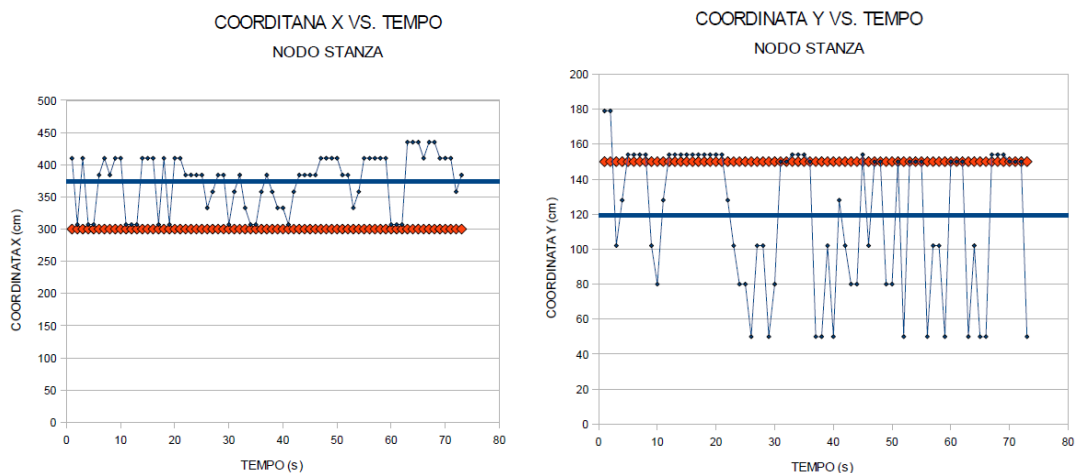


Figura 3.3: Grafici delle coordinate X,Y del nodo mobile all'interno della stanza. La linea arancione indica la posizione misurata, i punti blu indicano le posizioni calcolate dal nodo. La linea blu orizzontale indica la media dei valori.

La seconda serie di misure riguarda il nodo mobile posto nel corridoio, nella posizione di 2.8m x 6.2m. L'intervallo di acquisizione è ancora di 80 secondi e in Figura 3.4 è mostrato il confronto tra la posizione reale e quella misurata dai nodi. In questo caso l'errore medio delle due coordinate X e Y è per entrambe circa 1,2m.

I tre nodi disposti lungo il corridoio risentono maggiormente dell'apertura di porte metalliche (in particolare della porta tagliafuoco) e del passaggio di persone, questo infatti causa differenti attenuazioni del mezzo circostante nel quale sono inseriti i nodi.

Il nodo mobile è in grado di selezionare gli 8 segnali più forti provenienti dai nodi fissi ma in questo caso, essendo solamente 3 quelli lungo il corridoio, è costretto a lavorare con pochi segnali tra l'altro spesso perturbati e questo causa l'aumento dell'errore medio nelle misure.

In test successivi, infatti, l'aggiunta di un ulteriore nodo fisso nel corridoio ha compensato le misure di RSSI precedenti riducendo l'errore e le fluttuazioni.

La condizione ideale per una buona precisione è quindi creare una griglia rettangolare di nodi fissi, la cui distanza tra due consecutivi non superi i 10m.

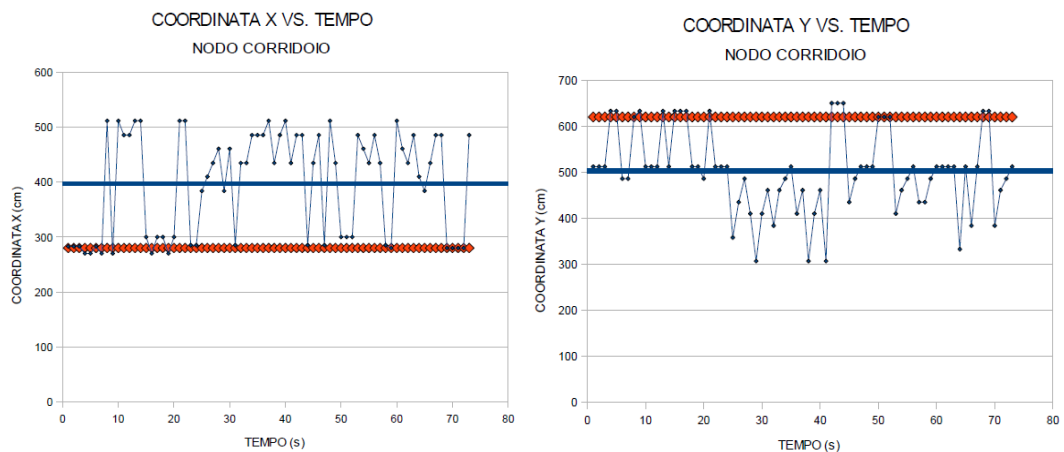


Figura 3.4: Grafici delle coordinate X,Y del nodo mobile posizionato nel corridoio. La linea arancione indica la posizione misurata, i punti blu indicano le posizioni calcolate dal nodo. La linea blu orizzontale indica la media dei valori.

3.2 Esperimenti bidimensionali

Dopo aver verificato la precisione dei moduli CC2431 in un tipico utilizzo all'interno di un piano, vediamo ora alcuni test eseguiti disponendo i nodi in più piani. L'ambiente utilizzato è la torre scale di un palazzo a tre piani, come mostrato in Figura 3.5. I nodi fissi con moduli CC2431 sono installati parallelamente nei due

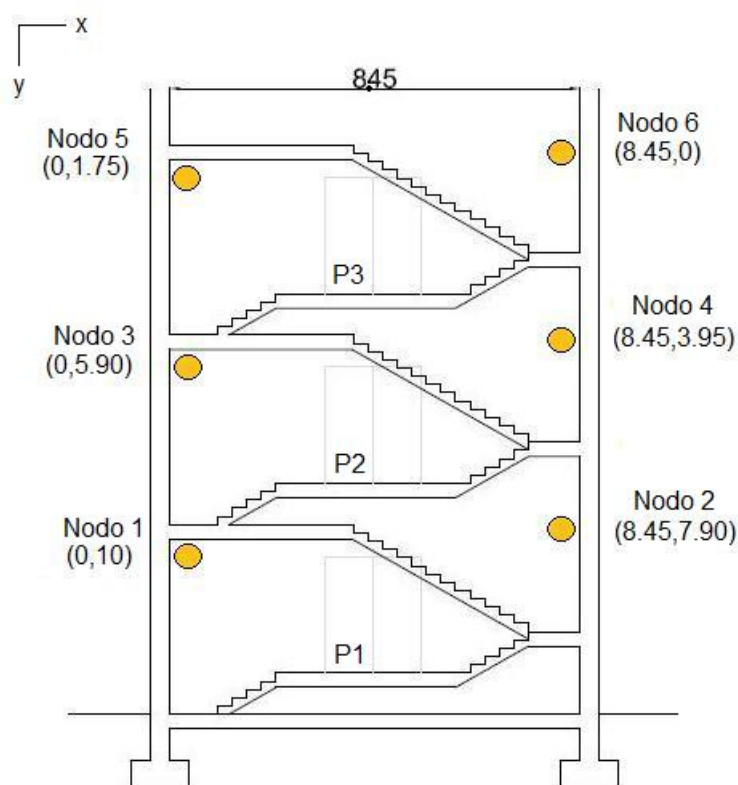


Figura 3.5: Planimetria dell'edificio a tre piani utilizzato nei test. In giallo sono indicati i nodi fissi e a fianco le loro rispettive coordinate (esprese in metri). Ogni scala che collega due piani è provvista di un corrimano metallico.

muri principali, ad un'altezza di 2.4m, in modo da creare idealmente un rettangolo contenente i nodi mobili nei vari spostamenti lungo le scale. La stazione base con modulo CC2430, collegata ad un PC, è stata posizionata al primo piano.

Anche in questo tipo di ambiente è necessario ruotare le antenne dei nodi fissi in posizione verticale rivolte verso il basso, così da garantire il collegamento radio

anche nel caso in cui il nodo mobile si trovi a transitare sotto ad essi.

Le prime prove, mirate alla ricerca del protocollo RF ideale, hanno evidenziato come *TiMAC* non consenta la lettura dei nodi più distanti da parte della stazione base, in quanto la comunicazione *point-to-point* implementata da questo protocollo richiede che ogni nodo sia nel range di tutti gli altri. Condizione irrealizzabile date le distanze e le barriere rappresentate dalle pavimentazioni in cemento armato, che diventano un ostacolo al collegamento radio tra la stazione base e i nodi presenti nel secondo e terzo piano.

Programmando i nodi con *Z-Stack* invece, grazie al routing dei pacchetti dati, la lettura di tutti i nodi è sempre garantita, consentendo quindi la realizzazione di una rete molto più estesa nella quale i dati possono essere ritrasmessi fino ad arrivare alla stazione base situata al primo piano.

Il primo obiettivo per una localizzazione che tenga conto dell'altezza è capire la sensibilità del nodo mobile di ricevere i nodi fissi che si trovano nel suo stesso piano rispetto a quelli presenti nei piani superiori e inferiori. E' necessario avere quindi dal nodo mobile l'indirizzo del nodo fisso che considera più vicino, ovvero quello con il valore maggiore di RSSI.

Sempre con l'ausilio del file di log creato dal software *Z-Location Engine*, viene estratto il pacchetto dati inviato dal nodo mobile che, oltre a contenere le coordinate X,Y, include anche l'indirizzo esadecimale nel nodo fisso a lui più vicino con il suo valore di RSSI. In Figura 3.6 è presente un esempio di tale pacchetto.

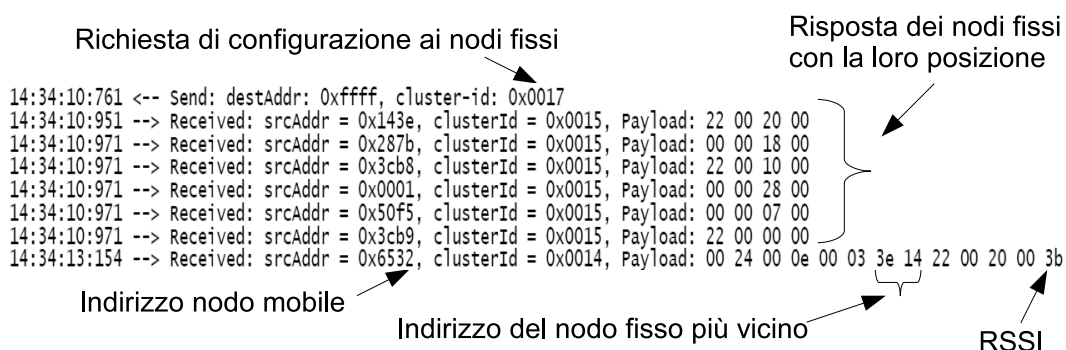


Figura 3.6: Pacchetti dati inviati alla stazione base dai nodi periferici. Si nota come il nodo mobile fornisca l'indirizzo del nodo fisso a lui più vicino.

La disposizione del nodo mobile (quadrato verde) è stata fatta in tre punti diversi, in modo da raccogliere le letture sia nei casi migliori di vicinanza ad un nodo fisso, sia quando ci si trova a transitare tra un piano ed un altro.

Queste tre posizioni rispecchiano le tappe di una persona in transito dal primo piano (nodi 1 e 2) verso il secondo (nodi 3 e 4), Figura 3.7.

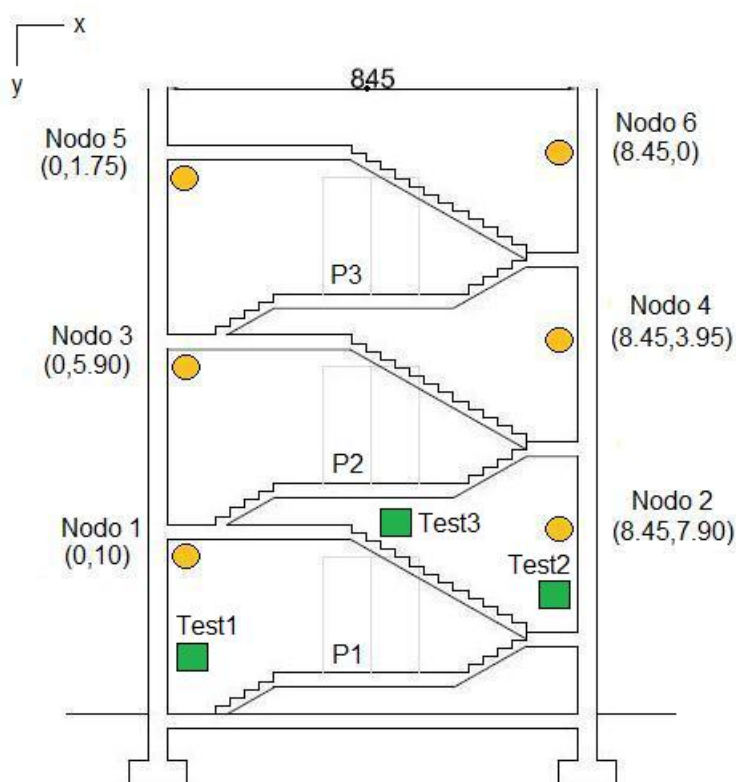


Figura 3.7: Disposizione del nodo mobile, rappresentato dai quadrati verdi, nei tre diversi test.

Raccogliendo una serie di pacchetti inviati dal nodo mobile ed estraendo gli indirizzi dei nodi più vicini, è stato possibile ricavare una tabella che riassume, in percentuale, quali nodi fissi esso considera più vicini.

Le tabelle mostrano i dati raccolti nelle tre diverse posizioni, i nodi fissi attivi sono tutti e sei, ma per semplicità vengono riportati solo i nodi ricevuti dal nodo mobile con percentuale diversa da zero.

Risultati Test 1

TEST 1	
NODO 1	76%
NODO 2	17%
NODO 3	7%

Nel primo test il nodo mobile si trova sotto al primo nodo fisso e dai valori si nota come esso rilevi con con maggior frequenza i nodi del suo stesso piano. Per una piccola percentuale riceve anche il nodo 3 presente verticalmente nel piano superiore, nonostante la presenza di una pavimentazione che divide i due dispositivi.

Risultati Test 2

TEST 2	
NODO 1	29%
NODO 2	63%
NODO 3	8%

Come in precedenza il nodo mobile segnala la maggior parte delle volte i nodi del suo stesso piano e, nonostante si trovi sotto al nodo 2, viene rilevato frequentemente anche il nodo 1 in quanto i due dispositivi si trovano ad una portata ottica di pochi metri. In misura minore viene ricevuto anche il nodo 3, anch'esso a portata priva di ostacoli.

Risultati Test 3

TEST 3	
NODO 2	10%
NODO 3	90%

In questo caso le percentuali sono giustificate dal fatto che, tra il nodo mobile e il nodo 3 esiste un collegamento ottico diretto senza alcuna struttura che interferisca alla comunicazione, mentre il nodo 2 si trova al di là del corrimano costituito da una griglia metallica che si estende su tutta la lunghezza della scala. Una simile struttura crea quindi uno schermo per le misure di RSSI.

Il seguente esperimento ha permesso di capire le potenzialità alternative del sistema nella localizzazione a piani. Sono stati utilizzati solamente tre nodi fissi disposti in un'unica linea verticale, ovvero uno in ogni piano come mostra la Figura 3.8:

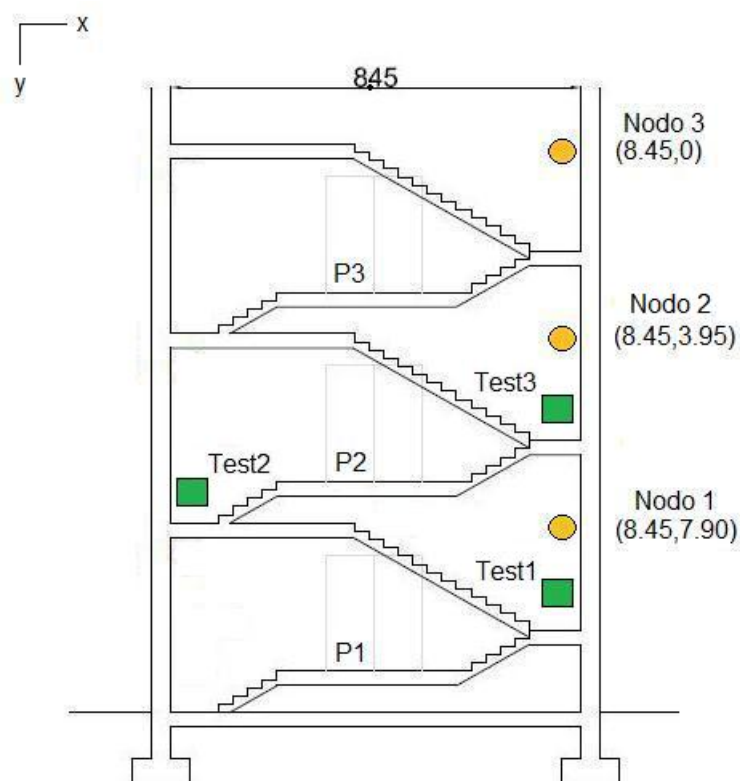


Figura 3.8: Disposizione dei nodi fissi (gialli) e del nodo mobile, rappresentato dai quadrati verdi, nei tre diversi test.

Risultati Test 1

TEST 1	
NODO 1	99%
NODO 2	1%

Il nodo mobile si trova posizionato sotto al nodo 1, i messaggi di posizionamento indicano una sola lettura del nodo 2.

La minore densità di nodi rende meno occupato il canale di trasmissione e il file di log registra pacchetti più frequenti e meno aleatori del nodo mobile.

Risultati Test 2

TEST 2	
NODO 1	72%
NODO 2	28%

In questa misura è particolarmente evidente l'effetto dello schermo costituito dal corrimano metallico della seconda scala che si interpone nel collegamento tra il nodo mobile e il nodo 2. Nonostante si trovi equidistante dai nodi 1 e 2, viene ricevuto più volte il nodo 1 in quanto privo di barriere che attenuano i segnali RF.

Risultati Test 3

TEST 3	
NODO 1	3%
NODO 2	97%

Il nodo mobile riceve nella quasi totalità delle volte il nodo fisso 2, pur presentando qualche influenza del nodo 1 in alcune misure di RSSI.

Osservando globalmente i dati raccolti è rilevante l'effetto di schermo RF delle strutture metalliche e delle pavimentazioni. Nonostante ciò, alcune volte il nodo mobile riceve segnali dal piano superiore o inferiore a causa dell'assenza di un opportuno algoritmo di filtraggio.

Ricorrendo ad una adeguata selezione dei pacchetti si potrebbero eliminare questi indesiderati inconvenienti: misurando la potenza dei segnali provenienti dagli altri piani è possibile costruire un algoritmo software che inserisce una soglia di potenza oltre la quale i pacchetti vengono ignorati, così da selezionare solamente i nodi presenti nello stesso piano in cui si trova il nodo mobile.

In questi ultimi test, con soli tre nodi fissi, il software *Z-Location Engine* contrassegnava quasi sempre i pacchetti ricevuti come "insuccessi", pregiudicando quindi la visualizzazione della posizione nell'interfaccia grafica. Questo problema nasce dal fatto che, essendo presenti solamente tre nodi fissi, il nodo mobile potrebbe non riceverli tutti e quando succede contrassegna il pacchetto come "insuccesso".

Questo fatto non ha pregiudicato le misure, in quanto è stato comunque possibile capire la vicinanza leggendo i dati nel log: il nodo mobile, anche se non può calcolare correttamente la propria posizione, invia SEMPRE l'indirizzo del nodo fisso ad esso più vicino e la sua posizione. Classificando come insuccesso il pacchetto rende impossibile la visualizzazione grafica della sua posizione, ma consente comunque di capire in quale piano si trovi.

La figura seguente mostra un esempio di pacchetto contrassegnato come “insuccesso”, ma contenente l'indirizzo del nodo più vicino e il suo valore di RSSI.

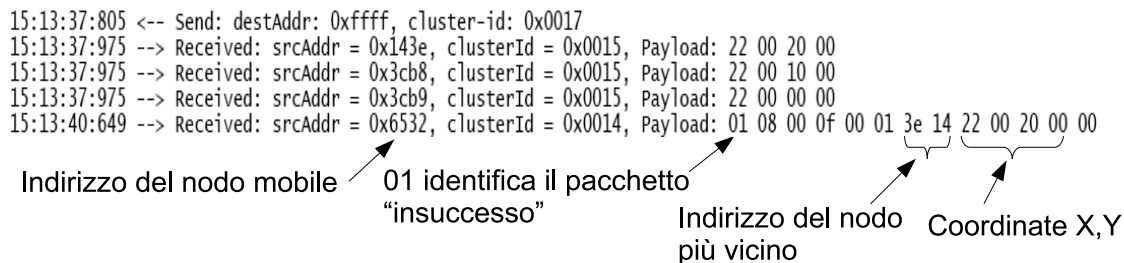


Figura 3.9: Pacchetto dati inviato alla stazione base dal nodo mobile, si nota come l'indirizzo del nodo fisso più vicino sia sempre presente nonostante il pacchetto sia insuccesso.

E' pertanto possibile, filtrando adeguatamente i messaggi, posizionare uno o più nodi fissi in vari piani ed avere la copertura necessaria a localizzare un nodo mobile in altezza, capire ad esempio in quale piano si trovi una persona all'interno di un edificio.

La lettura degli indirizzi, piuttosto che la visualizzazione della posizione grafica, consente inoltre una maggiore stabilità: la lettura del nodo più vicino non risente di valori alterati di RSSI. Essi infatti, compromettendo il calcolo della posizione, sono responsabili degli improvvisi cambiamenti di coordinate visibili nella grafica del software.

E' possibile vedere anche questo risultato come una valida alternativa al sistema RFID per il controllo di varco sui piani di un edificio. In questo caso non viene letto un codice identificativo di un tag, ma un indirizzo esadecimale di un nodo ZigBee stazionario.

3.3 Esperimenti tridimensionali

Le prove precedenti hanno avuto come obiettivo una localizzazione bidimensionale in un singolo piano o su piani distinti disponendo i nodi verticalmente. Vediamo ora, installando quattro nodi orizzontalmente in ogni piano, che tipo di risultati e di precisione si ottengono.

Sono stati utilizzati due piani consecutivi creando due rettangoli ruotati di 45° con quattro nodi fissi ciascuno. La Figura 3.10 rende meglio l'idea sull'installazione:

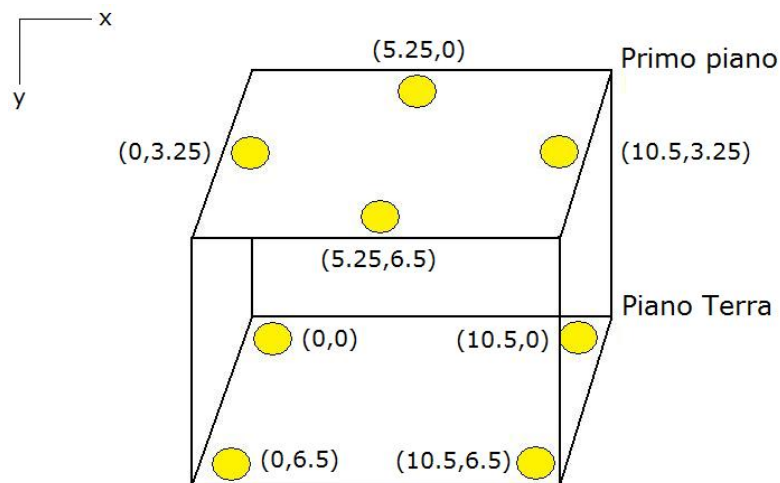


Figura 3.10: Disposizione di 4 nodi fissi per piano, ruotati di 45° . Le coordinate sono espresse in metri.

Il software *Z-Location Engine* non consente la visualizzazione tridimensionale dello spazio, la disposizione mostrata in Figura 3.10 è stata pensata per poter ottenere nel software un'immagine bidimensionale come illustrato in Figura 3.11

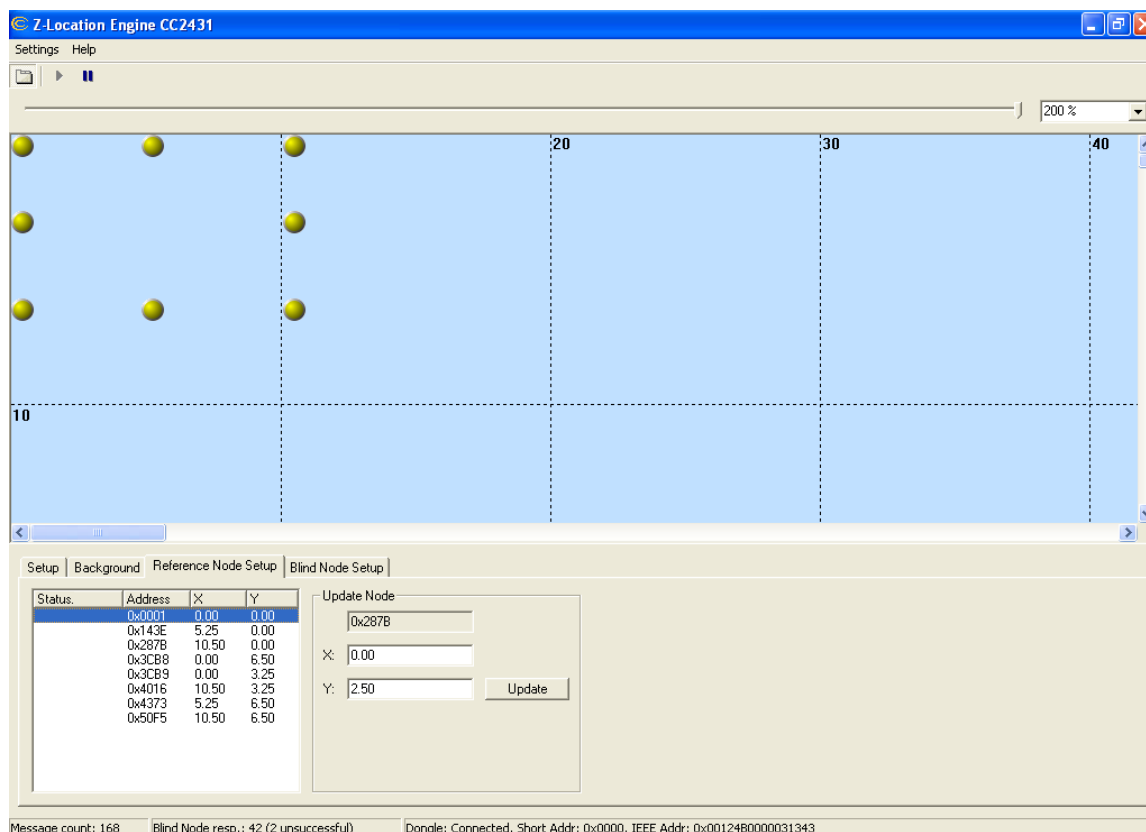


Figura 3.11: Visualizzazione bidimensionale dell'esperimento nel software *Z-Location Engine*.

In questo caso, muovendo il nodo mobile prima nel piano terra e poi nel primo piano, la posizione visualizzata dal software era stimata correttamente, con un errore di circa 3 metri. E' importante notare che i cambi di zona venivano riconosciuti correttamente, anche se l'errore era stimato in un raggio di circa 3-4 metri. Questo errore è in gran parte causato dall'influenza dei nodi presenti nel piano in cui non è posizionato il nodo mobile. Ad esempio, nell'ipotesi che il nodo mobile si trovi nel piano terra in posizione (5.25,0), molto spesso riceverà valori di RSSI maggiori dal nodo che gli sta sopra (presente nel primo piano) piuttosto che dai nodi del suo stesso piano. Figura 3.10.

Per migliorare la precisione si rende opportuna quindi una selezione dei nodi presenti nello stesso piano in cui si muove il nodo mobile, così facendo si ottiene un'accuratezza riconducibile ai casi di localizzazione standard esposti nella Sezione 3.2.

Un software per la localizzazione bidimensionale

I test bidimensionali sui piani, eseguiti sfruttando la lettura del nodo fisso più vicino a quello mobile, hanno suggerito lo sviluppo di un software che con opportune informazioni in ingresso consente il controllo della presenza del nodo mobile in piani diversi.

I dati sui quali si sono basati finora gli studi sono stati ricavati dal file di log che crea il software *Z-Location Engine*. E' necessario quindi trovare un metodo attraverso il quale avere una lettura diretta dei dati che la scheda *SmartRF04EB* invia all'applicazione software installata nel PC. La connessione tra la scheda e il PC avviene tramite la porta seriale RS232 e in essa è presente il flusso di dati necessario al software.

Con l'ausilio di un dispositivo di monitoraggio seriale RS232 è stata rilevata la velocità e la modalità di trasmissione dei dati e, raccogliendo un certo campione di messaggi, è stato possibile decodificare l'informazione grazie anche alla stretta analogia con i dati presenti nel file di log del software TI. In Appendice A.1 viene riportata la descrizione dettagliata della comunicazione e della decodifica dei dati seriali.

Il nodo mobile, responsabile del calcolo e dell'invio della propria posizione, possiede due modi principali di funzionamento:

- *Polled Mode*: l'invio della propria posizione avviene dopo l'interrogazione da parte della stazione base.
- *Auto Mode*: consente al nodo mobile di inviare, ad intervalli di tempo regolari, la propria posizione in modo autonomo.

Scegliendo la modalità automatica, l'applicazione software riceve dalla scheda *SmartRF04EB* una serie di messaggi ad intervalli regolari, consentendo quindi la lettura e l'estrazione delle informazioni necessarie senza bisogno di trasmettere interrogazioni.

Tutti i messaggi sono caratterizzati dall'aver i primi 9 byte riservati all'intestazione (header), nella quale si distinguono i messaggi inviati o ricevuti, l'indirizzo del modulo mittente e l'indicazione sul tipo di informazione contenuta.

Il messaggio che il software deve analizzare è naturalmente quello proveniente dal nodo mobile e distinto nei bit 7-8-9 dal codice esadecimale *d3 14 00*. Tale codice indica che in quel messaggio seguiranno le informazioni di posizionamento destinate alla stazione base.

La Figura 4.1 riporta l'esempio di un messaggio ricevuto dal nodo mobile, contenente il codice che contraddistingue la presenza di informazioni sulla posizione. Vengono inoltre mostrate alcune analogie con file di log creato dal software *Z-Location Engine*.

Z-Location Engine Log:

10:44:18:775 --> Received: srcAddr = 0x6532, clusterId = 0x0014, Payload: 01 00 00 00 00 01 3e 14 22 00 20 00 38

Dati seriali:

02 10 18 14 cb 32 65 d3 14 00 0d 01 00 00 00 00 01 3e 14 22 00 20 00 38 5a

Indirizzo nodo mobile 0X1400: messaggio con posizione Indirizzo nodo più vicino RSSI

Figura 4.1: Confronto tra il file di log e la comunicazione seriale di un messaggio inviato dal nodo mobile.

Grazie alla regolarità e alla lunghezza costante dei messaggi è stato possibile estrapolare le informazioni sul nodo più vicino e sul suo valore di RSSI.

Il software estrae le informazioni eseguendo i seguenti passi:

1. Apertura porta selezionata come ingresso seriale e impostazione di lettura a *38400 Baud*
2. Inizio lettura ad ogni messaggio avente intestazione uguale a *02 10 18*, indicante un pacchetto inviato dal nodo mobile
3. Lettura dei byte 7 – 8 – 9, se l'informazione è equivalente a *d3 14 00* il pacchetto è quello contenente le informazioni necessarie
4. Lettura dei byte 17 – 18, essi contengono l'indirizzo esadecimale del nodo fisso più vicino. Il dato sarà visualizzato nell'interfaccia grafica.
5. Lettura del byte 23 contenente il valore di RSSI, anch'esso visualizzato a display.

Tutti i valori sono in codifica esadecimale. Il range di RSSI varia tipicamente da -40 dBm a -90 dBm, dove -40 dBm è il valore più alto. Nei messaggi viene trasmesso il valore assoluto del dato, che va quindi da 40 a 90.

Per avere una visione in tempo reale sul valore di RSSI e su quale nodo fisso sia più vicino a quello mobile è stata creata un'interfaccia grafica in cui ogni dato viene mantenuto in memoria e visualizzato fino a che non viene aggiornato con un nuovo messaggio in arrivo.

La finestra del programma visualizza le seguenti informazioni :

- Selezione del numero di porta seriale connessa alla scheda *SmartRF04EB*
- Connessione o disconnessione del collegamento
- Indirizzo del nodo fisso più vicino al nodo mobile
- Valore di RSSI
- Finestra terminale che stampa a video in tempo reale il flusso di messaggi in arrivo

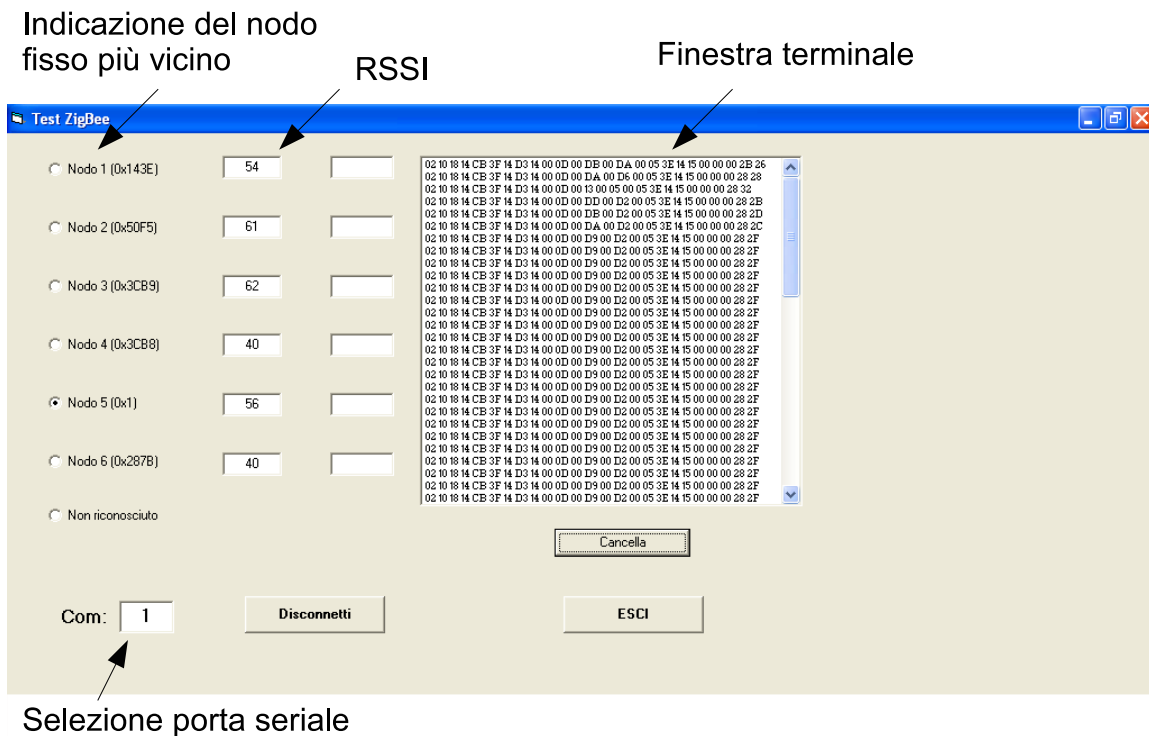


Figura 4.2: Interfaccia grafica del software di localizzazione realizzato.

La Figura 4.2 mostra l'interfaccia grafica del software realizzato.

E' importante notare, a differenza del software *Z-Location Engine*, che in questo caso viene ignorato il byte 11 che indica se il pacchetto è utilizzabile o meno. Anche se il messaggio è classificato "insuccesso", a causa della mancata triangolazione con almeno tre nodi fissi, il software realizzato legge in ogni caso l'indirizzo del nodo più vicino.

La versione del programma realizzata è molto essenziale, ma permette di eseguire i test di localizzazione bidimensionale sui piani senza la scomodità di leggere il file di log a fine prove.

Utilizzando questo tipo di approccio, basato sulla vicinanza ai nodi fissi, è interessante notare come sia privilegiata la stabilità delle letture. Anche nei casi in cui il nodo mobile si trova fermo in un punto, esso segnala sempre lo stesso nodo vicino, aggiornando, e a volte cambiando, solo il valore di RSSI. In questo modo si semplifica molto il concetto di localizzazione, diventando in pratica un controllo sugli accessi dei piani, ma vengono meno anche tutte quelle problematiche

di flessioni ed attenuazioni RF che affliggono il calcolo di posizione col metodo basato sulla misura della potenza ricevuta (RSSI).

Questo metodo alternativo, associato al software realizzato, si presta quindi a tutte quelle applicazioni di localizzazione che richiedono dispositivi a basso costo e a basso consumo in cui non è necessaria la conoscenza precisa delle coordinate di un nodo mobile, ma in cui c'è la necessità ad esempio di controllare gli accessi ai piani di un edificio.

Soluzioni di localizzazione tridimensionale

L'hardware di *location engine*, presente nel modulo CC2431, è stato sviluppato per il calcolo di posizioni in due dimensioni. Grazie ai risultati dei test precedenti, questo capitolo fornisce un metodo affinché la localizzazione possa essere estesa via software in modo da ottenere anche la terza coordinata, per conoscere ad esempio i piani di un edificio. L'obiettivo sarà quindi di ottenere una terna di coordinate (X,Y,Z) con le quali avere una stima tridimensionale della posizione di un nodo mobile.

5.1 Algoritmo 3D

Abbiamo precedentemente visto come l'hardware del modulo CC2431 calcoli, sotto opportune condizioni, le coordinate bidimensionali (X,Y) . Per indicare anche l'altezza serve aggiungere una terza coordinata, indicata con la lettera Z . Per la maggior parte degli utilizzi sarà sufficiente rappresentare Z con un byte, in questo modo si ottengono 256 differenti livelli.

Assumiamo che la potenza del segnale ricevuto da un nodo posto in un altro piano sia inferiore rispetto alla potenza del segnale di un nodo presente nello stesso piano di quello mobile, questo implica che la densità di nodi fissi sarà abbastanza alta (Sezione 3.3). Non è però possibile assumere che tutti i nodi fissi dello stesso

piano siano più forti, in un punto, di tutti i nodi presenti negli altri piani.

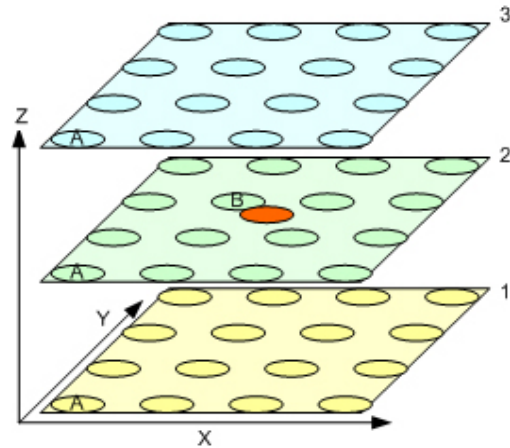


Figura 5.1: Posizione in una rete di sensori tridimensionale.[4]

La Figura 5.1 mostra una rete di sensori utilizzata per eseguire il tracking su diversi livelli. I tre nodi denominati con la lettera "A" hanno tutti le stesse coordinate X e Y, ma diversa Z. Tutti i nodi dello stesso colore hanno la stessa Z, ma diverse X,Y.

Consideriamo l'importante risultato ottenuto nei precedenti test, ovvero la capacità di segnalare il nodo più vicino da parte del nodo mobile. Si assuma di attribuire, oltre alle coordinate X,Y anche un valore Z ai nodi fissi, che è l'indicazione del livello (o piano) in cui si trovano.

Un algoritmo che può essere utilizzato consiste in primo luogo nel trovare il nodo fisso più vicino e leggerne l'indicazione del livello (valore Z) riportato da questo nodo. Questo valore di Z è assunto come il livello in cui si trova il nodo mobile. Il nodo mobile deve essere sicuro di utilizzare solamente i nodi presenti nel suo stesso piano per il calcolo della posizione. Sarà quindi compito dell'algoritmo selezionare quali nodi fissi dovranno essere utilizzati, e il nodo mobile accetterà solamente questi ultimi per calcolare RSSI e coordinate. Questo può essere ottenuto in diversi modi e, cambiando assunzioni, possono essere implementati altri tipi di algoritmi. L'indicazione del livello aggiunge solamente un criterio a questo algoritmo.

In questo esempio viene assunto che i nodi fissi più vicini forniranno al nodo mobile i segnali più forti. La Figura 5.1 mostra una rete di nodi distribuiti su tre piani. Il nodo rosso nel secondo piano rappresenta il nodo mobile. L'algoritmo che segue descrive gli step da eseguire in questo caso:

- Ricerca del nodo fisso più vicino (nodo B in Figura 5.1).
- Questo nodo comunicherà al nodo mobile il suo valore di Z.
- Il nodo mobile assume quindi di essere al piano 2.
- Per il calcolo della posizione verranno considerati SOLO i nodi fissi con il valore Z del nodo più vicino.
- Viene calcolata la posizione (X,Y) normalmente con l'*engine* di calcolo del modulo CC2431.
- Viene trasmessa la posizione (X,Y) alla stazione base, con l'aggiunta del livello Z ricevuto all'inizio.

Un possibile limite di questo algoritmo è la maggior latenza dei dati a causa della selezione dei nodi con lo stesso Z. Selezionando i nodi di un unico piano abbiamo però il vantaggio di limitare tutti quei problemi di attenuazione e riflessione visti nelle Sezioni 3.2 - 3.3.

5.2 Filtraggio dei pacchetti dati

Quando il modulo CC2431 riceve un pacchetto dati, attribuisce automaticamente un valore di RSSI al pacchetto ricevuto. Il valore di RSSI è sempre dato dalla media dei primi otto simboli di periodo ($128 \mu s$) e rappresentato da un byte (*signed* in complemento a due).

Anche se il valore di RSSI è calcolato nello stesso tempo in cui viene ricevuto il pacchetto dati, l'RSSI sarà l'intensità della potenza del segnale ricevuto in quel momento, non necessariamente la potenza di quel determinato dato ricevuto. Questo fatto può rendere errato il valore di RSSI quando un consistente numero

di nodi trasmettono nello stesso canale e nello stesso tempo in cui viene prelevato il valore di RSSI.

La potenza del segnale ricevuto è una funzione logaritmica tra la potenza trasmessa e la distanza fra nodo fisso e mobile. Il suo valore è inversamente proporzionale alla distanza, in accordo con la Formula 5.1, in cui n è la costante di propagazione, d la distanza dal trasmettitore, A potenza del segnale ricevuto ad un metro di distanza.

$$RSSI = -(10n \log_{10} d + A) \quad (5.1)$$

Quando si utilizza la formula matematica ideale 5.1 è molto semplice il calcolo esatto del valore di RSSI, ma nelle prove empiriche reali bisogna tenere in considerazione una percentuale di incertezza causata da tutta una serie di eventi ambientali visti nei capitoli precedenti. Molte di queste incertezze vengono gestite dall' hardware, ma alcuni software possono essere utilmente impiegati per incrementare l'accuratezza. I metodi presentati in questa sezione hanno l' obiettivo di ottenere un valore di RSSI che sia correlato nel miglior modo possibile alla distanza.

Possono essere utilizzati diversi filtri per linearizzare le misure di RSSI. I due filtri più comuni sono il filtro *media* e il filtro *feedback*. Il filtro base che calcola la media richiede la lettura di molti pacchetti, mentre il filtro *feedback* usa solo una piccola parte del valore più recente di RSSI per i calcoli, incrementando però la latenza nel calcolo di una nuova posizione. La media di RSSI è semplicemente calcolata utilizzando alcuni pacchetti dati da ogni nodo fisso in accordo con l'equazione sottostante.

$$\overline{RSSI} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} RSSI_i \quad (5.2)$$

Un' altra possibilità di filtraggio è data dal filtro approssimatore, che può essere realizzato come indicato dalla 5.3. In questa equazione la variabile a è tipicamente 0.75 o superiore. Questo approccio assicura che vengano eliminate le grandi differenze di RSSI.

$$RSSI_n = a \cdot RSSI_n + (1 - a) \cdot RSSI_{n-1} \quad (5.3)$$

Questo metodo non è consigliabile per nodi mobili che compiono lunghe distanze tra due calcoli di posizione.

Oltre a questi metodi, possono essere presi in considerazione algoritmi più complessi [1] in relazione all'applicazione e all'accuratezza di posizione richiesta.

CAPITOLO 6

Conclusioni

Le prove sperimentali hanno evidenziato come la tecnologia di localizzazione basata sulla potenza del segnale ricevuto (RSSI) sia poco precisa in determinate circostanze, nonostante possieda importanti vantaggi come la semplicità di utilizzo, i bassi costi e consumi.

Alcuni problemi si riscontrano nel momento in cui mezzi diversi dallo spazio libero attenuano e riflettono i segnali radio, riducendo la precisione nel calcolo delle posizioni. Le fluttuazioni dinamiche dei segnali radio si verificano soprattutto durante il movimento dei nodi mobili ed inoltre è stato sperimentato come in presenza di movimenti più rapidi si verificano maggiori fluttuazioni delle misure. Algoritmi di filtraggio da utilizzare nei software installati nella stazione base possono sicuramente migliorare sensibilmente la precisione delle misure, ma in presenza di ambienti dinamici può essere adottata la soluzione di utilizzare contemporaneamente numerose informazioni di localizzazione (stream sensoriali). Sfruttando la diversità delle caratteristiche degli errori degli stream sensoriali, l'obiettivo è realizzare moduli dotati di diversi tipi di sensing metrici (RSSI, TDoA, AoA) ricercando il compromesso migliore tra costi e precisione. In questo modo si ottengono risultati complessivi migliori di quelli ottenibili con ciascuno dei singoli sensori, come confermato in altri lavori come [6].

Nella localizzazione a piani le strutture che si interpongono tra i nodi concorrono ad accentuare i limiti del sistema RSSI, ma la soluzione ZigBee si rivela una valida alternativa alla tecnologia RFID per il controllo di varco anche sui piani. In questo caso, durante il transito in prossimità di un nodo fisso, sarà letto l'indirizzo esadecimale di un nodo ZigBee piuttosto che il codice identificativo di un tag. I risultati positivi anche nei test tridimensionali consentono lo sviluppo di un algoritmo 3D da implementare in un sistema RSSI, eventualmente supportato da algoritmi di filtraggio o dotando i moduli di ulteriori sensing per incrementarne la precisione.

A.1 La comunicazione seriale tra *SmartRF04EB* e PC

La stazione base, attraverso la quale avviene l'interazione con la rete di sensori ZigBee, è costituita da un computer a cui è connessa la scheda *SmartRF04EB* provvista del modulo RF (CC2430 o CC2431). La comunicazione avviene attraverso la porta seriale RS232, mentre l'alimentazione della scheda può essere fornita dall'esterno o dal PC grazie alla connessione USB. Questa connessione può essere utilizzata anche per operazioni di debugging o di download avanzato dei moduli.

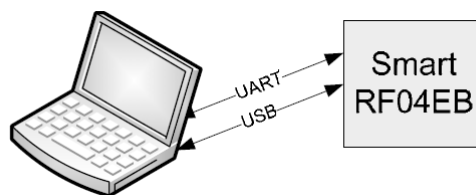


Figura A.1: Collegamento seriale e USB tra PC e *SmartRF04EB*.

La stazione base è un nodo ZigBee a tutti gli effetti ed è parte integrante della rete di sensori. Questo nodo è utilizzato per gestire i messaggi della rete e gli altri nodi la usano per indirizzare i pacchetti all'applicazione nel PC.

In particolare, per poter sviluppare il software descritto nel Cap. 4, si è reso necessario conoscere il flusso di informazione tra la *SmartRF04EB* e il PC. Allo scopo è stato utilizzato un dispositivo *sniffer* RS232 che, collegato in serie al cavo seriale, leggesse il flusso di dati e lo visualizzasse sullo schermo del PC.

Dopo aver creato una rete di nodi e stabilite le connessioni della stazione base sono stati effettuati alcuni tentativi per trovare il corretto *Baud-Rate* e la comunicazione è stata intercettata a *38400 Baud N81 (No parity, 8 bits + 1 stop)*.

Per poter effettuare la codifica è stato preso un campione di pacchetti, di cui viene riportato un estratto in Figura A.2:

Z-Location Engine Log:

```
10:44:17:704 <-- Send: destAddr: 0xffff, cluster-id: 0x0017
10:44:17:914 --> Received: srcAddr = 0x143e, clusterId = 0x0015, Payload: 22 00 20 00
10:44:18:775 --> Received: srcAddr = 0x6532, clusterId = 0x0014, Payload: 01 00 00 00 00 01 3e 14 22 00 20 00 38
```

Dati seriali:

```
02 00 18 07 cb ff ff ca 17 00 00 09
02 10 18 0b cb 3e 14 d2 15 00 04 22 00 20 00 23
02 10 18 14 cb 32 65 d3 14 00 0d 01 00 00 00 00 01 3e 14 22 00 20 00 38 5a
```

Figura A.2: Esempio di comunicazione seriale e confronto con il log dell'applicazione software.

Si nota come l'informazione sia in formato esadecimale e analoga a quella reperibile nel file di log creato dal software *Z-Location Engine*.

Analizzando le somiglianze e cercando di interpretare le intestazioni dei pacchetti è stato possibile arrivare ad una decodifica completa dell'informazione, le caratteristiche dei primi 9 byte di intestazione validi per tutti i messaggi sono riassunte in Tabella A.1:

BYTE	DESCRIZIONE
0-1-2	Header (distingue pacchetti inviati o ricevuti)
3	Lunghezza stringa + 1
4-5-6	Indirizzo del modulo mittente
7-8-9	Indicatore dell'informazione contenuta nel seguito

Tabella A.1: Descrizione dei byte di intestazione di ogni pacchetto nella comunicazione seriale.

In particolare, i messaggi più importanti utilizzati per il software di localizzazione bidimensionale, sono quelli provenienti dal nodo mobile e contenenti le coordinate X,Y, l'indirizzo del nodo ad esso più vicino e il valore di RSSI. Tali messaggi sono così costituiti:

BYTE	DESCRIZIONE
10	Inizio trasferimento dati
11	Status: 0 successo - 1 insuccesso
12-13	Coordinata X
14-15	Coordinata Y
16	Numero di nodi fissi utilizzati per il calcolo
17-18	Indirizzo del nodo fisso più vicino
19-20	Coordinata X
21-22	Coordinata Y
23	Valore RSSI

Tabella A.2: Descrizione dei byte utilizzati dal nodo mobile nella comunicazione seriale.

Le informazioni principali necessarie alla localizzazione sono quindi contenute in quei pacchetti aventi nei byte 7-8-9 il valore esadecimale $d3\ 14\ 00$, che identifica il messaggio inviato dal nodo mobile contenente le informazioni utili ad individuare la posizione. La Figura A.3 mostra un esempio di tale pacchetto dati:

Z-Location Engine Log:

10:44:18:775 --> Received: srcAddr = 0x6532, clusterId = 0x0014, Payload: 01 00 00 00 00 01 3e 14 22 00 20 00 38

Dati seriali:

02 10 18 14 cb 32 65 d3 14 00 0d 01 00 00 00 00 01 3e 14 22 00 20 00 38 5a

Indirizzo nodo mobile X Y Indirizzo nodo più vicino RSSI

Figura A.3: Confronto tra il file di log e la comunicazione seriale di un messaggio inviato dal nodo mobile.

Bibliografia

- [1] Erin-Ee-Lin Lau, Boon-Giin Lee, Seung Chul Lee Wan Young Chung: *Enhanced RSSI-based high accuracy real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments*. International journal on smart sensing and intelligent systems, Vol.1, No.2, june 2008.
- [2] Goldoni, Emanuele: *Wireless Sensors Networks*, 2008. Laboratorio Reti Università di Pavia.
- [3] Heile, Bob: *ZigBee Alliane Overview*, 2009. www.zigbee.org.
- [4] K. Aamodt, Chipcon Products from Texas Instruments: *Application Note AN042 CC2431 Location Engine*.
- [5] Mauri Kuorilenhto, Mikko Kohvakka, Jukka Suhonen Panu Hämäläinen Marko Hännikäinen Timo D. Hämäläinen: *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice*. Wiley, 2007.
- [6] Merico, Davide: *Localizzazione e tracciamento indoor con e senza infrastrutture*, 2008. Università degli Studi di Milano-Bicocca.
- [7] Michel Banâtre, Pedro José Marrón, Anibal Ollero Adam Wolisz: *Cooperating Embedded Systems and Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2008.

Bibliography

- [8] Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince Chook Stefano Chessa Alberto Gotta Y. Fun Hu: *Wireless Sensor Networks: a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards*. IEEE.
- [9] Peter Forstner, MSP430 FAE Europe Texas Instruments: *MSP430 Goes ZigBee/802.15.4*, 2006. MSP430 Advanced Technical Conference 2006.
- [10] Ralf Grossman, Jan Blumenthal, Frank Golatowski Dirk Timmermann: *Localization in ZigBee-based Sensor Network*. 2007. University of Rostock.
- [11] Stojmenović, Ivan: *Handbook of sensor networks. Algorithms and architectures*. Wiley, 2005.
- [12] Texas, Instruments: *Introduction to SimplicityTI*, 2008. <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/simpliciti.html>.
- [13] Texas Instruments, Chipcon Products from: *Application Note SWRS034B: System-On-Chip for 2.4 Ghz ZigBee/IEEE 802.15.4 with Location Engine*.
- [14] Texas Instruments, Chipcon Products from: *Application Note SWRU076D: CC2431DK User Manual Rev. 1.5*.
- [15] Texas Instruments, Chipcon Products from: *Z-Stack User's Guide For CC2431ZDK*, 2006. <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/z-stack.html>.
- [16] Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>.
- [17] Wikipedia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless sensor network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network).

Ringraziamenti

Ringrazio Euro-Link per l'opportunità di tirocinio su questo lavoro e per il loro contributo alla mia formazione nel corso degli anni.

Ringrazio il Prof. Vangelista per la grande disponibilità e cortesia dimostrata.

Un ringraziamento speciale ai miei genitori per la loro fiducia nei miei confronti e per tutte le opportunità che mi hanno permesso di realizzare.