UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Elettronica

Studio e sviluppo di soluzioni Industrial IoT per il tracciamento di asset produttivi

Study and development of Industrial Iot solutions for the tracking of productive assets

Relatore:

Chiar.ma Prof.ssa Pierleoni Paola

Tesi di Laurea di:

Di Paolo Michele

A.A. 2020 / 2021

Indice

Introduzione ..... **- 4 -**

PARTE I STATO DELL'ARTE ..... **- 5 -**

1 Iot ..... **- 6 -**

2 Asset Tracking ..... **- 7 -**

2.1 Settore Manifatturiero ..... - 7 -

2.2 Settore Ospedaliero ..... - 8 -

2.3 Logistica ..... - 8 -

3 Sistemi di Tracciamento ..... **- 9 -**

3.1 GPS ..... - 9 -

3.1.1 Vantaggi e svantaggi ..... - 11 -

3.2 RFID ..... - 12 -

3.2.1 Metodi di Utilizzo ..... - 13 -

3.2.2 Tag Attivi ..... - 13 -

3.2.3 Tag Passivi ..... - 14 -

3.2.4 Lettori RFID ..... - 14 -

3.2.6 Metodi di Tracciamento ..... - 15 -

3.2.6 Vantaggi e Svantaggi ..... - 16 -

3.3 UWB ..... - 17 -

3.3.1 Metodi di Utilizzo ..... - 18 -

3.3.2 Vantaggi e Svantaggi ..... - 21 -

3.4 Beacon ..... - 22 -

3.4.1 Modalità di Tracciamento ..... - 23 -

3.4.2 Caratteristiche ..... - 24 -

3.5 Implementazione industriale ..... - 25 -

3.6 Perchè scegliere Beacon BLE ..... - 27 -

PARTE II PROTOCOLLI DI COMUNICAZIONE ..... **- 29 -**

4 Bluetooth Low Energy ..... **- 30 -**

4.1 Physical Layer (PHY) ..... - 32 -

4.2 Link Layer ..... - 32 -

4.3 Host Controller Interface ..... - 33 -

4.4 L2CAP ..... - 33 -

4.5 Security Manager ..... - 34 -

4.6 ATT ..... - 34 -

4.7 GATT ..... - 34 -

4.8 GAP ..... - 35 -

4.9 Sicurezza ..... - 35 -

4.10 Advertising ..... - 36 -

4.11 Struttura di un Pacchetto Beacon ..... - 37 -
4.12 Protocollo Dati ..... - 38 -
4.12.1 iBeacon ..... - 38 -
4.12.2 Eddystone ..... - 40 -
4.13 Differenze di comunicazione tra BLE ..... - 42 -
5 MQTT ..... - 43 -
5.1 Formato Messaggio ..... - 44 -
5.2 QOS ..... - 45 -
PARTE III TECNICA DI FILTRAGGIO ..... - 47 -
6 RSSI ..... - 48 -
6.1 Relazione Distanza-RSSI ..... - 48 -
6.2 Multipath ..... - 49 -
7 Filtro di Kalman ..... - 49 -
7.1 Filtro di Kalman 1D ..... - 53 -
7.2 Filtro di Kalman in presenza di un ostacolo ..... - 54 -
8 LULU Filter ..... - 55 -
8.1 Applicazione del LuLu Smoother ..... - 57 -
9 KALMAN-LULU ..... - 58 -
PARTE IV SOLUZIONE IMPLEMENTATIVA ..... - 60 -
10 Soluzione Industrial Iot per l'Asset Tracking: Progettazione e Sviluppo ..... - 61 -
10.1 Beacon E8 ..... - 62 -
10.2 Gateway G1 ..... - 63 -
10.3 Settaggio dei dispositivi ..... - 64 -
10.4 Paho Client ..... - 68 -
10.5 Filtro di Kalman ..... - 70 -
10.5 LULU Smoother ..... - 72 -
10.6 Procedura Sperimentale ..... - 73 -
10.7 Risultati Prove ..... - 74 -
11 Trilaterazione ..... - 78 -
CONCLUSIONI ..... - 80 -
BIBLIOGRAFIA ..... - 81 -

Introduzione

Con lo sviluppo e la diffusione di dispositivi mobili e comunicazioni wireless, il concetto di Internet of things (IoT) negli ultimi anni si è diffuso a larga scala in edifici, case, aziende e molti altri ambienti interni, che sono diventati una nuova piattaforma in cui i dispositivi elettronici possono condividere dati e informazioni per migliorare concetti che vanno dalla logistica nei magazzini alla qualità della vita. Uno degli ambiti in maggior sviluppo attraverso applicazioni Iot è quello dell'Asset Tracking, cioè la localizzazione interna in tempo reale per il monitoraggio delle risorse attraverso la rete di sensori wireless. Per avere buone prestazioni, è essenziale disporre di hardware affidabili; infatti, molti studi si sono focalizzati sulla tecnologia di posizionamento utilizzando Global Positioning System (GPS), Radio Frequency Identification (RFID) o ultra-wide band (UWB) ma poca attenzione è stata prestata all'applicazione industriale della localizzazione tramite Bluetooth. Il Bluetooth è una tecnologia wireless introdotta per lo scambio dei dati ed è diventata uno degli elementi principali dell'IoT, soprattutto dall'introduzione dello standard del Bluetooth Low Energy, che ha reso possibile numerose applicazioni completamente nuove. Una delle principali è quella dei Beacon, il cui funzionamento è relativamente semplice: inviano un segnale che viene ricevuto da altri dispositivi Bluetooth presenti nell'area. Nella suddetta tesi viene riportato uno studio su quali sono le tecnologie utilizzabili e un confronto tra le prestazioni, infine viene mostrato il progetto di tesi che mira a proporre un sistema di posizionamento interno con l'utilizzo di Beacon Bluetooth per il tracciamento delle risorse in ambiente industriale, utilizzando i valori RSSI (Received Signal Strength Indicators) inviati da Beacon Bluetooth, ricevuti da un Gateway WiFi/Bluetooth e trasmessi tramite protocollo MQTT ad un broker attivo su un elaboratore, per poi essere filtrati dal Kalman-LULU filter e processati per ricavare la distanza Beacon e Gateway.

Nella prima parte si spiega il fenomeno dell'Iot, si introduce il concetto di tracciamento delle risorse per poi elencare in quali settori si sta diffondendo infine si riporta la descrizione e le funzionalità dei sistemi di tracciamento più utilizzati. Nella seconda parte si spiega l'architettura del protocollo Bluetooth Low Energy e delle sue funzionalità. Nella terza parte della tesi viene descritta la tecnica di filtraggio, il filtro utilizzato e in che modo si riescono a tracciare i Beacon. Infine, nell'ultima parte la procedura operativa per le prove di misura e i risultati ottenuti.

PARTE I STATO DELL'ARTE

1 Iot

Con Internet of Things (IoT) o Internet delle Cose, si intende quel percorso nello sviluppo tecnologico in base al quale, attraverso la rete Internet, potenzialmente ogni oggetto utilizzato quotidianamente acquista una sua identità nel mondo digitale e permette di avere un collegamento tra il mondo virtuale e quello reale.

L'IoT rappresenta la connettività della tecnologia moderna e la crescente rete di dispositivi in grado di comunicare tra loro senza utilizza cavi. Si basa sull'idea di oggetti "intelligenti" tra loro interconnessi in modo da scambiare le informazioni raccolte, elaborarle e memorizzarle, fornendo delle soluzioni tempestive e rapide qualora ci si trovi dinanzi a mutamenti all'interno dei processi operazionali. l'IoT sta già rivoluzionando il modo in cui molte realtà operano. Le aziende che scelgono di reingegnerizzare i loro processi investendo nell'IoT integrano una tracciabilità e una rintracciabilità a prova di errore, portando una serie di vantaggi economici poiché si migliora l'efficienza operazionale e, conseguentemente, la produzione in quanto si ottiene un risparmio in termini di costi e di tempi, avendo una coordinazione delle operazioni più efficiente e veloce dove l'analisi delle attività e dei processi di decision making sono decentralizzate. L'IoT permette di disporre di un nuovo modus operandi più efficiente che mette insieme tutte le tecnologie fino ad ora analizzate. Va, inoltre, aggiunto che tutte le tecnologie dell'Internet of things procura nuovi vantaggi in termini di produzione e di qualità della stessa, essendoci una maggiore disponibilità di queste stesse tecnologie per le imprese dovuta alla accessibilità in termini di costi grazie ai finanziamenti messi a disposizione e viene garantito un buon funzionamento grazie al personale esperto. I dispositivi che fanno parte della rete di oggetti sono chiamati smart objects o smart things, che a differenza dei normali dispositivi possiedono la capacità di poter interagire all'interno del sistema di comunicazione in cui sono inseriti: hanno quindi un ruolo attivo. La concretizzazione del significato dell'IoT è resa possibile grazie a tecnologie abilitanti come WSN (Wireless Sensor Networks), utilizzate soprattutto per operazioni di sensing. I nodi di una WSN sono dei sensori, disposti all'interno di un ambiente, con lo scopo di rilevare determinati dati, inviarli per esempio a un calcolatore o un altro sensore affinché essi vengano elaborati.

2 Asset Tracking

Il monitoraggio della posizione dei beni materiali, detto “Asset Tracking” è uno degli aspetti in forte sviluppo in diversi settori, perché aumenta di conseguenza la qualità del lavoro, velocizzando i processi ed è diffuso in ambienti indoor. Opera sia scansionando le etichette dei codici a barre attaccate alle risorse o utilizzando tag o dispositivi che implementano diverse tecnologie (GPS, BLE, RFID, UWB) in grado di trasmettere dati utili per elaborare la loro posizione. Ognuno di essi ha i propri vantaggi e svantaggi per quanto riguarda la precisione, il prezzo, la copertura del segnale e così via. Spetta sempre al cliente decidere che tipo di prestazioni si aspetta dal sistema di tracking. In questo capitolo si descrivono in quali settori viene maggiormente utilizzato.

2.1 Settore Manifatturiero

Le industrie manifatturiere sono tenute ad aumentare sempre di più la qualità dei loro prodotti vista l’alta concorrenza nel settore e le loro catene di produzione sono frammentate in quanto vengono lavorati diversi prodotti. I processi di produzione di solito prevedono un ambiente indoor e coinvolgono tonnellate di materiale che viene spostato continuamente. L'efficienza delle operazioni di produzione e di costruzione può essere seriamente influenzata dalla quantità di tempo speso alla ricerca di oggetti mal riposti, di seguito denominati asset. La soluzione a questo tipo di problema porta ai sistemi di posizionamento che possono fornire ai manager e ai lavoratori informazioni su come i beni vengono spostati all'interno della fabbrica, su dove sono immagazzinati e dove sono necessari. Questo sistema può ridurre il rischio di incidenti all'interno di una fabbrica, aiutando i lavoratori a muoversi in modo più sicuro all'interno dell'ambiente fornendo il percorso migliore e verificare la disponibilità o la mobilità dei prodotti. Gli asset che non raggiungono la catena di produzione possono portare all'interruzione dell'intero processo e quindi al rallentamento della produzione [1]; quindi, il poter identificare la posizione di un oggetto permette di trovarlo velocemente quando è necessario. Il tempo risparmiato può essere speso in modo più consono per ottimizzare il processo decisionale durante le attività di produzione e costruzione, migliorando così l'efficienza e la reattività.

2.2 Settore Ospedaliero

Gli ospedali sono strutture nelle quali la quantità di persone e strumentazione è molto elevata. L'utilizzo di un buon sistema di asset tracking non solo migliora la qualità del trattamento dei pazienti, ma influenza anche i risultati di interventi in situazioni di emergenza. Le infermiere sono generalmente incaricate della gestione degli inventari sia delle attrezzature che medicinali nei siti medici, e quando i loro turni finiscono, trasferiscono la responsabilità delle attrezzature nei loro reparti alle colleghe nel prossimo turno. Pertanto, una gestione efficace dei prodotti di base e una riduzione del tempo necessario per il loro trasferimento tra infermieri non solo aumenterebbe il tempo a disposizione per la fornitura di cure ai pazienti, ma migliorerebbe anche la qualità dell'assistenza. La gestione del personale medico è un altro punto fondamentale visto che l'interazione con i pazienti è uno degli aspetti vitali nella gestione di un ospedale. Un sistema di tracciamento può fornire una gestione più dinamica del personale. Medici e infermieri possono essere meglio collocati nei reparti giusti e con il loro tempo meglio gestito [2].

2.3 Logistica

Il sistema di asset tracking all'interno di un magazzino permette di verificare se una serie di prodotti sia stata trasportata oppure giace ancora internamente. I magazzinieri possono ottenere dati in tempo reale e tenere d'occhio il posizionamento della merce. Non dover considerare lo scaffale o la sezione destinata ad un oggetto permette di riporlo in quella più pratica. In modo simile, gli operatori possono localizzare in modo facile uno specifico elemento quando ne hanno bisogno. Merce di clienti diversi può essere posizionata vicino senza la preoccupazione di doverla confondere, permettendo un immagazzinamento più veloce ed efficace essendo posizionati su di loro tag differenti. Un altro punto cruciale sono le merci costose che possono essere monitorate in modo efficiente e il rischio di smarrimento, cattiva gestione e furto può essere ridotto in misura maggiore. Ultimo ma non meno importante, il monitoraggio consente la differenziazione tra stock vecchi e nuovi e inventari istantanei e intelligenti possono essere generati in qualsiasi momento utilizzando dati in tempo reale.

3 Sistemi di Tracciamento

I sistemi di localizzazione e tracciamento più diffusi sono l'utilizzo della tecnologia RFID (Radio Frequency Identification), il GPS (Global Positioning System) e UWB (Ultra-Wide Band) comunemente utilizzati nella stima delle informazioni sulla distanza degli oggetti, hanno diversi punti di forza e limitazioni nelle applicazioni. In questo capitolo verranno descritte ed elencate le loro caratteristiche e riportate delle prove di utilizzo in ambito industriale.

3.1 GPS

GPS (Global Positioning System) è un sistema di navigazione satellitare realizzato e controllato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America. La nascita di questo sistema è legata ad esigenze prettamente militari. Il GPS genera segnali opportunamente codificati che possono essere elaborati in un ricevitore GPS in modo tale da fornire dati per il calcolo di posizione, velocità e tempo. Il principio di funzionamento della geolocalizzazione satellitare si basa su un metodo di posizionamento sferico, detto trilaterazione (Figura 1), che sfrutta la misura del tempo impiegato da un segnale radio a percorrere la distanza tra satellite e ricevitore per calcolare la posizione del ricevitore GPS.

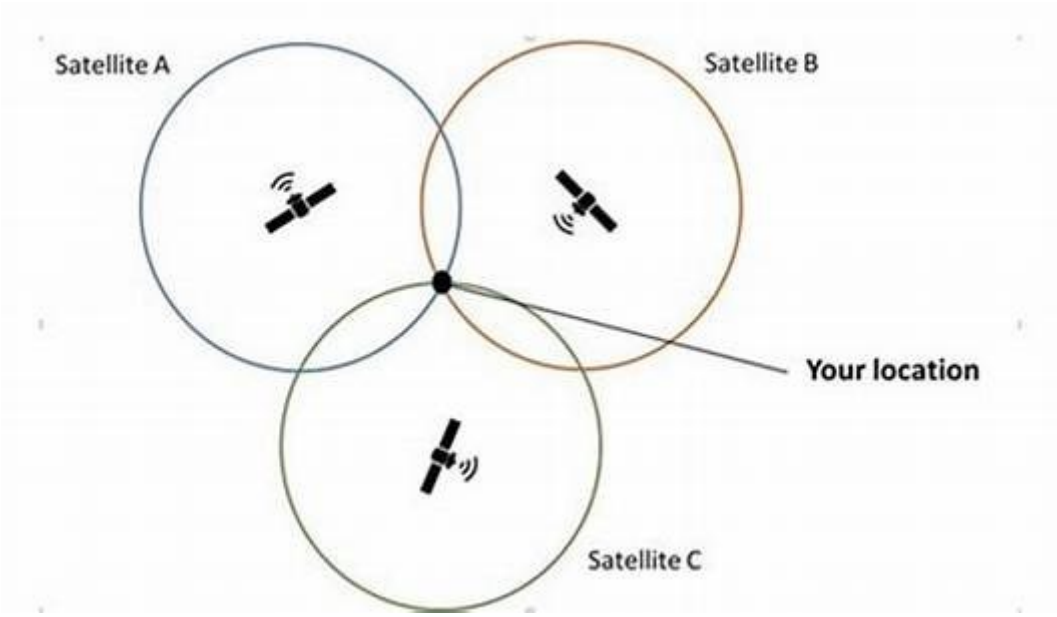

Figura 1: Metodo della trilaterazione

I satelliti trasmettono su due frequenze, 1574,42 MHz e 1227,60 MHz con una potenza in trasmissione di 20 – 50 W utilizzando la tecnologia spread spectrum.

Ogni satellite trasmette un segnale che contiene informazioni di identificazione, di posizione corrente e dell'istante temporale di trasmissione del messaggio. Il ricevitore elabora il segnale dei satelliti, e determina il tempo impiegato per percorrere il tratto satellite-ricevitore. Sulla base del ritardo di propagazione viene determinata la distanza ricevitore-satellite.

Il clock interno al ricevitore ha una sua precisione (costi contenuti) che condiziona le prestazioni: la ricezione del quarto satellite è necessaria per correggere l'errore introdotto dal clock interno. La localizzazione pertanto è attendibile a patto che il ricevitore riesca a captare il segnale da almeno quattro satelliti distinti.

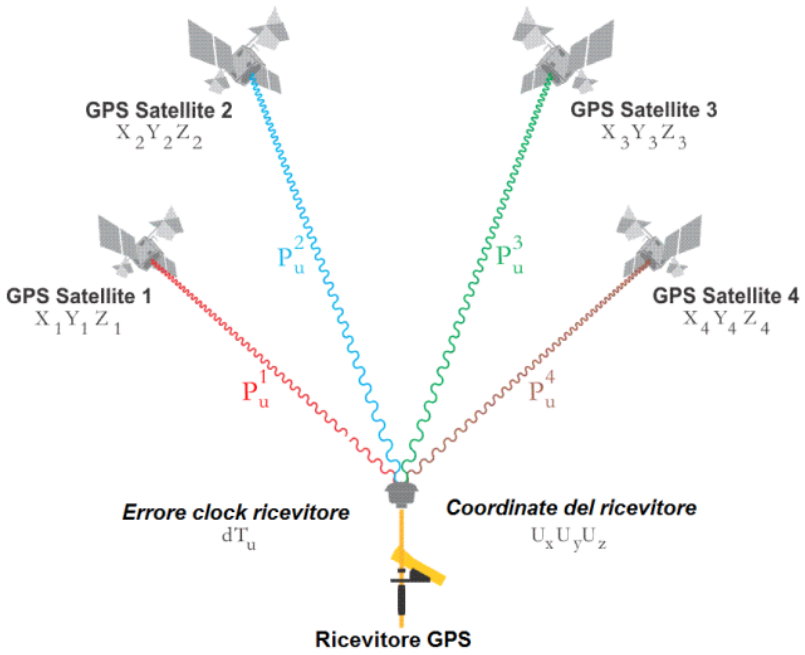

Figura 2: Ricezione dei segnali GPS

Le equazioni che vengono risolte per approssimare la posizione di un ricevitore utilizzando il GPS sono:

$$p_u^1 = \sqrt{(X_1 - U_x)^2 - (Y_1 - U_y)^2 - (Z_1 - U_z)^2} + c(dT_u)$$
$$p_u^2 = \sqrt{(X_2 - U_x)^2 - (Y_2 - U_y)^2 - (Z_2 - U_z)^2} + c(dT_u)$$
$$p_u^3 = \sqrt{(X_3 - U_x)^2 - (Y_3 - U_y)^2 - (Z_3 - U_z)^2} + c(dT_u)$$
$$p_u^4 = \sqrt{(X_4 - U_x)^2 - (Y_4 - U_y)^2 - (Z_4 - U_z)^2} + c(dT_u)$$

Dove X_i, Y_i, e Z_i rappresentano le coordinate dei satelliti, $c(dT_u)$ rappresenta l'errore introdotto dal bias del clock del ricevitore, mentre le 3 incognite sono U_x, U_y, U_z.

p_u^i rappresenta uno pseudo-range misurato dal ricevitore:

$$p_u^i = c(T_u^i - T_s^i)$$

Nella formula, c è la velocità della luce nel vuoto, mentre T_u^i l'istante di ricezione del messaggio dall'i-esimo satellite come indicato dall'orologio di bordo e T_s^i l'istante di trasmissione del segnale da parte del satellite [3].

3.1.1 Vantaggi e svantaggi

GPS è conosciuto per il buon funzionamento in ambiente outdoor, è ad oggi installato su tutti gli smartphone sul mercato, ma si è dimostrato inefficace per la localizzazione in ambiente indoor, essendo difficile tracciare la posizione degli asset in ambienti chiusi.

I diversi fattori che sconsigliano l'uso del GPS sono:

- gli errori di clock del satellite e del ricevitore: sono dovuti ad un tempo impreciso del ricevitore rispetto ai satelliti, anche piccole discrepanze tra l'orologio di bordo del ricevitore e il tempo sincronizzato globale possono generare problemi nella posizione stimata.

- L'interferenza dovuta al multipath: causa un ritardo nella ricezione del segnale tramutandosi in un errore di valutazione della posizione.

- Interferenze atmosferiche: sono dovute ad effetti ionosferici e ritardi troposferici, influenzano la velocità dei segnali GPS mentre attraversano l'atmosfera terrestre.

- Sconsigliato l'utilizzo in un ambiente indoor: i segnali GPS irradiati dai satelliti non possono essere ricevuti all'interno di edifici o aree chiuse perché risentono di forti attenuazioni.

- Consumo di batteria: il consumo di energia dipende fortemente dal fatto che il GPS sia attivo o meno, però accendere e spegnere il ricevitore GPS ci permette di risparmiare energia ma, come svantaggio, non permette di raggiungere un posizionamento preciso e in tempo reale, a causa del fatto che una certa quantità di tempo deve essere speso per riattivarlo. Il consumo di batteria è notevole, i dispositivi potrebbero non coprire un turno di lavoro [4].

3.2 RFID

L'identificazione a radiofrequenza (in inglese Radio-Frequency IDentification, acronimo RFID) è una tecnologia di riconoscimento e validazione e memorizzazione automatica di informazioni a distanza. Fu realizzata per ambiti militari con lo scopo di localizzare e identificare, con l'utilizzo di onde radio: aerei, autoveicoli ed altre attrezzature all'interno di ambienti indoor. Nel corso degli anni l'utilizzo si è diffuso in diversi ambiti:

- Bigliettazione elettronica: le maggiori città europee utilizzano smart card contactless con tecnologia RFID per permettere l'accesso ai mezzi di superficie e metropolitana.

- Logistica dei magazzini e gestione degli inventari: la tecnologia permette di conoscere in tempo reale le giacenze di magazzino, riordinare i capi esauriti identificando ogni contenitore e ogni scaffale di magazzino con tag. Inoltre, nella gestione della supply chain, i tag RFID (Figura 3) vengono utilizzati per tracciare i prodotti lungo tutta la catena di distribuzione, dalla consegna dei fornitori, alle scorte di magazzino e fino al punto vendita.

- Identificazione degli animali: rispetto ai metodi comunemente utilizzati per l'identificazione degli animali (marchiatura sull'orecchio, tatuaggio, passaporto cartaceo), con l'applicazione dei tag e, grazie all'emissione di onde elettromagnetiche a bassa frequenza del tutto innocue, si leggono informazioni come il codice dell'animale, dati anagrafici, aziende presso le quali il capo è transitato e controlli veterinari a cui l'animale è stato sottoposto.

Figura 3: TAG RFID Attivo

3.2.1 Metodi di Utilizzo

La tecnologia RFID prevede di disporre sugli articoli da monitorare dei tag, che sono identificati da un ID codificato secondo un particolare standard, ed è costituito da un chip, un'antenna e dall'involucro esterno. Le antenne dei tag emettono messaggi leggibili da lettori RFID specializzati. I tag RFID memorizzano dati identificativi e possono contenere una memoria scrivibile, che può memorizzare informazioni per il trasferimento a vari lettori RFID in posizioni diverse. Queste informazioni possono tracciare il movimento dell'elemento taggato, rendendo tali informazioni disponibili a ciascun lettore. I tag si dividono in due categorie: i tag attivi e quelli passivi.

3.2.2 Tag Attivi

I tag RFID attivi sono alimentati a batteria, quindi possono fare broadcast del proprio segnale fino a 100 metri, ma l'alimentazione li rende più grandi e più costosi. Possono rimanere inattivi fino a quando non entrano nel raggio d'azione di un ricevitore (da 20 a 100 metri) o possono trasmettere costantemente un segnale e operano su un range di frequenze alto. I sistemi RFID attivi in genere funzionano meglio su oggetti di grandi dimensioni tracciati su lunghe distanze [5].

3.2.3 Tag Passivi

I tag passivi ottengono energia dal segnale di un lettore esterno, per questo sono molto economici ma hanno una funzionalità limitata e sono piuttosto piccoli. Quando un tag si trova nel raggio d'azione del lettore, riceve un segnale elettromagnetico dal lettore (detto reader) attraverso l'antenna del tag, dal quale un processo chiamato accoppiamento induttivo fornisce energia ad un condensatore di bordo. Quando il condensatore ha accumulato abbastanza carica, può alimentare i circuiti del tag RFID, che trasmette un segnale modulato al lettore. Tale segnale di ritorno contiene le informazioni memorizzate nel tag [5].

3.2.4 Lettori RFID

I lettori RFID, chiamati anche reader, sono dispositivi che permettono di acquisire le informazioni dal tag. Il lettore comunica con i tag che sono presenti nel suo raggio di azione, raccogliendo dati da essi e passandoli ad un computer per processarli. I lettori possono comunicare contemporaneamente con più tag RFID. Come per i tag, sono presenti diversi tipi di lettori che variano in base al costo e il range di lettura che dipende dalla frequenza utilizzata

Come si legge nella tabella sottostante (Figura 4), in base alla frequenza di utilizzo dei tag RFID variano il range di lettura, il costo, la memoria, la penetrazione dei segnali attraverso i materiali, la data rate e il costo dei dispositivi di lettura. Più alta è la frequenza più aumenta la sensibilità alle interferenze e il range di lettura, ma il costo lievita di conseguenza come quello dei lettori.

	LF	HF	UHF	Active
Frequency	125 – 134.2 KHz	13.56 MHz	850 – 960 MHz	100 KHz – 2.45GHz
Range	0.2 – 2m	Up to 1m	Up to 3m	Up to 100m
Cost	Typ. 3 GBP	(Typ. 0.50 GBP)	(Typ. 0.30 GBP)	(Typ. 20 GBP)
Memory	Typ. 64 bits	Typ. 2048 bits	Typ. 96 bits	Typ. 32 bits
Penetration of Materials	V. Good	Good	Poor	V. Good
Data Rate	Slow	Fast	Fast	Fast
Reader Cost	50 – 500 GBP	50 – 3000 GBP	1000- 3000 GBP	200-600 GBP
Read Multiple Tags	Poor	Good	Very Good	Good
Applications	Animal Tags, Vehicle Immobilisers, Industrial Applications	Item Tracking, Access Control, Smart Labels	Box and Pallet tracking Some Item Tracking	Industrial Applications. Asset Tagging Location Systems

Figura 4: Caratteristiche dei tag RFID in base alla frequenza scelta

3.2.6 Metodi di Tracciamento

Il Time Of Arrival (ToA) misura il viaggio nel tempo di un segnale RF dal trasmettitore a un ricevitore. Rispetto al metodo TDOA (Time Difference of Arrival), ToA utilizza l'ora assoluta di arrivo in una determinata stazione base piuttosto che la differenza di tempo misurata tra la trasmissione del segnale e la ricezione all'altra stazione. La distanza può essere determinata direttamente dal ToA poiché i segnali viaggiano con una velocità nota. I dati dell'ora di arrivo da due o più tag restringono il campo di ricerca della posizione e i dati di un terzo tag sono necessari per risolvere la posizione precisa in un singolo punto [8].

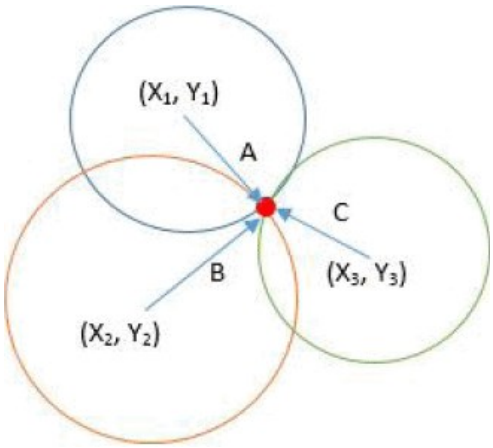

Figura 5: ToA in RFID

La multilaterazione è basata sulla differenza nel tempo di arrivo (TDOA - Time Difference Of Arrival) di un segnale emesso da un target da parte di un numero di sensori dislocati su un'area. Il tempo di arrivo, attraverso la stima della velocità con cui viaggia il segnale in aria, è proporzionale allo spazio percorso dal segnale stesso, in questo modo è possibile individuare la posizione di un target [8]. Definisco come riferimento il primo sensore che riceve il segnale dal target e chiamo A l'ennesimo sensore che riceve il medesimo. Le coordinate della sorgente vengono calcolate tramite l'intersezione di iperboli che sono descritte dalla differenza della distanza tra A e il target rispetto alla distanza tra il riferimento e il target.

3.2.6 Vantaggi e Svantaggi

I vantaggi della tecnologia RFID sono:

- la capacità di effettuare letture e scritture dei dati in modo automatico, tramite onde radio, e quindi senza visibilità ottica, che consente la rilevazione di etichette contenute all'interno di scatole, confezioni, pallet.

- I tag passivi sono economici e hanno dimensioni ridotte.

- Lettori di ottima fattura possono identificare fino a 1000 tag per secondo con una precisione di lettura del 100% fino a raggiungere buone distanze.

- L'usura dei tag è inferiore rispetto a quella dei codici a barre.

- I tag attivi hanno una buona memoria interna, quindi possono immagazzinare una buona quantità di dati, molto maggiore rispetto ai codici a barre. Hanno una memoria storica dell'oggetto che può essere tracciato in tutto il suo ciclo di vita.

Gli svantaggi della tecnologia RFID sono:

- I tag passivi e hanno un raggio di copertura ridotto e non possono essere letti qualora siano oscurati.

- Il costo varia in base al range di frequenze utilizzato e alla tipologia di tag. I tag più performanti sono quelli attivi, ma a causa di un elevato utilizzo bisognerebbe cambiare le batterie almeno una volta al mese, quindi considerare anche questo aspetto dal punto di vista dei costi.

- I tag attivi hanno dimensioni abbastanza ingombranti, quindi non adatti ad essere posizionati su target di piccole dimensioni.

- Vengono trasmessi dei dati relativi al prodotto ed eventuali minacce alla sicurezza dei dati sono presenti nella forma di falsi tag o reader non autorizzati, che intercettano dati sensibili. Non è possibile in una tale situazione un utilizzo di tecniche di crittografia potenti.

3.3 UWB

UWB (Ultra-Wide Band) è una delle tecnologie più recenti, accurate e promettenti per il tracciamento indoor. Pensata per lo scambio di dati su breve distanza, basa il proprio funzionamento sullo scambio di impulsi digitali tra sorgente e ricevitori a intervalli estremamente brevi e regolari. Per trasmissioni Ultra-Wide Band si intendono le modulazioni di segnali che sfruttano una larga porzione dello spettro EM (tecnicamente sono considerate UWB tutte le trasmissioni distribuite su 500 Mhz di banda o più, o comunque che occupano più del 20% della frequenza centrale) con lo scopo di ridurre la potenza di trasmissione ma soprattutto per garantire una banda molto alta. UWB utilizza un treno di impulsi piuttosto che un'onda sinusoidale modulata per trasmettere informazioni (Figura 6). Questa caratteristica unica lo rende perfetto per applicazioni di spaziatura precise.
Grazie all'ampia larghezza di banda che si traduce in alta risoluzione di tempo (impulsi brevi, in genere non più di due nanosecondi), UWB è una tecnologia robusta rispetto al problema del multipath. Questo permette al ricevitore di identificare le riflessioni multipath dal segnale originale. Questa proprietà rende l'UWB adatto per ambienti interni pieni di ostacoli e oggetti. A causa della natura dei segnali, gli impulsi UWB possono essere distinti anche in ambienti rumorosi (Figura 7).

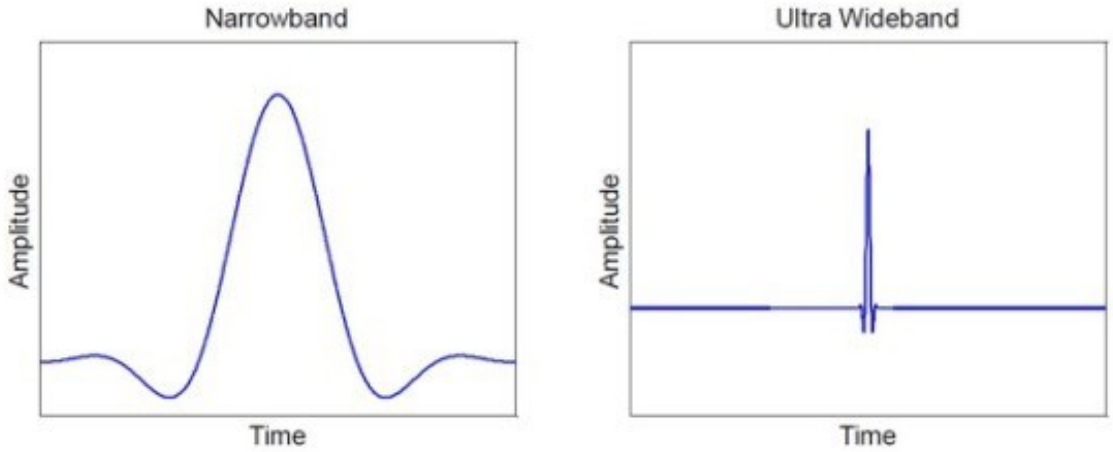

Figura 6: Differenza di impulsi tra Narrowband e UWB

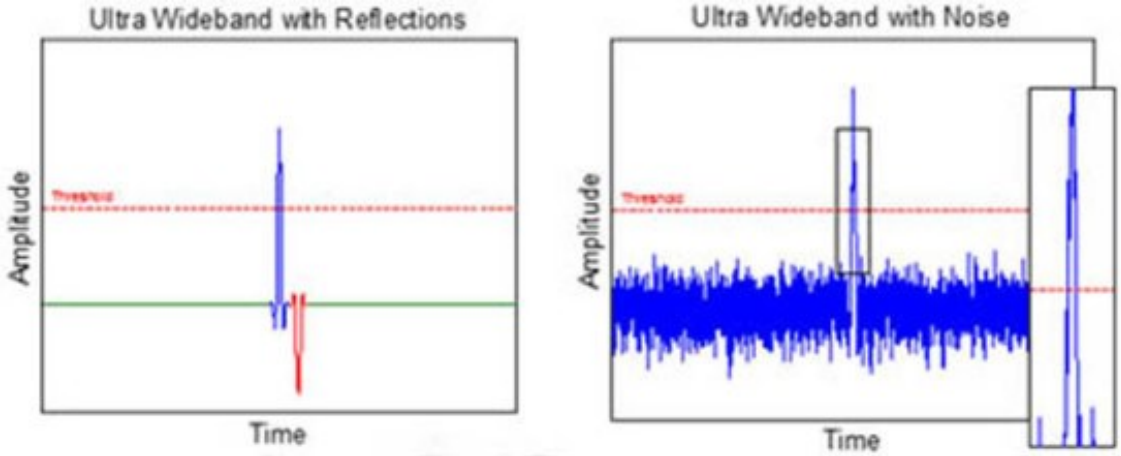

Figura 7: Impulsi UWB in presenza di riflessioni o rumori

3.3.1 Metodi di Utilizzo

La tecnologia si basa su tag posizionati su oggetti da monitorare e una rete di sensori UWB per la ricezione dei segnali. Lo schema Time Difference of Arrival (TDoA) si basa sulla misurazione precisa della differenza di tempo tra i segnali di arrivo ai dispositivi Anchors. In questo schema (Figura 8) gli Anchors devono essere sincronizzati accuratamente. ll Tag non comunica con gli Anchors singolarmente, non conosce il loro range di indirizzamento. Questo porta al significativo prolungamento della durata della batteria poiché il Tag deve inviare un solo messaggio Blink per essere localizzato nello spazio.

Inoltre, dal momento che non vi è alcun legame di indirizzo tra Tag e Anchors, il numero di Anchors che operano nel sistema sono completamente scalabili. L'aggiunta di più Anchors nel sistema non richiede alcuna riconfigurazione dei Tag. I Tag utilizzano solo una breve porzione di tempo per inviare un messaggio Blink.

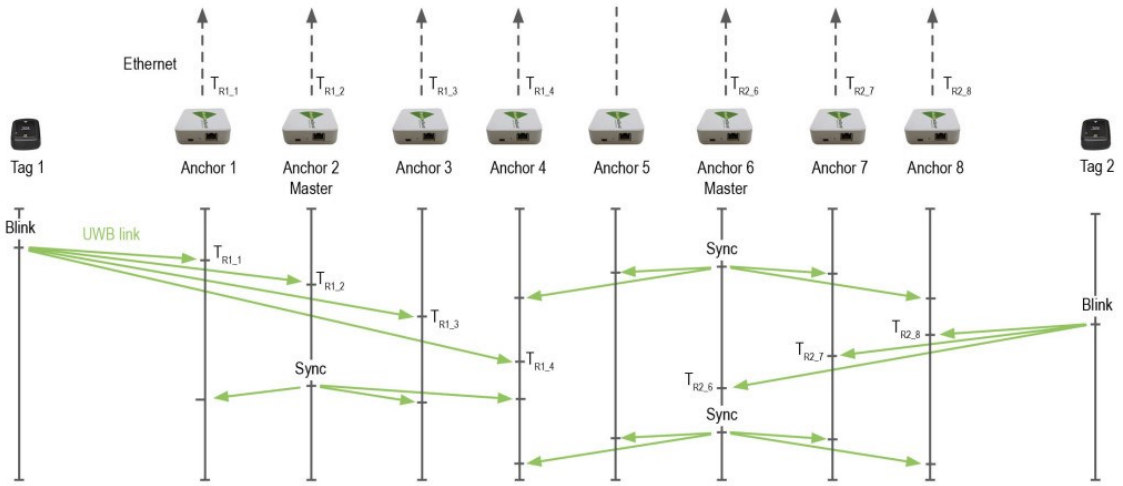

Figura 8: Funzionamento della tecnologia UWB

I Tag trasmettono a intervalli regolari (frequenza di aggiornamento) un messaggio Blink breve. Tale messaggio viene elaborato da tutti gli Anchors nel raggio di comunicazione. Indipendentemente dallo stato di sincronizzazione, gli Anchors inviano tutti i timestamp al server RTLS (Real-time locating system) tramite Ethernet. Per calcolare la posizione del Tag, il Server RTLS considera solo i timestamp provenienti da almeno tre Anchor con la stessa base di clock. La sincronizzazione di clock avviene in modalità wireless, selezionando automaticamente gli Anchors con una copertura ottimale, questi sono chiamati Master Anchors, i quali inviano un messaggio di sincronizzazione (Sync). Gli Anchors nel campo di comunicazione del Master Anchor sono le celle di trasmissione basate sullo stesso orologio per un determinato periodo di tempo.

Un altro metodo di localizzazione è quello dell'angolo di arrivo (Aoa) che impiega le antenne multiple di ricezione ai ricevitori. Tuttavia, i tag non trasmettono la loro posizione, ma segnali di riferimento speciali che sono ottimizzati per la localizzazione basata su Aoa all'interno dei ricevitori. L'onda elettromagnetica ha un diverso ritardo tra gli elementi riceventi a seconda dell'angolo di arrivo. Ciò consente di stimare l'angolo di arrivo dal cambiamento della fase portante tra gli elementi.
Segue un trasmettitore a singola antenna e un ricevitore a doppia antenna. La figura 9 illustra il processo di calcolo della differenza di percorso che verrà utilizzato per stimare l'Aoa. Un trasmettitore a singola antenna invia un pacchetto al ricevitore a doppia antenna. La distanza tra le antenne è definita d. Questa distanza d è scelta per essere inferiore alla metà della lunghezza d'onda del segnale λ. Questa separazione dell'antenna d fa sì che entrambi i ricevitori ricevano il segnale con una differenza di percorso $0 < p < d$. In base alla differenza di percorso p possiamo calcolare l'angolo come $\theta = \arcsin\left(\frac{p}{d}\right)$.

Mentre riceviamo il segnale con una differenza di percorso $p > 0$, le fasi di arrivo (Poa) del segnale su entrambi i ricevitori sono diverse.

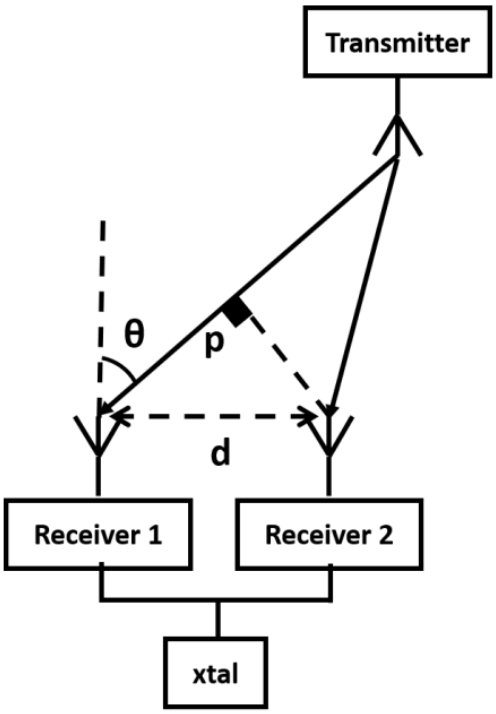

Figura 9: Metodo AoA

La Poa su ogni ricevitore è calcolata in base al CIR (Channel Impulse Response di ogni pacchetto). Quando viene ricevuto il preambolo del pacchetto, il chip UWB genera il CIR e rileva il primo indice di percorso.
Possiamo quindi calcolare la fase al primo indice del percorso come $PoA = \arctan\left(\frac{Q_i}{I_i}\right)$ con Q_i che è la parte immaginaria e I_i la parte reale del CIR del primo indice del percorso. Poiché entrambi i ricevitori utilizzano lo stesso clock, possiamo calcolare la differenza di fase di arrivo (Pdoa), che indichiamo, α come la differenza tra la fase del primo ricevitore e la fase del secondo ricevitore che va da $-\pi$ a π e la mappa alla differenza di percorso usando la formula $p = \frac{\alpha \times \lambda}{2\pi}$. Utilizzando la stima dell'angolo di più gateway consentirebbe una migliore stima della posizione del tag [6].

3.3.2 Vantaggi e Svantaggi

I vantaggi della tecnologia UWB sono:

- Precisione: questa tecnica di modulazione è la più precisa tra quelle che si basano su trasmissioni tramite modulazione di onde EM analizzate, questo porta ad una resistenza ad interferenze. Rispetto ad altre tecnologie di scambio dati wireless c'è la sincronizzazione precisa tra chi invia i segnali e i nodi che li ricevono.

- Penetrazione: l'UWB può operare su tutte le frequenze che vanno ai 3,1 ai 10 GHz, quindi su frequenze molto elevate, è in grado di attraversare muri e altri ostacoli senza grossi problemi, visto che la maggior frequenza della radiazione emessa accorcia la lunghezza d'onda e fa crescere la capacità della radiazione stessa di attraversare ostacoli.

Gli svantaggi:

- Costi: trattandosi di una tecnologia fortemente incentrata su una infrastruttura è necessaria una spesa iniziale e un costo di manutenzione in tempo e denaro. Non gode della compatibilità con dispositivi e infrastrutture già presenti sul mercato. Per mettere in piedi un sistema di questo tipo è necessario quindi l'acquisto di materiale specifico composto da tag e antenne da posizione in punti fissi.

- Interferenze: il sistema UWB è significativamente sensibile alle interferenze dei telefoni ad alta frequenza senza fili, del corpo umano, degli oggetti in metallo e delle strutture.

3.4 Beacon

Figura 10: Beacon Bluetooth di diversi marchi

I beacon sono piccoli dispositivi wireless alimentati a batteria che fungono da segnalatori a intermittenza, come dei veri e propri "fari" per indicare la loro presenza in modo che i dispositivi abilitati possano localizzarli o per usufruire di altri servizi. Implementano la tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE), offrendo connettività wireless a bassa potenza, inoltre, il loro impatto è significativo nelle applicazioni in cui il consumo di energia è fondamentale (come nei dispositivi alimentati a batteria) e dove c'è bisogno della trasmissione di piccole quantità di dati. Effettuano ripetutamente il broadcast di pacchetti Bluetooth, che contengono informazioni come MAC address, ID del dispositivo, valore RSSI, ai dispositivi circostanti che siano in grado di leggerli e utilizzare le informazioni per i propri scopi, nel nostro caso per la realizzazione di un sistema di asset tracking. Attraverso la app proprietaria del Beacon è possibile configurare vari parametri come:

- **Il livello di potenza del segnale**: misurabile in dB, più il livello è alto, maggiore è il range di trasmissione del beacon.

- **Advertising Interval**: cioè l'intervallo di trasmissione dei pacchetti, misurato in millisecondi.

- **UUID**: si tratta di una stringa di 16 byte utilizzata per differenziare un ampio gruppo di beacon correlati. Ad esempio, se Coca-Cola mantenesse una rete di beacon in una catena di negozi di alimentari, tutti i beacon Coca-Cola condividerebbero lo stesso UUID. Ciò consente all'app per smartphone dedicata di Coca-Cola di sapere quali annunci beacon provengono da beacon di proprietà di Coca-Cola.

- **Major**: questa è una stringa di 2 byte utilizzata per distinguere un sottoinsieme più piccolo di beacon all'interno del gruppo più grande. Ad esempio, se Coca-Cola avesse quattro beacon in un particolare negozio di alimentari, tutti e quattro avrebbero lo stesso Major. Ciò consente a Coca-Cola di sapere esattamente in quale negozio si trova il suo cliente.

- **Minor**: questa è una stringa di 2 byte destinata a identificare i singoli beacon. Seguendo l'esempio di Coca-Cola, un beacon nella parte anteriore del negozio avrebbe il suo valore Minor esclusivo. Ciò consente all'app dedicata di Coca-Cola di sapere esattamente dove si trova il cliente nel negozio.

3.4.1 Modalità di Tracciamento

Un sistema di tracciamento può operare in due modalità che differiscono per il ruolo svolto dal beacon che viene utilizzato e per i ricevitori utilizzati. La differenza tra questi due modelli si ripercuote sul prezzo, la complessità e la precisione che può raggiungere il sistema.

- **Modello Gateway - Beacons**: questa modalità utilizza dei Gateway wireless fissi che monitorano i beacon posizionati su oggetti o persone che si muovono o attraversano una determinata area. Le informazioni ottenute sono poi inviate ad un data service tramite una connessione wireless o cablata che si occuperà della loro elaborazione. In questo caso aumentando la quantità di ricevitori presenti nell'ambiente si potrà avere un'accuratezza maggiore, aumentando di conseguenza costo e complessità del sistema. Questa soluzione rappresenta la scelta obbligata quando è necessario tracciare una grande mole di oggetti.

- **Modello Beacons - Mobile Device**: In questa modalità di tracciamento i beacon vengono posizionati in posizioni statiche all'interno dell'ambiente. Il rilevamento viene effettuato da dispositivi mobili come smartphone e tablet con installata

un'applicazione che effettua continuamente scansioni associando la prossimità ad uno o più beacon ad una certa posizione. Questa soluzione risulta particolarmente vantaggiosa quando bisogna tracciare la posizione di asset "esterni" all'ambiente o quando è possibile utilizzare device già presenti [1].

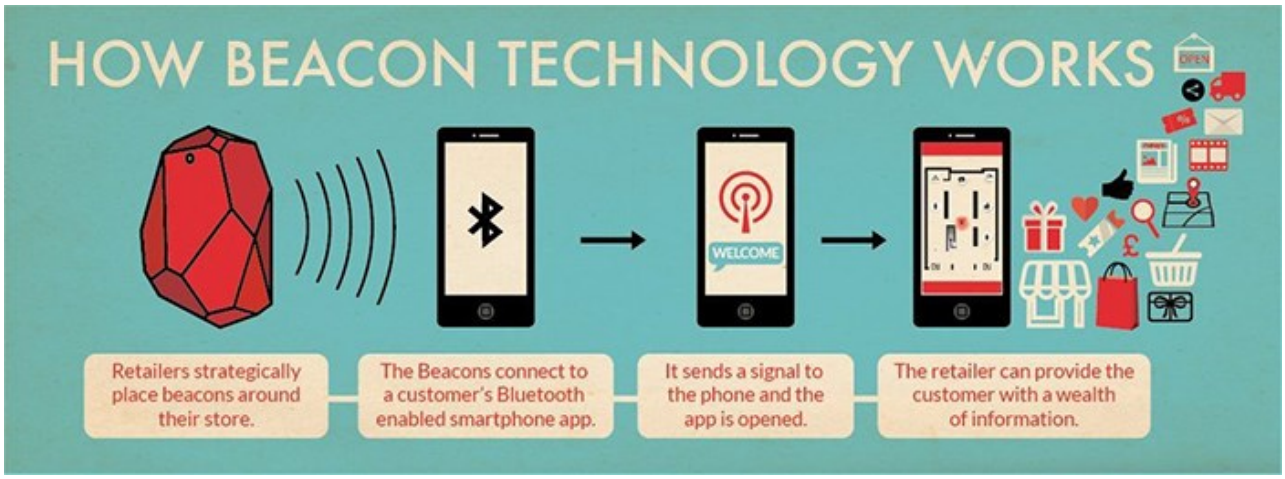

Figura 11: Esempio di funzionamento dei Beacon

3.4.2 Caratteristiche

Dopo aver affrontato una introduzione sulla tecnologia Beacon e i suoi modelli principali di utilizzo, in questo paragrafo si elencano e descrivono quali sono le principali caratteristiche:

- I parametri possono essere configurati da una app scaricabile dallo smartphone, questo li rende altamente scalabili; inoltre è possibile monitorare il livello di batteria e visualizzare le informazioni utili del Beacon come il Major, Minor e UUID.

- Possono essere installati facilmente su qualsiasi superficie o oggetto.

- Aumentando potenza si arriva a trasmettere fino a 100 m di raggio d'azione, però cala la durata della batteria.

- Modificare l'intervallo di invio degli advertising packet da parte di un beacon, più sono brevi questi intervalli (il minimo configurabile è di 100 millisecondi, mentre il massimo è di 5 secondi) più diminuisce la durata della batteria, ma consente una migliore approssimazione della posizione e non perde le scansioni.

- Un grande vantaggio dei sistemi che utilizzano beacon è il fatto di poter utilizzare device mobili come ricevitori, come gateway o altri sensori che elaborano

informazioni, poiché questi dispositivi sono ormai onnipresenti nella vita quotidiana.

- Il segnale Bluetooth viene influenzato dall'ambiente circostante, i problemi relativi alla "line of sight" e alla ricezione del segnale che solitamente porta ad un calo considerevole dell'accuratezza, può essere compensata alterando la rete di beacon semplicemente manipolando i beacon già presenti o aggiungendone di nuovi.

- Rispetto ad altre tecnologie esposte precedentemente i beacon sono molto economici (il prezzo medio oscilla tra gli 8 e i 20 dollari), inoltre in base al tipo e al tempo medio di utilizzo la durata della batteria varia dai 9 mesi ai 2 anni.

3.5 Implementazione industriale

In questo capitolo vengono riportati i lavori svolti in ambito industriale utilizzando sistemi di posizionamento che sono state descritti, infine viene spiegato quale tecnologia ho scelto per il mio lavoro di tesi.

La ricerca e gli studi sul tracciamento degli asset in ambienti come grandi magazzini o industrie propongono l'utilizzo del sistema GPS, di tag RFID (Radio Frequency IDentification) e Beacon [4].
Gli RFID sono impiegati per verificare quando un bene viene prelevato da un magazzino da un lavoratore. Ovviamente, gli edifici coinvolti all'interno del contesto sono dotati di lettori RFID. Inoltre, i lavoratori che gestiscono le risorse sono dotati di un altro tag RFID per identificarli attraverso un database. I tag RFID dei lavoratori contengono informazioni come il nome del dipendente e il numero di registrazione; i tag sulle risorse includono dati relativi alla tipologia delle risorse, al numero di serie e alla data di scadenza della manutenzione. In questo modo, è possibile determinare quale lavoratore sta utilizzando un determinato asset aggiornando i dati nel database. La stima della posizione degli oggetti è ottenuta tramite un'applicazione installata su smarthphone, essa verifica la presenza di tag BLE: dopo aver rilevato un tag BLE, l'applicazione determina la posizione dello smartphone utilizzando il GPS di bordo e misura la Potenza del segnale ricevuto (RSSI) del beacon ricevuto al fine di stimare la distanza tra il tag e l'operatore.
I satelliti sono stati utilizzati per fornire il posizionamento per il Global Positioning System (GPS) per rilevare una posizione individuale. D'altra parte, l'attività quotidiana di un individuo non è sempre all'aperto quando i satelliti possono rilevare i loro movimenti. Pertanto, il GPS non è in grado di fornire un posizionamento preciso quando un individuo o un oggetto è al coperto o si sposta in un grande impianto industriale [7], inoltre esso porta grande consumo di batteria nei dispositivi che lo implementano [4].

Nello studio [8] i tag RFID attivi a 2,4 GHz sono posti sull'asset da monitorare, dai quali si può leggere e scrivere set di dati di descrizione e identificazione dell'asset, adottano la modalità di lavoro di salto di frequenza. Le identificazioni possono raggiungere fino a 80 m (dipende dall'antenna) per estendere la frequenza di lavoro non solo in linea con la designazione industriale pertinente, ma può anche essere sviluppata anche in altri ambiti. MR3001A è un tipo di lettore RFID omnidirezionale a identificazione rapida. Soddisfa la speciale richiesta di identificazione, tracciamento e posizionamento tra molti tag contemporaneamente. Si costruisce con connessione wireless LAN 433 Mhz per essere facilmente collegata con i dati raccolti che si trovano sul server di sistema. Il campo di lettura di questo lettore RF è davvero grande ed è più adatto per essere utilizzato in grandi spazi. Nel sistema sviluppato, i tag sono misurati da lettori posti in angolazioni diverse. I dati ricavati d vengono inviati al data collector utilizzando la connessione wireless 433 Mhz. Quindi tutti i dati vengono memorizzati nel server e calcolati per ottenere la posizione del tag attraverso la stima del ToA dei segnali ricevuti.

L'utilizzo del sistema RFID richiede l'investimento in numerosi componenti hardware come tag, lettori considerando l'infrastruttura per il lato mittente (tag) e ricevitore (lettore). I beacon BLE possono funzionare contemporaneamente come lettori o beacon, con tag programmabili. RFID ha un raggio di lettura inferiore a 10 metri e ha un vincolo di angolo inclinato per quanto riguarda il lettore e il tag. Un lettore RFID può leggere fino a mille tag al secondo con una grande velocità di tracciamento. Nel frattempo, il beacon BLE può leggere a una portata più alta di oltre 100 metri, il che è conveniente per gli articoli che devono essere tracciati a una gamma più ampia che dipende dalla batteria come fonte di energia [7]. Un ulteriore problema è la presenza necessaria di un lettore RFID dedicato. I sistemi con tag attivi richiedono batterie nei dispositivi e a seconda dello standard utilizzato e della capacità delle stesse, ciò richiede una sostituzione o ricarica delle batterie a intervalli regolari, il che è costoso e poco pratico se vengono installati migliaia di tag [2]. Il costo dei lettori del sistema RFID è più costoso mentre i beacon sono a basso costo. I tag RFID, che possono funzionare senza batteria, sono venduti tra 0,05 e 1,00 dollaro per tag, un lettore RFID costa dai 500 ai 2000 dollari [7].

I sistemi di localizzazione per applicazioni di tracciamento di asset indoor con tecnologia UWB utilizzano time-difference-of-arrival (TDOA) o una combinazione di TDOA e angolo di arrivo (AOA). La precisione in tempo reale specificata di questi sistemi è di 10-15 cm con intervalli di funzionamento interni di oltre 50 m [9].
L'hardware della rete di sensori UWB del marchio Ubisense™, sviluppata nella ricerca [10], è costituito da tag e una rete di sensori. Un tag è collegato all'oggetto che richiede il tracking della posizione. Poiché ogni tag emette un segnale UWB, la posizione viene calcolata utilizzando sia la differenza di tempo di arrivo tra i diversi sensori (i ricevitori) e l'angolo di arrivo a ciascun sensore. Ciascun sensore utilizza un minimo di quattro ricevitori UWB, cioè una serie di antenne collegate al ricevitore radio UWB, il che consente di determinare l'angolo di arrivo. Ogni sensore slave è collegato a un wireless bridge e il sensore master è collegato a un router wireless. Il router wireless fornisce una connessione attraverso il quale un calcolatore è in grado di accedere alle letture dei sensori con connessioni 802.11. Anche la configurazione software dei sensori UWB deve essere modificata per sincronizzarli tramite canali wireless. Poi il calcolatore trasmette i file di avvio ai sensori in modalità wireless, consente all'utente di configurare il

comportamento del sistema e raccoglie informazioni sulla posizione. Un problema unico dei sistemi di asset tracking basati su UWB è che, per determinare con precisione la posizione del tag, un numero minimo di ricevitori (tipicamente tre) deve avere una linea di vista diretta (LOS), tuttavia, questa condizione è difficile per qualsiasi situazione in uno spazio chiuso.

3.6 Perchè scegliere Beacon BLE

Le motivazioni che mi hanno spinto a adottare la tecnologia Beacon BLE è che rispetto alle altre (GPS, RFID e UWB) consuma meno energia e la batteria ha una lunga durata. Dal momento che ha un fabbisogno energetico inferiore, non è così costoso ed è facile da installare. È ampiamente utilizzato per la localizzazione indoor e asset tracking in ambito industriale. Così, il posizionamento ottenuto da BLE ha molti vantaggi rispetto ad altre tecnologie (vedi Tabella). Il Beacon è un piccolo dispositivo che, come detto in precedenza supporta Bluetooth Low Energy (BLE), grazie ad essa fornisce una maggiore precisione delle informazioni sul posizionamento indoor e un consumo energetico inferiore rispetto al GPS [11]. I dati trasmessi contengono un URL o altre informazioni di testo; quindi, il segnale viene ricevuto dal ricevitore che si trova nelle sue vicinanze, compatibile con il protocollo BLE e le informazioni vengono quindi mostrate all'utente. Come RFID hanno una memoria dove si possono scrivere informazioni utili all'utente però non si ha bisogno di un lettore dedicato e sono abbastanza precisi da rilevare e restituire le coordinate di posizione e il posizionamento in tempo reale.

CARATTERISTICHE	GPS	RFID	UWB	BEACON
Tacking Accuracy	Bassa	Alta	Alta	Alta
Maintenance Effort	Difficile	Difficile	Media	Facile
Industy Uptake	Bassa	Media	Media	Alta
Security and Privacy	Alta	Alta	Alta	Alta
Installation Costs	Alti	Bassi	Alti	Medi

In ambito industriale si stanno diffondendo a larga scala, offrendo una buona sicurezza e privacy nelle informazioni sensibili. Hanno un costo di manutenzione e installazione contenuto, molto meno rispetto a UWB che risulta essere la tecnologia di posizionamento più onerosa (un kit con sei sensori e dieci tag costa all'incirca 26 900 euro). Per quanto riguarda la manutenzione del sistema, si ha la necessità solamente del cambio di batterie, le quali sono facilmente reperibili sul mercato.

Nel lavoro di tesi ho adottato il modello Gateway – Beacon per raccogliere dati statistici importanti. Si utilizzano dei Gateway wireless fissi che monitorano i Beacon posizionati su asset che si muovono o attraversano una determinata area. I dati ottenuti tramite protocollo di comunicazione MQTT, in particolare vengono elaborati e filtrati i valori RSSI in modo tale da avere una stima precisa di quella che è la distanza tra Gateway e Beacon. In alternativa al Gateway è possibile utilizzare come ricevitore uno smartphone con app dedicata al tracciamento dei dispositivi BLE.

PARTE II PROTOCOLLI DI COMUNICAZIONE

4 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE, colloquialmente BLE, precedentemente commercializzato come Bluetooth Smart) è una tecnologia wireless personal area network progettata e commercializzata dal Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG) per nuove applicazioni nel settore dell'assistenza sanitaria, fitness, per i beacon, per la sicurezza, per l'industria dell'intrattenimento domestico e per le industrie automobilistiche e dell'automazione. L'idea principale fu quella di definire una nuova versione che potesse operare per anni con una batteria a grandezza di moneta e potesse meglio adattarsi all'invio di piccoli quantitativi di dati. Rispetto al Bluetooth "classico", il Bluetooth Low Energy ha lo scopo di fornire un consumo energetico e un costo notevolmente ridotto, mantenendo un intervallo di comunicazione simile. BLE riduce la latenza al 10% di quella del BR/EDR e introduce l'abilità di fare broadcast di dati, grazie a nuove tecniche. Ci sono dispositivi Bluetooth Smart, che supportano solo la tecnologia BLE e Dispositivi Bluetooth Smart Ready, che sono in grado di supportare sia BLE che Bluetooth Classic.
Tra le due tipologie ci sono delle differenze elencate in figura 12.

Classic Bluetooth	Bluetooth Low Energy (BLE)
Known as Bluetooth v 3.0	Known as Bluetooth v 4.0
Supports moderate data transfer rate and consumes more power	Low data transfer rate and ultra low power consumption
Long discovering and pairing time	Short connection and comunication time
Stream-oriented	Message-oriented
Pairing of Bluetooth device with the mobile phone is required before data exchange takes place	Pairing of the Bluetooth device with the mobile phone is not required
Ex: Bluetooth speaker, Bluetooth headset	Ex: Heartbeat monitor, Blood Pressure Monitor, IoT

Figura 12: Differenze tra classic Bluetooth e Bluetooth Low Energy

Il protocollo BLE è strutturato in una pila composta da tre blocchi principali, come mostrato in figura 13.

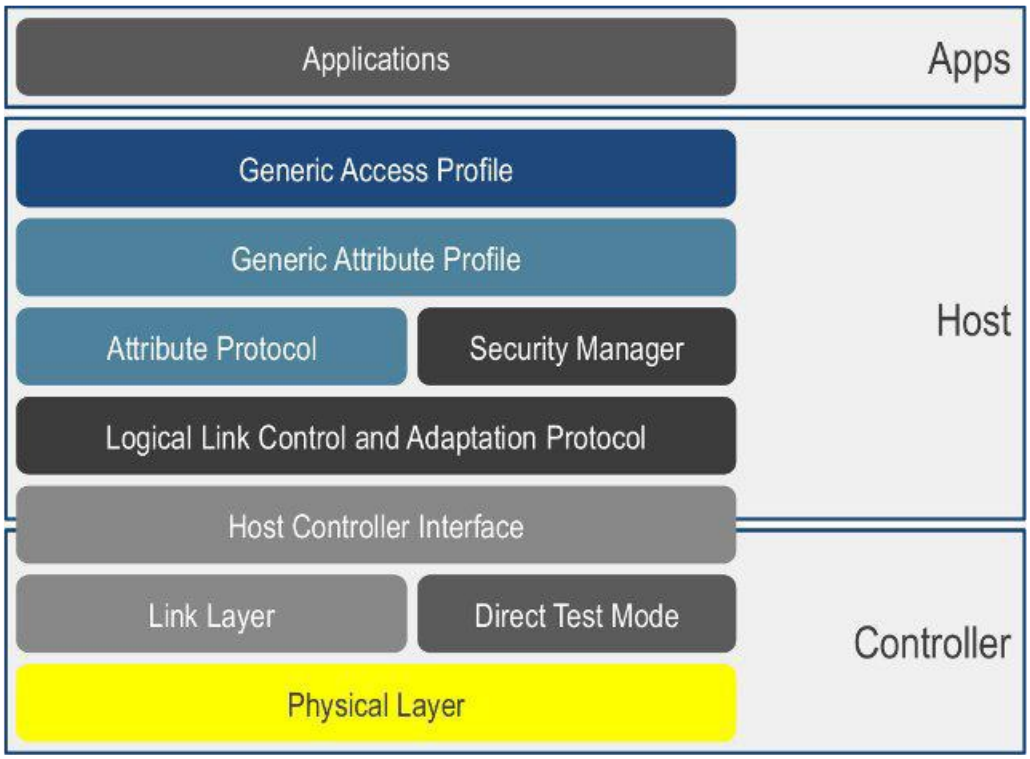

Figura 13: Stack protocollare del Bluetooth Low Energy

- L'Applications (App) è il blocco più alto dello stack e rappresenta l'interfaccia diretta con l'utente.
- L'host include i seguenti livelli:
    1. Profilo di accesso generico (GAP);
    2. Profilo di attributo generico (GATT);
    3. Protocollo L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol);
    4. Protocollo attributi (ATT);
    5. Protocollo SMP (Security Manager Protocol);
    6. Interfaccia controller host (HCI), lato host.
- Il Controller è strutturato nei seguenti livelli:
    1. Host Controller Interface (HCI), lato Controller.
    2. Link Layer (LL).
    3. Physical Layer (PHY).

4.1 Physical Layer (PHY)

La larghezza di banda del BLE è di 2.4 GHz, divisi in 40 canali a Radio frequenza con uno spazio tra i canali di 2 MHz, distinti in canali di avviso e canali di dati (Figura 14). I canali di avviso sono 3 (37,38,39 sono gli Advertising Channels), vengono utilizzati per il rilevamento dei dispositivi, per la realizzazione dei collegamenti e la trasmissione in broadcast, a questi sono stati assegnati le frequenze centrali per minimizzare la sovrapposizione con gli altri canali. I 37 canali dei dati (Data Channels) vengono utilizzati per la comunicazione bidirezionale tra i device connessi. La Physical Layer definisce anche i limiti per la potenza di trasmissione radio, che sono compresi tra il minimo di 0,01 mW (-20 dBm) e il massimo di 10 mW (+10 dBm).

Si utilizza una modulazione GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) con un indice di modulazione di 0,5. La Data rate è fissa a 1 Mbps. Il Throughput dati è minore o uguale a 100 kbps.

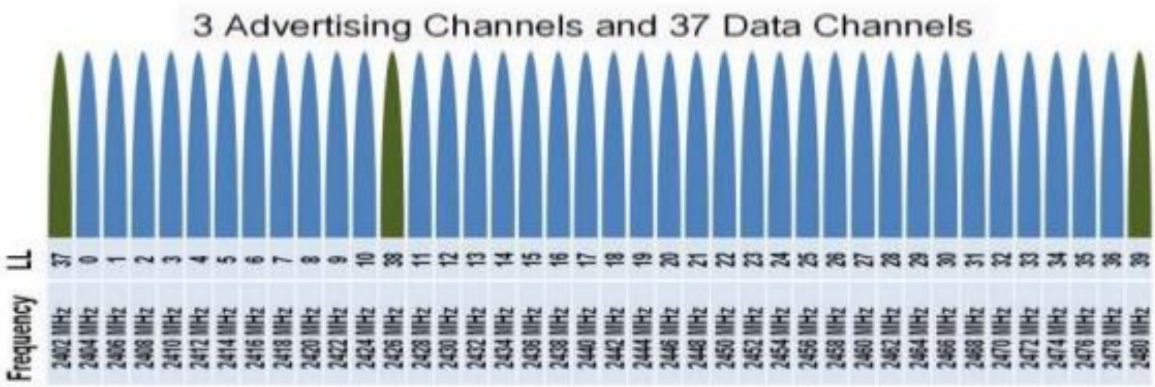

Figura 14: Canali di comunicazione utilizzati da BLE

4.2 Link Layer

Il Link Layer è il livello che si interfaccia con il livello fisico e fornisce ai livelli superiori un'astrazione e un modo per interagire con la radiocomunicazione. Quando un dispositivo manda avvisi, consente ad altri dispositivi che sono in scansione di trovare il dispositivo ed eventualmente collegarsi ad esso.

Si occupa di formattazione di dati e pacchetti, di assicurare la connessione e la ritrasmissione e aggiungere una sequenza di controllo di errore a ciascun pacchetto.

Il Link Layer gestisce i diversi stati della comunicazione (Figura 15):

- Standby: non viene né trasmesso né ricevuto alcun dato;

- Advertising: il dispositivo invia pacchetti di avviso per altri dispositivi disponibili e pronti alla lettura;
- Scanning: il dispositivo scansiona i dispositivi nelle vicinanze;
- Initiating: il dispositivo di scansione decide di stabilire la connessione con un dispositivo;
- Connected: il dispositivo ha un collegamento stabilito con un altro dispositivo e scambia dati con esso.

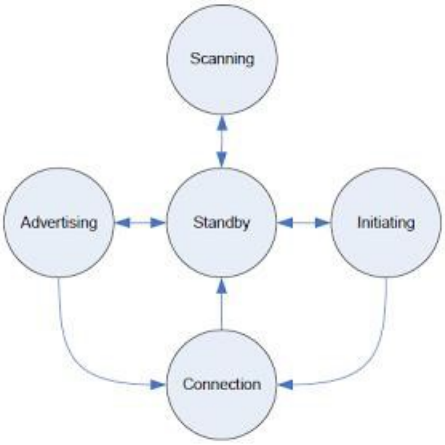

Figura 15: Stati di comunicazione

Sono definiti due ruoli per i dispositivi nel Link Layer per una connessione creata: il master e lo slave. Il master è colui che avvia la connessione, può gestire più connessioni simultaneamente con diversi slave, mentre lo slave è il dispositivo che era in advertising.

4.3 Host Controller Interface

L'HCI è un protocollo standard che si occupa della comunicazione tra il Controller, ovvero la parte più bassa del protocollo, e l'Host, ovvero il nucleo dello stack del protocollo BLE, che gestisce la comunicazione tra l'HW e l'applicazione utente. Pertanto, il suo ruolo è quello di definire un insieme di comandi ed eventi al fine di tradurre i dati grezzi in pacchetti di dati per inviarli tramite porta seriale al livello Host e viceversa.

4.4 L2CAP

Il Logical Link Control and Adaptation Protocol utilizzato in BLE è un protocollo ottimizzato e semplificato basato sul classic Bluetooth L2CAP. In BLE l'obiettivo principale di L2CAP è quello di gestire la frammentazione e ricombinazione. Prende più protocolli dagli strati superiori e li posiziona in pacchetti BLE standard che vengono passati agli strati inferiori sottostanti.

Il livello L2CAP gestisce due protocolli principali: Attribute Protocol (ATT) e Security Manager Protocol (SMP).

4.5 Security Manager

L'SMP è composto da diversi algoritmi di sicurezza per crittografare e decrittografare i pacchetti di dati. Definisce due ruoli principali durante la creazione di una connessione: chi inizia la connessione e chi risponde, che corrisponderanno rispettivamente al master e allo slave, una volta stabilita la connessione.

4.6 ATT

ATT definisce come un server espone i propri dati a un client e come questi dati sono strutturati. Ci sono due ruoli all'interno l'ATT:

- Server: espone i dati che controlla o contiene, e possibilmente alcuni altri aspetti del comportamento del server. Accetta il comando in arrivo e invia risposte, notifiche e indicazioni. Es. termometro (temperatura, unità, livello della batteria, intervallo)

- Client: dispositivo che si interfaccia con il server allo scopo di leggere i dati esposti e/o controllare il comportamento del server. Invia comandi e richieste e accetta notifiche e indicazioni in arrivo. Es. Smarphone (dati di lettura del termometro). I dati che il server espone sono strutturati come attributi.

4.7 GATT

Generic Attribute Profile (GATT) si basa sull'Attribute Protocol (ATT), stabilisce operazioni comuni e un quadro per i dati trasportati e memorizzati dal protocollo degli attributi (servizi e caratteristiche). GATT definisce come due dispositivi BLE trasferiscono i dati avanti e indietro utilizzando concetti denominati service e characteristics:

- Service è fondamentalmente un contenitore che raggruppa concettualmente gli attributi correlati, mentre le caratteristiche sono gli attributi inclusi in un servizio e ognuno di essi viene utilizzato per comunicare un tipo specifico di dati;

- Characteristics contengono il valore dei dati, un descrittore, che fornisce informazioni aggiuntive sulla caratteristica, il suo valore e alcune proprietà.

GATT definisce due ruoli in una connessione, client e server, che corrispondono a quelli descritti nel protocollo ATT.

4.8 GAP

Il GAP (Generic Access Profile) controlla le connessioni e gli advertising in Bluetooth: determina come due dispositivi possono (o non possono) interagire tra loro. GAP definisce vari ruoli per i dispositivi. Due sono i concetti chiave:

- I dispositivi periferici sono piccoli, a bassa potenza, con risorse limitate che pubblicizzare per connettersi a un dispositivo centrale molto più potente. Annunciano la loro presenza inviando pacchetti advertising e accetta una connessione da un altro dispositivo BLE. È detto slave.
- I dispositivi centrali sono di solito (ma non necessariamente) un telefono cellulare o gateway con molta più potenza di elaborazione e memoria. Dispositivo che scopre e ascolta altri dispositivi BLE che sono in advertising. È anche in grado di stabilire una connessione. È sempre il Master.

4.9 Sicurezza

BLE offre diversi servizi di sicurezza per proteggere lo scambio di informazioni tra i due dispositivi collegati:

- Autenticazione e autorizzazione: stabilire connessione sicura tra dispositivi;
- Crittografia e protezione dei dati: che garantisce protezione dell'integrità e riservatezza di dati;
- Privacy e Riservatezza: garantisce il monitoraggio dei dispositivi.

Questi servizi sono implementati attraverso cinque funzioni di sicurezza:

- Pairing: è il processo per la creazione di chiavi segrete condivise;
- Bonding: memorizzazione delle chiavi create durante l'accoppiamento in modo che possano essere successivamente utilizzato se necessario;
- Autenticazione del dispositivo: verifica delle chiavi memorizzate;
- Cifratura: riservatezza dei dati;
- Integrità dei messaggi: protezione contro l'alterazione dei dati.

BLE fornisce protezione contro i principali attacchi: Man-in-the-Middle e Intercettazione passiva.

4.10 Advertising

Un Beacon inizia sempre nello stato di advertising, ciò comporta che 3 dei 40 canali utilizzati dal BLE (37, 38 e 39 vedi Figura 16) sono riservati per il broadcast degli “advertising packets".

Questi pacchetti sono posizionati strategicamente in frequenze tra i 3 canali dei WiFi a 2.4 GHz per evitare interferenze con esso. È essenziale per comunicare ai dispositivi circostanti (entro il raggio di copertura) la loro presenza (tramite advertisement), per stabilire una connessione o fornire dati sui servizi. I dispositivi BLE trasmettono i pacchetti di advertising con un intervallo fisso.

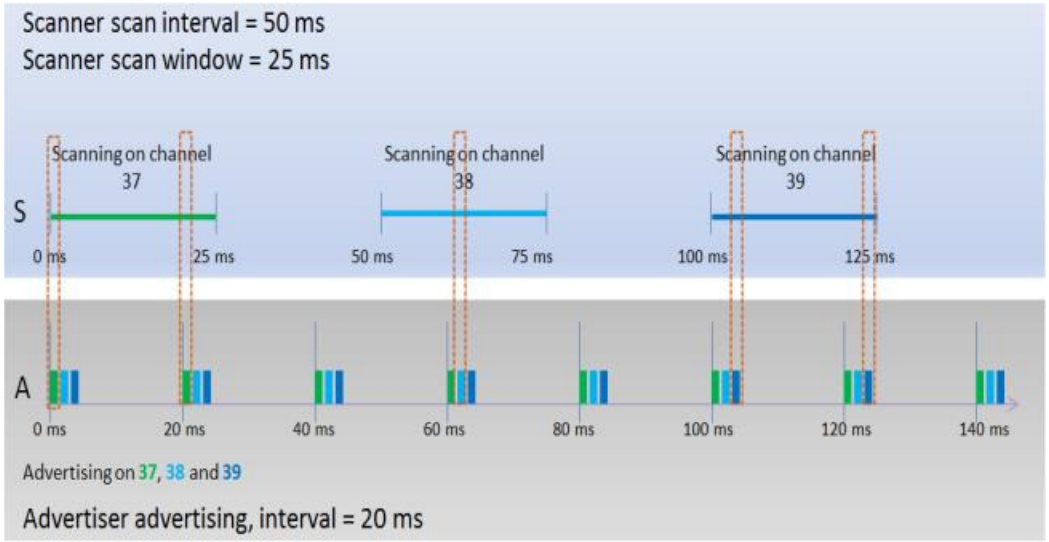

Figura 16: Modalità di scanning e Advertising

Dispositivi di ascolto come smartphone o Gateway effettuano scansioni per un tempo definito, detta finestra di scansione, il Beacon risponderà con una Scan Response affinché ci sia lo scambio di dati. La finestra di scansione è di solito inferiore all'intervallo di scansione per risparmiare energia perché la potenza di scansione consuma molta batteria. Dopo la scoperta del dispositivo, la connessione è stabilita ed è possibile leggere i servizi che il dispositivo Bluetooth ha da offrire.

Figura 17: Modalità di funzionamento tra dispositivi Bluetooth

4.11 Struttura di un Pacchetto Beacon

BLE consente due tipi di comunicazione (cioè trasmissione e connessione), il che implica due diverse tipologie di pacchetti, che condividono una struttura comune, come mostrato nella Figura 18.

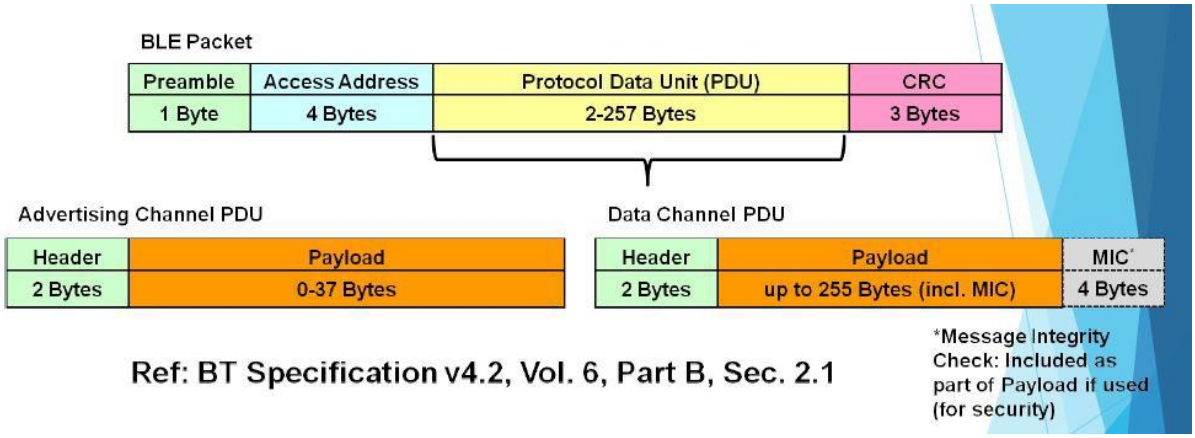

Figura 18: Struttura pacchetto beacon

Questa struttura è suddivisa in quattro sottosezioni obbligatorie:

1. La lunghezza del preambolo (PREAMBLE): è una sequenza molto semplice di bit utilizzata dal ricevitore per determinare la frequenza corrispondente alla velocità dei dati.

2. Access Address: è il gruppo che include i quattro byte seguenti e identifica la comunicazione su un collegamento fisico e viene utilizzato per escludere i pacchetti diretti a destinatari diversi.

3. Protocol Data Unit: va da 2 a 257 byte e la sua lunghezza dipende strettamente dal tipo di comunicazione utilizzata.

La PDU dell'advertising channel (figura 18) ha un'intestazione a 16 bit e un payload di dimensioni variabili, da zero a 37 byte. L'intestazione contiene quattro bit che indicano il tipo di PDU, perché esistono diversi tipi di pacchetti di trasmissione.

Un pacchetto Data Channel (Figura 18) è composto da un'intestazione a due byte, che contiene diversi parametri, mentre gli altri byte sono il payload effettivo del pacchetto, infine esiste un valore facoltativo MIC (Message Integrity Check) di quattro byte, che viene utilizzato per autenticare la PDU dei dati in una connessione crittografata

4.12 Protocollo Dati

Dopo aver parlato del protocollo utilizzato da BLE, ora si necessita la spiegazione di quelli che sono i formati principali di trasmissione dati. Poiché non esiste un unico standard ufficiale Bluetooth rilasciato dal SIG per i beacon, tutte le loro implementazioni sono dette pseudo-standard, implementate da una o più compagnie e adottate da chi ne vuol fare uso. I più importanti protocolli di trasmissione dati sono: iBeacon ed Eddystone.

4.12.1 iBeacon

Figura 19: Logo iBeacon

iBeacon è un protocollo basato sulla tecnologia di rete Bluetooth Low Energy, standardizzato da Apple e presentato durante la Worldwide Developer Conference del 2013. Dalla sua presentazione, è diventato lo standard di riferimento per la creazione di infrastrutture di prossimità basate su Bluetooth Low Energy.

Un dispositivo che supporta la tecnologia iBeacon usa il BLE per trasmettere periodicamente pacchetti che contengono:

- Timestamp: indica data e orario della ricezione del pacchetto.
- Type: il tipo di protocollo utilizzato.
- MAC Address.
- Beacon Type: 2 byte che indicano il tipo di beacon.
- UUID: sequenza di 16 byte i quali permettono di distinguere vari tipi di Beacon.
- Major: 2 byte che possono essere utilizzati per definire una sotto-regione
- all'interno della regione più ampia definita dall'UUID. Un esempio potrebbe essere quello di utilizzare questo campo per definire un particolare negozio di una catena come detto precedentemente nel capitolo 2.
- Minor: 2 byte che possono essere utilizzati per suddividere ulteriormente la regione definita dal campo Major. Ad esempio, per indicare una particolare sezione all'interno del negozio identificato dal Major.
- TxPower: un byte che indica la potenza di output a cui è stato impostato il Beacon, misurata in dBm alla distanza di un metro.
- RSSI (Received Signal Strength Indicator) a 1 metro: è l'intensità del segnale misurato a 1 metro dal dispositivo. Può essere utilizzato per stimare la prossimità dal trasmettitore, conoscendo la corrente RSSI ottenuta insieme al segnale ricevuto.
- Rssi: l'indicatore di potenza del segnale ricevuto, misurato in dB, il valore è negativo.
- Battery: il livello di batteria del dispositivo

4.12.2 Eddystone

Figura 20: Logo Eddystone

Il formato Eddystone è stato rilasciato da Google nel 2015, è la specifica di un protocollo che definisce il formato dei messaggi inviati da dispositivi Beacon Bluetooth Low Energy.

La progettazione di Eddystone si è concentrata principalmente su alcuni aspetti chiave:

- Funzionamento con le API Bluetooth di Android e iOS;
- Semplice implementazione per una vasta gamma di dispositivi Bluetooth Low Energy esistenti;
- Compatibilità con le specifiche del Bluetooth Core Specification;
- Architettura flessibile che consente lo sviluppo di nuovi tipi di frame.

A differenza di Ibeacon, ha 4 tipi di frame che possono essere utilizzati anche individualmente o combinati per creare dei beacon che possono essere utilizzati per una varietà di applicazioni:

- Eddystone-UID: composto da 16 byte, 10-byte per il namespace e 6-byte per l'istanza. Il primo è destinato a garantire un ID univoco attraverso multiple piattaforme Eddystone. È utilizzato per filtrare i beacon sottoposti a scansione.

- Eddystone-URL: possibilità di compressione di qualsivoglia URL, mandato attraverso il payload a cui l'utente potrà successivamente accedervi. Una volta decodificato, un generico user con un qualsivoglia client potrà accedervi tramite un browser a sua scelta;

- Eddystone-TLM: trasmette informazioni sul beacon. Ciò può includere il livello della batteria, i dati dei sensori o altre informazioni rilevanti per gli

amministratori dei beacon. Deve essere accompagnato da un altro tipo di frame (UID o URL) per essere utilizzabile come beacon.

- Eddystone-EID: trasmette un identificatore crittografato che cambia periodicamente a una velocità determinata durante la registrazione iniziale con un servizio Web. L'ID di trasmissione può essere inviato in remoto dal servizio con cui è stato registrato, ma ad altri osservatori sembra cambiare in modo casuale. Questo tipo di frame è destinato all'uso in dispositivi di sicurezza e privacy migliorati.

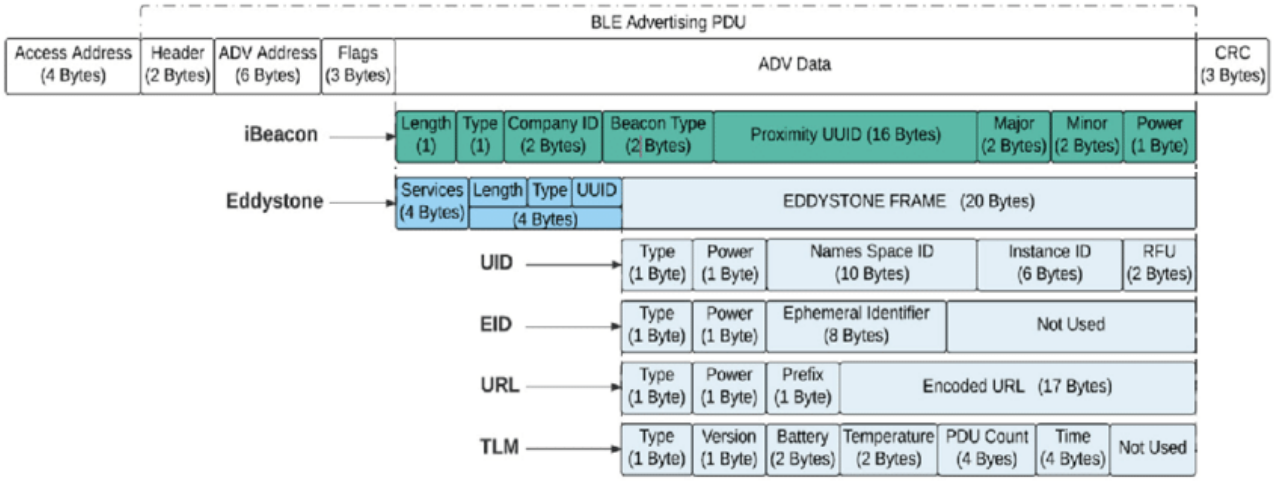

Figura 21: Struttura del pacchetto dati tra i diversi formati

Nel pacchetto advertising del protocollo Eddystone troviamo:

- 16-bit Eddystone Service UUID;
- Length: servono a rendere più facile trovare gli elementi successivi all'interno del pacchetto;
- Type: type descriptor per Service Data;
- Services: 4 Byte.

4.13 Differenze di comunicazione tra BLE

In Fig. 22 viene mostrata la differenza tra la comunicazione BLE dei beacon e quella generica. Non essendo in ascolto di segnali radio, l'antenna dei beacon può essere disattivata immediatamente dopo l'emissione del segnale, estendendo così l'autonomia. È importante far notare che alcune applicazioni che lavorano con i beacon includono altri servizi GATT in aggiunta a quello del beacon, e questi servizi possono far convivere pacchetti di advertising non connettibili e connettibili. In questo caso il beacon esegue un ciclo di advertising più tipico con operazioni di trasmissione e ascolto.

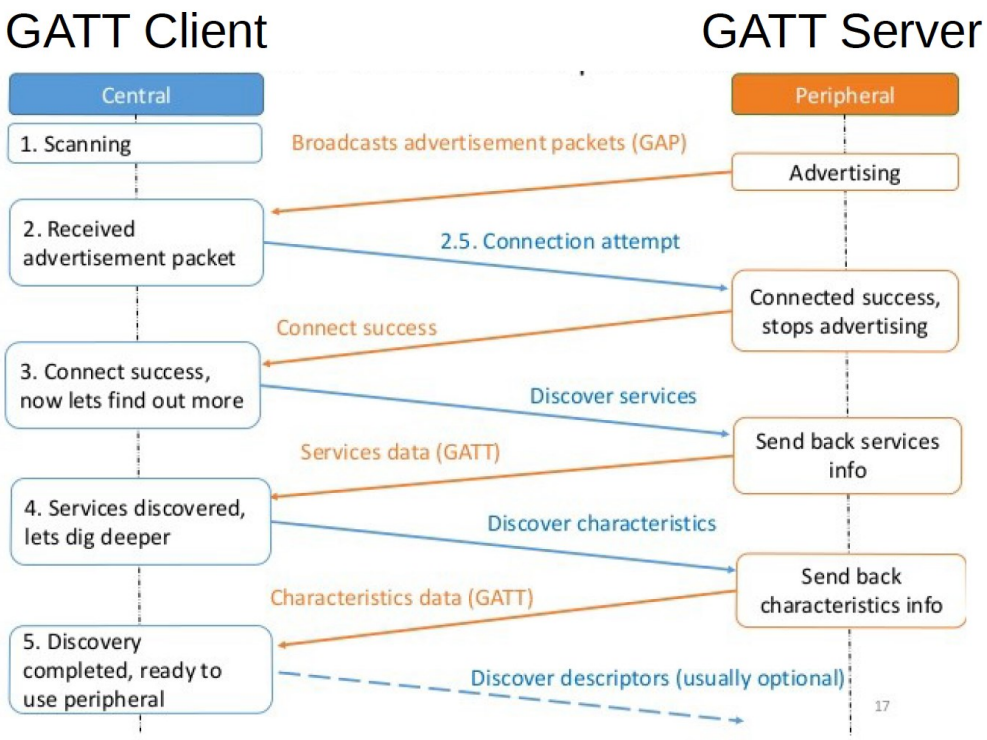

Figura 22: Comunicazione BLE Generica

La tecnologia beacon BLE utilizza solo una parte del protocollo Bluetooth Low Energy: Broadcast advertising. BLE Beacon sfrutta la modalità pubblicitaria GAP per trasmettere i dati in pacchetti pubblicitari periodici e appositamente formattati.

Figura 23: Comunicazione utilizzata dai Beacon

Un client può limitare i risultati di scansione solo a quelli che sono di loro interesse:

- Nome del dispositivo remoto Bluetooth LE;
- Indirizzo MAC del dispositivo remoto;
- Data Service che sono i dati associati a un servizio;
- Dati specifici del costruttore che sono i dati associati ad un particolare produttore.

5 MQTT

MQTT (Message Queue Telemetry Transport), è un protocollo di messaggistica leggero di tipo publish-subscribe posizionato in cima a TCP/IP. I protagonisti del protocollo sono:

- Il Publisher: è il dispositivo che invia i dati, il quale vuole che siano ricevuti solo da chi sottoscrive ad un determinato topic.
- Il Subscriber: è un dispositivo che vuole ricevere dati relativi a specifici argomenti ai quali è interessato.
- Il Broker: è il fondamentale dell'architettura. Ogni client (Publisher o Subscriber) stabilisce una connessione con il broker per ricevere o inviare messaggi.

I topic MQTT sono una forma di indirizzamento che consente ai client MQTT di condividere informazioni. Sono strutturati in una gerarchia simile alle cartelle e ai file in un file system utilizzando la barra (/) come delimitatore. I Publisher pubblicano informazioni sotto un determinato topic, mentre lo stesso fanno i Subscriber per ricevere le informazioni. I topic sul broker sono definiti come: “dominio/categoria/oggetto”, dove dominio è un identificatore univoco legato a un ambiente specifico. Categoria è un nome all’interno di un dominio che può identificare un insieme di dispositivi correlati, e l’oggetto rappresenta il singolo dispositivo o sensore, l’ultimo pezzo non ulteriormente scomponibile nella gerarchia. Tutti i messaggi

MQTT scambiati sul broker possono essere di qualunque formato, nel nostro caso andremo a utilizzare il formato standard JSON.

Le connessioni MQTT sono eseguite attraverso un serie di pacchetti denominati MQTT Control Packets. Il primo pacchetto inviato da un Client (publisher o subscriber) ad un server quando viene stabilita una connessione è il pacchetto “connect”. Al termine di una connessione, il Client invia un pacchetto “disconnect”.

5.1 Formato Messaggio

Il messaggio è formato da tre parti:

1. L’header fisso: contiene informazioni sul tipo di messaggio, il livello Qos, alcuni flags e la lunghezza del messaggio.
2. Variable Header: alcuni messaggi di comando MQTT contengono un'intestazione variabile che risiede tra l'intestazione fissa e il payload.
3. Payload.

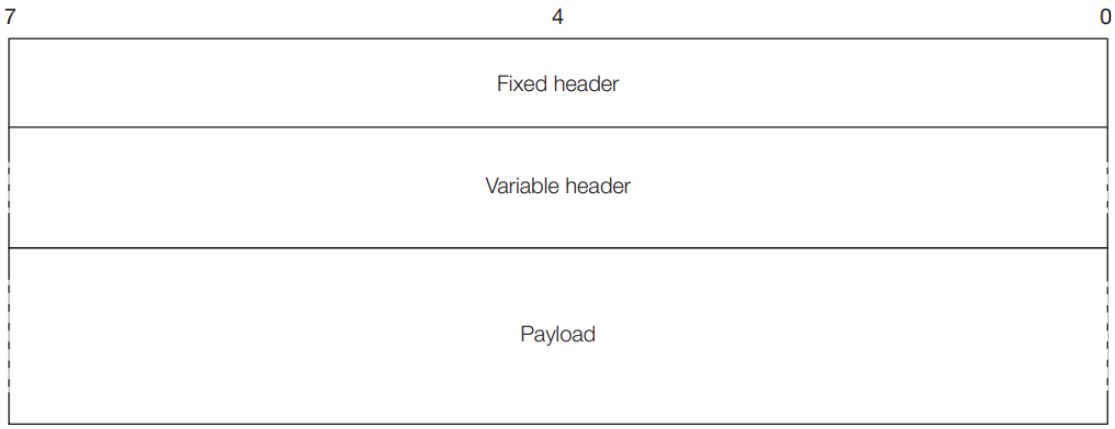

Figura 24: Formato messaggi MQTT

5.2 QOS

MQTT definisce 3 livelli di quality of service (QoS) per la consegna dei messaggi. È deciso tra mittente e destinatario (publisher-broker e broker-subscriber), quindi non è obbligatorio avere lo stesso livello di Qos da publisher a subscriber. Ogni livello indica un impegno maggiore da parte del server per assicurarsi che il messaggio venga consegnato. QoS più alti indicano una maggiore affidabilità nella consegna dei messaggi ma un impiego maggiore in termini di banda

MQTT è un protocollo di messaggistica estremamente leggero, progettato per dispositivi limitati e reti a bassa larghezza di banda ed alta latenza. I principi su cui si basa sono quelli di abbassare al minimo le esigenze in termini di ampiezza di banda e risorse mantenendo allo stesso tempo una certa affidabilità e grado di certezza di invio e ricezione dei dati. Protocollo orientato all'IoT ed a quelle applicazioni mobili per le quali va tenuto in maggior conto il consumo di banda in rete e di energia dei dispositivi.

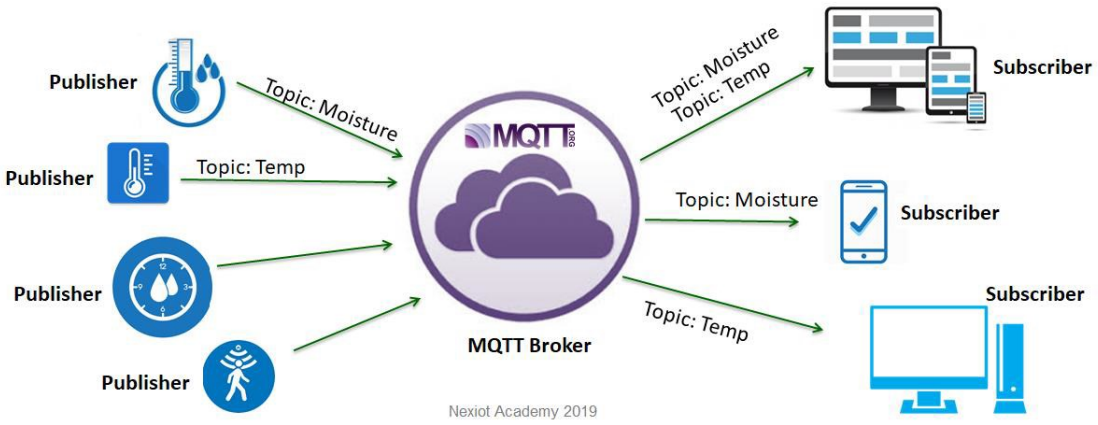

Figura 25: Utilizzo MQTT

Per realizzare la comunicazione via MQTT utilizzeremo:

- Mosquitto: Eclipse Mosquitto è un broker di messaggi open source (con licenza EPL / EDL) che implementa la versione 3.1.1 del protocollo MQTT. Mosquitto è leggero ed è adatto per l'uso su tutti i dispositivi da computer a scheda singola a basso consumo. È in ascolto di default sulla porta 1883 all'indirizzo Ip dell'elaboratore su cui gira l'applicazione.

- Eclipse Paho: libreria Python che implementa tutti i metodi per la comunicazione MQTT. Il progetto Paho è stato creato per fornire implementazioni open source scalabili di protocolli di messaggistica aperti e standard rivolti ad applicazioni nuove, esistenti ed emergenti per Machine-to-Machine (M2M) e Internet of Things (IoT). Paho, tramite script Python che richiama la libreria apposita, viene utilizzato nel progetto come client subcriber MQTT per ricevere i dati da Mosquitto.

PARTE III TECNICA DI FILTRAGGIO

6 RSSI

Nelle telecomunicazioni, received signal strength indicator (RSSI) è una misura della potenza presente in un segnale radio ricevuto. RSSI è solitamente invisibile a un utente di un dispositivo ricevente. Tuttavia, poiché la potenza del segnale può variare notevolmente e influire sulla funzionalità delle reti wireless, i dispositivi IEEE 802.11 spesso rendono la misurazione disponibile per gli utenti. In un sistema IEEE 802.11, RSSI è la potenza relativa del segnale ricevuto in un ambiente wireless, maggiore è il valore RSSI, più forte è il segnale. L'unità di misura è in dBm, pertanto, quando un valore RSSI è rappresentato in una forma negativa (ad esempio −75), più il valore è vicino a 0, più forte è il segnale ricevuto. Tuttavia, RSSI non sempre fornisce misurazioni sufficientemente accurate per determinare correttamente la posizione.

6.1 Relazione Distanza-RSSI

Le soluzioni di stima della prossimità sono spesso difficili da implementare e l'accuratezza di tali sistemi deve essere robusta, precisa e adatta a tutti gli ambienti. L'utilizzo di tecniche RSSI è difficile a causa di non linearità nel sistema. Queste non linearità possono essere il risultato di ostruzione LOS (Line Of Sight), interferenza del segnale/rumore e condizioni ambientali dinamiche che possono causare l'effetto multipath. Le situazioni appena elencate sono i principali fattori che governano le prestazioni della stima basata su RSSI. Il valore RSSI dei segnali wireless trasmessi dai beacon segue il path loss model:

$$RSSI = -10\, n\, \log_{10}\left(\frac{D}{D_0}\right) + C_0, \qquad (6.1)$$

dove $RSSI$ è il valore RSSI osservato in dBm, n è l'esponente di pathloss corrispondente all'ambiente, D è la distanza tra il beacon e il dispositivo ricevente, D_0 è la distanza di riferimento e C_0 è il valore RSSI medio alla distanza di riferimento.

Il primo problema, in base all'ambiente considerato, è quello di definire in modo ottimale i parametri n e C_0 del modello path-loss attraverso la sperimentazione dei beacon. Quindi, a una distanza di riferimento,D_0 , di 1 m, la stima della prossimità e della distanza può essere calcolata come segue:

$$D = 10^{\frac{C_0 - RSSI}{10n}} \qquad (6.2)$$

Il secondo problema è quello di ottenere stime accurate della distanza D garantendo che la RSSI osservata sia ideale. Le tecniche di filtraggio della stima dei valori sono applicate per attenuare gli effetti delle non linearità nel sistema, con conseguente migliore stima della prossimità [12].

6.2 Multipath

Per definizione multipath è il fenomeno di propagazione che deriva da un segnale radio che raggiunge l'antenna ricevente attraverso due o più percorsi. Cause tipiche di multipath sono riflessione e rifrazione della ionosfera, o più in generale in un ambiente interno, pareti e oggetti. I segnali influenzati da multipath provocano interferenze costruttive o distruttive. Quest'ultima causa il fading, cioè la variazione o l'attenuazione del segnale.

Il segnale riflesso da più oggetti produce diversi segnali che raggiungono il ricevitore in momenti diversi causando interferenze che rendono il ricevitore incapace di distinguere il segnale originale che viaggia in LOS.

7 Filtro di Kalman

I dati ricevuti dai beacon contengono il valore RSSI. L'algoritmo sviluppato in questo lavoro di tesi si basa sul filtro di Kalman, un efficiente filtro stocastico ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore. È una tecnica innovativa nel filtraggio del segnale RSSI, ma usata con successo in svariati settori. I valori RSSI possono essere influenzati dall'effetto del multipath e dal fading nell'ambiente indoor [12]. Di conseguenza, il filtro del segnale è applicato solitamente nella fase di elaborazione dei dati per ridurre il rumore e minimizzare l'errore di misura di RSSI, per poi tradurli in stime della distanza. La stima, basata sulla minimizzazione dell'errore tra il modello matematico e le misure, si compone di due fasi ben distinte:

- Time Update o Prediction Phase: in questa fase si esegue una previsione dello stato e della covarianza dell'errore, basandosi sul modello matematico del sistema. Questa stima viene solitamente definita con il termine di stima a priori del sistema.
- Measurement Update o Correction Phase: in questa fase si esegue una correzione dello stato a priori attraverso una misura esterna. Si ottiene in tal modo una migliore stima dello stato, definita con il termine di stima a posteriori del sistema.

Il filtro di Kalman affronta il problema generale di cercare di stimare lo stato $x \in \Re^n$ governato da un'equazione stocastica lineare alle differenze finite:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B u_k + w_k, \qquad (7.1)$$

e un'equazione di misura:

$$z_k = H_k x_k + v_k. \qquad (7.2)$$

Dove:

- x_k è il vettore di stato del sistema;
- u_k è il vettore dell'input di controllo del sistema;
- A_k è la matrice che lega lo stato del sistema x_k con lo stato x_{k+1};
- B è la matrice che lega l'input u_k con lo stato del sistema x_{k+1};
- w_k è il rumore bianco Gaussiano avente media nulla $E[w_k] = 0$ e covarianza nota $E[w_k\, w_i^T] = Q_k$ se $i = k$ zero altrimenti;
- z_k è il vettore di misura;
- H_k è la matrice che lega lo stato del sistema alla misura z_k;
- v_k è il rumore bianco Gaussiano avente media nulla $E[v_k] = 0$ e covarianza nota $E[v_k\, v_i^T] = R_k$, se $i = k$ zero altrimenti.

Si assume inoltre che i rumori w e v nelle due equazioni siano tra loro non correlati, di conseguenza le matrici di covarianza Q_k e R_k risultano tra loro indipendenti.

Definendo con x_{k-1} lo stato a priori del nostro sistema allo step k e $\hat{x}_k$ lo stato a posteriori del nostro sistema allo step k, possiamo stimare l'errore a priori e l'errore a posteriori nel seguente modo:

$$e_{k-1} = x_k - x_{k-1}; \qquad (7.3)$$

$$e_k = x_k - \hat{x}_k. \qquad (7.4)$$

Le cui matrici di covarianza, associate rispettivamente all'errore di stima dello stato a priori e a posteriori risultano:

$$P_{k-1} = E[e_{k-1}\, e_{i-1}^T]; \qquad (7.5)$$

$$P_k = E[e_k\, e_i^T]. \qquad (7.6)$$

Lo stato a posteriori x_k è calcolato come combinazione lineare dello stato a priori con una differenza ponderata tra l'attuale misura z_k e la misura prevista $H_k x_{k-1}$:

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - H_k x_{k-1}); \qquad (7.7)$$

dove:

- $(z_k - H_k x_{k-1})$ è il termine che riflette la discrepanza tra l'attuale misura x_k e la misura prevista $H_k x_{k-1}$ che viene solitamente definito residuo;
- K_k è il guadagno di Kalman.

La giustificazione per (7.2) è radicata nella probabilità della stima a priori x_{k-1} condizionata su tutte le misure precedenti z_k.

Il guadagno di Kalman corrisponde a quel fattore che permette di minimizzare la matrice di covarianza P_k e viene calcolato mediante la seguente relazione:

$$K_k = \frac{P_{k-1}H_k^T}{(H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)}; \qquad (7.8)$$

Osservando la (7.7) e la (7.8) si può notare come K_k pesi in misura maggiore il valore del residuo se la matrice di covarianza di misura R_k tende a zero.

$$\lim_{R_k \to 0} K_k = H_k^{-1}. \qquad (7.9)$$

In ugual modo, K_k pesa in misura minore il residuo se la matrice di covarianza dello stato a priori P_{k-1} tende a zero.

$$\lim_{P_{k-1} \to 0} K_k = 0\,; \qquad (7.10)$$

Il guadagno di Kalman permette quindi di eseguire la stima ottimale dello stato di un sistema, pesando il valore della misura in maniera proporzionale al suo grado di affidabilità.

Questo grado di affidabilità viene definito dal confronto tra la covarianza della misura prevista mediante il modello matematico e la covarianza della misura realmente acquisita.
Una volta determinato lo stato del sistema a posteriori x_k, una nuova matrice di covarianza viene calcolata mediante:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k-1}; \qquad (7.11)$$

Nella fase di TIME UPDATE, si determina il nuovo stato a priori x_{k+1} basandosi sul modello matematico del sistema, definito dall'equazione di processo:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B u_k; \qquad (7.12)$$

e la nuova matrice di covarianza dello stato a priori viene calcolata mediante:

$$P_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q_k. \qquad (7.13)$$

[13]

Le equazioni specifiche per il Time Update sono la (7.12) e (7.13).

Le equazioni specifiche per la Measurement Update sono la (7.7), (7.8) e (7.11).

Il primo compito durante l'aggiornamento della misurazione è calcolare il guadagno di Kalman K_k. Il passo successivo è misurare il processo per ottenere z_k, e quindi generare una stima dello stato a posteriori incorporando la misura (7.7). Il passo finale è quello di ottenere una stima di covarianza di errore a posteriori tramite (7.11).

Dopo ogni coppia di aggiornamento di misura e di tempo, il processo viene ripetuto con le precedenti stime a posteriori utilizzate per proiettare o prevedere le nuove stime a priori. Questa natura ricorsiva è una delle caratteristiche molto interessanti del filtro Kalman che condiziona ricorsivamente la stima attuale su tutte le misurazioni passate.

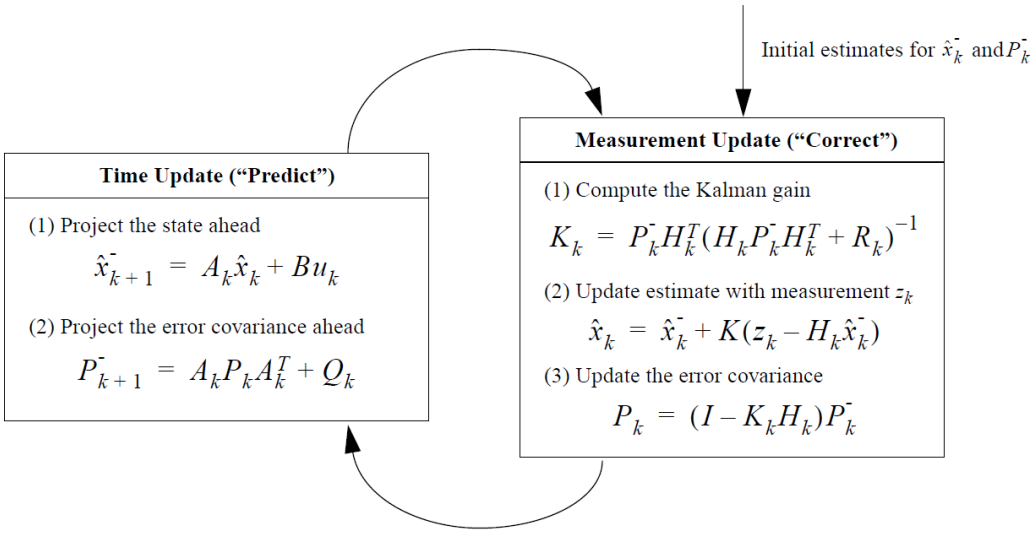

Figura 26: Fasi di update e prediction nel filtro Kalman

Ciascuna matrice di covarianza dell'errore di misura R_k e il rumore di processo Q_k possono essere misurati prima dell'uso del filtro. Nel caso della covarianza errore di misura R_k, in particolare questo ha senso perché abbiamo bisogno di essere in grado di misurare il processo (durante il funzionamento del filtro). In genere dovremmo essere in grado di effettuare alcune misurazioni di campioni offline per determinare la varianza dell'errore di misura.

Nel caso di Q_k, spesso la scelta è meno deterministica. Per esempio, questa fonte di rumore è spesso usata per rappresentare l'incertezza nel modello di processo (7.1). A volte un modello molto povero può essere usato semplicemente "iniettando" abbastanza incertezza attraverso la selezione di Q_k. Certamente in questo caso ci si aspetterebbe che le misurazioni del processo siano affidabili.

In entrambi i casi, indipendentemente dal fatto che si disponga o meno di una base razionale per la scelta dei parametri, spesso si possono ottenere prestazioni di filtro superiori (statisticamente parlando) accordando i parametri di filtro Q_k e R_k.

In condizioni in cui Q_k e R_k sono costanti, sia la covarianza dell'errore di stima P_k che il guadagno di Kalman K_k si stabilizzeranno rapidamente e quindi rimarranno costanti.

7.1 Filtro di Kalman 1D

Trattando il caso del Filtro di Kalman in una dimensione, visto che i beacon sono fissi, la formulazione viene semplificata in questo modo:

$$K_k = \frac{P_{k-1}H_k^T}{(H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)}; \qquad (7.14)$$

$$K_k = \frac{P_{k-1}}{(P_{k-1}+R)}; \qquad (7.15)$$

Dove K_k è il guadagno di Kalman, P_k è l'errore di misura o matrice di covarianza, P_{k-1} è la matrice di covarianza nello stato precedente, H_k è la matrice delle misurazioni e R è il rumore di processo. La deviazione standard per i valori RSSI è stata calcolata per determinare l'errore di misurazione e l'errore iniziale nella stima nella prima serie. Supponendo che H_k sia una matrice unitaria uguale a 1 per gli oggetti fissi nell'equazione (7.2), il guadagno di Kalman può essere semplificato come equazione (7.15).

Supponiamo che P_k sia uguale a R, che il guadagno iniziale di Kalman sia 0.5 e che il valore continui ad aggiornare durante la misurazione con l'aggiornamento dell'errore nella stima, l'equazione per il nuovo valore stimato di RSSI sia:

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - x_{k-1}); \qquad (7.16)$$

dove x_k è la stima per il nuovo valore RSSI, x_{k-1} è la stima per il vecchio valore RSSI, K_k è il guadagno Kalman, z_k è l'attuale lettura RSSI. Quindi, l'equazione per il calcolo della covarianza sarà:

$$P_k = (1 - K_k)P_{k-1}. \qquad (7.17)$$

Un maggiore guadagno di Kalman si traduce in una maggiore influenza sul valore finale. Man mano che il guadagno di Kalman aumenta, il valore RSSI filtrato x_k tenderà al valore letto dal ricevitore z_k, mentre la varianza P_k tenderà a zero [11].

7.2 Filtro di Kalman in presenza di un ostacolo

Un ricevitore è posizionato a 50 cm sul lato sinistro della striscia metallica e il Beacon a 50 cm sul lato destro della striscia metallica. La distanza totale tra Beacon e ricevitore è di 1 metro. La striscia metallica blocca il percorso rettilineo diretto tra Beacon e ricevitore. L'impostazione dell'esperimento è illustrata in Fig. 27. I valori RSSI raccolti vengono confrontati con il valore RSSI raccolto nella taratura per osservare se vi è una variazione nei valori RSSI che può derivare dall'effetto schermante e dalla riflessione.

Figura 27: Beacon e ricevitore ostacolati da uno schermo metallico

Dai risultati riportati sul grafico sottostante (Figura 28), i valori RSSI filtrati iniziali sono superiori a quello della presenza di metallo, questo indica una maggiore resistenza del segnale in assenza di metallo nel percorso di trasmissione del segnale. Dopo l'iterazione continua del filtro Kalman, i valori RSSI coprono rapidamente e raggiungono risultati stabili [11]. Quindi, per avere risultati migliori in caso di ostacoli è opportuno processare una grande quantità di dati.

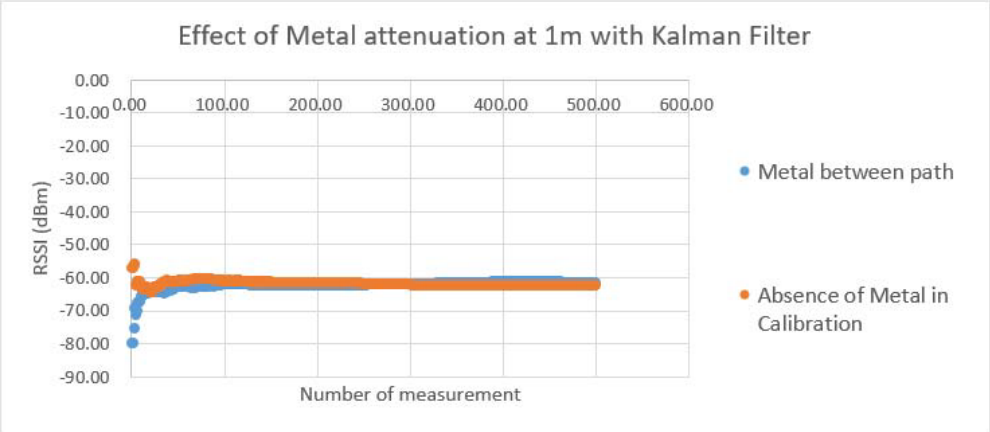

Figura 28: Effetto della presenza dello schermo metallico

8 LULU Filter

Questo capitolo tratta una classe di smoother o anche detti smussatori non lineari, chiamati LULU smoothers, introdotti da Rohwer alla fine degli anni Ottanta nella letteratura matematica. Sono stati applicati con successo in vari problemi tecnici e scientifici. Gli smussatori lineari invece, non rispondono bene ai dati contenenti rumore impulsivo o valori anomali.

La famiglia di filtri LULU è definita dalle interconnessioni a cascata di una collezione di componenti semplici. La base per tutti i membri di questa classe di filtri è la seguente coppia di operatori:

$$\bigvee_K \{x_k\} = max\{x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+K}\}, \qquad (8.1)$$

e

$$\bigwedge_K \{x_k\} = min\{x_{k-K}, \dots, x_{k-1}, x_k\} \qquad (8.2)$$

Si noti che, a differenza della maggior parte degli altri filtri considerati, questi operatori sono asimmetrici: $\bigvee_K\{x_k\}$ si riferisce al set $\{x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+K}\}$ delle osservazioni attuali e future, rimuove gli impulsi verso il basso, mentre $\bigwedge_K\{x_k\}$ si riferisce al set $\{x_{k-K}, \dots, x_{k-1}, x_k\}$ delle osservazioni attuali e passate, rimuove gli impulsi verso l'alto.

La famiglia di filtri LULU si basa sulla seguente coppia di interconnessioni a cascata (definita dal simbolo $\circ$) di questi due elementi:

$$L_K\{x_k\} = \bigvee_K \circ \bigwedge_K \{x_k\}, \qquad (8.3)$$

e

$$U_K\{x_k\} = \bigwedge_K \circ \bigvee_K \{x_k\} \qquad (8.4)$$

L_K e U_K sono filtri NFIR (nonlinear nonrecursive or finite impulse response fillters) definiti sulla finestra dei dati in movimento simmetrico $w_k = \{x_{k-K}, \dots, x_k, \dots, x_{k+K}\}$. Le principali proprietà di questi filtri sono:

1. Il filtro identità I appartiene alla famiglia dei LULU smoothers e si ricava in questo modo:

$$\bigvee_0 = \bigwedge_0 = L_0 = U_0 = I; \qquad (8.5)$$

2. Per ogni $m \geq n$, abbiamo che:

$$L_n \circ L_m = L_m \; e \; U_n \circ U_m = U_m, \qquad (8.6)$$

3. I seguenti filtri sono idempotenti per ogni n:

$$L_n, U_n, U_n \circ L_n \; e \; L_n \circ U_n \qquad (8.7)$$

L'idempotenza è una proprietà delle funzioni per la quale applicando molteplici volte una funzione data, il risultato ottenuto è uguale a quello derivante dall'applicazione della funzione un'unica volta come ad esempio:

$$(L_n \circ U_n)^2 = L_n \circ U_n \qquad (8.8)$$

4. Chiaramente $L_K\{x_k\} \leq x_k \leq U_K\{x_k\}$ e ne consegue abbastanza facilmente che:

$$\ldots \leq L_{K+1}\{x_k\} \leq L_K\{x_k\} \leq \cdots \leq L_1\{x_k\} \leq x_k \leq U_1\{x_k\} \leq \cdots \leq U_K\{x_k\} \leq U_{K+1}\{x_k\} \leq \cdots$$

È possibile combinare i due operatori ottenendo $L_K U_K$ oppure $U_K L_K$ (l'interconnessione tra i due operatori può essere rappresentata anche eludendo l'operatore ∘) [14].

8.1 Applicazione del LuLu Smoother

Gli operatori LULU sono utilizzati per la rimozione del rumore impulsivo. LULU filtra il segnale eseguendo un semplice metodo di valutazione per rimuovere i picchi e gli avvallamenti. La Figura 29 illustra i risultati degli operatori L e U nel filtrare la sequenza. In questa figura, quella superiore è il segnale originale mentre quella centrale e quella inferiore mostrano i segnali smussati dopo aver applicato rispettivamente gli operatori L e U [14].

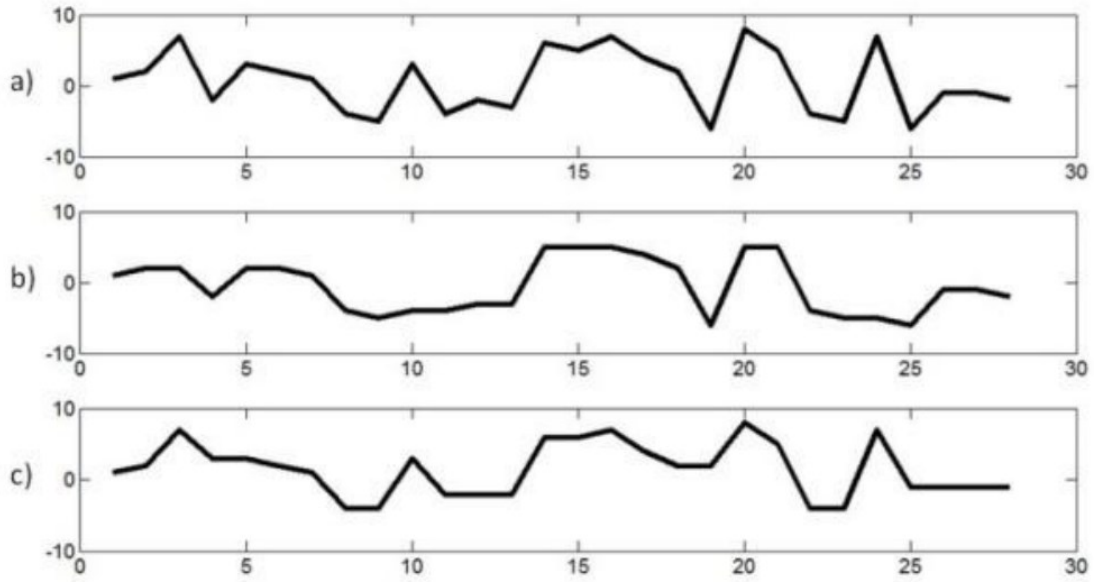

Figura 29: Applicazione del LuLu smoother

La figura a) mostra il segnale originale, la b) l'applicazione dell'operatore L_K, la c) dell'operatore U_K.

Nel caso del filtro Kalman-LULU, si definiscono i due operatori in questo modo:

- $L_n = \max(\min(x_{i-n}, \dots, x_i) \dots \min(x_i, \dots, x_{i+n}))$;
- $U_n = \min(\max(x_{i-n}, \dots, x_i) \dots \max(x_i, \dots, x_{i+n}))$.

Dove $(x_{i-n}, \dots, x_i, \dots, x_{i+n})$ rappresentano i valori RSSI in uscita dal filtro di Kalman.

$$\left(W_j x\right)_i = \begin{cases} x_i & if \quad L_n < x_i < U_n \\ L_n & if \quad x_i < L_n \\ U_n & if \quad x_i > U_n \end{cases}$$

Il valore $\left(W_j x\right)_i$ in uscita dal filtro viene chiamato "winsorised smoother". Si viene a creare un limite superiore (U_n) e un limite inferiore (L_n) lungo la serie, dove se x_i è compreso tra i limiti viene scelto esso stesso come valore finale; invece, se si supera il confine superiore o inferiore il valore RSSI è assegnata al valore dei confini superiore $\left(W_j x\right)_i = U_n$ o inferiore $\left(W_j x\right)_i = L_n$ [11].

9 KALMAN-LULU

Per il progetto di tesi si è scelto il filtro Kalman-LULU perché a differenza di altri mostra risultati migliori per quanto riguarda l'accuratezza e l'efficacia nella stima della prossimità, come riportato nella ricerca [11]. Si è dimostrato che l'errore quadratico medio del filtro Kalman-LULU proposto è il minore tra tutti i filtri, l'errore percentuale rispetto al range effettivo è del 22.42%, molto migliore rispetto al valore non filtrato, al filtro mediano, alla media mobile e al solo filtro di Kalman. La percentuale di miglioramento dei risultati del filtro Kalman-LULU rispetto ai valori non filtrati è del 30,42%

Filter	Average RMS Error	% Error to Effective Range	% of improvement compare with non-filter
Non-filtered	3.06	32.22%	N/A
Median	2.46	25.90%	19.64%
Moving Average	2.52	26.54%	17.63%
Kalman	2.19	23.07%	28.42%
Kalman-LULU	2.13	22.42%	30.42%

Figura 30: Prestazione delle diverse tecniche di filtraggio

I risultati non filtrati non sono auspicabili per il posizionamento in quanto la fluttuazione dei valori RSSI può avere un impatto negativo sulla precisione che può portare a ambiguità nella stima della distanza.

Inoltre, i risultati sono anche insoddisfacenti dopo l'applicazione del filtro mediano, del filtro a media mobile e del filtro di Kalman a causa della diminuzione o del miglioramento insignificante del valore di RMS Error. Tuttavia, il filtro Kalman-LULU proposto mostra la più forte correlazione tra i filtri testati che fornisce una relazione lineare più affidabile delle equazioni dedotte per la stima della distanza [11].

PARTE IV SOLUZIONE IMPLEMENTATIVA

10 Soluzione Industrial Iot per l'Asset Tracking: Progettazione e Sviluppo

Con questo capitolo, si cercherà di descrivere nel dettaglio l'implementazione di un progetto realizzato con la tecnologia Beacon per la localizzazione di asset produttivi in ambito industriale. Come già accennato nei capitoli precedenti, il compito di questo progetto è quello di fornire un sistema di tracciamento di asset produttivi, che sarà poi integrato in una realtà industriale, ma soprattutto per fornire uno strumento utile agli operatori nel momento in cui andranno a posizionare i beacon all'interno dell'ambiente indoor, per semplificare e velocizzare i tempi di lavoro in una catena produttiva.

Il sistema è costituito da tre protagonisti principali: uno scanner, trasmettitori e un elaboratore. Nel dettaglio:

1. Lo scanner è il Gateway Bluetooth / WiFi, il quale da una posizione ideale effettua scansioni per intervalli configurabili e tramite protocollo MQTT invia i dati scansionati al Broker. Si occupa di indirizzare i messaggi dei Beacon.

2. I trasmettitori sono i Beacon BLE i quali inviano dati per un intervallo di Advertising specifico ad una determinata potenza.

3. L'elaboratore nel contesto descritto è un PC che può essere sia portatile che fisso, su cui è in ascolto il Broker MQTT e implementa il programma di filtraggio e posizionamento dei valori. Memorizza i valori calcolati, per poi renderli disponibili.

Il funzionamento della scansione e della determinazione della posizione avviene mediante i seguenti passi:

1. Posizionamento dei Beacon su un asset specifico;

2. Scansione dei Beacon;

3. I segnali vengono ricevuti dal Gateway, la scansione termina se non vengono rilevati dispositivi;

4. Invio dei dati al Broker Mosquitto;

5. Sottoscrizione al Topic specifico;

6. Selezione dei dati scansionati in relazione all'indirizzo MAC del dispositivo;

7. Filtraggio dei valori RSSI, si eliminano dall'elenco quelli che non fanno parte del sistema;

8. I valori RSSI filtrati vengono utilizzati per la determinazione della distanza.

10.1 Beacon E8

Un Bluetooth Low Energy Beacon viene utilizzato per trasmettere segnali in tutte le direzioni che vengono catturati dal ricevitore. Il Tag Beacon E8 (Figura 31), utilizzato nel progetto di tesi, è un beacon di nuova generazione che implementa la piattaforma hardware Bluetooth 5.0, un accelerometro a 3 assi a basso consumo (opzionale). Viene utilizzato principalmente per l'asset tracking, activity monitoring e inventory tracking. Pubblicizza dati standard iBeacon, Eddystone (UID, URL, TLM) e sensori di accelerometro contemporaneamente. L'utente può configurare il beacon tag E8 tramite l'app di configurazione Beaconset+, attraverso il quale può variare i parametri come la Measured Power, Radio Tx power e Adv. Interval.

Figura 31: Beacon E8

Per la tecnologia Bluetooth LE incorpora il chipset nRF52 series della Nordic Semiconductor. Ha un massimo di 50 metri di portata per i pacchetti pubblicitari.

Nella tabella sottostante vengono riportate le caratteristiche del beacon utilizzato nelle prove di misura.

ELECTRONIC PARAMETER

Item	Value	Remarks
Case Color	white	Other colors can be customized
Battery Model	1 x CR2032	230mAh, 3.0V
Operation Voltage	1.8-3.6V	DC
Transmission Current	5.3mA (peak current)	Tested at 0dBm transmission power
Transmission Range	50 meters	Maximum
Sampling Interval	900ms	Accelerometer
Sampling Accuracy	+/- 2g	Default
Antenna	50ohm	On board / PCB Antenna
Size	32x23x 3.3 mm	Null

E8 è ideale per localizzare e tracciare le risorse fisiche senza infrastrutture complesse e costi elevati. Il design elegante e compatto dell'E8 lo rende perfetto in molti tipi di applicazioni in diversi settori industriali. E8 è in grado di essere installato su asset nella gestione del magazzino e nel trasporto logistico (Figura 32). Attraverso il posizionamento in tempo reale, i responsabili di magazzino e logistica possono monitorare efficacemente la posizione e lo stato degli asset, migliorando così l'efficienza, riducendo i costi del lavoro e mitigando il rischio di perdita [15].

Figura 32: Esempio di applicazione del Tag E8

10.2 Gateway G1

Il ricevitore G1 utilizzato è un Gateway (Figura 33) di connettività Bluetooth 5.0 low energy (BLE) to Wi-Fi/Ethernet senza l'utilizzo di smartphone o app. Il Gateway G1 raccoglie i dati dai sensori BLE e quindi invia i dati al server locale o al server cloud remoto con MQTT / HTTP protocol tramite Wi-Fi. Il Gateway per quanto concerne il lavoro supporta il protocollo MQTT 3.1.1.

Figura 33: Gateway G1

Al fine di realizzare fabbriche intelligenti semi-automatizzate e automatizzate, molte di queste hanno già avviato piani per implementare gateway Bluetooth e stanno già lavorando. I gateway Bluetooth sono installati all'interno della fabbrica in base all'area effettiva del sito.

Il gateway Bluetooth / WiFi è un dispositivo che collega prodotti basati su Bluetooth ad altri dispositivi o hardware. Il gateway di cui parliamo qui è il beacon gateway, un lettore in una configurazione beacon BLE. Può anche essere definito come un lettore abilitato Bluetooth che consente la comunicazione tra beacon Bluetooth a bassa energia. Consente inoltre la trasmissione di dati da dispositivi intelligenti a beacon BLE nello stesso edificio e viceversa.

Un'altra cosa importante da sapere è che il gateway Bluetooth / WiFi funziona scansionando i dispositivi Bluetooth presenti nel suo raggio d'azione. Una volta che il gateway trova un dispositivo, rileva i servizi del dispositivo e le strutture dati delle caratteristiche. Successivamente, il gateway elabora una richiesta HTTP o di altri protocolli di comunicazione. In termini di dimensioni e forma, il gateway Bluetooth / WiFi assomiglia principalmente a un modem wireless esterno. Tuttavia, funziona in modo simile a quello di un router di rete [16].

10.3 Settaggio dei dispositivi

Tramite smartphone, grazie all'applicazione Beaconset+ riesco a monitorare i Beacon utilizzando la connettività Bluetooth del telefono cellulare per la ricezione dei segnali. I dati sono leggibili direttamente sullo schermo (Figura 34) e variano in base alla mia posizione rispetto a quella dei dispositivi BLE. Viene fornita la tipologia di beacon, l'indirizzo MAC relativo, il valore RSSI, il livello percentuale di batteria, i dati standard iBeacon, Eddystone (UID, URL, TLM) e i valori dei sensori di accelerometro in caso di movimento o caduta. Ciò che interessa il mio lavoro è lo standard iBeacon.

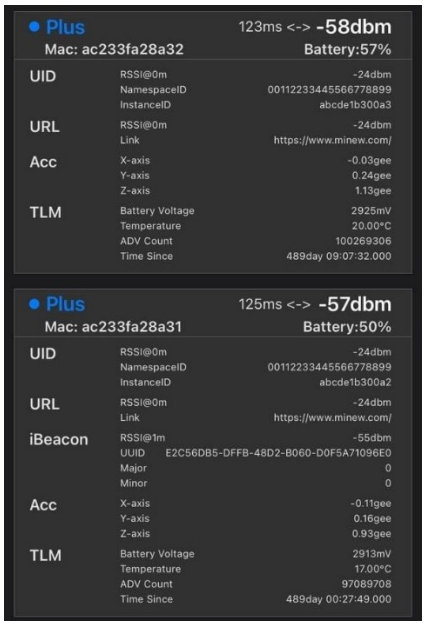

Figura 34: Esempio Interfaccia BeaconSet+

Per distinguere i beacon in base ai reparti di appartenenza dell'asset si impostano da qui (figura 35) i valori UUID, Minor e Major. Si sceglie il valore frequenza di trasmissione dei pacchetti Bluetooth che va da 100 millisecondi fino a 5 secondi, mentre il valore di RSSI ad 1m a -59 dBm e la potenza di trasmissione va da -40 dB fino a 4 dB.

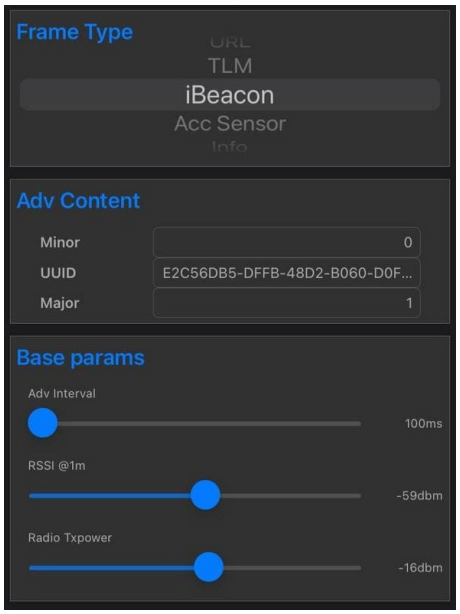

Figura 35: Settaggio dei parametri iBeacon

Il Gateway viene impostato come ripetitore WiFi, agganciandosi alla rete Internet presente nella struttura, può essere collegato al WLAN AP come client WLAN per realizzare la comunicazione dei dati con il server. Dopo aver collegato il gateway WIFI, si

apre la pagina http://192.168.99.1 tramite computer per accedere all'interfaccia di configurazione.

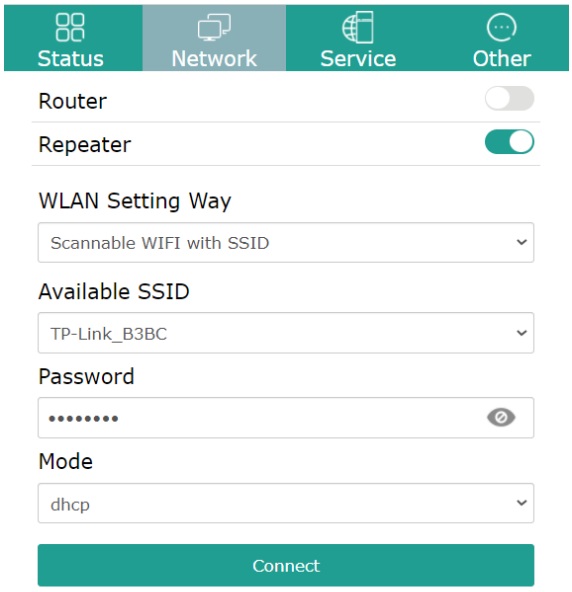

Figura 36: Interfaccia G1

Per poter leggere i dati di monitoraggio sul server, si sceglie come servizio di comunicazione il protocollo MQTT, digito l'indirizzo TCP/IP del Broker Mosquitto in ascolto sulla porta 1883 del PC (Figura 37). In questo modo il Gateway invia i dati dei Beacon sotto un topic specifico (/gw/ac233fc04e45/status) al Broker. L'interfaccia di configurazione permette di modificare i parametri, consentendo anche come protocollo di comunicazione http.

Figura 37: Settaggio parametri G1

Ci sono due tipi di advertising packet nei tag BLE, tra cui pacchetti pubblicitari e pacchetti di risposta di scansione. I pacchetti pubblicitari sono trasmessi attivamente dai tag BLE, mentre i pacchetti di risposta alla scansione sono trasmessi passivamente dai tag BLE dopo aver ricevuto richieste dallo scanner. Esistono due strategie di scansione per il modulo BLE del gateway, tra cui la scansione attiva e la scansione passiva. La scansione attiva invia richieste di pacchetti di risposta alla scansione al tag BLE, mentre la scansione passiva riceve solo pacchetti pubblicitari e non invia richieste di pacchetti di risposta alla scansione. Si possono configurare scansioni attive da 100 ms fino a 5000 millisecondi (Figura 38). Il parametro della finestra di scansione non deve essere più grande del parametro dell'intervallo di scansione. Quando i due parametri sono uguali, la velocità di scansione può raggiungere il 100%.

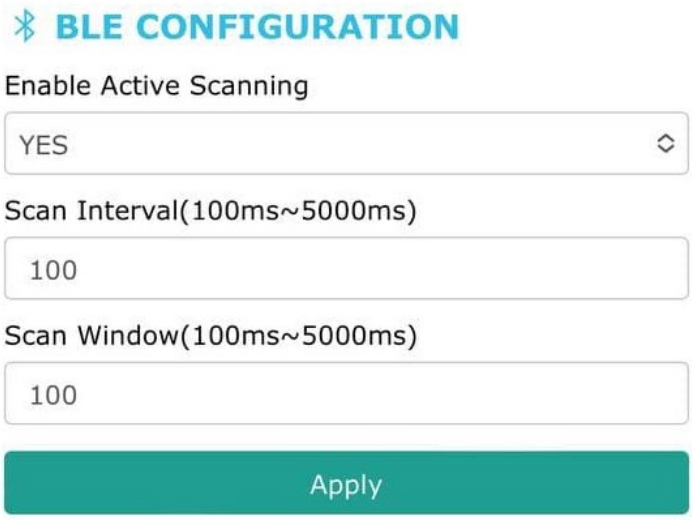

Figura 38: Settaggio parametri G1

10.4 Paho Client

Per implementare la parte del protocollo MQTT e processing dei segnali con il filtro Kalman-LuLu ho utilizzato il linguaggio di programmazione Python, perché è un linguaggio di alto livello, e al tempo stesso semplice e potente, attraverso cui sono riuscito ad implementare ciò di cui avevo bisogno per realizzare il sistema di asset tracking. In questa sezione forniremo una descrizione di un publisher e di un subcriber che possono scambiarsi messaggi. Tuttavia, un client può essere sia chi pubblica i messaggi e chi li riceve allo stesso tempo.

Come sottolineato nel capitolo 5, viene utilizzato Paho come client, che fa parte del linguaggio Python. Per prima cosa è opportuno richiamare la libreria opportuna ***import paho.mqtt.client as paho***, per poter usufruire delle sue funzionalità. Per poter leggere messaggi bisogna creare una funzione di callback per poi poterli elaborare. Ecco la funzione di callback, che fondamentalmente importerà in output i messaggi ricevuti:

def on_message(client, userdata, message)

Viene creata tramite una funzione un client chiamato “user”, con le funzionalità di Paho per sottoscriversi al topic "/gw/ac233fc04e45/status". Prima di poter pubblicare messaggi o iscriversi ad argomenti, è necessario stabilire una connessione a un broker. Per fare ciò utilizzare il metodo connect del client Python mqtt, fornendo l’indirizzo IP del Broker Mosquitto (nel mio caso 192.168.1.190). Infine, abbiamo bisogno di eseguire un ciclo altrimenti non vedremo i messaggi ricevuti. Il metodo più semplice consiste nell'utilizzare ***loop_start()*** come segue. Dobbiamo anche interrompere il ciclo alla fine dello script ***loop_stop()*** e un ***break***, dopo un determinato periodo che possiamo decidere impostando un valore di ***tempolim.***

```python
import paho.mqtt.client as paho
import time
import sys
import datetime
import time
import json
broker='192.168.1.190'
topic="/gw/ac233fc04e45/status"
def on_message(client, userdata, message):
print(str(message.payload.decode("utf-8")))
json_ex = json.loads(message.payload.decode("utf-8"))
client= paho.Client("user")
client.on_message=on_message
print("connecting to broker host",broker)
client.connect(broker)
print("subscribing begins here")
client.subscribe(topic)
tempolim = time.time() + 15
while 1:
    client.loop_start()
    if (time.time() > tempolim):
      client.loop_stop()
      break
```

I messaggi ricevuti sono in formato JSON, per questo viene importata la libreria apposita, inoltre si richiamano le librerie con le quali si può lavorare con orari e date (***import time, import datetime***). La funzione subscribe viene adoperata per un tempo limitato a discrezione dell'operatore, in modo tale da poter elaborare un certo numero di dati.

Di seguito si riporta un esempio di messaggio ricevuto dopo aver fatto partire il programma.

{"timestamp":"2022-01 24T14:20:32Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A32","bleName":"","ibeaconUuid": "E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":0,"ibeaconMinor":0,"rssi":-59,"ibeaconTxPower":-59,"battery":0},{"timestamp":"2022-01 24T14:20:33Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A32","bleName":"","ibeaconUuid": "E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":0,"ibeaconMinor":0,"rssi":-57,"ibeaconTxPower":-59,"battery":0},{"timestamp":"2022-01-24T14:20:33Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A31","bleName":"","ibeaconUuid": "E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":1,"ibeaconMinor":0,"rssi":-75,"ibeaconTxPower":-59,"battery":0}

I messaggi includono le seguenti informazioni:

- Timestamp: data e orario di ricezione;
- Type: tipologia di protocollo del formato dati utilizzato, in questo caso iBeacon;
- Mac: indirizzo mac del dispositivo;
- bleName: nome del dispositivo BLE;

- ibeaconUuid: UUID del dispositivo;
- ibeaconMajor: valore major impostato;
- ibeaconMinor: valore minor impostato;
- rssi: valore rssi ricevuto;
- ibeaconTxPower: valore rssi ad 1 metro di distanza;
- battery: livello di batteria

10.5 Filtro di Kalman

In questa sezione viene descritta la parte implementativa del filtro di Kalman.

Viene importata la libreria math in modo tale da poter lavorare con le funzioni matematiche. Nel seguente script il filtro di Kalman viene definito come una classe di oggetti, così è possibile al suo interno definire le equazioni e le procedure di calcolo del filtro che sono state ampiamente descritte nel capitolo 7. Il codice rappresenta ampiamente le fasi di Prediction Phase e Measurement Update e la natura ricorsiva del filtro di Kalman. l filtro ha due fasi; previsione e aggiornamento. Le fasi sono necessarie in quanto il filtro effettua previsioni sul segnale RSSI in base al valore RSSI precedentemente determinato. Infine, aggiorna le variabili prima della sua prossima iterazione.

```python
import math
class KalmanFilter:
    cov = float('nan')
    x = float('nan')
    def __init__(self, Q, R):
        self.A = 1
        self.B = 0
        self.C = 1
        self.R = R
        self.Q = Q
    def filter(self, measurement):
        u = 0
        if math.isnan(self.x):
            self.x = (1 / self.C) * measurement
            self.cov = (1 / self.C) * self.Q * (1 / self.C)
        else:
            predX = (self.A * self.x) + (self.B * u)
            predCov = ((self.A * self.cov) * self.A) + self.R
            K = predCov * self.C * (1 / ((self.C * predCov) + self.Q));
            self.x = predX + K * (measurement - (self.C * predX));
            self.cov = predCov - (K * self.C * predCov);
         return self.x
    def last_measurement(self):
        return self.x
    def set_measurement_noise(self, noise):
        self.Q = noise
    def set_process_noise(self, noise):
        self.R = noise
```

Viene richiamata la funzione ***KalmanFilter***, affinché vengano filtrati i valori RSSI contenuti nei messaggi MQTT in formato JSON, di cui abbiamo parlato nella sezione precedente. In ingresso alla funzione vengono dati i parametri Q e R che rispettivamente rappresentano l'errore nella misurazione e il rumore di processo. In output si ottengono i valori RSSI non filtrati e filtrati dal filtro di Kalman. Il processo di filtraggio viene completato dopo aver processato tutti i valori acquisiti durante la scansione.

```python
test = KalmanFilter(Q,R)
testData = []
for x in testData:
    print ("Data:", x)
    print ("Filtered Data: ", test.filter(x))
```

10.5 LULU Smoother

Seguendo la teoria per il LuLu smoother in rifermento al capitolo 8, con questo script viene elaborato il filtro Kalman-LuLu. I valori RSSI in uscita dal filtro di Kalman vengono lavorati attraverso l'applicazione degli operatori Ln, Un e la scelta del valore x_i in modo tale da avere in uscita il valore ***smoothvalue*** Wi ottenuto confrontando il valore di riferimento x_i con i valori ottenuti dagli operatori Ln e Un così da poterlo inserire nella parte di codice in cui viene ricavata la distanza Gateway-Beacon.

```
test1 = KalmanFilter(Q,R)
for x in testData1:
    print ("Data1:", x)
    s=test1.filter(x)
    print ("Filtered Data1: ", s)
    maxseries1.append(s)
    minseries1.append(s)
    if (len(testData1)%2!=0):
        if(len(maxseries1)==(len(testData1)+1)*0.5) and (len(minseries1)==(len(testData1)+1)*0.5):
                xi1=maxseries1[0]
                Ln1.append(min(maxseries1))
                Un1.append(max(minseries1))
                maxseries1.pop(0)
                minseries1.pop(0)
    elif(len(maxseries1)==(len(testData1))*0.5) and (len(minseries1)==(len(testData1))*0.5):
                xi1=maxseries1[0]
                Ln1.append(min(maxseries1))
                Un1.append(max(minseries1))
                maxseries1.pop(0)
                minseries1.pop(0)
lower1=max(Ln1)
upper1=min(Un1)
if(xi1>=lower1 and xi1<=upper1):
    smoothvalue1=xi1
elif(xi1<lower1):
    smoothvalue1=lower1
elif(xi1>upper1):
    smoothvalue1=upper1
```

In riferimento alla sezione 6.1, equazione (6.2), al contrario del valore RSSI non filtrato, viene preso il valore in uscita dal filtro Kalman-LuLu e inserito nell'equazione per il calcolo della distanza tra il Gateway e il Beacon come ampiamente descritto nei capitoli precedenti per avere una maggiore efficienza nel sistema di tracciamento e superare i problemi dovuti all'ambiente indoor.

```
distGatewayBeacon=pow(10,((C0beacon-smoothvalue1)/10*n))
```

C0beacon sta ad indicare il valor medio di RSSI calcolato ad un metro di distanza, ***n*** è l'indice di pathloss relativo alla situazione considerata e ***smoothvalue*** il valore RSSI filtrato.

10.6 Procedura Sperimentale

Dopo aver posizionato il Gateway a meno di un metro di altezza dal pavimento e il Beacon su un asset specifico, sempre in linea di vista con il ricevitore, questi ultimi sono stati settati tramite l'applicazione Beaconset+ ad una potenza di trasmissione di -16 dBm, che meglio si adatta ad utilizzi in ambienti indoor di medie dimensioni e alla frequenza di trasmissione massima di 100 millisecondi, mentre il Gateway G1 ad una finestra di scansione ed un intervallo di scansione a 100 millisecondi. Il broker Mosquitto è in ascolto di messaggi di ricezione. Vengono selezionati tramite MAC Address specifico quali Beacon monitorare. Il client Paho effettua la connessione al broker Mosquitto (in ascolto sulla porta 1883 all'indirizzo 192.168.1.190) e successivamente effettua l'operazione di subscribe. Prima di eseguire le prove di misurazione è stata calcolato l'indice di pathloss per l'ambiente considerato attraverso un Anchor Beacon utilizzando i valori nella ricerca [12], in modo tale da individuare e testare quale valore si addice meglio all'ambiente indoor di prova. Inoltre, è stato calcolato il valore C0, il valore RSSI medio ad 1 metro di distanza del Beacon di prova. La riuscita dell'operazione di connessione al broker è data in output dal terminale (Figura 39), di conseguenza sono i mandati a video i messaggi del formato dati iBeacon sottoscrizione al topic.


```
connecting to broker host 192.168.1.190
subscribing begins here
[{"timestamp":"2022-01-29T08:16:02Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A32","bleName":"","ibeaconUuid":"E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096
E0","ibeaconMajor":0,"ibeaconMinor":0,"rssi":-67,"ibeaconTxPower":-59,"battery":0},{"timestamp":"2022-01-29T08:16:02Z","type":"iBeaco
n","mac":"AC233FA28A31","bleName":"","ibeaconUuid":"E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":1,"ibeaconMinor":0,"rssi":-64,"i
beaconTxPower":-59,"battery":0},{"timestamp":"2022-01-29T08:16:02Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A32","bleName":"","ibeaconUuid":
"E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":0,"ibeaconMinor":0,"rssi":-61,"ibeaconTxPower":-59,"battery":0},{"timestamp":"2022-
01-29T08:16:02Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A31","bleName":"","ibeaconUuid":"E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":1
,"ibeaconMinor":0,"rssi":-66,"ibeaconTxPower":-59,"battery":0},{"timestamp":"2022-01-29T08:16:02Z","type":"iBeacon","mac":"AC233FA28A
32","bleName":"","ibeaconUuid":"E2C56DB5DFFB48D2B060D0F5A71096E0","ibeaconMajor":0,"ibeaconMinor":0,"rssi":-65,"ibeaconTxPower":-59,"
```


Figura 39: Riuscita connessione al Broker e successiva visualizzazione dei messaggi

Sono state effettuate 6 acquisizioni per ogni distanza testata. Nella prima parte dell'esperimento si ottengono circa 700 valori RSSI grezzi alla distanza considerata del beacon di prova, per un intervallo di acquisizione medio di 3 minuti ognuno. Nella seconda parte dell'esperimento si applica la tecnica di filtraggio prendendo i campioni

RSSI ed elaborandoli con il filtro Kalman-Lulu, per poi utilizzare il valore RSSI filtrato per ricavare la distanza tra trasmettitore e ricevitore con un tempo medio di processo di pochi secondi. Il gateway rimane fisso insieme all'Anchor Beacon, mentre il Beacon posizionato sull'asset ad ogni prova viene spostato a partire da 1 metro fino a 5 metri a passi di 1 metro. Tutte le misurazioni sono state effettuate al chiuso, mantenendo beacon e ricevitore in linea d'aria diretta ad una altezza di circa 1 metro senza la presenza di ostacoli tra i due, in modo da avere una misurazione più corretta possibile.

I risultati ottenuti vengono salvati direttamente sul calcolatore attraverso un file di testo o un file csv, questo perché ogni operatore leggendo la data, l'ora di ricezione dei dati e l'indirizzo MAC di ciascun Beacon può monitorare quante volte l'asset specifico si è spostato, se è uscito dal magazzino o edificio.

```
720,    2022-01-24 14:20:32,    AC233FA27B6A,   -49.212037010293486 dBm,        1.02842 meters
```

10.7 Risultati Prove

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle prove svolte. I test sono stati effettuati in ambiente indoor, per comprendere il comportamento del segnale. Le misurazioni sono state fatte in assenza di ostacoli in linea diretta tra beacon e ricevitore.

	1 METRO	**2 METRI**	**3 METRI**	**4 METRI**	**5 METRI**
PROVA N 1	1.02842	1.93942	2.84690	4.04090	5.21094
PROVA N 2	1.15301	2.03458	3.10342	3.85642	5.20906
PROVA N 3	0.83099	2.16368	3.14166	3.93241	4.85269
PROVA N 4	1.33146	2.04902	3.26224	3.91807	5.64026
PROVA N 5	1.19422	2.39558	3.08810	4.37903	5.25729
PROVA N 6	1.09976	1.95096	2.81537	4.16622	5.38535

I valori della tabella mostrano come i risultati a cui è stato possibile rilevare i beacon in ambienti indoor si avvicinano a quelli reali. In particolare, si nota che le prove a 5 metri di distanza sono quelle che portano ad un errore maggiore, mentre la più precisa in media è quella a 2 metri.

Nella tabella sottostante si riportano i valori dell'errore medio assoluto (Mean Absolute Error), errore quadratico medio (Mean Square Error) e della sua radice (Root Mean

Square Error) cioè la deviazione standard. La prova a 3 metri di distanza è quella ha i valori poco sparsi intorno alla media, cioè con il valore RMSE minore, mentre la prova a 5 metri è quella più dispersiva.

	1 METRO	2 METRI	3 METRI	4 METRI	5 METRI
MAE	0.16265	0.12541	0.15552	0.14654	0.30837
MSE	0.03505	0.03215	0.02747	0.03414	0.12242
RMSE	0.18722	0.17932	0.16574	0.18477	0.34988

In questa sezione si riportano i valori MAE, MSE e RMSE dei dati filtrati dal solo fitro di Kalman e i valori non filtrati.

	1 METRO	2 METRI	3 METRI	4 METRI	5 METRI
MAE	0.26446	0.30799	0.20871	0.18482	0.31208
MSE	0.08157	0.03864	0.05741	0.09102	0.10241
RMSE	0.28561	0.19658	0.23961	0.30170	0.32001

	1 METRO	2 METRI	3 METRI	4 METRI	5 METRI
MAE	1.50071	2.51018	1.05545	2.26121	5.46486
MSE	3.01318	15.90516	1.27348	7.11164	42.08205
RMSE	1.73585	3.98812	1.12848	2.66676	6.48706

Nel grafico di Figura 40 vengono riportati in ascissa i valori in metri della distanza, in ordinata i valori RSSI in dBm. La curva verde è la rappresentazione grafica dell'equazione che relaziona RSSI con la distanza nel capitolo 6.1, equazione 6.1, come valore di pathloss è stato calcolato in base alle prove svolte n=1.224, mentre il valore C0 calcolato corrispondeva a -49. I pallini blu indicano i valori RSSI misurati alle distanze reali delle

prove. Come si evince studiando il grafico, i valori filtrati si avvicinano molto a quelli che sono i valori reali della curva.

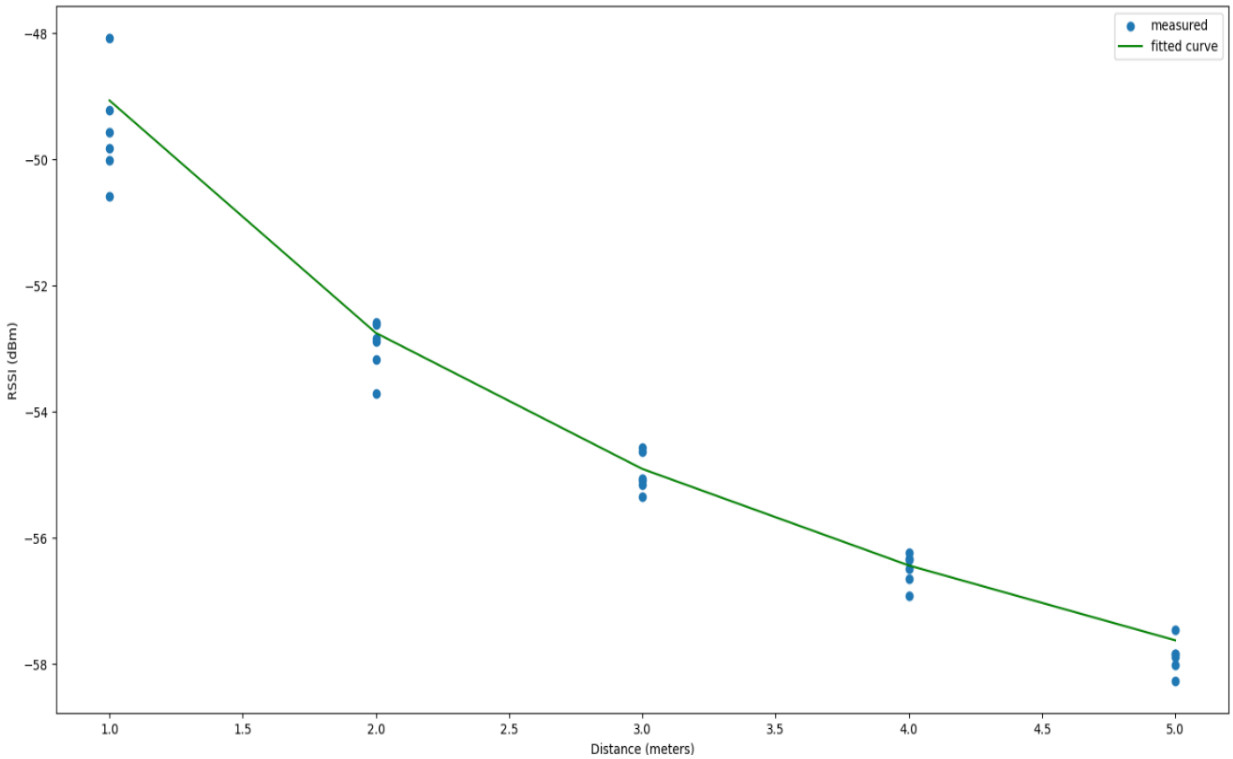

Figura 40: Differenza tra curva reale e valori misurati tramite filtro

Nella figura 41 si evidenzia la netta differenza tra gli ultimi i valori non filtrati e acquisiti durante la scansione Beacon e la curva dell'equazione di rappresentazione grafica di RSSI e distanza in metri.

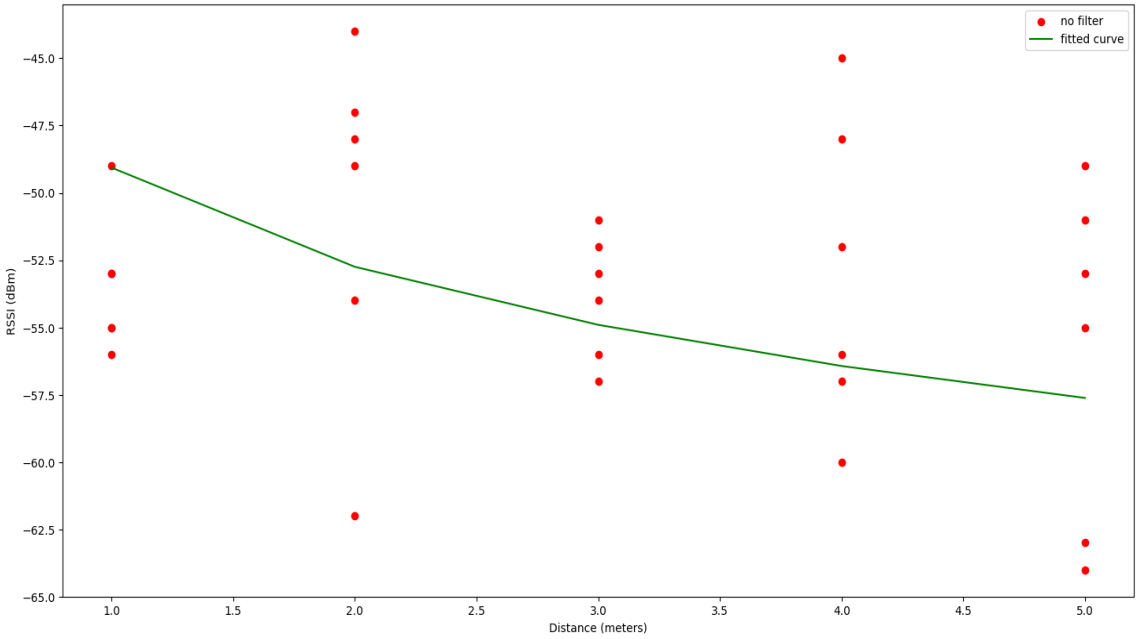

Figura 41: Curva reale e valori misurati senza filtraggio

Come si può facilmente vedere dai dati, l'ambiente indoor è un luogo molto rumoroso. L'utilizzo del filtro di Kalman-LuLu porta un significativo miglioramento nella stima di prossimità. I risultati sperimentali hanno imposto la necessità di un modello multipath ben sviluppato per la stima della distanza basata su RSSI. Nel complesso, la precisione di prossimità può essere notevolmente migliorata con le tecniche di filtraggio. I risultati sperimentali hanno mostrato un miglioramento fino al 40% rispetto ai risultati non filtrati [11], raggiungendo un intervallo di errore di prossimità fino a 0,3 m quando il Beacon si trova entro 5 metri dal ricevitore. L'uso del filtraggio può migliorare le loro prestazioni, senza tempi di processo significativi.

11 Trilaterazione

Nel caso in cui vengano utilizzati più Gateway WiFi/BLE, si presume che l'intensità del segnale dell'onda EM propagata in tutte le direzioni sia identica, in modo che le coordinate dell'oggetto bersaglio (x_a, y_a) e dei ricevitori (x_i, y_i) possano essere calcolate per trilaterazione. La posizione del Beacon può essere determinata dal ricevitore con coordinate note quando il valore RSSI è convertito in distanza (d_i) tra il ricevitore del segnale e il Beacon. La Figura 42 illustra il processo di localizzazione dell'oggetto tramite trilaterazione e solo tre ricevitori con la distanza stimata più breve vengono selezionati per eseguire la trilaterazione.

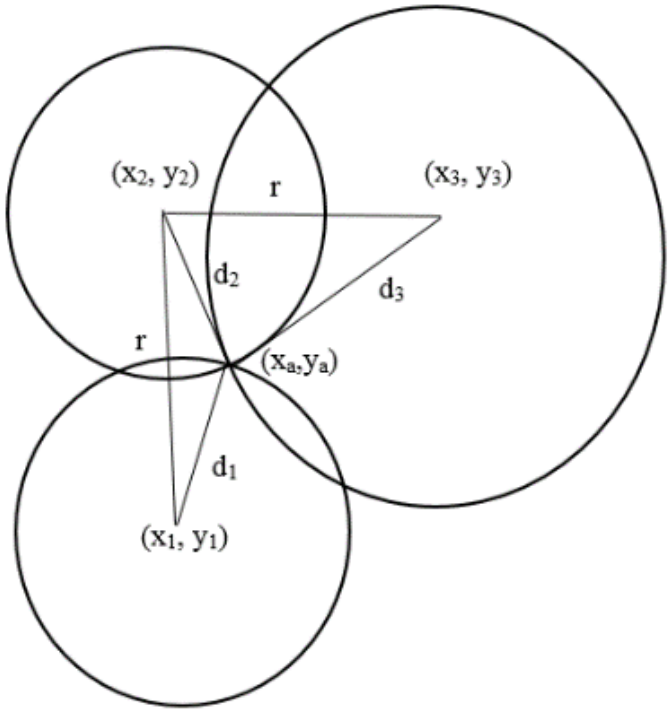

Figura 42: Distanza oggetto stimata dalla trilaterazione

In caso di più ricevitori installati, sulla base di Figura 43, d_1, d_2 e d_3 sono scelti per la procedura perché la distanza stimata più corta è convertita da valori RSSI più elevati, il che implica un segnale più forte ricevuto dai ricevitori, oppure in caso di malfunzionamento di uno dei ricevitori, il ricevitore rimanente può ancora stimare la posizione dell'oggetto per trilaterazione.

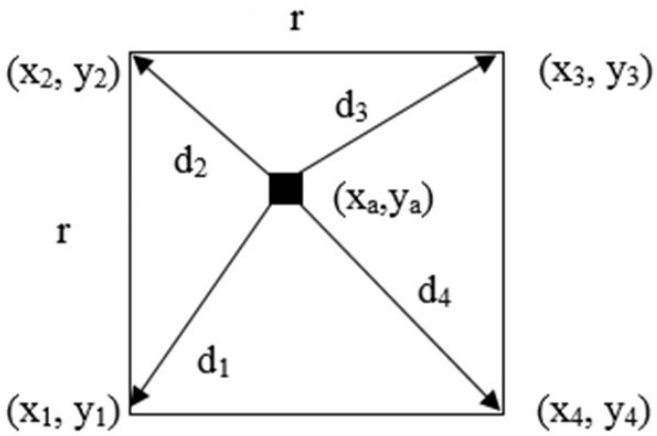

Figura 43

Dalle seguenti equazioni:

$$(x_a - x_1)^2 + (y_a - y_1)^2 = d_1^2 \qquad (13.1)$$

$$(x_a - x_2)^2 + (y_a - y_2)^2 = d_2^2 \qquad (13.2)$$

$$(x_a - x_3)^2 + (y_a - y_3)^2 = d_3^2 \qquad (13.3)$$

Le equazioni possono aiutare a stimare le coordinate del Beacon (x_a, y_a), dopo aver considerato $x_1 = 0, y_1 = 0, x_2 = 0, y_2 = r$ e sottrarre le equazioni (13.2) da (13.1) e ottenere:

$$y_a = \frac{d_1^2 - d_2^2 + r^2}{2r}$$

$$x_a = \frac{d_2^2 - d_3^2 + r^2}{2r}$$

ovvero le coordinate del Beacon [11].

CONCLUSIONI

I sistemi di asset tracking possono essere integrati in moltissime delle realtà industriali moderne, fornendo uno strumento prezioso capace di migliorare molti degli aspetti che le caratterizzano, come la sicurezza o la produttività. Nel presente progetto di tesi i beacon si sono rivelati una tecnologia molto valida per l'utilizzo indoor, grazie ai costi contenuti, al consumo limitato di energia, dato che hanno batterie economiche e facilmente sostituibili, alla grande versatilità e alla possibilità di poterli utilizzare con una gamma di dispositivi sempre più ampia, visto che oltre i Beacon che ho utilizzato nelle prove ci sono molti altri dispositivi con funzionalità differenti. L'adozione del protocollo MQTT come sistema di comunicazione e al contempo della tecnologia BLE, ha reso il sistema integrabile non solo all'interno di device "classici" come smartphone, ma anche con calcolatori o laptop portatili, risultando una tecnologia all'avanguardia, semplice da implementare e a bassa latenza. Applicando il filtro proposto, il filtro Kalman-LULU, in fase di elaborazione del segnale, si è contribuito ad aumentare la precisione del sistema e a ridurre il rumore e i disturbi in tempi rapidi. La gamma efficace del sistema proposto è fino a 5 metri di range, con potenza trasmessa uguale a -16dBm e un tempo medio di processo di 3 minuti. I requisiti che hanno portato alla realizzazione del progetto sono nati dalle esigenze del settore industriale e manifatturiero, dove l'introduzione del sistema di tracciamento sviluppato è funzionale sia come dato per arricchire le informazioni raccolte durante gli inventari, ma anche per tracciare asset fondamentali per la catena di produzione affinché i processi lavorativi non vengano rallentati o bloccati. I test effettuati hanno evidenziato ottimi risultati sia in termini di velocità di rilevazione che di correttezza della rilevazione stessa. Poiché esistono poche alternative per identificare gli asset in presenza di effetti del multipath, il sistema che è stato proposto viene introdotto per la prima volta ed è dotato di tecniche avanzate di filtraggio dei dati e di elaborazione per ridurre al minimo il rumore nel segnale Bluetooth per una stima più accurata della distanza.

BIBLIOGRAFIA

[1] Matteo Cavalluzzo, *Tracking Indoor basato su Beacon: trauma tracker come caso studio, 2016/2017*

[2] Sooyoung Yoo1, Seok Kim1, Eunhye Kim, Eunja Jung, Kee-Hyuck Lee and Hee Hwang, *Real-time location system-based asset tracking in the healthcare field: lessons learned from a feasibility study,* Medical Informatics and Decision Making, 2018.

[3] Giulia De Lorenzo, *Geolocalizzazione di veicoli con sistema elettronico GPS differenziale e piattaforma inerziale, 2016/2017.*

[4] Igor Bisio, Andrea Sciarrone, Sandro Zappatore, *A new asset tracking architecture integrating RFID, Bluetooth Low Energy tags and ad hoc smartphone applications,* Pervasive and Mobile Computing-Elsevier, 2016.

[5] R. Weinstein, "RFID: a technical overview and its application to the enterprise", in IT Professional, vol. 7, no. 3, pp. 27-33, May-June 2005, doi: 10.1109/MITP.2005.69.

[6] N. Smaoui, M. Heydariaan and O. Gnawail, "Single-Antenna AoA Estimation with UWB Radios," 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCNC49053.2021.9417526.

[7] P. Octaviani and W. Ce, "*Inventory Placement Mapping using Bluetooth Low Energy Beacon Technology for Warehouses,"* 2020 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech), 2020.

[8] A. A. W. Ab Razak and F. Samsuri, "*Active RFID-based Indoor Positioning System (IPS) for industrial environment,"* 2015 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), 2015

[9] M. R. Mahfouz, A. E. Fathy, M. J. Kuhn and Y. Wang, *"Recent trends and advances in UWB positioning,"* 2009 IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID, 2009.

[10] A. R. Jiménez Ruiz e F. Seco Granja, "Comparison Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB Location Systems: Indoor Performance Analysis," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, n. 8, pp. 2106-2117, agosto 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2681398

[11] C. K. M. Lee, C. M. Ip, Taezoon Park, S.Y. Chung, A Bluetooth Location-based Indoor Positioning System for Asset Tracking in Warehouse, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2019.

[12] A. Mackey, P. Spachos, L. Song and K. N. Plataniotis, "*Improving BLE Beacon Proximity Estimation Accuracy Through Bayesian Filtering,*" in IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 4, pp. 3160-3169, April 2020.

[13] Welch, Greg, and Gary Bishop. "*An introduction to the Kalman filter.*" (1995): 127-132.

[14] W.J. Conradiea, T. de Weta, M. Jankowitzb , “Exact and asymptotic distributions of LULU smoothers”, in Journal of Computational and Applied Mathematics 186 (2006) 253 – 267.

[15] Tag Beacon E8 disponibile in https://www.minew.com/product/e8-asset-tracking-tag/.

[16] G1 IoT Gateway disponibile in https://www.minew.com/product/g1-iot-gateway/.