Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

Tecniche anti-spoofing GNSS con tecnologia RTK

Relatore

Prof. Stefano Tomasin

Laureando

Massimiliano Comin

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice

1 Tecnologie per la Localizzazione Precisa **1**
1.1 RTK . . . 1
1.1.1 GPS . . . 1
1.1.2 Sistemi GNSS . . . 2
1.1.3 Funzionamento sistemi di posizionamento GNSS . . . 3
1.1.4 Real-Time Kinematic . . . 5
1.2 Bluetooth . . . 7
1.2.1 Classi Bluetooth . . . 8
1.2.2 Evoluzione del Bluetooth . . . 8
1.2.3 Funzionamento e Utilizzi Bluetooth . . . 10
1.3 Spoofing . . . 12
1.3.1 Spoofing di segnale GNSS . . . 12
1.3.2 Protezione da attacchi spoofing GNSS . . . 13

2 Metodologia Sperimentale **15**
2.1 Metodologia RTK . . . 15
2.1.1 Raccolta Dati . . . 15
2.1.2 Elaborazione Dati . . . 17
2.1.3 Analisi Dati . . . 19
2.1.4 Calcolo Distanze . . . 20
2.2 Metodologia Bluetooth . . . 22
2.2.1 Dati RSSI . . . 23

3 Risultati Sperimentali **25**
3.1 Risultati RTK . . . 25
3.1.1 RTK Single-Device . . . 25
3.1.2 RTK Multi-Device . . . 29
3.2 Risultati Bluetooth . . . 30
3.2.1 Bluetooth RSSI . . . 30

4 Conclusioni **35**
4.1 Conclusioni RTK 35
4.2 Conclusioni Bluetooth 36
4.3 Confronto RTK e Bluetooth 36

Bibliografia **40**

Sommario

Il Real-time kinematic positioning (RTK) è un sistema di posizionamento satellitare che mediante una correzione in tempo reale è in grado di fornire risultati con un'accuratezza a livello centimetrico. La tecnologia RTK permette la correzione dei dati GNSS del ricevitore (Rover) grazie all'utilizzo dei dati forniti da una stazione di riferimento (Base Station) la cui posizione è nota a priori. La tecnica RTK viene applicata per rilevamenti topografici, rilevamenti idrografici e nella navigazione di veicoli aerei senza pilota (droni). Nonostante l'RTK abbia molti vantaggi che lo rende una delle tecniche più utilizzate, come altri sistemi di posizionamento può essere soggetto ad attacchi spoofing che hanno l'obiettivo di falsificare la posizione ottenuta al ricevitore andando ad alterare i dati GNSS.

La tesi presenta gli aspetti legati alla sicurezza nella tecnica RTK e attraverso la raccolta e analisi di dati reali definisce un metodo per la segnalazione di attacchi spoofing e per la prevenzione di attacchi falsi. Inoltre, vengono confrontati questi aspetti della tecnologia RTK con altri sistemi di posizionamento satellitare, in particolare con il sistema GPS, e con la tecnologia Bluetooth per stabilire l'efficacia della tecnica RTK.

Capitolo 1

Tecnologie per la Localizzazione Precisa

1.1 RTK

Il GNSS (Global Navigation Satellite System) è un sistema di geo radiolocalizzazione e navigazione terrestre che utilizza una rete di satelliti artificiali in orbita per fornire un servizio di posizionamento geo-spaziale a copertura globale. Tale sistema consente ad appositi ricevitori elettronici di determinare le loro coordinate geografiche (longitudine, latitudine ed altitudine) su un qualunque punto della superficie terreste o dell'atmosfera con un errore di pochi metri, elaborando i segnali a radiofrequenza trasmessi dai satelliti.

1.1.1 GPS

Creato nel 1973 dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti per sostituire il precedente sistema di posizionamento satellitare Transit, il GPS (Global Positioning System), originariamente chiamato NAVSTAR GPS, è il più noto sistema di posizionamento globale.

Inizialmente il sistema GPS disponeva di 24 satelliti, sufficienti per ottenere la posizione in ogni punto della Terra, e veniva utilizzato solo per scopi militari. Successivamente viene reso disponibile per servizi civili e diventa pienamente operativo nel 1994.

Il principio di funzionamento del GPS si basa sul metodo di posizionamento sferico (trilaterazione) che tramite la triangolazione dei segnali ricevuti calcolando il tempo impiegato dal segnale radio a percorrere la distanza satellite-ricevitore, permette di individuare un punto, ovvero la posizione finale, con una precisione accettabile.

Il sistema GPS è attualmente gestito dal governo degli Stati Uniti e ha un grado di accuratezza dell'ordine di pochi metri.

1.1.2 Sistemi GNSS

Dopo la realizzazione del primo sistema GNSS chiamato GPS, sono state realizzate altre reti di satelliti con i medesimi scopi.

Il GLONASS (Global Navigation Satellite System) è un sistema satellitare globale di navigazione russo attivato nel 1995 ma, in seguito alla caduta dell'Unione Sovietica e alla mancanza di fondi necessari, la rete è rimasta pressoché inutilizzabile fino al 2004. In seguito ad un accordo con l'India per lo sviluppo congiunto del sistema, la rete è migliorata fino a diventare il secondo sistema di navigazione in funzione con copertura globale e con precisione comparabile al GPS.

La Cina con il progetto Compass ha ampliato il proprio sistema regionale di navigazione, chiamato Beidou, nato per uso militare e aperto ora a uso commerciale e con una copertura globale.

Il sistema di navigazione satellitare dell'Unione Europea è rappresentato dalla rete Galileo, entrata in funzione nel 2016 con un GNSS da 18 satelliti;

il sistema una volta completato potrà contare 30 satelliti e fornirà un grado di accuratezza di alcuni centimetri.

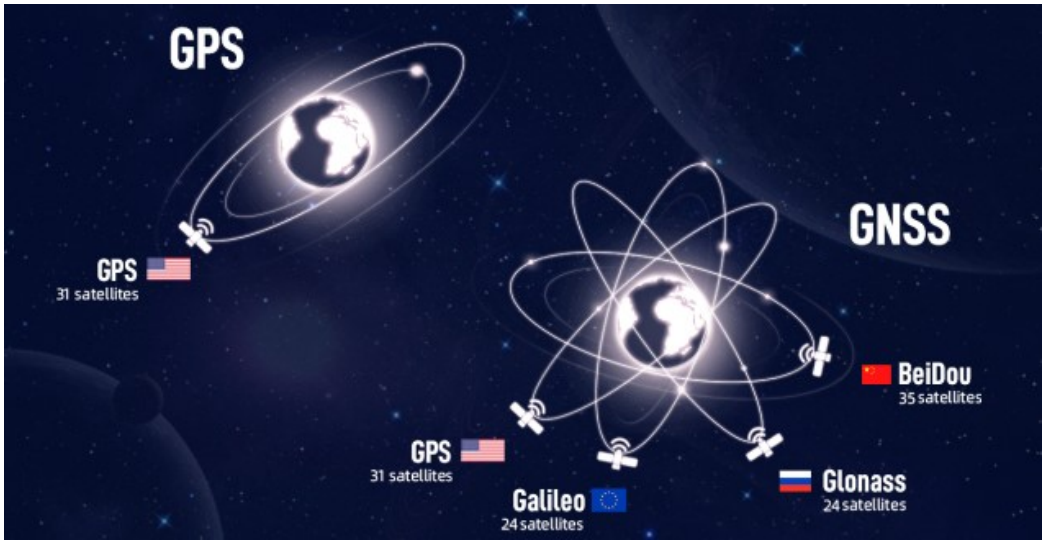


Figura 1.1: GNSS e GPS [1]

1.1.3 Funzionamento sistemi di posizionamento GNSS

La tecnica che, tramite l'utilizzo del sistema GNSS, permette di ottenere una posizione nella superficie terrestre con un ridotto margine di errore prende il nome di trilaterazione (vedi Figura 1.2). Per il principio della trilaterazione, utilizzando i segnali trasmessi dai satelliti e calcolando la distanza da tali punti di riferimento, si riesce a determinare un punto di convergenza. Per rappresentare una posizione nello spazio sono necessari almeno 3 riferimenti che nei sistemi di localizzazione vengono individuati nei 3 satelliti di riferimento.

I segnali GNSS trasmessi dai satelliti sono onde elettromagnetiche con una frequenza compresa tra 1.2 GHz e 1.6 GHz che si propagano alla velocità della luce.

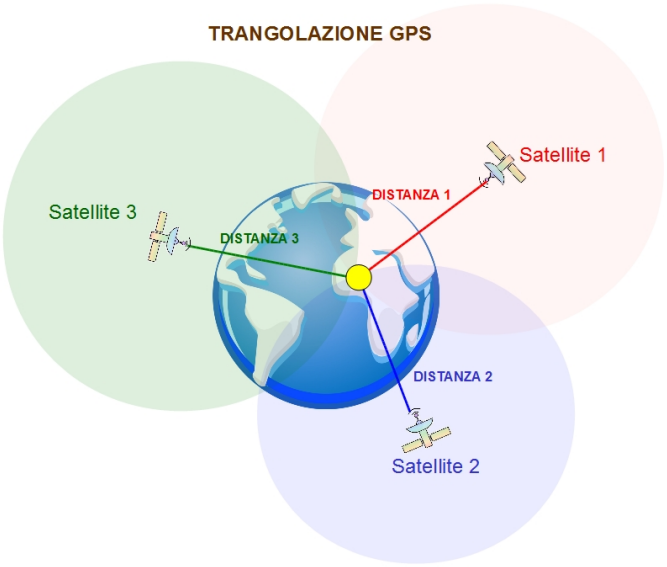


Figura 1.2: Principio Triangolazione [2]

Di conseguenza, misurando il tempo che il segnale impiega per raggiungere la superficie terrestre, possiamo determinare la distanza dal satellite di riferimento. La distanza viene quindi calcolata nel seguente modo:

$$d = c \cdot t \tag{1.1}$$

Dove $c = 299.792 km/s \approx 300.000 km/s$ è la velocità della luce, mentre t è il tempo misurato calcolando il ritardo di fase tra il segnale trasmesso e il segnale ricevuto, ovvero del segnale PRN (Pseudo Random Noise).

Poichè i ricevitori non hanno a disposizione una misura accurata del tempo, è necessario usare 4 satelliti in modo da eliminare l'errore sul tempo misurato, scalando le distanze fino ad ottenere un solo punto. Il ricevitore utilizza il suo orologio interno, solitamente al quarzo, per calcolare il tempo trascorso, mentre i satelliti hanno orologi atomici molto più precisi. L'accuratezza dunque può variare in base alla qualità dello strumento, cambiando

in modo significativo la precisione nel calcolo della distanza.

Lo sviluppo di questa tecnologia è stata resa possibile anche grazie agli studi sulla relatività speciale e generale condotti dal fisico Albert Einstein nei primi anni del 900', il quale introdusse il concetto di tempo come una variabile relativa e non assoluta, oltre alla teoria relativistica gravitazionale e alle relative proprietà dello spazio-tempo.

1.1.4 Real-Time Kinematic

Il Real-Time Kinematic positioning è una tecnica che ha come obiettivo l'eliminazione degli errori e il miglioramento della posizione di un dispositivo ricevitore, chiamato Rover, mediante un processo di correzione dei dati GNSS. Questa correzione viene realizzata utilizzando la fase dell'onda portante e integrando i dati GNSS del dispositivo Rover con i dati provenienti da una stazione di riferimento, chiamata Base Station, la cui posizione è nota a priori, che può fornire al Rover correzioni in tempo reale (vedi Figura 1.3).

Il risultato che si ottiene da questo processo è rappresentato da una posizione caratterizzata da un'accuratezza di posizionamento centimetrica. Per ottenere una precisione di questo tipo, la distanza dal satellite viene calcolata moltiplicando la lunghezza d'onda della portante per il numero di cicli interi tra il satellite e il Rover e sommando la differenza di fase, poiché gli intervalli calcolati includono errori causati da diverse variabili, come l'orologio satellitare, e ritardi ionosferici e troposferici legati in particolare alle condizioni meteorologiche.

La stima della fase presenta un'incertezza di multipli di 2π, problema chiamato integer ambiguity. La risoluzione di questo problema, ovvero la ricerca di ambiguità di numeri interi, permette di ottenere posizioni con precisione centimetrica evitando errori che, per esempio, sarebbe pari a circa 19cm per

il segnale L1. Nonostante sia un processo complesso, i ricevitori GNSS ad alta precisione possono risolvere le ambiguità quasi istantaneamente. Il Rover per determinare la sua posizione utilizza algoritmi che incorporano la risoluzione dell'ambiguità e la correzione differenziale della fase. L'accuratezza della posizione ottenibile dal Rover dipende anche dalla "linea di base", ovvero dalla sua distanza dalla stazione base, e dall'accuratezza delle correzioni differenziali.

Con lo sviluppo della tecnica RTK, la precisione del posizionamento è notevolmente migliorata passando da un'accuratezza di 2-4 metri dei sistemi GNSS semplici, tra i quali il GPS, a un'accuratezza di qualche centimetro. RTK è principalmente utilizzata per applicazioni che richiedono un alto livello di precisione, come rilevamenti territoriali, attività di costruzione edilizia e nella navigazione dei droni; l'utilizzo dell'RTK nei rilevamenti del territorio garantiscono un risparmio di risorse finanziarie e richiedono tempistiche minori, assicurando al tempo stesso risultati molto accurati.

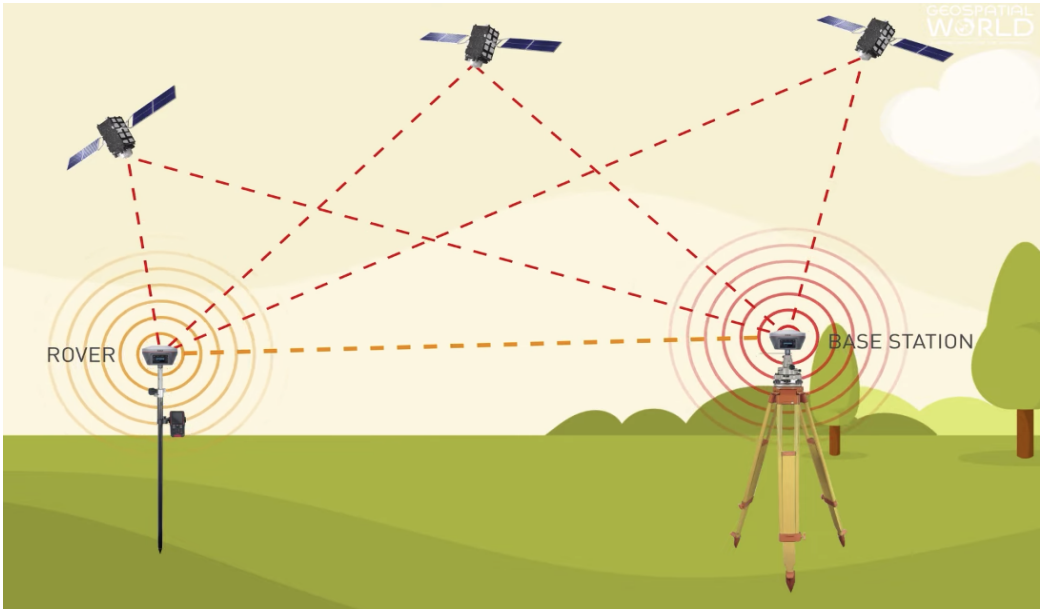


Figura 1.3: Funzionamento RTK [3]

1.2 Bluetooth

Il Bluetooth è uno standard tecnologico di trasmissione di dati in modalità wireless su breve distanza; questa tecnologia consente lo scambio di informazioni sicuro ed economico tra dispositivi, attraverso segnali con frequenze che variano tra 2.4 e 2.48 GHz, entro un raggio di qualche decina di metri (circa 10-30 m).

Il Bluetooth, ideato dall'azienda Ericcson nel 1994 e successivamente controllato dal SIG (Special Interest Group), è stato sviluppato con l'obiettivo di ottenere un sistema di comunicazione dati a basso consumo, basso costo di produzione e con un corto raggio d'azione. I dispositivi compatibili con questa tecnologia contengono un chip a basso consumo energetico in grado di creare una rete privata senza fili di dimensioni limitate, la PAN (Personal Area Network) (vedi Figura 1.4); il range di copertura della rete PAN dipende dalla classe del Bluetooth utilizzata nel chip.

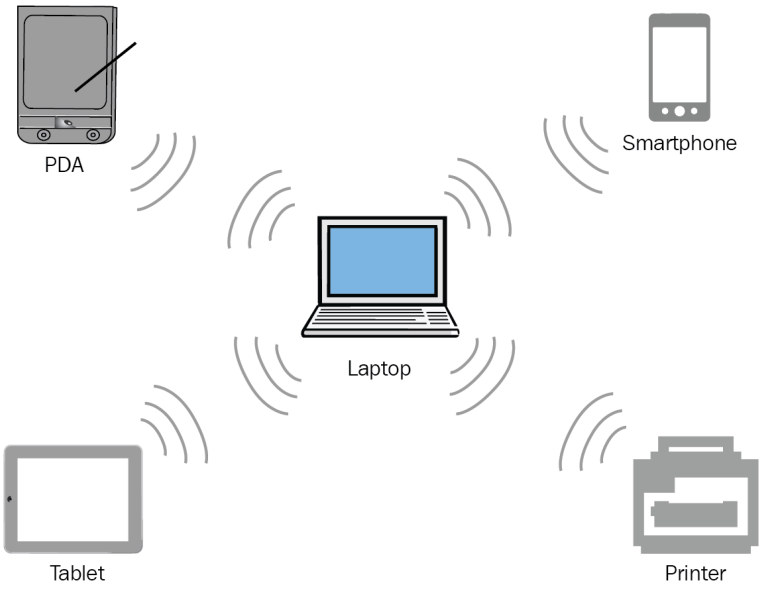


Figura 1.4: Personal Area Network [4]

1.2.1 Classi Bluetooth

Un dispositivo compatibile con la tecnologia Bluetooth può appartenere a 3 diverse classi di Bluetooth suddivise in base alla potenza ERP, che rappresenta la massima potenza trasmissiva in radiofrequenza, e alla distanza intesa come il raggio massimo di copertura del segnale, senza considerare eventuali ostacoli. Generalmente, il consumo di energia è maggiore per le classi più alte e la maggior parte dei dispositivi (smartphone, notebook, tablet, ecc.) hanno integrato un chip di classe 2. Le classi con le relative caratteristiche sono rappresentate nella Tabella 1.1.

Classe	**Potenza ERP**	**Distanza**	**Dispositivi**
1	100 mW (20 dB)	100 m	USB Adapter, Access Point
2	2.5 mW (4 dB)	10 m	Dispositivi Mobili, Smart Card
3	1 mW (0 dB)	1 m	Bluetooth Adapter

Tabella 1.1: Classi Bluetooth

1.2.2 Evoluzione del Bluetooth

Per distinguere le varie tipologie Bluetooth sviluppate nel corso degli anni, ogni tipologia viene etichettata con un numero di versione. La prima versione Bluetooth, che rappresenta il Bluetooth meno evoluto, è la 1.0. Ogni versione Bluetooth successiva introduce delle migliorie sviluppate per ottimizzare il range, la velocità di trasmissione delle informazioni e il consumo energetico.

Con il passaggio alla versione 2.0 si è raggiunta la velocità di 3 Mbit/s rispetto ad 1 Mbit/s della prima versione, grazie all'introduzione dell'EDR (Enhanced Data Rate) e, inoltre, lo standard raggiunse una buona affidabilità, con importanti migliorie sulla sicurezza. Tuttavia, questa versione ha

portato ad un incremento notevole dei consumi di energia e rappresentava un problema dal momento che i dispositivi sono alimentati a batteria.

Dalla versione Bluetooth 4.0, denominato BLE (Bluetooth Low Energy), si introdussero i primi notevoli miglioramenti riguardanti il consumo energetico, grazie alla riduzione della durata dei segnali trasmessi che, a parità di dati trasferiti, dimezzò l'utilizzo di corrente rispetto alla versione 1.2.

Nel 2016, con il Bluetooth 5.0 venne migliorata la precedente versione grazie all'introduzione di 4 diverse velocità di trasmissione dei dati (125 kbps, 500 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps) mantenendo comunque un basso livello di consumo energetico.

La versione Bluetooth 5.1, uscita nel 2019, ha portato un aggiornamento riguardante la precisione del sistema di localizzazione, con la possibilità di determinare non solo la distanza da un'altro dispositivo Bluetooth ma anche la posizione del device che trasmette/riceve i dati. I due metodi per individuare la posizione dei dispositivi all'interno dello spazio sono AoA (Angle of Arrival) e AoD (Angle of Departure) (vedi Figura 1.5); entrambi necessitano di un certo numero di antenne per inviare o ricevere il segnale e sono in grado di determinare la posizione mediante la triangolazione dei segnali ottenuti, sfruttando lo stesso principio delle reti cellulari per la localizzazione dei cellulari.

L'ultima versione Bluetooth è lo standard Bluetooth 5.3 che è stato presentato a Luglio 2021 ed è già integrato in diversi dispositivi, soprattutto su accessori audio e smartphone. Le principali novità introdotte sono volte a migliorare la sicurezza dei dispositivi, tramite il miglioramento dei controlli delle chiavi di crittografia, e le prestazione dei dispositivi che lavorano in questa modalità per lunghi periodi di tempo e porterà anche ad un ulteriore risparmio energetico con l'introduzione del Connection Subrating.

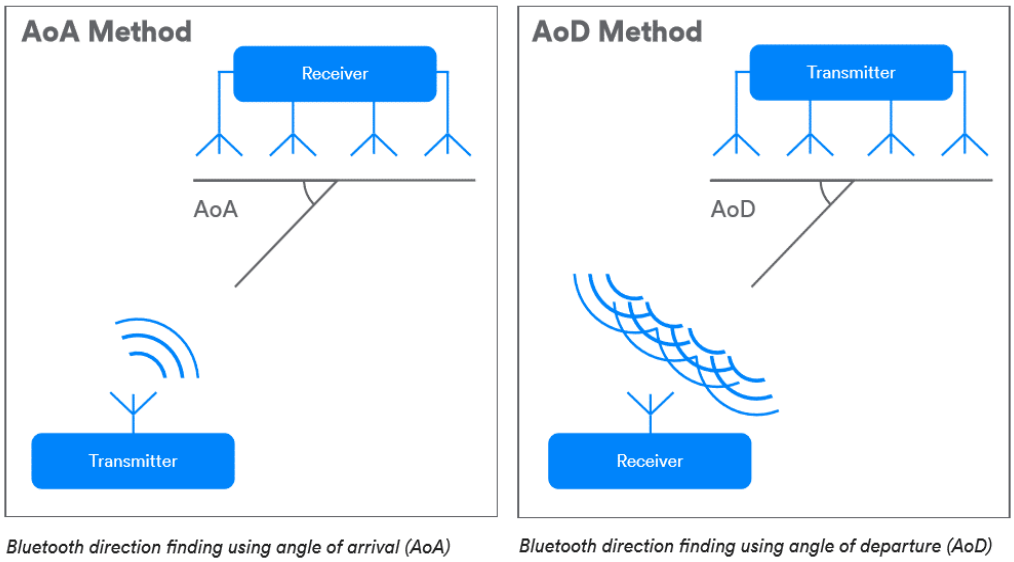


Figura 1.5: Angle of Arrival e Angle of Departure [5]

1.2.3 Funzionamento e Utilizzi Bluetooth

Per la trasmissione dei dati la tecnologia Bluetooth utilizza la banda radio a onde corte (UHF) con frequenza a 2.4 GHz.

Il dispositivo che crea la rete PAN è chiamato master, mentre quello in attesa è il dispositivo slave che, se impostato correttamente in modalità 'rilevabile' o 'visibile', invia segnali per notificare la sua presenza ai master vicini.

La prima fase viene chiamata Pairing e consiste nell'operazione di collegamento, o accoppiamento, dei dispositivi. Il dispositivo master, dopo aver eseguito una scansione per trovare gli altri dispositivi nel raggio di copertura, invia una richiesta di connessione al dispositivo slave in ascolto; se il dispositivo slave accetta la richiesta allora viene aggiunto, previa inserimento di un codice di sicurezza, alla rete PAN creata dal master per iniziare la comunicazione, altrimenti si interrompe il Pairing. In alcuni casi, l'accoppiamento può essere eseguito anche per contatto fisico, sfruttando la tecnologia NFC.

Dopo l'operazione di Pairing, può iniziare la fase di trasferimento dei dati tra i due dispositivi che può consistere in uno scambio di file o in operazioni di input/output. È importante specificare che la trasmissione dei dati, che avviene tramite una connessione con canale condiviso RFCOMM (Radio Frequency Communication), non può essere avviata senza aver prima creato una connessione criptata tra i due dispositivi.

La tecnologia Bluetooth viene utilizzata principalmente per lo scambio di file come immagini, video e audio tra dispositivi, anche di diverso tipo (computer, smartphone, tablet, ecc.) oppure per connettere dispositivi di input/output quali tastiere, mouse e controller permettendo un utilizzo wireless (senza fili).

Negli ultimi anni, la tecnologia Bluetooth è stata fondamentale per lo sviluppo di auricolari wireless che hanno avuto un notevole successo; nel 2018, le cuffie auricolari AirPods sono state il prodotto accessorio più popolare di Apple, con 35 milioni di unità vendute che sono incrementate a 60 milioni di unità nel 2019.

Figura 1.6: Bluetooth in Internet of Things [6]

Il Bluetooth viene utilizzato anche per il collegamento di Smartwatch e Fitness Tracker, e per far comunicare dispositivi di IoT (Internet of Things) utilizzati soprattutto nella domotica. BMW è stato il primo produttore di autoveicoli a integrare la tecnologia Bluetooth nelle sue automobili consentendo ai guidatori di rispondere al cellulare senza dover staccare le mani dal volante, aumentando così la sicurezza nella guida.

1.3 Spoofing

Con il termine '*Spoofing*' ci si riferisce, in generale, ad un tipo di attacco informatico che, tramite la falsificazione dell'identità (*spoof*), consente ad utenti malintenzionati (*hacker*) di accedere alle informazioni di una rete ed impadronirsi di dati o diffondere malware. Esistono diversi tipi di attacchi spoofing ma i più comuni riguardano l'IP, l'indirizzo e-mail e il server DNS.

1.3.1 Spoofing di segnale GNSS

Lo spoofing GNSS è un tipo di cyberattacco in cui l'hacker trasmette segnali contraffatti a un ricevitore GNSS, alterando le misurazioni del sistema GNSS di riferimento e rendendo inaffidabile la sua posizione GNSS. In questo modo, al ricevitore viene visualizzata la posizione falsificata e non quella reale, facendo credere alla vittima di trovarsi in un altro luogo (vedi Figura 1.7).

Il principale tipo di attacco spoofing GNSS è il GPS spoofing che può colpire qualsiasi dispositivo che utilizzi il GPS come servizio di geo-localizzazione.

Questi attacchi possono colpire un ricevitore specifico, oppure possono influire su tutti i ricevitori GPS nelle vicinanze della fonte dell'attacco spoofing che potrebbe provenire da dispositivi elettronici adiacenti o da fonti esterne presenti nell'area, come un trasmettitore radio.

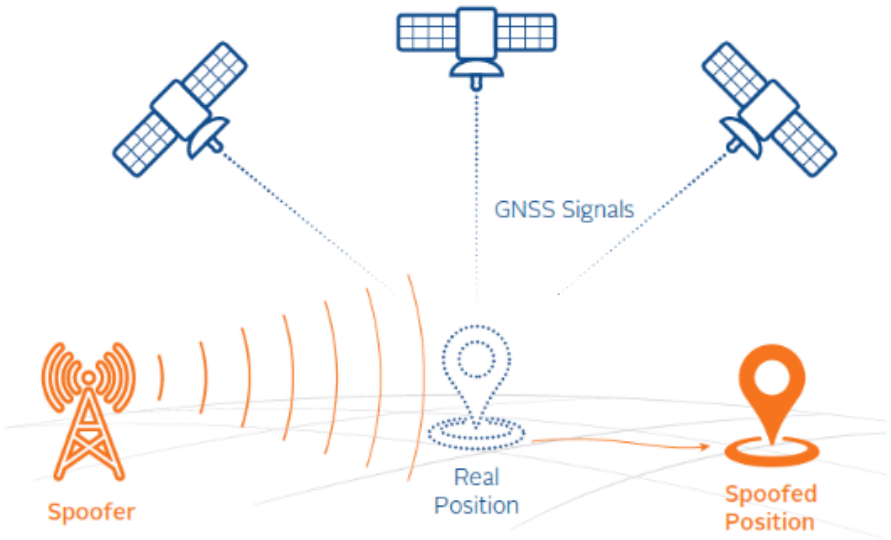


Figura 1.7: Attacco Spoofing GNSS [7]

Principalmente, esistono due modi per superare i segnali GNSS deboli con segnali radio che trasportano false informazioni sulla posizione ed eseguire lo spoofing:

- Ritrasmissione di segnali GNSS registrati in un altro luogo o momento (*meaconing*)
- Generazione e trasmissione di segnali satellitari modificati

1.3.2 Protezione da attacchi spoofing GNSS

Con i recenti progressi tecnologici, i dispositivi GNSS hanno assunto un ruolo fondamentale nella maggior parte dei contesti applicativi, poiché consente di fare affidamento su posizionamento e tempismo precisi. L'ora GNSS sincronizza le reti di telecomunicazioni, le banche e la rete elettrica; si stima che un solo giorno di interruzione del servizio GNSS potrebbe costare 1 miliardo di dollari solo negli Stati Uniti [8].

Pertanto, è necessario implementare un livello di sicurezza che permetta di mantenere il GNSS un sistema affidabile. Per proteggersi dagli attacchi spoofing, i ricevitori GNSS devono rilevare i segnali contraffatti, distinguendoli dai segnali autentici, per poterli escludere dal calcolo del posizionamento, ottenendo una posizione finale coerente con quella reale.

L'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di studiare tecniche per la rilevazione e segnalazione di attacchi spoofing GPS, garantendo la sicurezza dei dispositivi e, in particolare, della loro localizzazione, utilizzando come anti-spoofing tecniche di posizionamento ad alta precisione come RTK e tecnologia Bluetooth.

Capitolo 2

Metodologia Sperimentale

2.1 Metodologia RTK

La tecnica RTK permette di ottenere un'approssimazione precisa della posizione finale mediante la registrazione dei dati GNSS del dispositivo. Nel caso di studio è stata testata la tecnica RTK su un singolo dispositivo ed è stata poi utilizzata per calcolare la distanza tra due dispositivi posizionati ad una precisa distanza.

2.1.1 Raccolta Dati

La prima fase della sperimentazione RTK è stata svolta utilizzando l'applicazione *Geo++ RINEX Logger* [9] (vedi Figura 2.1) disponibile per dispositivi Android che, tramite i satelliti disponibili trovati in fase di ricerca, avvia la fase di logging in cui registra i dati GNSS e, una volta terminata la registrazione, crea un file contenente tutti i dati ottenuti e ulteriori informazioni utili per la successiva fase di elaborazione dei dati.

Il file viene convertito dall'applicazione in formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) (vedi Figura 2.2) in modo tale da permettere

una migliore elaborazione dei risultati nella successiva fase.

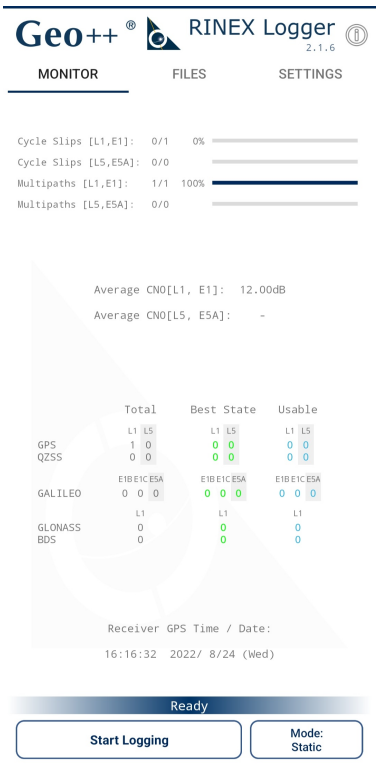


Figura 2.1: Home Geo++ RINEX Logger App

Nella fase di logging è stata selezionata la registrazione di tipo 'Static' perché il dispositivo si trovava sempre nella stessa posizione e non necessitava delle correzioni dovute ad un eventuale spostamento del dispositivo stesso. Per migliorare la precisione dei dati ottenuti in questa fase, è stato fondamentale disabilitare il miglioramento della posizione del dispositivo con l'utilizzo di reti 4G, Wi-Fi e Bluetooth poiché queste correzioni andavano a peggiorare la stima della posizione ottenuta con il solo utilizzo del sensore GNSS.

```
     3.03           OBSERVATION DATA    M: Mixed            RINEX VERSION / TYPE
Geo++ RINEX Logger  Geo++                20220704 170943 UTC PGM / RUN BY / DATE
************************************************************COMMENT
This file was generated by the Geo++ RINEX Logger App       COMMENT
for Android devices (Version 2.1.6). If you encounter       COMMENT
any issues, please send an email to android@geopp.de        COMMENT
Filtering Mode: BEST                                        COMMENT
************************************************************COMMENT
Geo++                                                       MARKER NAME
GEODETIC                                                    MARKER TYPE
Geo++               Geo++                                   OBSERVER / AGENCY
unknown             samsung             SM-G998B            REC # / TYPE / VERS
unknown             SM-G998B                                ANT # / TYPE
  4377158.1925   908913.3466  4534018.4749                   APPROX POSITION XYZ
        0.0000        0.0000        0.0000                   ANTENNA: DELTA H/E/N
G    8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q                       SYS / # / OBS TYPES
R    4 C1C L1C D1C S1C                                      SYS / # / OBS TYPES
E   12 C1B L1B D1B S1B C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q      SYS / # / OBS TYPES
C    4 C2I L2I D2I S2I                                      SYS / # / OBS TYPES
J    8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q                      SYS / # / OBS TYPES
  2022     7     4    17    10    1.9995420     GPS         TIME OF FIRST OBS
 24 R01  1 R02 -4 R03  5 R04  6 R05  1 R06 -4 R07  5 R08  6 GLONASS SLOT / FRQ #
    R09 -2 R10 -5 R11  0 R12 -1 R13 -2 R14 -7 R15  0 R16 -1 GLONASS SLOT / FRQ #
    R17  4 R18 -3 R19  3 R20  2 R21  4 R22 -3 R23  3 R24  2 GLONASS SLOT / FRQ #
G L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
G L5Q -0.25000                                              SYS / PHASE SHIFT
R L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
E L1B                                                       SYS / PHASE SHIFT
E L1C +0.50000                                              SYS / PHASE SHIFT
E L5Q -0.25000                                              SYS / PHASE SHIFT
C L2I                                                       SYS / PHASE SHIFT
J L1C                                                       SYS / PHASE SHIFT
J L5Q -0.25000                                              SYS / PHASE SHIFT
 C1C    0.000 C1P    0.000 C2C    0.000 C2P    0.000        GLONASS COD/PHS/BIS
                                                            END OF HEADER
> 2022  7  4 17 10  1.9995420  3  1
Geo++                                                       MARKER NAME
> 2022  7  4 17 10  1.9995420  0 12
C33  23273198.200                      -2185.914         33.486
E03                                                                 23430094.883
G03  21369006.445                      -2088.861         36.257
G04  20361964.305                       -802.644         42.756
G06  21744926.101                       2083.042         36.319
G09  20782968.250                       1431.438         38.883    20782966.752
G17  23504782.777                      -2813.861         29.958
G19  22726220.265                      -2203.540         35.249
R04  20237949.159                      -2160.112         27.947
R05  19893896.242                        987.636         44.440
R14  22386625.562                       2501.760         43.125
```

Figura 2.2: File RINEX dispositivo Rover

2.1.2 Elaborazione Dati

Per l'elaborazione dei dati dei file RINEX è stato utilizzato il programma di post-processing RTKPOST della libreria open source RTKLIB, nella sua versione per sistemi operativi Windows, sviluppata da Tomoji Takasu dell'Università di Tokyo [10].

Il programma RTKPOST richiede l'inserimento di 3 diversi file: il file RINEX del dispositivo Rover, il file RINEX della Base Station e il file navigazionale della Base Station (vedi Figura 2.3). Il primo file RINEX viene creato dal dispositivo che esegue l'applicazione Geo++ RINEX Logger, mentre gli altri due file sono stati scaricati dal Database della Rete GPS Veneto che fornisce, per ogni giorno, file RINEX a 30 secondi e file RINEX ad 1 secondo per una migliore correzione delle misure GNSS [11].

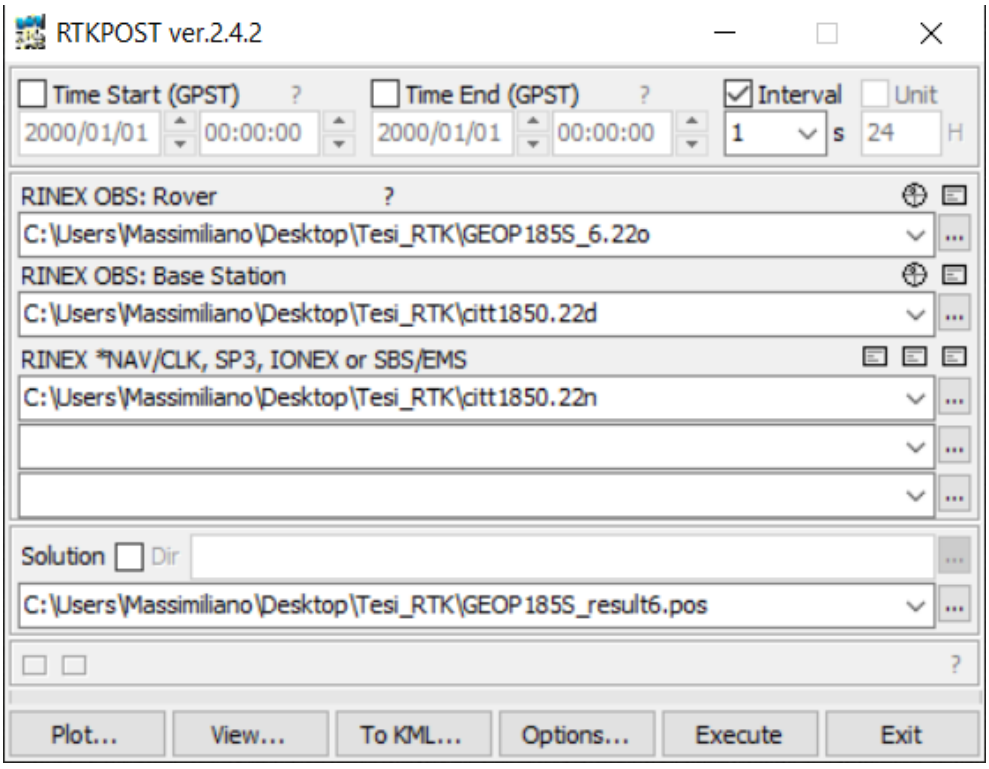


Figura 2.3: Programma RTKPOST

Dopo l'inserimento dei file di input richiesti e il setting delle principali opzioni (tipologia antenna del dispositivo, formato coordinate in output, ecc.) il programma elabora i dati e restituisce come output un file posizionale che contiene le posizioni finali nel formato richiesto, oltre ad altre informazioni utili aggiuntive (ora/data, dispositivo, coordinate Base Station, ecc.). Nel formato standard le posizioni finali sono rappresentate dalla latitudine, longitudine e altezza (vedi Figura 2.4).

Il programma RTKPOST fornisce anche un output grafico in cui vengono rappresentate tutte le posizioni ottenute con la possibilità di simulare l'andamento delle posizioni in diversi istanti temporali.

```
% program   : RTKPOST ver.2.4.2
% inp file  : C:\Users\Massimiliano\Desktop\Tesi_RTK\GEOP185S_6.2
% inp file  : C:\Users\Massimiliano\Desktop\Tesi_RTK\citt1850.22d
% inp file  : C:\Users\Massimiliano\Desktop\Tesi_RTK\citt1850.22n
% obs start : 2022/07/04 18:02:39.0 GPST (week2217 151359.0s)
% obs end   : 2022/07/04 18:12:41.0 GPST (week2217 151961.0s)
% pos mode  : static
% freqs     : L1+L2
% solution  : forward
% elev mask : 15.0 deg
% dynamics  : off
% tidecorr  : off
% ionos opt : broadcast
% tropo opt : saastamoinen
% ephemeris : broadcast
% amb res   : continuous
% val thres : 3.0
% antenna1  :                     ( 0.0000  0.0000  0.0000)
% antenna2  :                     ( 0.0000  0.0000  0.0000)
% ref pos   : 45.639493464   11.794619342    96.8544
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps
%  GPST                  latitude(deg) longitude(deg)  height(m)
2022/07/04 18:02:39.000   45.596358867   11.730747555    88.2714
2022/07/04 18:02:40.000   45.596358867   11.730747555    88.2714
2022/07/04 18:02:41.000   45.596358784   11.730744491    88.1919
2022/07/04 18:02:43.000   45.596423108   11.730720982    91.6778
2022/07/04 18:02:56.000   45.596423108   11.730720982    91.6778
2022/07/04 18:02:57.000   45.596466853   11.730788552    75.4865
2022/07/04 18:02:58.000   45.596470304   11.730793331    73.9577
2022/07/04 18:03:23.000   45.596468165   11.730795720    74.6335
2022/07/04 18:03:45.000   45.596468165   11.730795720    74.6335
2022/07/04 18:03:46.000   45.596468165   11.730795720    74.6335
2022/07/04 18:03:47.000   45.596469135   11.730794579    74.3170
2022/07/04 18:03:48.000   45.596469135   11.730794579    74.3170
2022/07/04 18:03:49.000   45.596424280   11.730803713    81.4919
2022/07/04 18:03:50.000   45.596401255   11.730803443    84.7990
2022/07/04 18:03:51.000   45.596397722   11.730800752    84.5337
2022/07/04 18:03:52.000   45.596367705   11.730779912    84.6774
2022/07/04 18:03:53.000   45.596367921   11.730780520    84.3257
```

Figura 2.4: File posizionale RTKPOST

2.1.3 Analisi Dati

La terza fase della sperimentazione è stata la fase di analisi dei dati. In questa fase è stato utilizzato un altro programma della libreria RTKLIB chiamato RTKPLOT [12]. RTKPLOT crea un output grafico del file posizionale generato da RTKPOST permettendo la visualizzazione dei punti geografici contenuti nel file (vedi Figura 2.5).

Per l'elaborazione e l'analisi delle posizioni geografiche contenute nei file posizionali e rappresentate dalle coordinate geografiche latitudine e longitudine è stato utilizzato il programma Microsoft Excel [13].

Per analizzare l'efficacia della correzione RTK, sono state calcolate le varianze per diverse finestre temporali valutando il modo in cui cambiava il margine d'errore con il passare del tempo e applicando le giuste correzioni

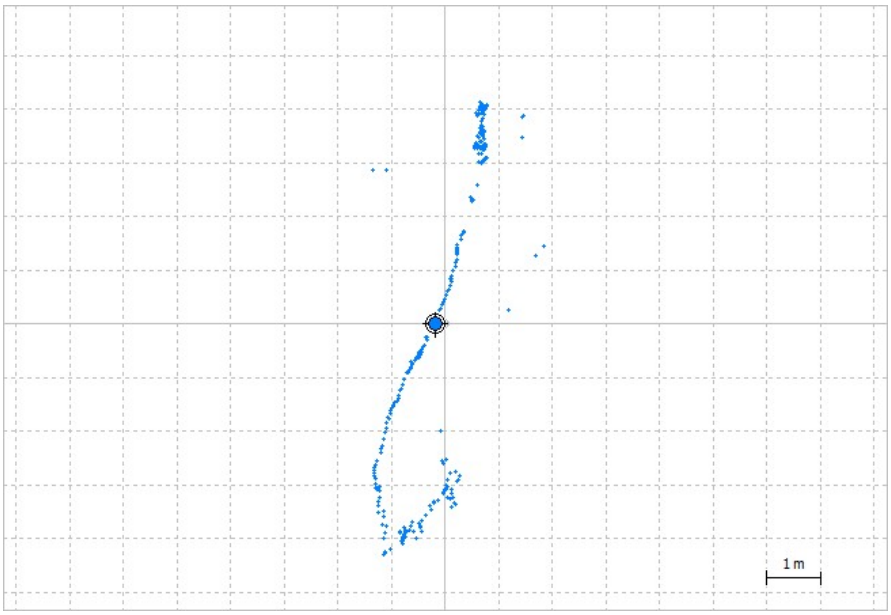


Figura 2.5: Output grafico RTKPLOT

per il miglioramento dei risultati. Nello specifico, sono stati rimossi i primi valori di ogni misurazione poiché è stato verificato che, risultando instabili, peggioravano in modo significativo il risultato finale ed in particolare il margine di errore.

2.1.4 Calcolo Distanze

Per determinare il risultato numerico delle distanze, è stato creato uno script che legge le coordinate delle posizioni contenute nel file e ne calcola la posizione media con l'obiettivo finale di calcolare la distanza tra due punti geografici, rappresentati da due file posizionali. La scelta del metodo per calcolare la distanza finale, che considera la posizione media e non ogni singola posizione, è stata resa necessaria dal fatto che il dispositivo, in fase di registrazione dei dati grezzi, non è stato in grado di ottenere l'intero set di dati. Di conseguenza, non essendo presenti le posizioni (latitudine, longitu-

dine) per alcuni secondi, non è stato possibile calcolare le distanze per ogni secondo e, a partire da queste, ottenere poi la distanza media. La distanza dunque viene calcolata a partire dai valori medi di latitudine e longitudine che rappresentano la posizione media del dispositivo.

Per il calcolo della distanza si è ipotizzato che la Terra fosse una sfera perfetta; in questo modo si è semplificato il calcolo ottenendo comunque una precisione adatta ai fini della ricerca.

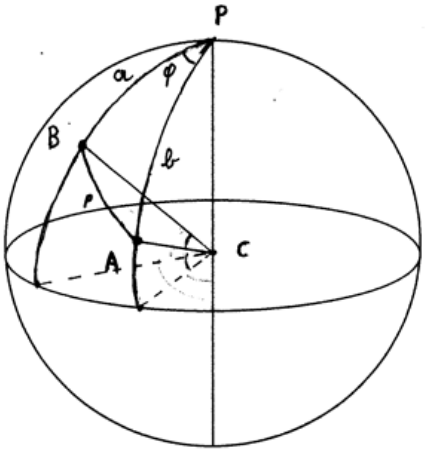


Figura 2.6: Distanza Geodetica in una Sfera [14]

Osservando la Figura 2.6 e applicando il Teorema di Eulero, si può notare che tra i lati a, b e p del triangolo sferico ABP vale la seguente relazione:

$$\cos(p) = \cos(a) \cdot \cos(b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \cdot \cos(\varphi) \tag{2.1}$$

Indicando con $lat(A), lon(A), lat(B), lon(B)$ rispettivamente la latitudine e la longitudine dei punti A e B, si ha:

$$a = 90 - lat(B)\ ;\ b = 90 - lat(A)\ ;\ \varphi = lon(A) - lon(B)$$

Sostituendo nella (2.1) si ottiene:

$$\begin{aligned}\cos(p) = &\cos(90 - lat(B)) \cdot \cos(90 - lat(A)) + \\ &\sin(90 - lat(B)) \cdot \sin(90 - lat(A)) \cdot \cos(lon(A) - lon(B))\end{aligned} \tag{2.2}$$

La distanza d in metri si calcola come:

$$d = p \cdot R \cdot 10^3 \tag{2.3}$$

Dove $R \sim 6371km$ è il raggio della sfera terrestre.

2.2 Metodologia Bluetooth

Negli smartphone dotati di Bluetooth che possono dunque scambiarsi segnali di questo tipo sia in trasmissione che in ricezione, l'indicatore RSSI (Received Signal Strength Indicator) stabilisce la misura della potenza del segnale ricevuto, detto anche rumore, che aumenterà mano a mano che il dispositivo che invia il segnale si avvicina al dispositivo che lo riceve. La potenza misurata ed espressa dall'indicatore RSSI è solitamente molto bassa, in linea con l'utilizzo standard del segnale Bluetooth che segue l'ordine dei mW, e di conseguenza viene indicata in dBm secondo la seguente formula:

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(P_W \cdot 10^3) \tag{2.4}$$

Dove P_W è la potenza espressa in Watt.

2.2.1 Dati RSSI

La sperimentazione con tecnica Bluetooth ha come obiettivo quello di trovare un modello che associ ad una determinata distanza tra due dispositivi un certo range di valori RSSI e verificare l'affidabilità del modello, confrontando i risultati ottenuti tramite la metodologia Bluetooth con i risultati ottenuti mediante tecnica RTK, la cui metodologia è spiegata nella Sezione 2.1.

Lo studio dei due modelli e la ricerca della tecnica più affidabile e in grado di fornire risultati con un accuratezza migliore risulterà fondamentale per la prevenzione e protezione da attacchi spoofing GPS, oltre a stabilire quale tecnica utilizzare per ottenere una distanza tra due dispositivi che sia il più precisa possibile.

Per via dei limiti della tecnologia Bluetooth e in particolare del raggio d'azione limitato, la sperimentazione si è limitata su distanze comprese tra 0 e 3 metri ed è stata svolta in condizioni ideali, ovvero con l'assenza di ostacoli quali oggetti e persone, ferme o in movimento, tra i due dispositivi e in un ambiente indoor, rappresentando comunque una situazione che potrebbe verificarsi in circostanze reali.

Nello smartphone Android, con tecnologia Bluetooth 5.0 integrata, utilizzato per la sperimentazione è stata installata l'applicazione *Bluetooth RSSI*, realizzata con l'ambiente di sviluppo Android Studio [15]. L'applicazione individua i dispositivi Bluetooth visibili nelle circostanze e, dopo aver fatto selezionare all'utente un dispositivo tra quelli disponibili, inizia con la fase di registrazione dei dati RSSI mostrando in tempo reale i valori registrati che, al termine dell'esecuzione, verranno salvati in un file Excel per la successiva fase di analisi.

Utilizzando il programma Microsoft Excel sono stati analizzati i dati RSSI ottenuti, calcolando il range, la media e la frequenza dei valori RSSI per ogni

distanza, oltre alla probabilità campionaria di tali valori. I dati RSSI e i parametri calcolati sono stati utilizzati per realizzare dei grafici che evidenziano l'andamento dei valori RSSI in funzione del tempo e della distanza.

Capitolo 3

Risultati Sperimentali

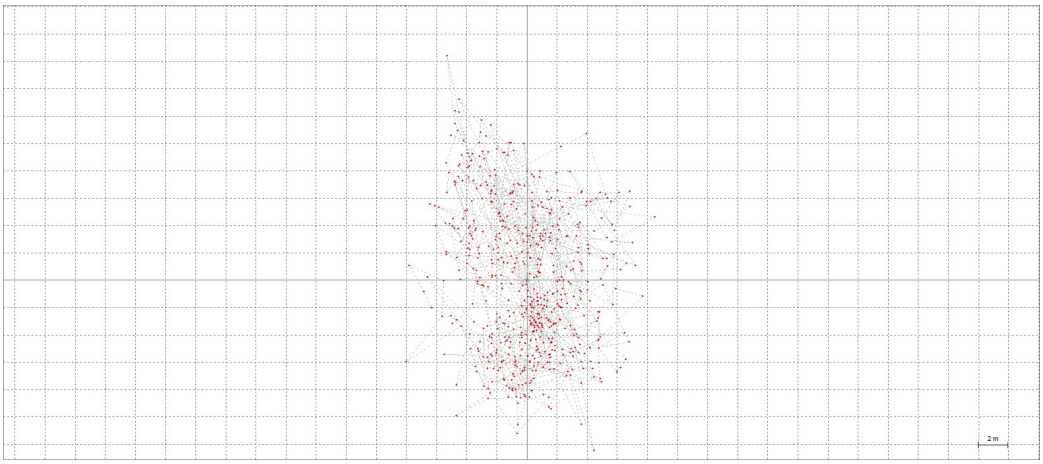
3.1 Risultati RTK

3.1.1 RTK Single-Device

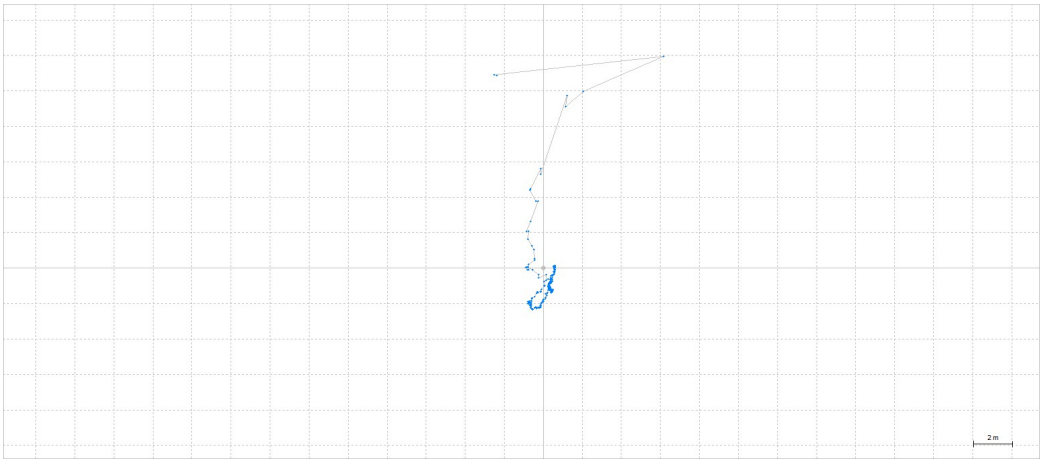
L'obiettivo della prima sperimentazione RTK è analizzare il comportamento del file posizionale di un dispositivo statico che riceve dati GNSS e tramite l'RTK corregge questi dati per ottenere una posizione finale migliore.

Il dispositivo utilizzato per registrare i dati è uno smartphone Android (Samsung Galaxy S21 Ultra 5G) che è compatibile con la ricezione dei dati GNSS grezzi. La registrazione dei dati è stata svolta in una giornata con condizioni meteo favorevoli e la sperimentazione è stata fatta a circa 15 km dalla Base Station di Cittadella (PD). Questa stazione GNSS prende solamente i dati della rete GPS e non considera altre reti di satelliti che dunque non sono state integrate nella fase di registrazione dei dati.

Sono state prese 5 misurazioni, in cui ogni file posizionale ha circa 600 posizioni geografiche salvate, che corrispondono a circa 10 minuti di registrazione dati.



(a) Dati GNSS



(b) Correzioni RTK

Figura 3.1: Confronto file posizionali

Osservando il file posizionale con le correzioni RTK rispetto al file posizionale contenente solamente i dati GNSS (GPS), si può notare come i punti, che rappresentano le posizioni, si addensano in zone ben specifiche e non siano sparsi in modo aleatorio (vedi Figura 3.1).

Inoltre, simulando l'andamento delle posizioni RTK con il passare del tempo si può notare come il ricevitore segua un percorso ben preciso e, mano a mano che avanza, si allontana sempre meno dalla posizione precedente, addensando quindi le posizioni in una zona ben precisa.

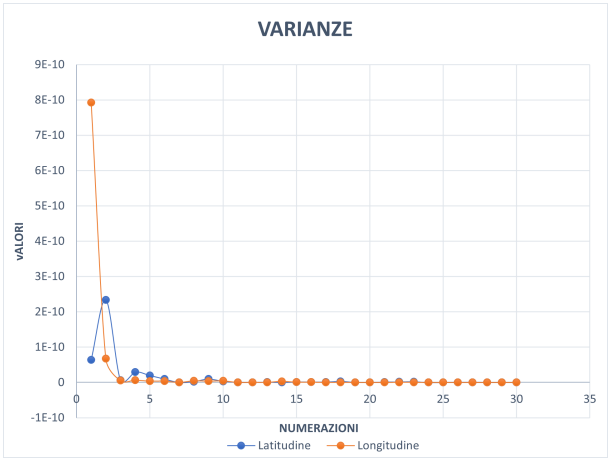


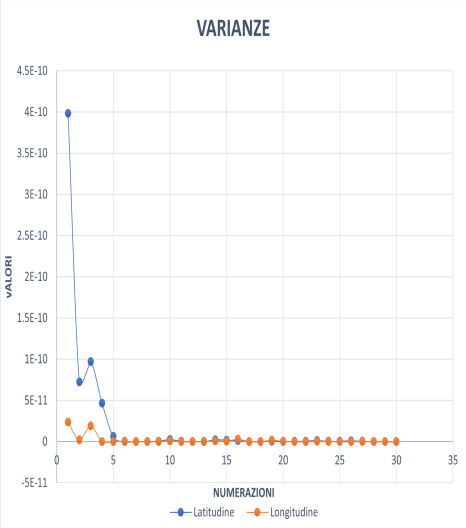
Figura 3.2: Varianza dati RTK

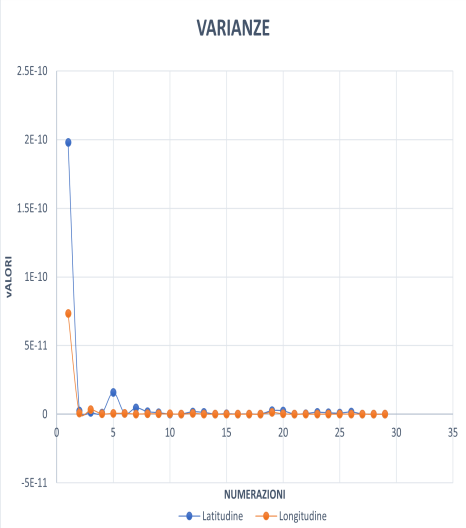
Nonostante questo comportamento più lineare, anche nella tecnica RTK inizialmente i punti risultano distanti tra loro e privi di una connessione logica.

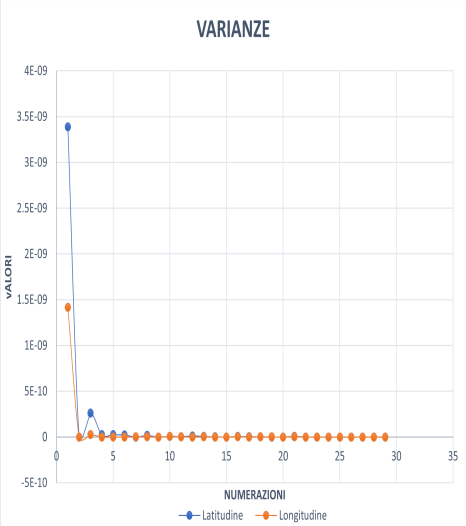
Questo aspetto è stato approfondito, andando a calcolare la varianza campionaria delle coordinate geografiche rappresentanti la posizione (latitudine, longitudine), scegliendo intervalli contenenti 20 posizioni. In questo modo, per ogni file posizionale sono state ottenute circa 30 varianze per latitudine e longitudine (vedi Figura 3.2).

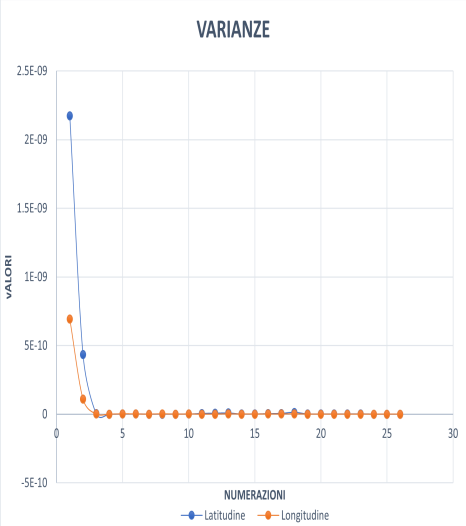
Osservando i risultati ottenuti, viene confermato quanto già notato precedentemente: inizialmente la varianza campionaria risulta molto alta e le correzioni RTK non possono considerarsi attendibili, mentre dopo un certo intervallo di tempo l'incertezza diminuisce notevolmente. I primi risultati efficaci ed attendibili, che coincidono con la riduzione e stabilizzazione della varianza, si ottengono dopo circa 2-3 minuti di registrazione dati.

Questa caratteristica notata nell'utilizzo pratico della tecnologia RTK verrà preso in considerazione nella seconda sperimentazione, nella quale verrà calcolata la distanza tra due dispositivi.


VARIANZE
4.5E-10
4E-10
3.5E-10
3E-10
2.5E-10
2E-10
1.5E-10
1E-10
5E-11
0
-5E-11
VALORI
0
5
10
15
20
25
30
35
NUMERAZIONI
Latitudine
Longitudine


VARIANZE
2.5E-10
2E-10
1.5E-10
1E-10
5E-11
0
-5E-11
VALORI
0
5
10
15
20
25
30
35
NUMERAZIONI
Latitudine
Longitudine


VARIANZE
4E-09
3.5E-09
3E-09
2.5E-09
2E-09
1.5E-09
1E-09
5E-10
0
-5E-10
VALORI
0
5
10
15
20
25
30
35
NUMERAZIONI
Latitudine
Longitudine


VARIANZE
2.5E-09
2E-09
1.5E-09
1E-09
5E-10
0
-5E-10
VALORI
0
5
10
15
20
25
30
NUMERAZIONI
Latitudine
Longitudine

3.1.2 RTK Multi-Device

L'obiettivo della seconda sperimentazione con tecnica RTK è calcolare la distanza tra due dispositivi con lo scopo di determinare la precisione della tecnologia RTK come tecnica di geo-localizzazione.

I dispositivi Android utilizzati (smartphone Samsung Galaxy S21 Ultra e smartphone Samsung Galaxy S21) sono stati posizionati a determinate distanze, comprese tra 0 e 3 metri, e per ogni distanza si sono raccolte 5 misurazioni, ognuna delle quali contiene circa 300 posizioni salvate (circa 5 minuti di registrazione dati). Tenendo in considerazione i risultati ottenuti nella precedente sperimentazione con tecnica RTK (vedi Sezione 3.1.1), nel calcolo delle posizioni medie, necessarie per determinare la distanza, sono state considerate solo le ultime 120 posizioni geografiche. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 3.1.

Distanza Reale	**Distanza RTK**
0.5m	0.58m
1m	0.93m
2m	2.19m
3m	3.16m

Tabella 3.1: Distanze dispositivi

Osservando il grafico delle distanze, realizzato utilizzando i valori nella Tabella 3.1 (vedi Figura 3.5), si può vedere che le distanze medie RTK ottenute seguono un andamento lineare con un piccolo margine di errore rispetto alle distanze reali (5-20 cm).

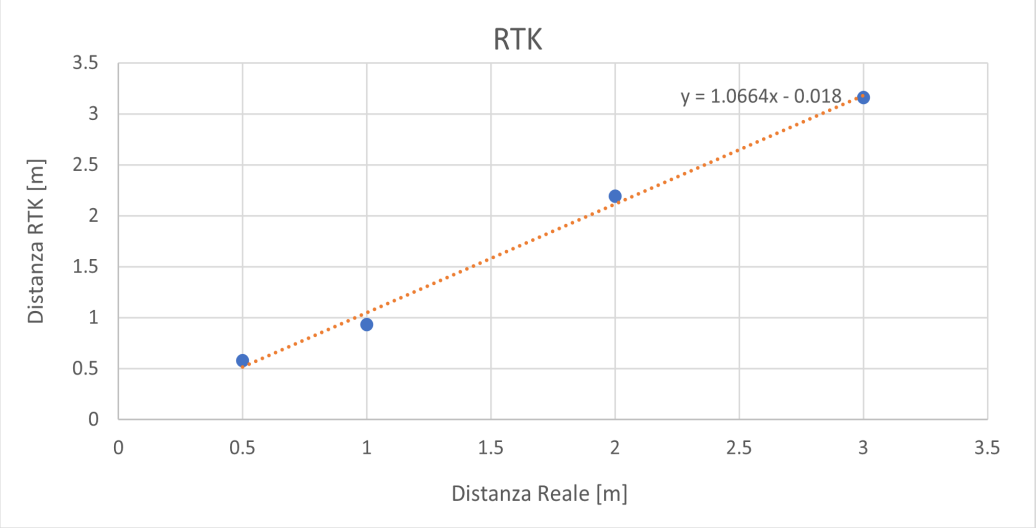


Figura 3.5: Distanze medie RTK

3.2 Risultati Bluetooth

3.2.1 Bluetooth RSSI

Nella sperimentazione con tecnologia Bluetooth sono stati registrati e analizzati 300 valori di RSSI per ogni distanza, con l'obiettivo di associare un range preciso di valori RSSI e vedere come questo cambia in funzione della distanza tra i due dispositivi.

I valori RSSi registrati e il loro andamento temporale sono rappresentati nella Figura 3.6, nella quale si può subito notare come all'aumentare della distanza aumenti sia il rumore del segnale e sia le oscillazioni dei valori RSSI, indice di una minore stabilità ed efficienza. Inoltre, si nota che l'intervallo di distribuzione dei valori RSSI cambia anch'esso in funzione della distanza, in particolare tende ad allargarsi con l'aumentare della distanza.

Analizzando i dati RSSI raccolti sono stati calcolati alcuni parametri, come la media, ed è stato associato un range di valori RSSI ad ogni distanza presa in considerazione.

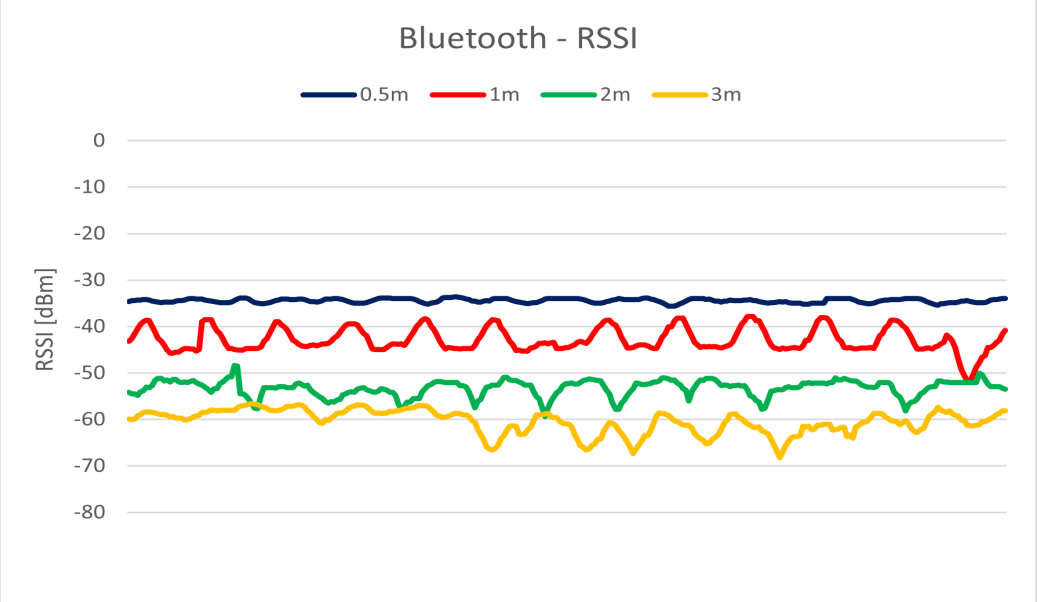


Figura 3.6: Andamento valori RSSI

Il range calcolato rappresenta l'intervallo contenente almeno il 90% dei valori RSSI osservati, intorno al valore medio, per ogni distanza. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 3.2

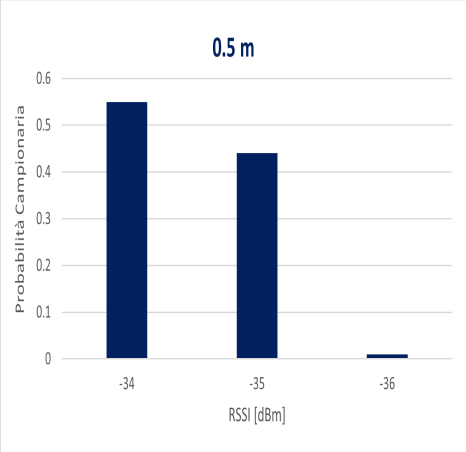
Distanza	**Media RSSI**	**Range RSSI**	**Affidabilità**
0.5m	-34.5 dBm	[-34,-35] dBm	99%
1m	-42.9 dBm	[-39,-45] dBm	95.3%
2m	-53 dBm	[-51,-56] dBm	93%
3m	-60.6 dBm	[-57,-64] dBm	90.6%

Tabella 3.2: Parametri RSSI

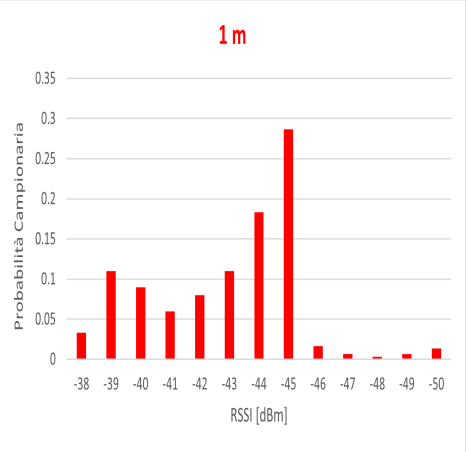
Osservando i risultati ottenuti, si può affermare che aumentando la distanza tra i due dispositivi si riduce l'affidabilità dei valori RSSI misurati che indicano l'efficienza della tecnologia Bluetooth.

Per approfondire lo studio, sono state calcolate le Probabilità Campionarie dei dati RSSI (vedi Figura 3.7) per capire come i valori vengono distribuiti

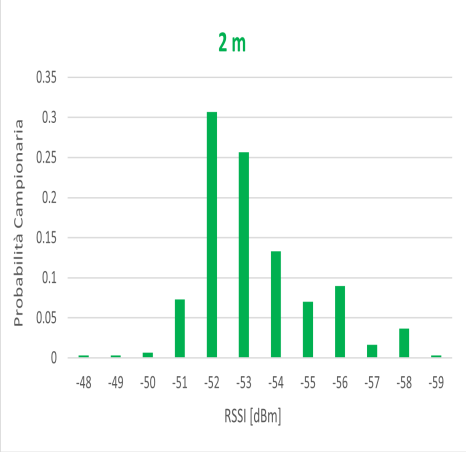
all'interno del range di appartenenza stabilito, relativo ad ogni distanza, ed osservare se la distribuzione di probabilità ottenuta può essere associata ad una distribuzione di probabilità nota.



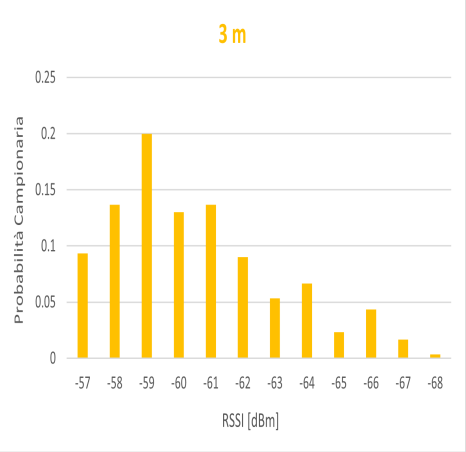
(a) 0.5 metri



(b) 1 metro



(c) 2 metri



(d) 3 metri

Figura 3.7: Distribuzione di Probabilità RSSI

Dai grafici ottenuti che mostrano le distribuzioni di probabilità, si può notare una somiglianza con la funzione di probabilità discreta binomiale (vedi Figura 3.8), specialmente per i valori di distanze maggiori.

Per completare lo studio, si è analizzato l'andamento dei valori RSSI in funzione della distanza realizzando un grafico con il valore di RSSI medio

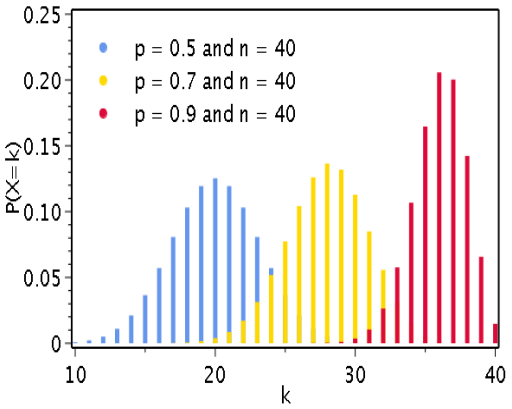


Figura 3.8: Esempi di distribuzione binomiale [16]

per ogni distanza (vedi Figura 3.9) e si è potuto verificare che l'attenuazione della potenza in funzione della distanza segue un andamento logaritmico.

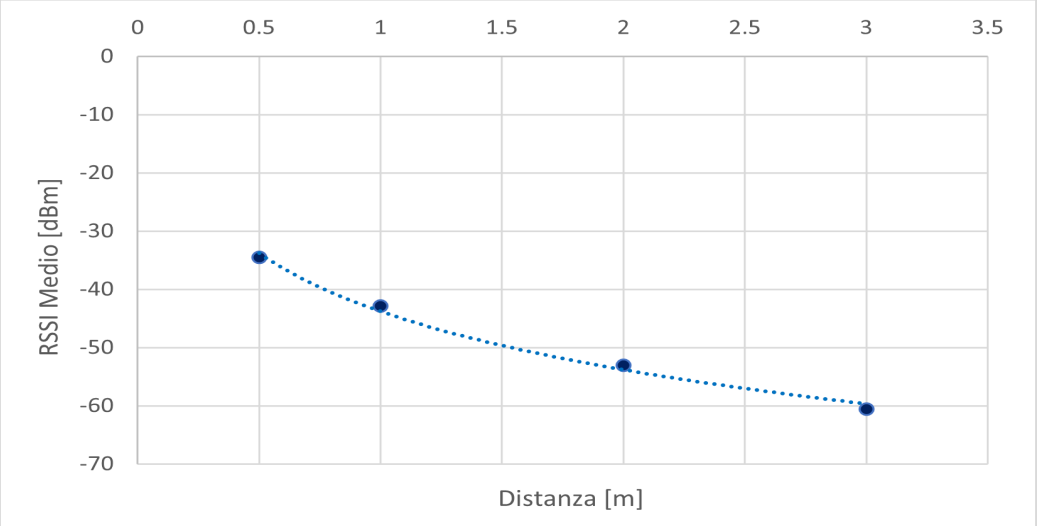


Figura 3.9: Valori RSSI medi

Capitolo 4

Conclusioni

4.1 Conclusioni RTK

I risultati ottenuti con tecnica RTK presentano un'ottima accuratezza poichè il margine di errore per le distanze considerate è sempre inferiore ai 20 cm e, considerando distanze minori o uguali ad 1 metro, esso si abbassa e diventa inferiore ai 10 cm. La tecnica RTK però, teoricamente, dovrebbe essere in grado di raggiungere una precisione a livello centimetrico che non è stata ottenuta nel caso di studio. Probabilmente, l'utilizzo di ricevitori GNSS di qualità superiore avrebbe permesso di ottenere una maggiore accuratezza rispetto a quella ottenuta utilizzando il ricevitore integrato nello smartphone, riducendo l'errore fino ad un massimo di qualche centimetro. Osservando i risultati ottenuti, si può affermare che la tecnica RTK ha portato un netto miglioramento rispetto alle tecniche GNSS standard, come il GPS, e la sua accuratezza la rende una delle tecniche più affidabili in grado di rilevare attacchi spoofing GPS superiori a 20 cm dalla posizione reale, indipendentemente dalla distanza tra i dispositivi.

4.2 Conclusioni Bluetooth

I risultati ottenuti con la tecnologia Bluetooth riflettono la caratteristica principale del Bluetooth, ovvero l'ottimo funzionamento ad un basso raggio d'azione. Infatti, osservando i risultati si nota un'alta affidabilità per distanze inferiori ai 2 m, mentre con distanze maggiori il livello di affidabilità decresce notevolmente. Considerando che la sperimentazione è stata svolta in condizioni ideali, si può confermare che la tecnologia Bluetooth non è ottimale per l'alto margine di errore introdotto con distanze medio-alte (maggiori di 2-3 m) e soprattutto con la presenza di ostacoli. Inoltre, considerando l'andamento logaritmico tra RSSI-Distanza, si può dedurre che minime variazioni dei dati RSSI potrebbero provocare un errore notevole nella stima della distanza. Nonostante questo, il Bluetooth può essere considerato una buona tecnica anti-spoofing per dispositivi posizionati ad una breve distanza e i risultati dimostrano un'affidabilità media pari al 98% e, basandosi su questo parametro, si può dedurre che la tecnologia Bluetooth riesce a rilevare attacchi spoofing GPS anche di bassa entità.

4.3 Confronto RTK e Bluetooth

La principale differenza notata tra le due tecnologie è l'indipendenza dell'errore dalla distanza tra i dispositivi nei risultati ottenuti con tecnica RTK, rispetto ai risultati ottenuti con tecnologia Bluetooth che mostrano un'alta affidabilità soltanto per piccole distanze. Un altra proprietà della tecnica RTK è che non risente in modo particolare della presenza di ostacoli ma i risultati ottenuti dipendono molto dalla qualità dei ricevitori GNSS e dalle condizioni ambientali, soprattutto condizioni meteorologiche. Le misure prese con tecniche Bluetooth invece sono fortemente influenzati da eventuali

ostacoli, anche se, per il principale utilizzo a corto raggio di questa tecnologia, le applicazioni che la utilizzano funzionano in modo corretto ed efficace. In conclusione, valutando l'affidabilità delle due tecnologie e quanto siano efficaci nella sicurezza dei dispositivi, in particolare quando sottoposti ad attacco spoofing GPS, si può affermare che per piccole distanze (<1-2m) si preferisce l'utilizzo della tecnologia Bluetooth, mentre per distanze maggiori (>1-2m) è preferibile utilizzare la tecnologia RTK poiché grazie alla sua alta accuratezza consente di stabilire una soglia relativamente bassa senza causare falsi allarmi di attacco spoofing GPS.

Bibliografia

[1] "How gnss & rtk technology achieve high-precision positioning?." https://www.fjdynamics.com/blog/91-GNSS--RTK.html.

[2] "Dove mi trovo?." https://danielepostacchini.it/2019/02/01/dove-mi-trovo/.

[3] "What is real-time kinematic (rtk) and how does it work?." https://www.geospatialworld.net/videos/what-is-real-time-kinematic/.

[4] "Personal area network (pan)." https://www.oreilly.com/library/view/ccentccna-icnd1-100-105/9781788621434/beee6f56-d88a-4536-87dc-63f0e077018a.xhtml.

[5] J. Marcel, "A look inside bluetooth direction finding." https://www.bluetooth.com/blog/a-look-insidebluetooth-direction-finding/, 2019.

[6] "Bluetooth security measures on timetec ble & iot product series." https://www.timetecaccess.com/bluetooth_security.

[7] T. Hohman, "The inside scoop on gps spoofing." https://www.orolia.com/the-inside-scoop-on-gps-spoofing/.

[8] E. Berger, "Study finds that a gps outage would cost $1 billion per day." https://arstechnica.com/science/2019/06/study-finds-that-a-gps-outage-would-cost-1-billion-per-day/, 2019.

[9] "Geo++ rinex logger." https://play.google.com/store/apps/details?id=de.geopp.rinexlogger&hl=it&gl=US".

[10] T. Takasu, "Rtkpost." http://www.rtklib.com/.

[11] "Rete gnss veneto." http://retegnssveneto.cisas.unipd.it/Web/index.php.

[12] T. Takasu, "Rtkplot." http://www.rtklib.com/.

[13] "Microsoft excel." https://www.microsoft.com/it-it/microsoft-365/excel.

[14] "Calcolo della distanza geodetica tra due punti della superficie terrestre." https://www.spadamar.com/archivio/tag/distanze-geodetiche/index.html.

[15] "Android studio." https://developer.android.com/studio.

[16] "Binomial distribution." https://math.stackexchange.com/.

[17] N. Benvenuto and M. Zorzi, *Principles of Communications Networks and Systems*. Wiley, 2011.

[18] "Wikipedia." https://it.wikipedia.org/.