



**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA CAMPUS DI CESENA**

DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA ELETTRONICA PER L'ENERGIA E L'INFORMAZIONE

# **Caratterizzazione sperimentale del canale radio "Air-to-Ground" in ambiente urbano**

Elaborato in  
**Campi Elettromagnetici**

Relatore:  
**Prof. Ing. Enrico Maria Vitucci**

Presentato da:  
**Cornacchia Francesco**

Correlatore:  
**Prof. Ing. Vittorio Degli Esposti**

Anno accademico **2020/2021**

## Sommario

<b>UAV E UTILIZZO NELLE TELECOMUNICAZIONI E MONITORAGGIO .....</b>	<b>5</b>
1.1 INTRODUZIONE A RPA E DRONI.....	5
1.1.2 RPA: <i>classificazione e caratteristiche</i> .....	5
1.2 RPA NELLE TELECOMUNICAZIONI.....	7
1.2.1 <i>Supporto RPA per la copertura e trasmissione</i> .....	7
1.2.2 <i>RPA per la comunicazione 5G</i> .....	8
1.2.3 <i>Gli RPA per le comunicazioni IoT (Internet of Things)</i> .....	9
<b>CARATTERIZZAZIONE DEL CANALE AIR TO GROUND (ARIA-TERRA) .....</b>	<b>10</b>
2.1 CARATTERISTICHE BASE DEL CANALE AIR TO GROUND .....	10
2.1.1 <i>Introduzione A2G</i> .....	10
2.1.2 <i>Descrizione e caratteristiche del canale A2G</i> .....	10
2.2 IL CANALE AIR-TO-GROUND: SCENARI .....	12
2.2.1 <i>Scenari differenti</i> .....	12
2.2.2 <i>Gli scenari: rurale o sull'acqua</i> .....	12
2.2.3 <i>Scenario urbano</i> .....	13
2.2.4 <i>Modello dell'ambiente urbano</i> .....	13
2.3 INTRODUZIONE ALLE ONDE MILLIMETRICHE (MMWAVE).....	15
2.3.1 <i>Caratteristiche onde millimetriche</i> .....	15
<b>DESCRIZIONE DELL'APPARATO DI MISURA .....</b>	<b>16</b>
3.1 ATTREZZATURA.....	16
3.1.1 <i>Il kit SAF</i> .....	16
3.1.2 <i>Antenna ad "Horn"</i> .....	17
3.1.3 <i>Antenna omnidirezionale</i> .....	18
3.1.4 <i>Altra attrezzatura</i> .....	18
3.1.5 <i>Drone/RPA a disposizione per le rilevazioni sperimentali</i> .....	19
3.1.6 <i>Telemetria di bordo</i> .....	19
<b>CAMPAGNA DI MISURA.....</b>	<b>20</b>
4.1 SETUP SUL CAMPO .....	20
4.1.2 <i>Ground Station (GS): utilizzo di QGC</i> .....	20
4.1.3 <i>Programmazione delle missioni di volo dell'RPA</i> .....	20
4.2 INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA.....	21
4.2.1 <i>Descrizione della campagna di misura</i> .....	21
4.3 TIPOLOGIE DI MISURE.....	22
4.3.1 <i>Rotazioni sul posto</i> .....	22
4.3.2 <i>Scansioni orizzontali</i> .....	22
4.3.3 <i>Scansioni verticali</i> .....	23
4.4 MISURE AD IMOLA .....	24
4.4.1 <i>Misure di canale radio</i> .....	24
4.4.2 <i>Sito di Via Callegherie</i> .....	26
4.4.3 <i>Sito di via Petrarca</i> .....	28
<b>POST-PROCESSING .....</b>	<b>30</b>
5.1 POST-PROCESSING DEI DATI RACCOLTI.....	30
5.1.1 <i>Cosa si intende per post-processing</i> .....	30
5.1.2 <i>Matching con i dati di telemetria (file .log)</i> .....	31
5.1.3 <i>Elaborazione matematica</i> .....	32

<b>ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI .....</b>	<b>33</b>
6.1 ANALISI DELLE MISURE: ROTAZIONI SUL POSTO .....	33
6.1.1 <i>Via Petrarca: Rotazione sul posto in <math>(x_1, y_1, h_{med})</math></i> .....	33
6.1.2 <i>Via Petrarca: Rotazione sul posto in <math>(x_2, y_2, h_{med})</math></i> .....	34
6.1.3 <i>Via Petrarca: Rotazione sul posto in <math>(x_2, y_2, h_{max})</math></i> .....	35
6.1.4 <i>Via Petrarca: Rotazione sul posto in <math>(x_5, y_5, h_{max})</math></i> .....	36
6.1.5 <i>Via Petrarca: Rotazione sul posto in <math>(x_5, y_5, h_{med})</math></i> .....	38
6.1.6 <i>Via Petrarca: Rotazione sul posto in <math>(x_6, y_6, h_{med})</math></i> .....	39
6.1.7 <i>Via Callegherie: Rotazione sul posto in <math>(x_0, y_0, h_{med})</math></i> .....	40
6.2 ANALISI MISURE: SCANSIONI ORIZZONTALI .....	41
6.2.1 <i>Via Callegherie: percorso orizzontale da <math>(x_1, y_1, h_{med})</math> a <math>(x_2, y_2, h_{med})</math></i> .....	41
6.2.2 <i>Via Callegherie: percorso orizzontale da <math>(x_1, y_1, h_{max})</math> a <math>(x_2, y_2, h_{max})</math></i> .....	42
6.3 ANALISI MISURE: SCANSIONI VERTICALI .....	44
6.3.1 <i>Via Callegherie: percorso orizzontale da <math>(x_1, y_1, h_{med})</math> a <math>(x_2, y_2, h_{med})</math></i> .....	44
6.4 ANALISI SINTETICA DEI RISULTATI .....	45
6.4.1 <i>Grafici inclinazione-potenza Via Petrarca</i> .....	45
6.4.2 <i>Grafici inclinazione-potenza Via Callegherie</i> .....	46
6.4.3 <i>Grafici distanza-inclinazione ottimale Via Petrarca e Via Callegherie</i> .....	47
6.5 CONCLUSIONI .....	48
<b>RIFERIMENTI .....</b>	<b>49</b>

## INTRODUZIONE

L'utilizzo di piattaforme volanti come i "veicoli aerei senza pilota" (RPA), popolarmente noti come droni, è in rapida crescita in particolare per le loro caratteristiche intrinseche, come mobilità, flessibilità e altitudine adattiva.

Gli RPA ammettono diverse potenziali applicazioni chiave nei sistemi wireless.

Da un lato, possono essere utilizzati come stazioni base aeree per migliorare la copertura, la capacità, l'affidabilità e l'efficienza energetica delle reti wireless, d'altra parte possono funzionare come terminali mobili volanti all'interno di reti [1].

L'obiettivo di questo elaborato è quello di caratterizzare in maniera sperimentale proprio il canale "Air to Ground" (A2G) (aria a terra), che permette la comunicazione tra stazione base e terminale aereo.

L'analisi sperimentale presuppone l'osservazione di dati raccolti sul campo, nel nostro caso ambiente urbano, per la precisione nel centro della città di Imola (zona residenziale e centro storico).



# UAV E UTILIZZO NELLE TELECOMUNICAZIONI E MONITORAGGIO

## 1.1 Introduzione a RPA e droni

Si tratta di veicoli aerei senza pilota a bordo, Remotely Piloted Aircraft (RPA), dispositivi quindi pilotati da remoto, comunemente conosciuti anche come droni. In alternativa possiamo anche trovarli denominati Unmanned Aerial Vehicles (UAV).

### 1.1.2 RPA: classificazione e caratteristiche

A seconda dell'impiego che sene deve fare, degli obbiettivi e delle caratteristiche richieste, esistono diverse tipologie di RPA. In generale, quest'ultimi possono essere classificati tenendo in considerazione due caratteristiche fondamentali: l'altitudine di volo e la loro tipologia [2]. In base all'altitudine, si possono distinguere due tipi di droni:

- High-Altitude Platform (HAP) [1]: sono caratterizzati da una lunga durata di volo (giorni o mesi), larga copertura e solitamente sono quasi-stazionari. La loro altitudine di norma è al di sopra dei 17 km.
- Low-attitude Platform (LAP) [2]: al contrario dei primi, non hanno una lunga resistenza e possono volare solamente per alcune ore, ma possono essere schierati più velocemente e con maggior flessibilità (sono semplicemente ricaricati o sostituiti). Sono economicamente vantaggiosi e la loro altitudine raggiunge intorno ai 2 km.

In base alla loro tipologia, gli RPA possono essere classificati in:

- Fixed-wing (ala fissa), sono dei velivoli con una dimensione ridotta. Hanno però un peso maggiore, maggiore velocità e devono spostarsi in avanti per rimanere in volo (non possono librarsi). Grazie alla loro stabilità, gli RPA ad ala fissa possono trasportare carichi e volare per diverse ore.
- Rotary-wing (ala rotante), noti anche come "Quadricotteri", possono sollevarsi e rimanere fermi su un'area. Rispetto a quelli ad ala fissa, tuttavia, hanno molti limiti a causa della loro natura, ad esempio la loro bassa velocità e le consistenti limitazioni energetiche, che provoca una durata di volo più breve (meno di 1 ora per i droni standard).

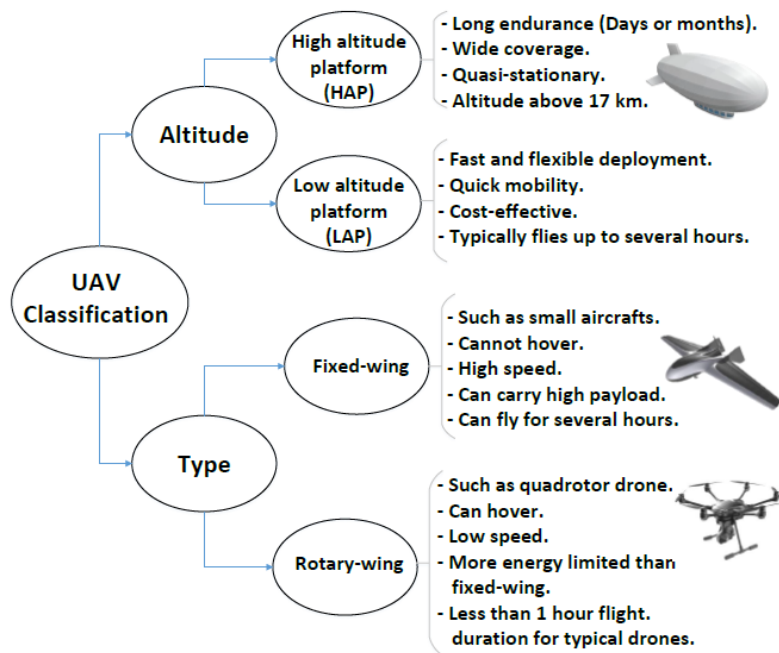


Fig. 1.1 Classificazione RPA a seconda dell'altitudine e capacità

## 1.2 RPA nelle telecomunicazioni

### 1.2.1 Supporto RPA per la copertura e trasmissione

Gli RPA possono essere utilizzati per assistere l'eventuale infrastruttura di comunicazione nel fornire una copertura wireless senza interruzioni nell'area di servizio. In Fig. 1.1 sono rappresentati due scenari esemplificativi di possibili utilizzi di RPA, quali il rapido ripristino del servizio di connettività dopo un danneggiamento parziale o completo di un'infrastruttura a causa di un problema di natura generica (a), oppure il possibile schieramento di quest'ultimi per fornire connettività wireless tra due o più utenti o gruppi di utenti distanti senza avere collegamenti di comunicazione [6].

Ciò potrebbe accadere, ad esempio, tra la linea frontale e il centro di comando per le comunicazioni in caso di emergenza (b). Un altro esempio potrebbe essere la congestione di canale di una stazione base dovuto ad aree estremamente affollate (ad esempio uno stadio durante un'importante partita di calcio). Questo genere di scenario è di forte interesse per i futuri sistemi wireless di quinta generazione(5G) e oltre (beyond-5G, 6G) [5].

Oppure ancora il monitoraggio da remoto di sensori wireless distribuiti nel territorio per svariate applicazioni (agricoltura, prevenzione incendi, ecc.)

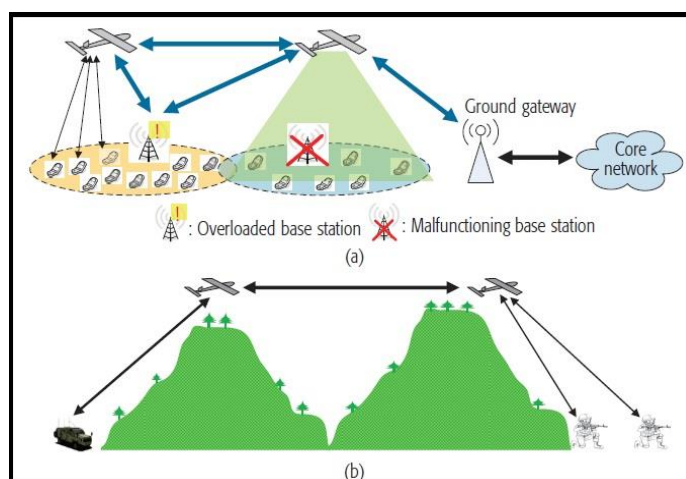


Fig. 1.1 Caso(a) UAV fornisce copertura in caso di mal funzionamento di una stazione base.  
Caso(b) Supporto per una trasmissione di emergenza.

### 1.2.2 RPA per la comunicazione 5G

Il 5G, 5° generazione, è l'ultima generazione per la comunicazione mobile cellulare ed è rivoluzionaria grazie alle sue prestazioni, che non sarebbe stato possibile raggiungere con i precedenti standard di comunicazione wireless.

Gli obiettivi di questa nuova tecnologia sono: l'elevato data-rate (trasferimento dati), tempi di latenza ridotti, risparmio energetico, riduzione dei costi e maggiore capacità del sistema di connettività del dispositivo di massa.

Tutto questo è possibile grazie allo sviluppo di nuove tecnologie wireless, come per esempio la comunicazione device-to-device (D2D), piccole reti con densità molto elevata grazie alla comunicazione per mezzo delle onde millimetriche (mmWave), le quali rappresentano il punto focale dei sistemi cellulari 5G [7].

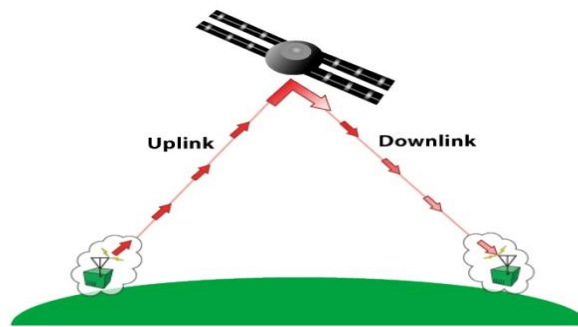
Quindi, le stazioni base RPA portate in volo rappresentano un inevitabile complemento per un ambiente 5G eterogeneo. Per esempio:

- I LAP- RPA possono fornire comunicazioni volanti rapide e convenienti, invece di implementare una rete di microcelle ultra densa in ambienti rurali e geograficamente vincolati.
- I HAP- RPA possono fornire soluzioni sostenibili a lungo termine per la copertura in ambienti rurali.
- Gli RPA dotati di connessione wireless possono naturalmente stabilire connessioni LoS con gli utenti di terra (il che reduce significativamente la perdita di propagazione). Questa può essere una soluzione interessante per fornire una trasmissione wireless ad alta capacità, sfruttando al contempo i vantaggi degli RPA e i collegamenti mmWave.
- Le comunicazioni tra Device-to-Device(D2D) e Vehicle-to-Vehicle (V2V) potrebbero essere molto più efficienti. In primo luogo, i droni possono ridurre le interferenze riducendo il numero di collegamenti di trasmissione richiesti tra dispositivi a terra quando questi sono in condizioni di non visibilità radio. In secondo luogo, i droni mobili possono introdurre l'opportunità di selezionare diversi tipi di trasmissione e aumentare l'affidabilità e la connettività delle reti terrestri D2D e V2V.

### 1.2.3 Gli RPA per le comunicazioni IoT (Internet of Things)

In un ambiente IoT l'efficienza energetica, la bassissima latenza, l'affidabilità e le comunicazioni uplink e downlink ad alta velocità diventano estremamente importanti. A questo proposito, l'uso dell'RPA mobile può essere implementato come stazione base volante per fornire una comunicazione affidabile, per l'invio di pacchetti (uplink) e la ricezione dei pacchetti (downlink) rappresentazione nella *fig. 1.2*, molto efficienti dal punto di vista energetico.

In effetti, a causa della loro natura, i droni possono essere implementati in modo efficace per ridurre gli effetti di ombreggiatura (shadowing) e di blocco del segnale radio. Inoltre, gli UAV possono aiutare a collegare i dispositivi IoT alla rete utilizzando una potenza di trasmissione minima al fine di risparmiare energia [11].



*Fig. 1.2 esempio di una comunicazione tra Uplink e Downlink*

## CARATTERIZZAZIONE DEL CANALE AIR TO GROUND (ARIA-TERRA)

### 2.1 Caratteristiche base del canale Air to Ground

#### 2.1.1 Introduzione A2G

Un elemento di studio imprescindibile è il canale di comunicazione (canale A2G) che veicola le informazioni tra GS (Ground Station) e RPA.

Per garantirne un'affidabile operatività e ottimizzarne l'utilizzo, si è presentata la necessità di crearne un modello matematico, che tenesse conto delle condizioni operative e di tutti i vincoli che comportano.

#### 2.1.2 Descrizione e caratteristiche del canale A2G

Il canale A2G è utilizzato per comunicare tra una stazione terra (GS-Ground Station) e una piattaforma volante (in generale) per mezzo di segnale elettromagnetico.

Il canale A2G conterrà spesso, ma non sempre, una componente "Line-of-Sight" (LoS) cioè in linea di vista (condizione ottimale), che nella terminologia delle telecomunicazioni indica il percorso ottico in linea retta fra un dispositivo trasmettitore ed uno ricevitore.

Il movimento dei droni causerà spesso anche il verificarsi di situazioni di ombreggiamento (shadowing) di "No-Line-of-Sight" (NLoS).

Quest'ultime possono essere causate da ostacoli, come edifici, terreno, alberi o persino dall'aeromobile stesso (chiamato "airframe shadowing").

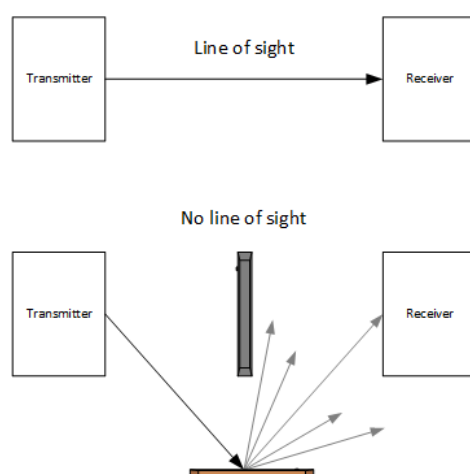


Fig 2.1 Rappresentazione LoS e NLoS tra trasmettitore e ricevitore

Un altro aspetto da tenere in considerazione del canale A2G sono le “multi-path components” (MPC) o componenti multipath.

Le MPC si vengono a verificare principalmente per la presenza di ostacoli di superficie, e il loro numero e la loro intensità relativa dipendono in modo critico dall’ambiente che circonda la GS e in generale da cosa si trova all’interno del volume ellissoidale tra la GS e l’aereomobile.

Osservando alcune applicazioni, come ad esempio la comunicazione satellite terra o radio cellulare, dobbiamo considerare i vincoli e le caratteristiche di una comunicazione tra GD (Ground Station) e un RPA che si muove nell’aria (nel nostro caso costantemente) ad una certa distanza. Infatti la principale differenza tra una comunicazione terra-satellite e un canale A2G per droni è l’ambiente di lavoro e la distanza a cui viene intrapresa la comunicazione.

Per quanto riguarda le comunicazioni satellitari sarebbe infatti importante tenere in considerazione anche il fattore “linea di vista radio” (RLoS) della GS, poiché l’attenuazione aumenta molto rapidamente oltre questa distanza a causa della curvatura della terra [6], che invece nelle nostre considerazioni non è necessario tenere in considerazione.

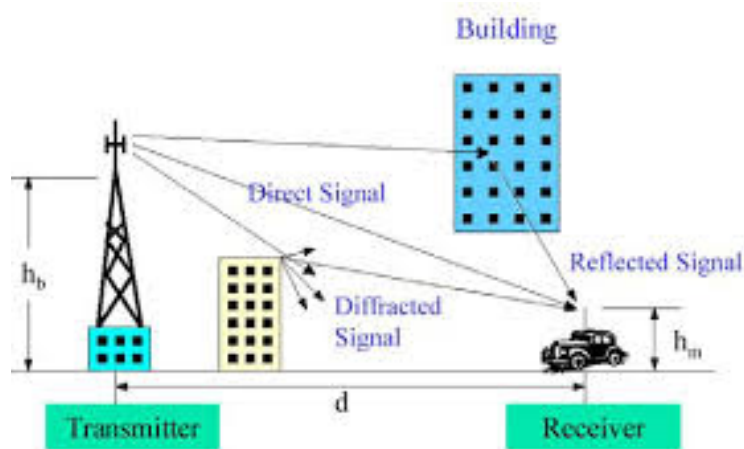


Fig. 2.2 Scenario che esemplifica i concetti di riflessione e diffrazione del segnale

## 2.2 Il canale Air-to-Ground: Scenari

### 2.2.1 *Scenari differenti*

Per garantire la sicurezza e il controllo dei droni, i collegamenti devono operare in modo affidabile in differenti condizioni.

Ciò richiede una certa caratterizzazione quantitativa del canale A2G, quindi un modello analitico che si adatti al meglio all'ambiente di lavoro. Pertanto, lo scenario assume un ruolo estremamente importante nella caratterizzazione del canale A2G e nel modello che utilizziamo chiaramente di esso.

Lo scenario può essere classificato considerando due aspetti:

- Il terreno: può essere pianeggiante, collinare, montuoso e acquoso.
- L'ambiente: rurale, suburbano e urbano.

Ovviamente, queste classificazioni non sono sempre disgiunte e non sono necessariamente esaustive, quindi è indispensabile un'analisi completa dell'ambiente specifico. In questo capitolo vengono presi in considerazione i due scenari per la loro importanza e per il loro utilizzo nelle applicazioni pratiche [11].

### 2.2.2 *Gli scenari: rurale o sull'acqua*

In questi due scenari non ci sono né ostacoli né vincoli particolari da trattare. Le caratteristiche principali sono l'assenza di oggetti nella traiettoria LoS e la non presenza di percorsi multipli (MPC) aggiuntivi, tranne nel caso della riflessione sulla superficie dell'acqua.



### 2.2.3 Scenario urbano

Questi scenari sono decisamente più complicati da analizzare, principalmente per gli MPC dovuti alle riflessioni dei segnali sugli ostacoli. In ambienti complessi come quello urbano sono presenti elementi infrastrutturali come edifici, pali della luce, terrazzi, grondaie, ecc. Questi possono influire pesantemente sulla propagazione del segnale elettromagnetico rispetto al caso dello spazio libero. In questi ambienti, la propagazione del campo è dominata dai percorsi multipli (MPC) [8] e molte risposte dello stesso segnale arrivano al ricevitore da direzioni diverse e con ritardi temporali diversi.

Lo studio e la caratterizzazione di questa tipologia di scenari è fondamentale per il gran numero di applicazioni pratiche che li riguardano. In questo elaborato si potrà osservare proprio un'analisi dei risultati ottenuti attraverso misurazioni effettuate sul campo in un ambiente del tutto simile a quello di cui si sta trattando (centro di Imola).

In effetti, uno degli utilizzi più interessanti è l'impiego della tecnologia dei droni in ambienti affollati e pieni di ostacoli.

Pertanto, lo studio di scenari urbani risulta una sfida molto ardua ma fortemente necessaria.

### 2.2.4 Modello dell'ambiente urbano

Sulla caratterizzazione di canale Air-to-Ground in ambiente urbano è presente poca documentazione. In questo genere di ambienti, i segnali possono essere diretti, quindi in assenza di ostacoli tra trasmettitore e ricevitore (LoS), ma anche riflessi (nLoS), in questa circostanza si può parlare di riflessione e diffrazione dei segnali (Fig. 2.2).

La presenza di molti ostacoli nello scenario urbano di propagazione fa sì che alla Ground Station giungano numerosi contributi originati dall'interazione delle onde elettromagnetiche con l'ambiente circostante (multipath). Il segnale ricevuto è dato pertanto dall'interferenza dei segnali giungono al ricevitore dopo aver percorso cammini differenti.

Di conseguenza, l'andamento della potenza ricevuta con la distanza si discosta significativamente da quello previsto dalla formula di Friis. Il segnale all'antenna Rx è somma di segnali che hanno percorso vie diverse (multipath). L'attenuazione in spazio libero nel caso ideale risulta essere:

$$L(dB) = -10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

Considerando l'ambiente urbano l'attenuazione è più elevata rispetto a quella prevista dalla legge dell'inverso del quadrato della distanza e dipenderà da un parametro  $\nu > 2$  secondo la legge  $r^{-\nu}$ . Il parametro  $\nu$  è variabile a seconda dello scenario presente tra trasmettitore e ricevitore.

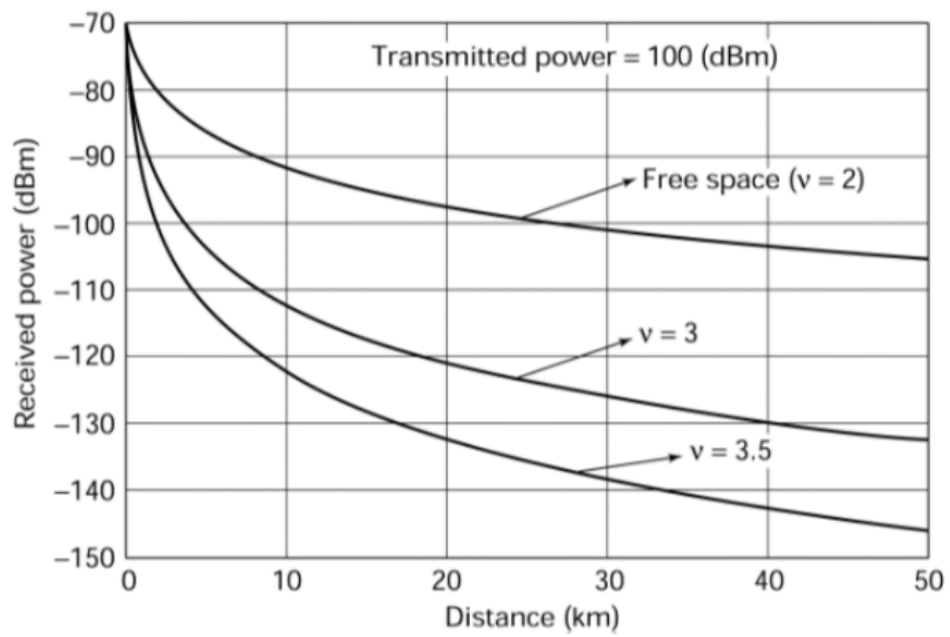


Fig. 2.3 Grafico andamento attenuazione in funzione della distanza e del parametro  $n$  (caratteristico di un ambiente urbano)

## 2.3 Introduzione alle onde millimetriche (mmWave)

### 2.3.1 *Caratteristiche onde millimetriche*

Gli attuali sistemi cellulari che utilizzano frequenze al di sotto dei 6 GHz hanno una banda abbastanza stretta, circa 600 MHz sono attualmente in utilizzo dagli operatori.

Ci sono diversi modi per ottenere uno spettro più ampio, ad esempio tramite l'utilizzo di tecniche cognitive [7].

In alternativa è presente una grande quantità di spettro a disposizione nelle frequenze delle onde millimetriche (mm-wave), che vanno da 6 a 300 GHz.

L'enorme quantità di spettro è solo uno dei vantaggi di questo tipo di tecnologia. Ad esempio, nei sistemi 5G and beyond, le mmWave saranno utilizzate in aggiunta ad altre funzionalità che possano migliorare esponenzialmente la qualità della comunicazione odierna. Gli array di antenne sono caratteristiche chiave nei sistemi mmWave, e sono alla base delle tecnologie massive MIMO [7]. In tale tecnologia, arrays con grandi numeri di elementi sono utilizzati per mantenere costante l'area efficace dell'antenna, compensando l'aumento di frequenza con un aumento del guadagno, e quindi eliminando la dipendenza della frequenza dell'attenuazione di spazio libero, rispetto alle antenne omnidirezionali. In pratica, ciò viene realizzato tramite la generazione di fasci molto stretti (pencil-beams), che vengono orientati in modo adattativo nelle direzioni dove la propagazione è più favorevole, attraverso l'uso di opportuni algoritmi di beamforming.

L'uso di tecniche di beamforming adattative consentono inoltre di ridurre l'impatto delle interferenze con altri link radio.

I guadagni in termini di quantità di informazione trasmessa nell'unità di tempo diventano più di dieci volte maggiori rispetto agli attuali sistemi 4G, grazie all'aumento di banda disponibile, e alla riduzione delle interferenze, quindi grazie al beamforming direzionale da TX a RX.

## DESCRIZIONE DELL'APPARATO DI MISURA

### 3.1 Attrezzatura

#### 3.1.1 Il kit SAF

Il kit di misura a onde millimetriche utilizzato nelle misure, realizzato dalla azienda lettone SAF Tehnika (<https://www.saftehnika.com/>) è formato dai seguenti componenti:

- Analizzatore di spettro portatile chiamato Spectrum Compact, rappresentato in figura 3.1. Esso è un dispositivo di misurazione leggero, compatto, facile da utilizzare grazie al display LCD e al touchscreen resistivo, lavora a vari intervalli di frequenze nel range complessivo 5.9 - 40GHz, ed è alimentato a batteria ricaricabile tramite porta USB. Può essere usato per svariate applicazioni sul campo come la raccolta di dati per la pianificazione di un sito di collegamento, la verifica di un collegamento già esistente tramite regolazione del puntamento o della polarizzazione dell'antenna, oppure effettuare misurazioni sulla densità spettrale di potenza del segnale tramite la funzionalità Power in band. Sul display del dispositivo si possono visualizzare immediatamente i risultati mentre per poter effettuare un post-processing bisogna utilizzare un software per pc chiamato "Spectrum Manager". Questo programma permette di acquisire i dati relativi allo spettro del segnale e di salvarli in file .csv che possono poi essere analizzati da software di calcolo come Matlab.
- Generatore di segnali chiamato Signal Generator, rappresentato sempre in *fig. 3.1*. Questo dispositivo rappresenta il nostro trasmettitore ad onde millimetriche in quanto, tramite il display touchscreen, si possono impostare i valori di frequenza e di potenza per la trasmissione del segnale. Il range di frequenze è compreso tra 24-40GHz mentre la potenza varia da -3dBm a +5dBm. Esso è un dispositivo compatto, leggero, facile da usare e alimentato a batteria; simile allo Spectrum Compact come mostra la figura sottostante [9].

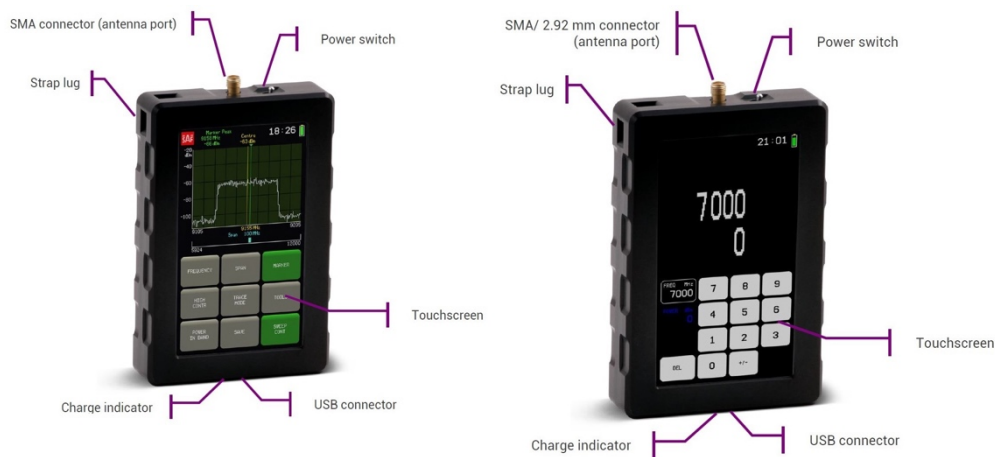


Fig. 3.1 Lo spectrum Compact sulla sinistra e il Signal Generator sulla destra

### 3.1.2 Antenna ad "Horn"

Antenna conica "Horn" del kit SAF Tehnika, in particolare il modello "JOAA2640HG03" che opera in un range di frequenze compreso da 26.5GHz a 40.5GHz con un guadagno compreso nel range precedente tra 20.5 e 21dBi. Essa puo' essere montata su sostegni verticali tramite gli appositi supporti metallici senza l'utilizzo di ulteriore attrezzatura. Dal diagramma di radiazione mostrato in figura 3.2 possiamo notare bene la caratteristica principale di questa tipologia di antenne: la direttività, ovvero la capacità di irradiare la maggior potenza in una direzione di massimo. In dettaglio si nota la presenza di un unico lobo, che coincide con l'area di bocca dell'antenna, grazie al quale il segnale viene propagato mentre in tutte le altre direzioni angolari il segnale viene attenuato molto.

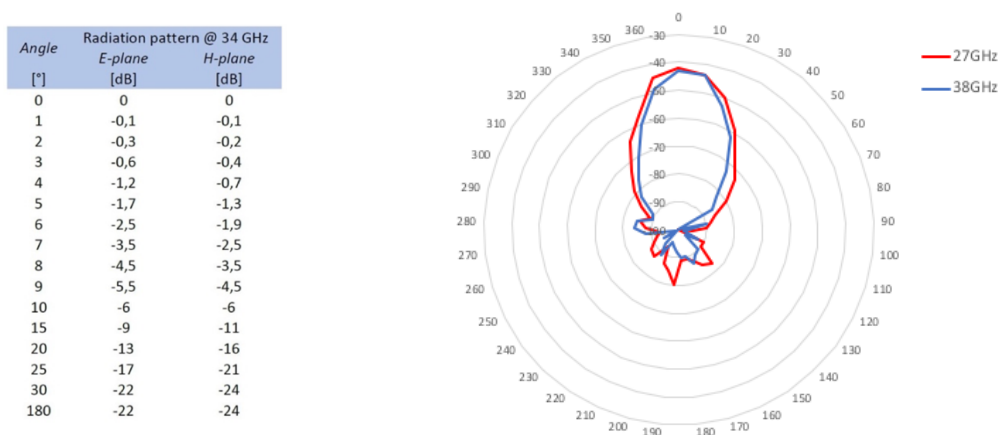


Fig. 3.2 Diagramma di radiazione antenna ad horn

### 3.1.3 Antenna omnidirezionale

Antenna omnidirezionale prodotta dalla Sage, modello SAO-2734030345-KF-S1, che ha un range di utilizzo compreso tra 26.5GHz e 40GHz. L'antenna è polarizzata verticalmente e il suo guadagno tipico sul piano orizzontale risulta essere pari a 3 dBi.

### 3.1.4 Altra attrezzatura

Cavi coassiali con connettori SMA-SMA realizzati apposta per avere una eccellente efficacia schermante fino a frequenze dell'ordine dei 50GHz, hanno impedenza caratteristica 50Ω e lunghezza di 30cm. Sono fondamentali per realizzare buoni collegamenti tra antenna e analizzatore di spettro o generatore di segnali.

Amplificatore di potenza coassiale per segnali a onde millimetriche nel range compreso tra 26.5GHz e 40GHz, modello SBP-2734033020-KFKF-S1 che ha la funzione di amplificare il segnale generato dal Signal Generator fino ad un massimo di 20dB. Nei set-up delle campagne di misura, l'amplificatore è costantemente raffreddato da una ventola per evitarne un riscaldamento eccessivo e seguenti malfunzionamenti.

Altri componenti del kit SAF utili per il trasporto e per effettuare le misurazioni come: varie custodie protettive per la strumentazione, supporti metallici per il fissaggio dell'antenna, supporto treppiede (mostrato in *fig 3.3*) per installazioni ad altezza necessaria, cavi e connettori vari.



*Fig. 3.3 Stazione per la trasmissione delle onde millimetriche fissata sul treppiede*

### 3.1.5 Drone/RPA a disposizione per le rilevazioni sperimentali

L' RPA utilizzato è "custom" ovvero realizzato appositamente per eseguire questo genere di misurazioni, è quindi dotato di particolari dispositivi hardware che ne permettono l'esecuzione, quali:

- Spectrum Analyser SAF che ha la funzione di ricevitore per le onde millimetriche.
- Antenna conica "Horn" SAF.
- Antenna omnidirezionale.



Fig. 3.4 Antenna ad "Horn" fissata sull'RPA

### 3.1.6 Telemetria di bordo

L' RPA utilizzato per le misurazioni è dotato di un sistema di telemetria di bordo, che permette a posteriori di avere una mappatura nel tempo di tutti i movimenti eseguiti e di tutte le posizioni ricoperte dal drone.

Le informazioni e i parametri registrati in questi dati, comunemente chiamati "log" dall'estensione con cui vengono memorizzati (.log), sono di rilevante importanza nel processo di post-processing delle misure, in quanto utilizzati per ricostruire i moventi del drone nel tempo e la rispettiva associazione (matching) alle misurazioni effettuate.

## CAMPAGNA DI MISURA

### 4.1 Setup sul campo

#### 4.1.2 *Ground Station (GS): utilizzo di QGC*

Durante l'esecuzione delle misure è necessaria la presenza sul campo di un PC dotato della piattaforma QGroundControl (QGC).

Quest'ultima permette il collegamento in remoto tra RPA e operatore alla GS e quindi il caricamento in tempo reale delle missioni precedentemente codificate (questo implica la possibilità compiere più missioni durante lo stesso volo).

Permette inoltre la supervisione di importanti parametri da parte dell'operatore alla GS quali:

- stato delle batterie.
- orientazione e posizionamento.
- numero di satelliti in collegamento con il sistema GPS di bordo e dunque grado di precisione di posizionamento e orientazione dell'RPA.

#### 4.1.3 *Programmazione delle missioni di volo dell'RPA*

La codifica delle missioni di volo compiute dall' RPA è stata implementata usufruendo della piattaforma QGroundControl (QGC), e viene solitamente svolta nei giorni antecedenti la giornata di misura.

Il tool in questione rende possibile il settaggio della posizione del drone (WP=Way Point) in termini di coordinate spaziali (es. [44.346813 °N](#), [11.714008°E](#)) e altitudine e l'orientazione dell'antenna di cui è dotato (ROI= Region Of Interest), per lassi di tempo a loro volta configurabili.

La programmazione consiste dunque nell'ordinare cronologicamente diverse posizioni che si desidera il drone assuma in combinazione con il puntamento dell'antenna su di esso montata, per avere il controllo sulla posizione del trasmettitore in aria e della sua orientazione.





Fig. 4.1 Esempio di situazione nella generica missione

## 4.2 Introduzione alla campagna

### 4.2.1 Descrizione della campagna di misura

Lo scopo di questa campagna di misurazione è quello di mettere in pratica, dalla teoria, il comportamento della propagazione dei segnali radio in scenari diversi e a frequenze diverse, con particolare riferimento all'ambiente urbano e a collegamenti radio A2G, cioè dove uno dei due terminali è installato su di un drone.

Le misure effettuate riguardano due diverse bande di frequenza:

- frequenze inferiori a 6 GHz, per le quali si è utilizzato un sistema di misura Ultra-Wide Band (banda ultra-larga), con banda centrata sulla frequenza 4.3 GHz, e larghezza di banda di 2 GHz.
- Frequenze superiori a 6 GHz, onde millimetriche, in particolare nelle misure si è utilizzato un segnale a banda stretta con una frequenza di 27 GHz.

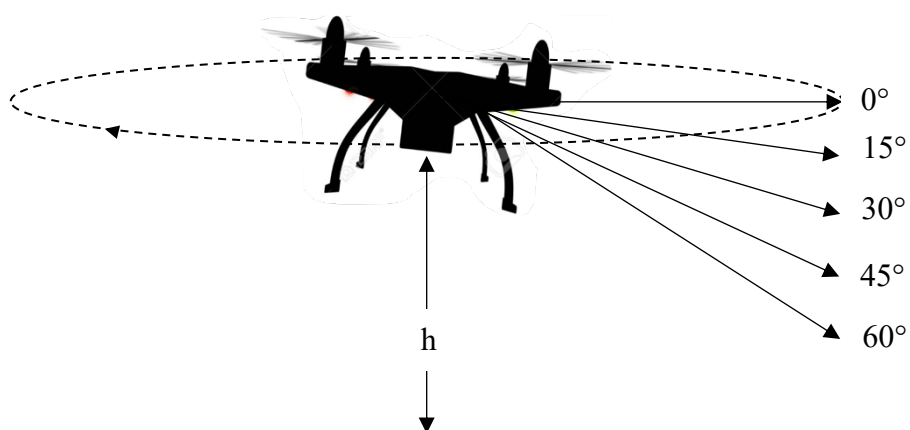
Per ragioni di tempo, nell'ambito della tesi saranno analizzate le sole misure a onde millimetriche.

Nel seguito verranno descritte le tipologie di misure di interesse che si sono effettuate.

## 4.3 Tipologie di misure

### 4.3.1 Rotazioni sul posto

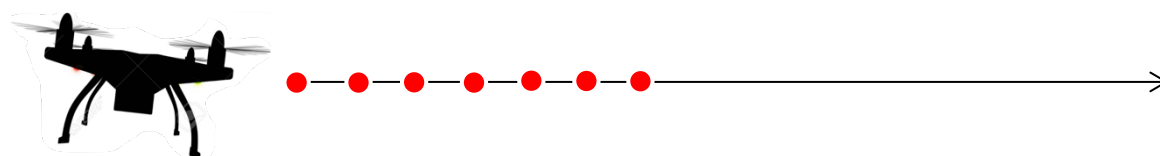
Questa tipologia di rilevazioni si esegue posizionando il drone in un punto fisso nello spazio, e facendolo ruotare su sè stesso (azimut) di 360°, con differenti angolazioni nel puntamento dell'antenna ad "Horn" su di esso fissata. Le angolazioni ritenute significative per le nostre rilevazioni sono cinque: 0°, 15°, 30°, 45°, 60°.



*Fig. 4.2 Rotazione sul posto con diverse inclinazioni di puntamento*

### 4.3.2 Scansioni orizzontali

Questa tipologia di rilevazioni si esegue posizionando il drone in una sequenza di punti fissi nello spazio, seguendo precise traiettorie, allo scopo di verificare l'andamento della potenza ricevuta in diverse situazioni e distanze.



*Fig. 4.3 Traiettoria scansione orizzontale*

#### 4.3.3 Scansioni verticali

Questa tipologia di rilevazioni si esegue posizionando il drone in una sequenza di punti fissi nello spazio, variando ad ogni passo il parametro altezza. Lo scopo è anche in questo caso verificare l'andamento della potenza ricevuta in diverse situazioni e distanze.

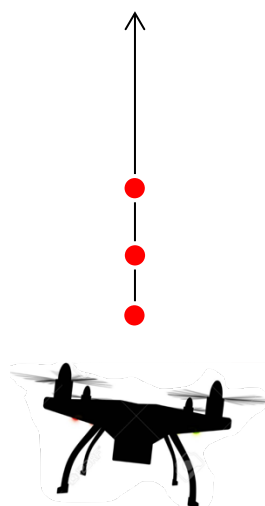


Fig. 4.4 Traiettoria scansione verticale

## 4.4 Misure ad Imola

### 4.4.1 Misure di canale radio

Le misure alla frequenza di 27 GHz riguarderanno due vie del centro di Imola, un'area aperta con vegetazione e il sito rurale di Villa Griffone (Sasso Marconi), in questo elaborato verranno prese in considerazione soltanto le misure effettuate in ambiente urbano.

Per ogni via il drone verrà posizionato su un piano verticale ortogonale alla via e su un piano verticale lungo la via su una serie di punti discreti a varie altezze (con multiple orientazioni dell'antenna direttiva a bordo per misurare Power-Angle-Profiles, PAPs) e su quattro traiettorie continue verticali e orizzontali per effettuare misure in situazione dinamica.

Sul piano ortogonale saranno effettuati due set di misure: uno con il terminale terrestre posizionato in  $(x_{a1}, y_{a1})$  ("vicino") e il drone su tutte le posizioni e traiettorie, e uno con il terminale terrestre in  $(x_{a2}, y_{a2})$  ("lontano") effettuando solo le traiettorie continue.

Le misure di PAP "vicina" saranno effettuate con antenna del terminale terrestre sia omnidirezionale sia direttiva, tutte le altre solamente con antenna al terminale terrestre direttiva.

Le misure sul piano longitudinale saranno effettuate con terminale a terra solo in  $(x_{a1}, y_{a1})$  o in  $(x_{a2}, y_{a2})$ .

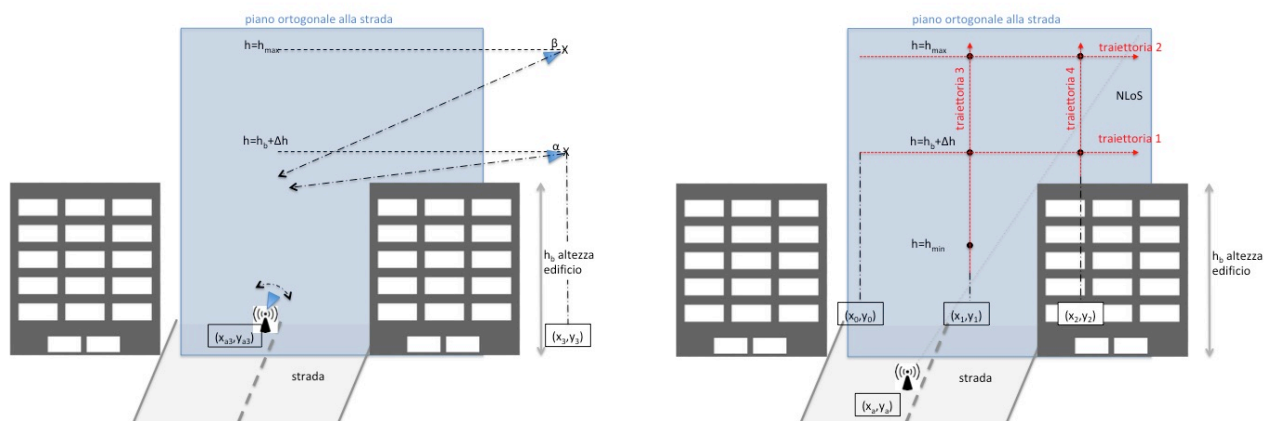


Fig. 4.5 Schemi di posizionamento del drone sul piano "O" ortogonale alla via

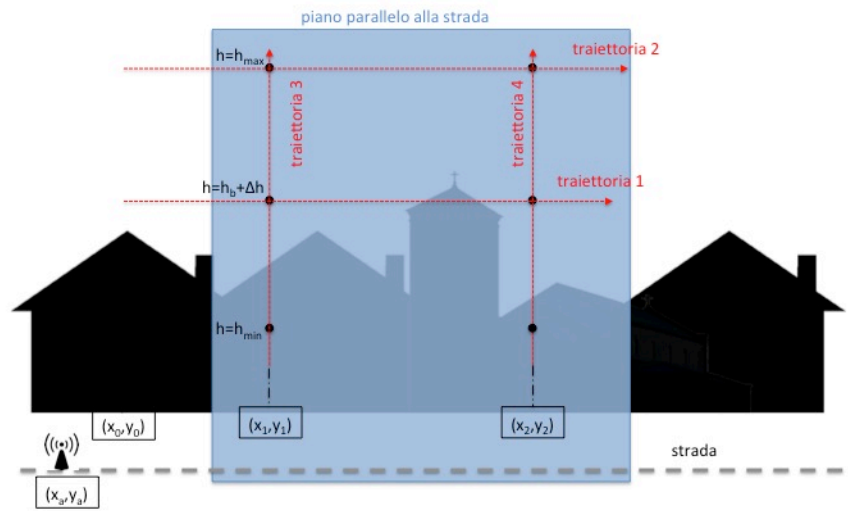


Fig. 4.6 Schema di posizionamento del drone sul piano "L" longitudinale alla via

#### 4.4.2 Sito di Via Callegherie

Valori dei parametri di posizionamento elencati al seguito:

- $h_{\min} = 6\text{m}$ ;  $h_B$  stimata = 15 m;  $\Delta h = 2\text{m}$ ;  $h_{\max} = 50\text{m}$  [ $h_{\text{med}} = h_b + \Delta h = 17\text{m}$ ]
  
- Piano ortogonale
  - $x_{a1}, y_{a1} = 44.354889^\circ, 11.716902^\circ$
  - $x_{a2}, y_{a2} = 44.354381^\circ, 11.718167^\circ$
  - $x_{a3}, y_{a3} = 44.354942^\circ, 11.716785^\circ$
  - $x_1, y_1 = 44.354846^\circ, 11.717024^\circ$
  - $x_0, y_0 = 44.354804^\circ, 11.717002^\circ$
  - $x_2, y_2 = 44.354906^\circ, 11.717064^\circ$
  - $x_3, y_3 = 44.355234^\circ, 11.716998^\circ$
  - traiettoria 1 orizzontale: da  $(x_0, y_0, h_{\text{med}})$  a  $(x_2, y_2, h_{\text{med}})$
  - traiettoria 2 orizzontale: da  $(x_0, y_0, h_{\max})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$
  - traiettoria 3 verticale: da  $(x_1, y_1, h_{\min})$  a  $(x_1, y_1, h_{\max})$
  - traiettoria 4 verticale: da  $(x_2, y_2, h_{\text{med}})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$
  
- Piano longitudinale
  - Tx in  $(x_{a2}, y_{a2})$
  - $x_0, y_0 = x_{a2}, y_{a2}$
  - $x_2, y_2 = 44.355267^\circ, 11.715969^\circ$
  - $x_1, y_1 = 44.354846^\circ, 11.717024^\circ$  (come  $x_1, y_1$  del piano ortogonale)
  - traiettoria 1 orizzontale: da  $(x_0, y_0, h_{\text{med}})$  a  $(x_2, y_2, h_{\text{med}})$
  - traiettoria 2 orizzontale: da  $(x_0, y_0, h_{\max})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$
  - traiettoria 2 verticale: da  $(x_1, y_1, h_{\min})$  a  $(x_1, y_1, h_{\max})$
  - traiettoria 3 verticale: da  $(x_2, y_2, h_{\min})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$



*Fig. 4.7 Mappa dell'area con posizionamento dei piani Via Callegherie (i riferimenti indicati in questa mappa saranno utili per la comprensione delle analisi effettuate in seguito (sez. 6 "Analisi dei risultati))*

#### 4.4.3 Sito di via Petrarca

Valori dei parametri di posizionamento elencati al seguito:

- $h_{\min} = 6\text{ m}$ ;  $h_B$  stimata:  $17\text{ m}$ ;  $\Delta h = 2\text{ m}$ ;  $h_{\max} = 50\text{ m}$  [ $h_{\text{med}} = h_b + \Delta h = 19\text{ m}$ ]
  
- Piano ortogonale
  - $x_{a1}, y_{a1} = 44.347022^\circ, 11.714008^\circ$
  - $x_{a2}, y_{a2} = 44.347825^\circ, 11.714003^\circ$
  - $x_{a3}, y_{a3} = 44.348032^\circ, 11.714023^\circ$
  - $x_1, y_1 = 44.346925^\circ, 11.714008^\circ$
  - $x_2, y_2 = 44.346919^\circ, 11.713819^\circ$
  - $x_3, y_3 = 44.348060^\circ, 11.713383^\circ$
  - traiettoria 1 orizzontale: da  $(x_1, y_1, h_{\text{med}})$  a  $(44.346925^\circ, 11.713750^\circ, h_{\text{med}})$
  - traiettoria 2 orizzontale: da  $(x_1, y_1, h_{\max})$  a  $(44.346925^\circ, 11.713750^\circ, h_{\max})$
  - traiettoria 3 verticale: da  $(x_1, y_1, h_{\min})$  a  $(x_1, y_1, h_{\max})$
  - traiettoria 4 verticale: da  $(x_2, y_2, h_{\text{med}})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$
  
- Piano longitudinale
  - Tx in  $(x_{a1}, y_{a1})$
  - $x_0, y_0 = x_{a1}, y_{a1}$
  - $x_1, y_1 = 44.347825^\circ, 11.714003^\circ (=x_{a2}, y_{a2})$
  - $x_2, y_2 = 44.348739^\circ, 11.714008^\circ$
  - traiettoria 1 orizzontale: da  $(x_0, y_0, h_{\text{med}})$  a  $(x_2, y_2, h_{\text{med}})$
  - traiettoria 2 orizzontale: da  $(x_0, y_0, h_{\max})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$
  - traiettoria 2 verticale: da  $(x_1, y_1, h_{\min})$  a  $(x_1, y_1, h_{\max})$
  - traiettoria 3 verticale: da  $(x_2, y_2, h_{\min})$  a  $(x_2, y_2, h_{\max})$





*Fig. 4.8 Mappa dell'area con posizionamento dei piani Via Petrarca  
(i riferimenti indicati in questa mappa saranno utili per la comprensione delle analisi effettuate  
in seguito (sez. 6 "Osservazione dei risultati"))*

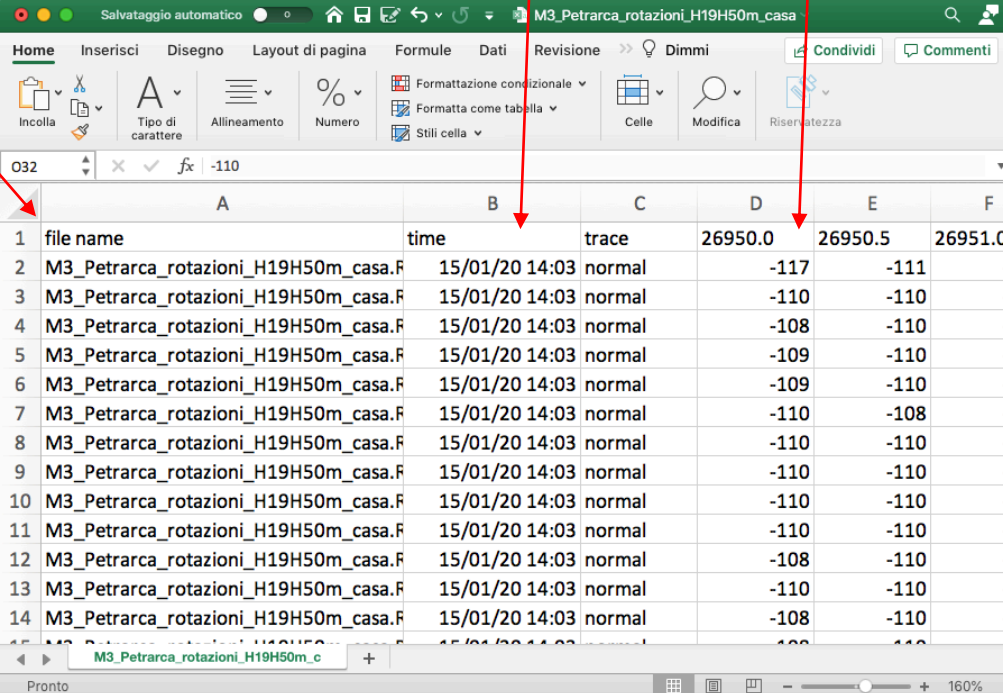
## POST-PROCESSING

### 5.1 Post-Processing dei dati raccolti

#### 5.1.1 Cosa si intende per post-processing

Con il termine post-processing si intende quella serie di operazioni che vengono svolte al termine un processo di raccolta di dati sperimentale, che portano i dati da una forma grezza e di difficile comprensione ad una forma desiderata e facilmente consultabile.

Nel nostro caso la post-elaborazione dei dati sperimentali raccolti durante le giornate di misura consiste in due fasi indipendenti: la prima di “matching” dei dati con i file di telemetria, la seconda di pura elaborazione matematica, allo scopo di ottenere un set di dati graficabile e successivamente commentabile.



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F
1	file name	time	trace	26950.0	26950.5	26951.0
2	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-117	-111	-
3	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-110	-
4	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-108	-110	-
5	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-109	-110	-
6	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-109	-110	-
7	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-108	-
8	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-110	-
9	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-110	-
10	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-110	-
11	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-110	-
12	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-108	-110	-
13	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-110	-110	-
14	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-108	-110	-
15	M3_Petrarca_rotazioni_H19H50m_casa.F	15/01/20 14:03	normal	-108	-110	-

Red arrows point to the following columns:

- (a) Column A (file name)
- (b) Column B (time)
- (c) Column D (dBm values at 26950.0)

Fig. 5.1 Esempio di file .csv contenente le misure a onde millimetriche, (a) colonna titoli, (b) colonna tempi, (c) colonne dati raccolti in dBm nelle frequenze

### 5.1.2 Matching con i dati di telemetria (file .log)

In questa fase sono stati confrontati i dati raccolti (compresi di orario di raccolta) con i dati telemetrici raccolti durante il volo dal dispositivo di cui è dotato il drone.

Una volta associato ad ogni istante di volo il corrispondente dato raccolto (in termini di potenza ricevuta) siamo in grado di dare un significato a ciò che stiamo osservando.

L'importanza e la precisione con cui si effettua questa operazione risulta evidente per poter considerare attendibili i risultati che si andranno ad osservare.

Per questo genere di operazione è necessario l'utilizzo un tool in grado di mostrare i movimenti nel tempo del drone, nel nostro caso si tratta di MissionPlanner.

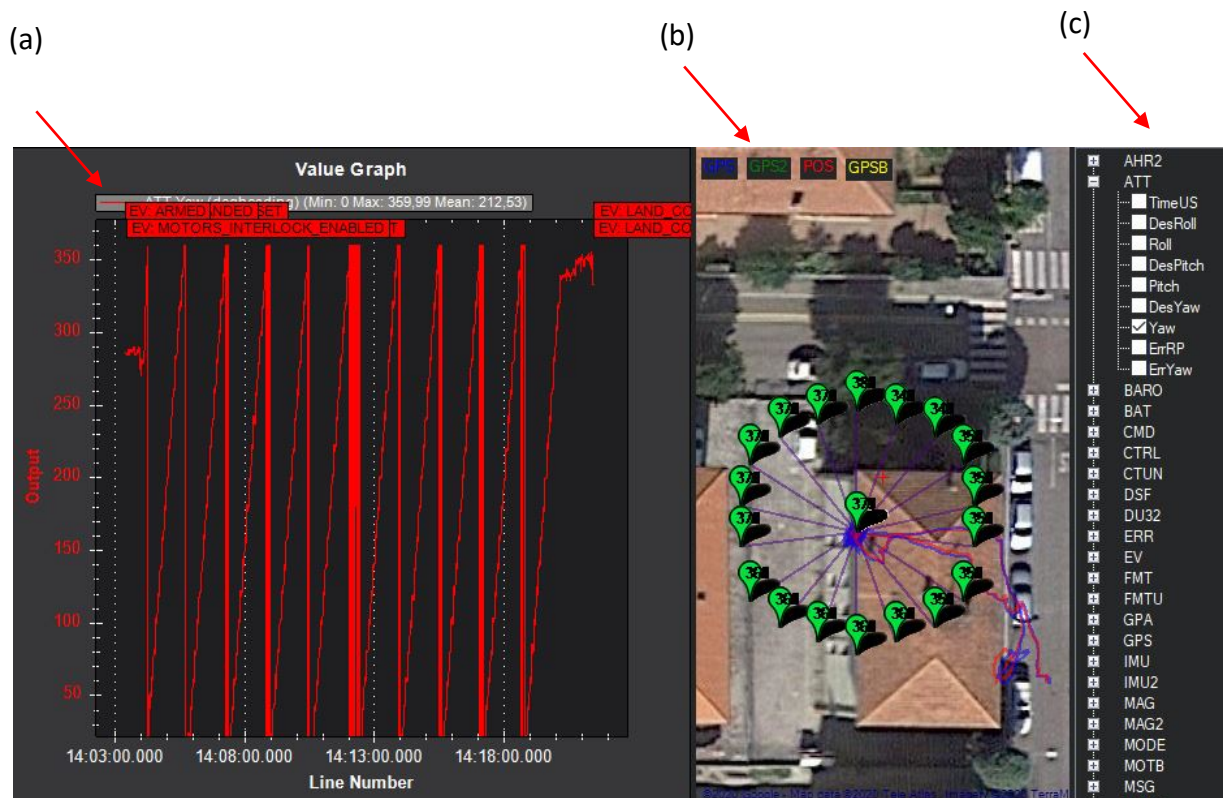


Fig. 5.2 Esempio di file .log contenente i dati telemetrici dell' RPA, (a) valori parametro in osservazione (nell'esempio angolo di orientazione), (b) mappa delle posizioni, (c) lista parametri osservabili

### 5.1.3 *Elaborazione matematica*

I dati in questa fase verranno manipolati matematicamente.

Quello che si vuole ottenere sono medie temporali, che tengano conto dei dati raccolti nelle medesime situazioni (posizione, puntamento) ma in istanti diversi, in modo da avere appunto una media dei valori di potenza ricevuti.

Per questo è stata necessaria una prima conversione da valori di potenza in dBm a corrispondenti valori in lineare.

A questo punto si sono effettuate le operazioni algebriche del caso (medie) ed in fine i dati sono stati riconvertiti in dBm per essere poi resi facilmente comprensibili sui grafici.



## ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

### 6.1 Analisi delle misure: rotazioni sul posto

#### 6.1.1 Via Petrarca: Rotazione sul posto in $(x_1, y_1, h_{med})$

Questa tipologia di misure ha lo scopo di mettere in evidenza l'effetto della variazione del puntamento dell'antenna direttiva a bordo del drone e quindi la predominanza della linea di vista (LoS), e l'eventuale effetto di altri cammini di forte intensità che consentono di raggiungere il ricevitore tramite riflessione, diffrazione o scattering sulle pareti o sui tetti degli edifici. Le misure di questo tipo sono infatti state realizzate, variando 2 angoli: azimuth, che varia da  $0^\circ$  a  $360^\circ$  e che ci permette di ottenere un grafico polare della potenza al variare dell'angolo (Power-Azimuth Profile, o PAP). E l'angolo di elevazione (o tilt), che rappresenta il puntamento verso il basso, che "campioniamo" considerando 5 diversi valori da  $0^\circ$  a  $60^\circ$ , a ciascuno dei quali associamo un diverso diagramma (PAP).

Dall'ampiezza dei lobi si deduce una migliore ricezione del segnale dalla GS per inclinazioni maggiori di  $30^\circ$  (linee verde, gialla e rosa). Dalla forma di quest'ultimi si può invece osservare da quali orientazioni provenga il segnale ricevuto, in questo caso i lobi di  $15^\circ, 30^\circ$  e  $45^\circ$  sembrano allargarsi verso la facciata dell'edificio a sinistra, comportamento riconducibile ad una riflessione del segnale da parte di quest'ultimo, per  $0^\circ$  e  $60^\circ$  questo genere di riflessione è quasi inapprezzabile, per il fatto che con poca inclinazione il segnale non viene trasmesso contro la parete ma direttamente al di sopra dei tetti, mentre con troppa inclinazione la riflessione è minima.

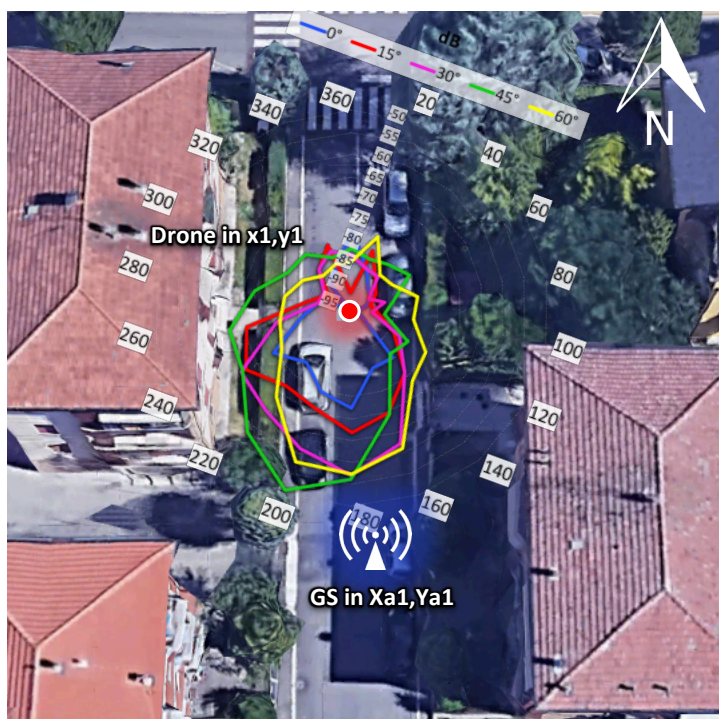


Fig. 6.1 Rotazione sul posto in  $(x_1, y_1, h_{med})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a1}, y_{a1})$  con amplificatore e antenna omni

### 6.1.2 Via Petrarca: Rotazione sul posto in $(x_2, y_2, h_{med})$

Si tratta di uno scenario abbastanza simile al precedente, il drone però staziona sopra il tetto dell'edificio, anche se il tetto non ostruisce la linea di vista, oppure la ostruisce solo parzialmente (situazione quasi-LOS). Il risultato di questa misure è simile a quella precedente, ma la differenza principale che si può notare immediatamente (al di là della variazione del posizionamento del drone), è la presenza alcuni lobi molto forti in direzione Nord, probabilmente causati da riflessioni sulle pareti di edifici circostanti, più alti dell'edificio su cui è posizionato il drone (ciò è giustificato anche dal fatto che nella rotazione successiva, effettuata a  $h_{max}$ , questi lobi non saranno presenti).

In questa situazione l'inclinazione migliore risulta a  $15^\circ$ , mentre la peggiore, e anche di molto, a  $60^\circ$ , probabilmente perché con questa inclinazione il lobo principale di radiazione dell'antenna ricevente è puntato verso il tetto, mentre il cammino principale (LoS) cade al di fuori di esso.

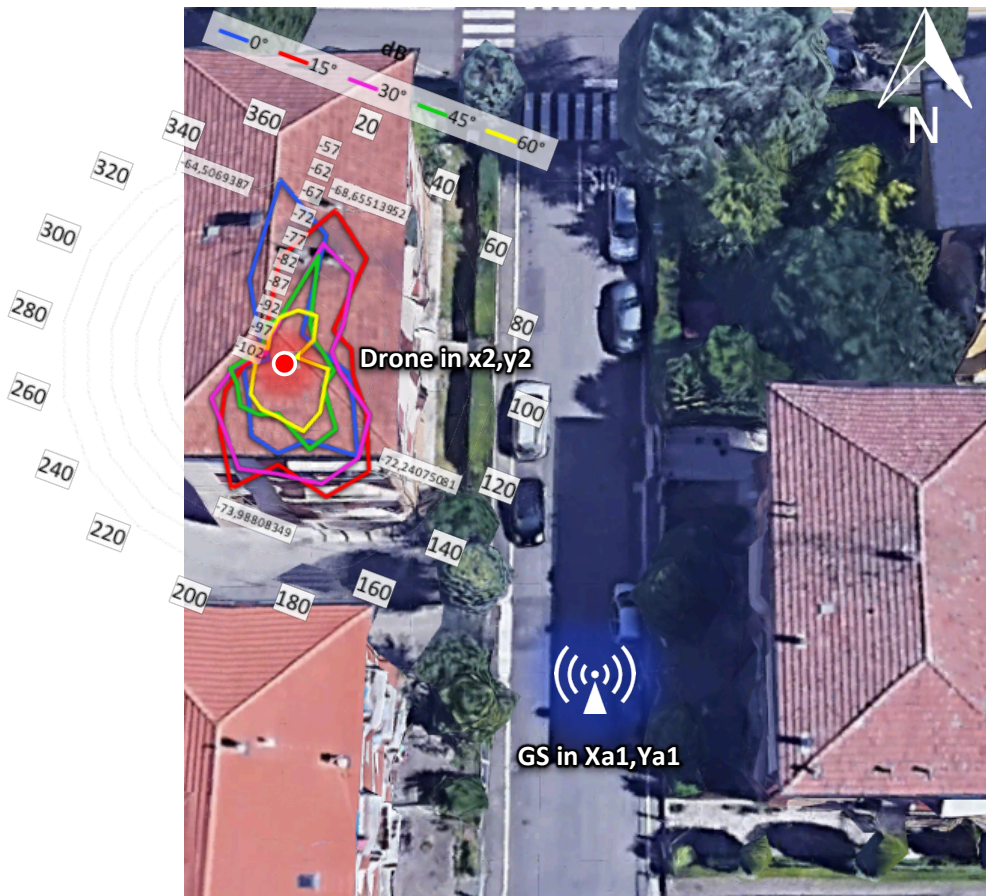


Fig. 6.2 Rotazione sul posto in  $(x_2, y_2, h_{med})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a1}, y_{a1})$  con amplificatore e antenna omni

### 6.1.3 Via Petrarca: Rotazione sul posto in $(x_2, y_2, h_{max})$

In questa situazione la potenza ricevuta è maggiore sono per angoli di tilt di  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Viceversa, per angoli di tilt di  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , la potenza ricevuta è molto bassa perché il raggio diretto (LoS) cade al di fuori del lobo principale di radiazione dell'antenna horn montata sul drone. Questa misura è stata svolta infatti a  $h_{max}$ , quindi la condizione di migliore puntamento tra GS e ARP si ha per elevate inclinazioni. In questo caso non sono presenti lobi secondari particolarmente evidenti, in quanto l'altezza di volo elevata esclude possibili riflessioni contro edifici circostanti.

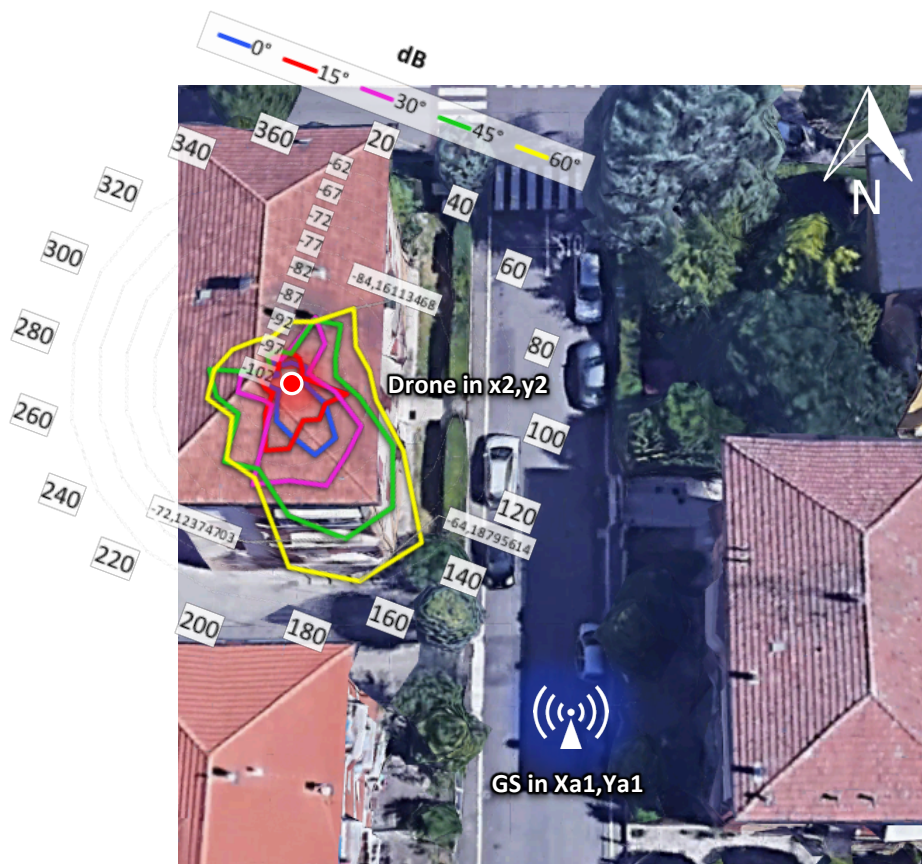


Fig. 6.3 Rotazione sul posto in  $(x_2, y_2, h_{max})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a1}, y_{a1})$  con amplificatore e antenna omni



#### 6.1.4 Via Petrarca: Rotazione sul posto in $(x_5, y_5, h_{max})$

Questa rotazione è stata effettuata ad una distanza tra GS e RPA maggiore di quelle osservate fin ora, quello che si nota è che i lobi sembrano calcare il diagramma di radiazione dell'antenna ad 'horn' utilizzata, ovviamente con potenze che variano in funzione dell'angolo di inclinazione. In virtù di ciò si può dire che il cammino dominante è quello LoS orientato lungo l'asse della strada. La curva migliore risulta quella viola (30°), verificato in *fig. 6.5* con un semplice calcolo goniometrico.

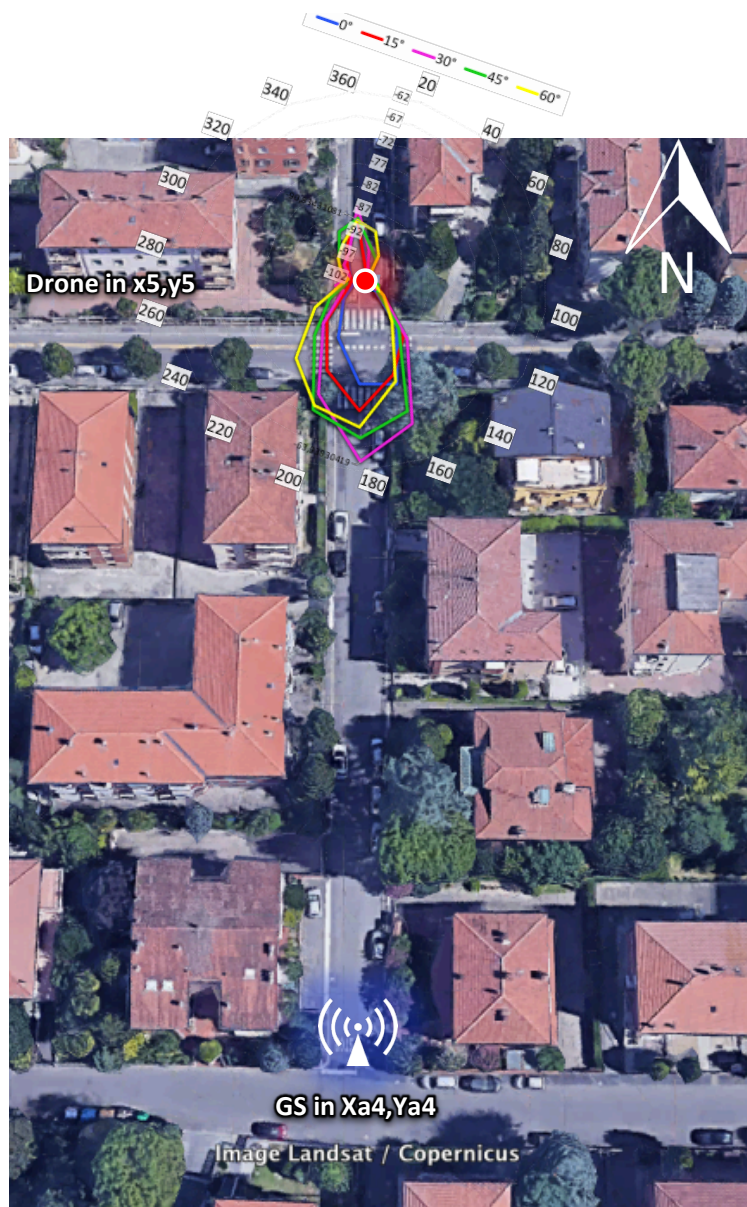


Fig. 6.4 Rotazione sul posto in  $(x_5, y_5, h_{max})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a4}, y_{a4})$  con antenna direttiva puntata verso Nord



$$\alpha = \arctg(h/d)$$

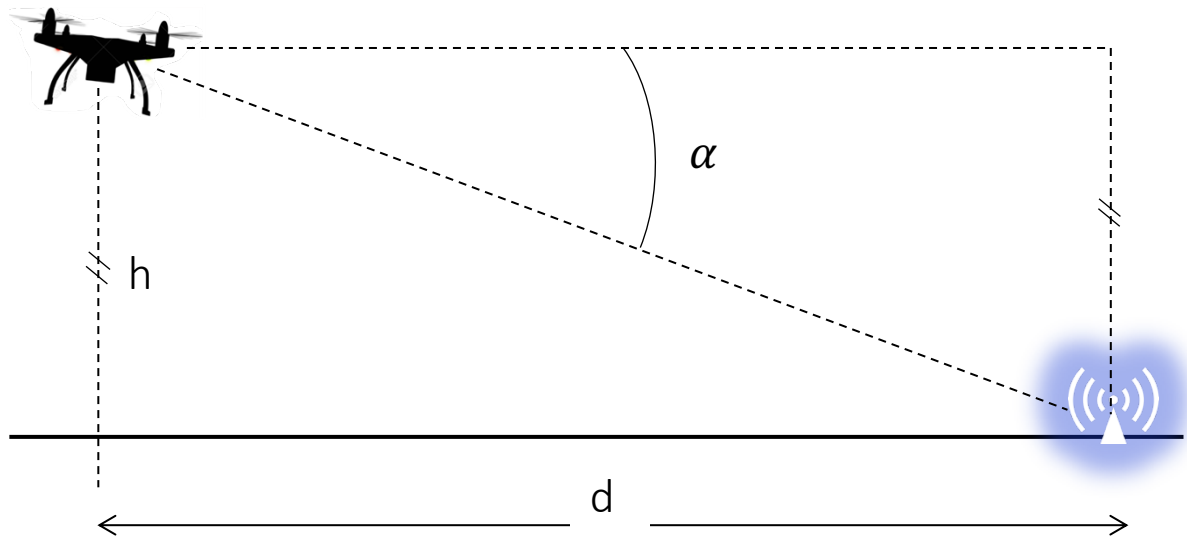


Fig. 6.5 con  $d= 100m$  ,  $h= 50m$  risulta un'inclinazione ottimale =  $26,57^\circ$  (circa  $30^\circ$ )

6.1.5 Via Petrarca: Rotazione sul posto in  $(x_5, y_5, h_{med})$

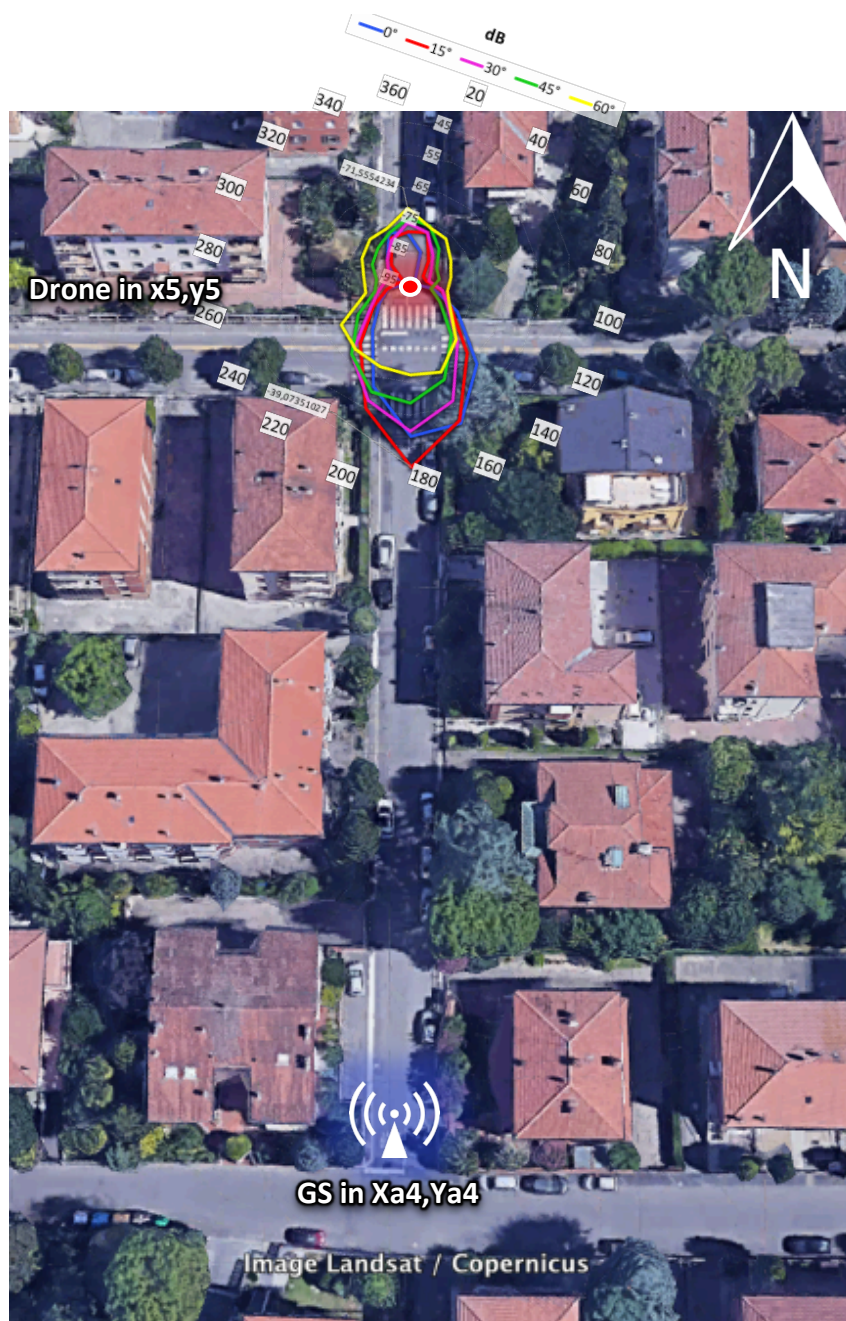


Fig. 6.6 Rotazione sul posto in  $(x_5, y_5, h_{med})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a4}, y_{a4})$  con antenna direttiva puntata verso Nord

6.1.6 Via Petrarca: Rotazione sul posto in  $(x_6, y_6, h_{med})$

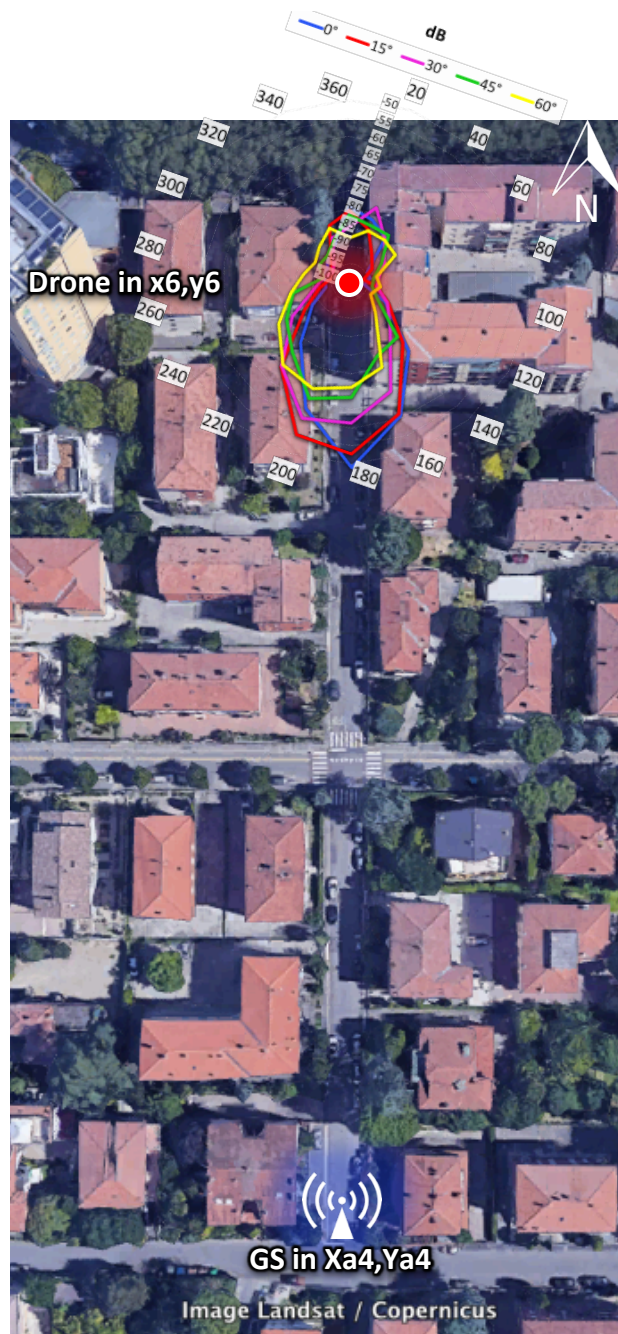


Fig. 6.7 Rotazione sul posto in  $(x_6, y_6, h_{max})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a4}, y_{a4})$  con antenna direttiva puntata verso Nord



### 6.1.7 Via Callegherie: Rotazione sul posto in $(x_0, y_0, h_{med})$

In questo diagramma PAP è interessante osservare come risultino allargati verso destra tutti i lobi presenti, come se fosse presente una fonte di riflessione in quella direzione.

I tetti degli edifici in figura risultano infatti ad altezze differenti, lasciando libera tra loro una fascia di muro dell'altezza di circa un metro, che risulta essere proprio nella direzione del lobo che stiamo osservando. Dalle varie ampiezze dei lobi possiamo anche dedurre per quale inclinazione la riflessione risulti migliore, ovvero  $30^\circ$  (linea rosa).

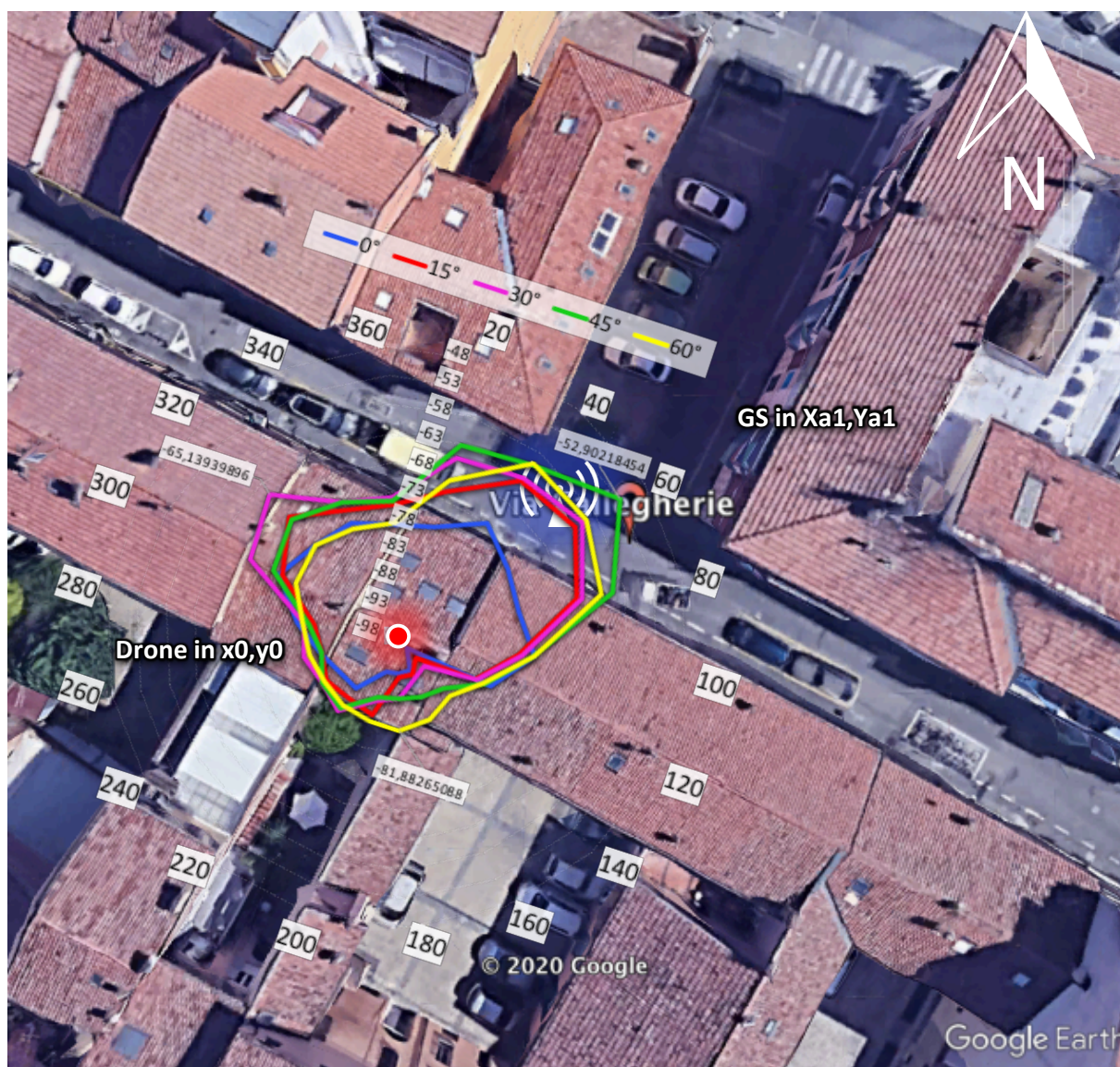


Fig. 6.8 Rotazione sul posto in  $(x_0, y_0, h_{med})$  con antenna direttiva, GS in  $(x_{a1}, y_{a1})$  con amplificatore e antenna omnidirezionale



## 6.2 Analisi misure: scansioni orizzontali

### 6.2.1 Via Callegherie: percorso orizzontale da $(x_1, y_1, h_{med})$ a $(x_2, y_2, h_{med})$

Dall'osservazione delle misure di questa scansione orizzontale lungo Via Callegherie ne emerge una diminuzione nella potenza del segnale ricevuta nell'allontanarsi dalla GS, questa progressiva variazione è dovuta non tanto ad una perdita della LoS, ma piuttosto al semplice aumento della distanza tra trasmettitore e ricevitore.

Concetto facilmente verificabile con la formula di Friis, dove viene presa in considerazione il fattore distanza al quadrato.

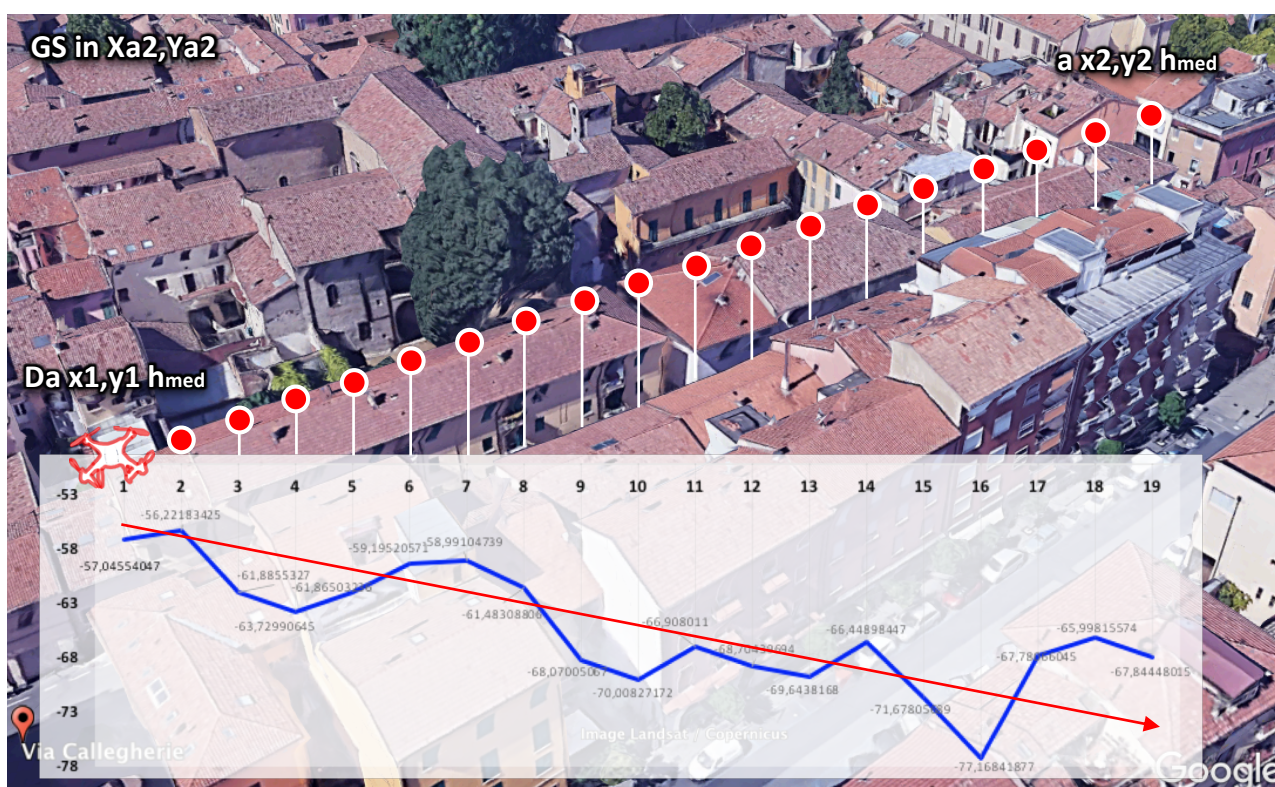


Fig. 6.9 Percorso orizzontale da  $(x_1, y_1, h_{med})$  a  $(x_2, y_2, h_{med})$  con passo 5 m e attesa in ogni punto di 5 secondi, la freccia rossa segnala il trend discendente della potenza

### 6.2.2 Via Callegherie: percorso orizzontale da $(x_1, y_1, h_{max})$ a $(x_2, y_2, h_{max})$

In questa misura il risultato è esattamente opposto a quello ottenuto precedentemente.

A variare, in questo caso, è stata l'altezza a cui si è svolta la rilevazione, e quello che si nota è un progressivo "aumento" della potenza ricevuta, dovuto ad un diagramma di radiazione dell'antenna omnidirezionale alla GS, che rispetta la caratteristica di unidirezionalità principalmente sul piano orizzontale e non per tutte le direzioni. In particolare, il guadagno dell'antenna può ridursi in modo significativo per angoli di elevazione che si allontanano molto dal piano orizzontale.

L'effetto che si ottiene allontanando il trasmettitore dalla GS è quindi quello di un progressivo miglioramento nella ricezione del segnale, in quanto all'aumentare della distanza ci si avvicina progressivamente al piano orizzontale di radiazione dell'antenna omni.

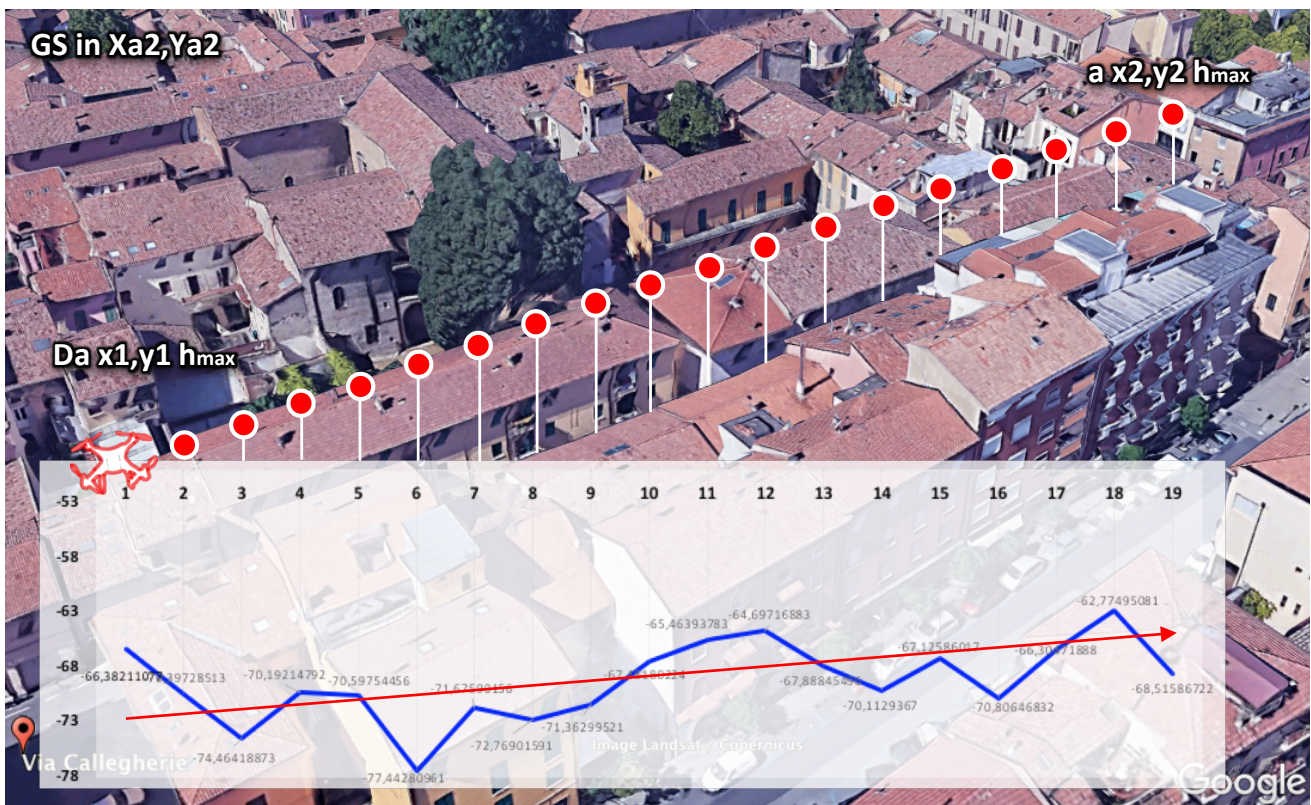


Fig. 6.10 Percorso orizzontale da  $(x_1, y_1, h_{max})$  a  $(x_2, y_2, h_{max})$  con passo 5 m e attesa in ogni punto di 5 secondi, la freccia rossa segnala il trend ascendente della potenza



Per verificare quanto detto è necessario osservare l'angolo di puntamento tra GS e drone nelle situazioni iniziali e finali di entrambe le precedenti misurazioni. La distanza tra le due antenne risulta essere di 100m tra GS e  $x_1, y_1$ , e 200m tra GS e  $x_2, y_2$ . L'inclinazione iniziale nel primo caso ( $x_1, y_1, h_{med}$ ) risulta di  $9.6^\circ$ , per finire a ( $x_2, y_2, h_{med}$ ) a  $4.8^\circ$ , mentre nel secondo caso ( $x_1, y_1, h_{max}$ ) risulta di  $26.5^\circ$ , per finire a ( $x_2, y_2, h_{max}$ ) a  $14.8^\circ$ .

Osservando ora il diagramma di radiazione dell'antenna omnidirezionale (Fig. 6.11) si nota che la variazione per  $h_{med}$  (17m) è compresa tra  $5^\circ$  e  $10^\circ$  e non coincide con una variazione significativa del guadagno nel diagramma (pochi dB), mentre nel caso  $h_{max}$  (50m), si verifica una variazione compresa tra  $14^\circ$  e  $27^\circ$ , che risente maggiormente della variazione di guadagno dell'antenna, di circa 5 dB.

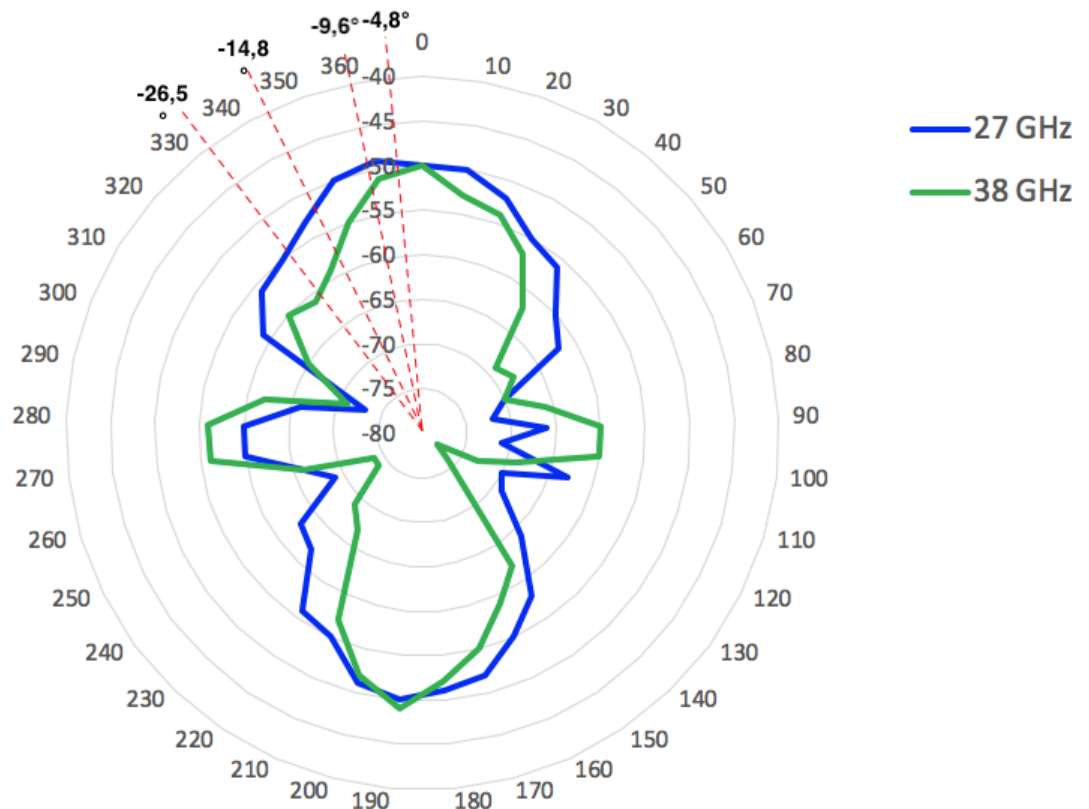


Fig. 6.11 Diagramma di radiazione antenna omnidirezionale

### 6.3 Analisi misure: scansioni verticali

#### 6.3.1 Via Callegherie: percorso orizzontale da $(x_1, y_1, h_{med})$ a $(x_2, y_2, h_{med})$



Fig. 6.12 Percorso verticale da  $(x_0, y_0, h_{med})$  a  $(x_0, y_0, h_{max})$  con passo 1 m e attesa in ogni punto di 5 secondi



## 6.4 Analisi sintetica dei risultati

### 6.4.1 Grafici inclinazione-potenza Via Petrarca

I seguenti grafici sono stati realizzati selezionando i valori di potenza più forti dai precedenti diagrammi di PAP per differenti angoli di tilt e sono stati confrontati tra loro in funzione della distanza tra GS e drone: vicino(10m), medio(100m), lontano(200m).

Dall'osservazione di questi risultati si può confermare un'idea intuitiva che suggerisce una migliore ricezione della potenza per inclinazioni maggiori (60°) nei casi di vicinanza tra GS e drone, e una miglior ricezione per inclinazioni minori (0°/15°) nei casi di maggiore distanza.

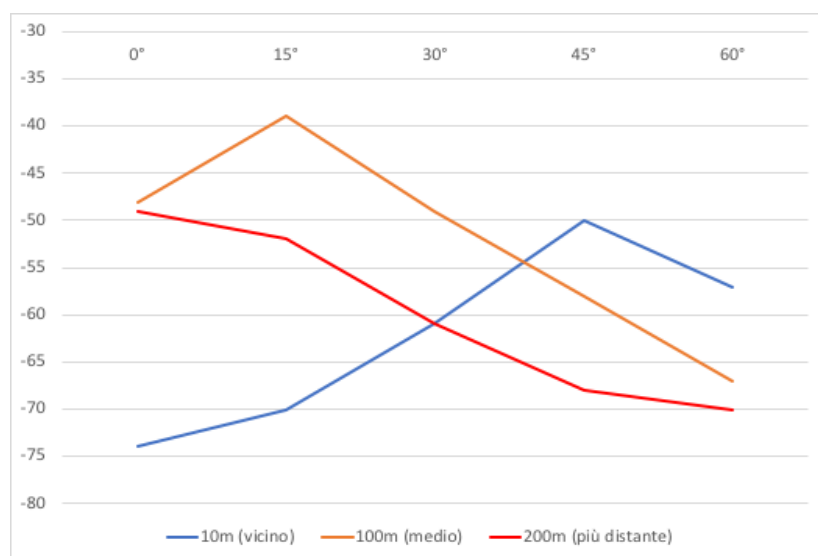


Fig. 6.13 (a) Grafico inclinazione-potenza Via Petrarca  $h_{med}$ ,

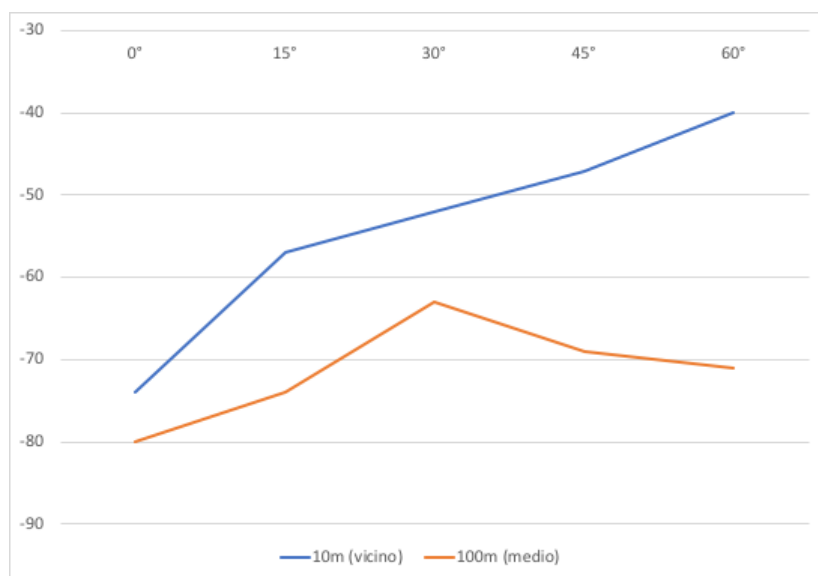
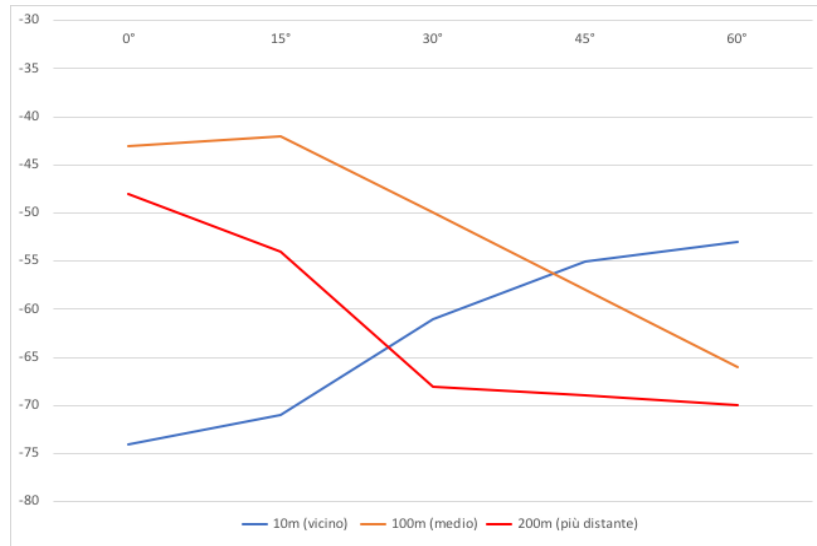


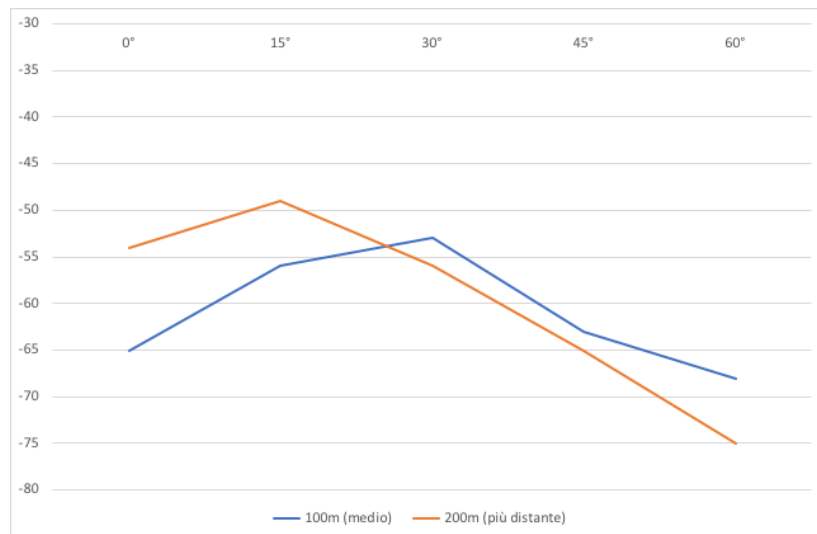
Fig. 6.13 (b) Grafico inclinazione-potenza Via Petrarca  $h_{max}$

### 6.4.2 Grafici inclinazione-potenza Via Callegherie

Per i seguenti grafici si possono fare le medesime considerazioni fatte per i casi in Via Petrarca, come d'altronde si poteva intuire.



(a)



(b)

Fig. 6.14 (a) Grafico inclinazione-potenza Via Callegherie  $h_{med}$ ,  
(b) Grafico inclinazione-potenza Via Callegherie  $h_{max}$

### 6.4.3 Grafici distanza-inclinazione ottimale Via Petrarca e Via Callegherie

In questo genere di grafici si mette in evidenza la relazione che si è trovata tra distanza in termini assoluti tra GS e drone, e l'inclinazione nel caso migliore.

Quello che si può concludere dall'osservazione è che, come ci si sarebbe aspettato, per distanze maggiori la potenza viene meglio ricevuta per angoli di inclinazione "piccoli",  $0^\circ/15^\circ$ , mentre riducendo le distanze ci si sposta verso inclinazioni ottimali maggiori,  $60^\circ$ .

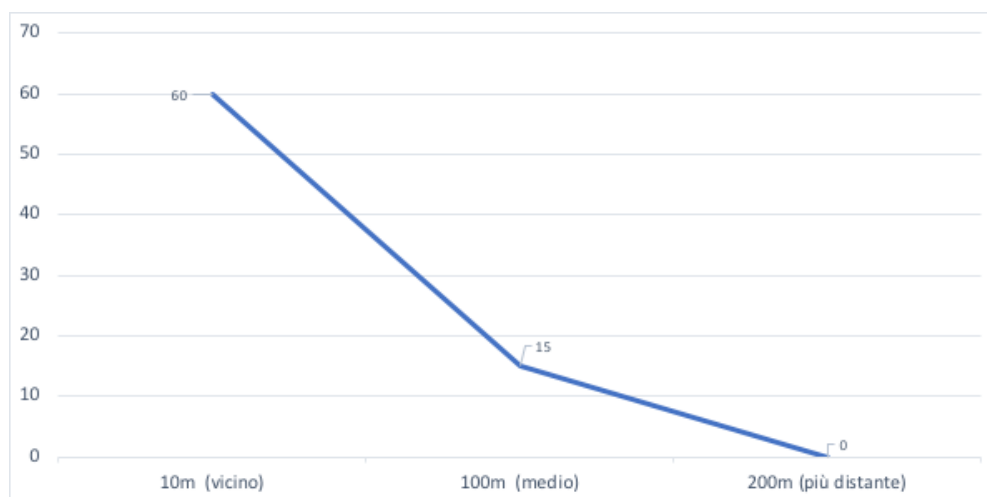


Fig. 6.15 Grafico distanza-inclinazione

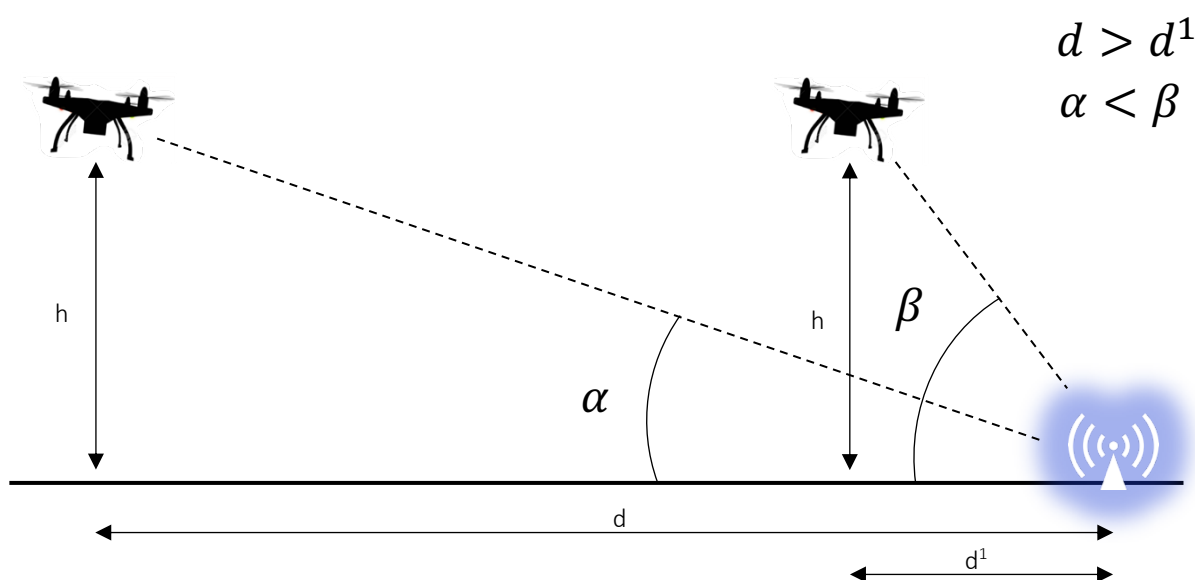


Fig. 6.16 Illustrazione per facilitare la comprensione intuitiva del grafico in Fig. 6.14

## 6.5 Conclusioni

Lo scopo che ci si è posti nello svolgimento di questo elaborato, nell'ambito del quale sono state effettuate misure sperimentali ed analisi dei risultati da esse portati, è quello di osservare alcuni fenomeni di propagazione dei segnali radio in ambiente urbano quando uno dei due terminali è installato su un velivolo RPA (drone), e trovarne una giustificazione teorica valida e motivabile. La comprensione di questi meccanismi di propagazione è fondamentale per il progetto e il deployment di futuri sistemi radiomobili che utilizzeranno il canale radio Air-to-Ground (A2G) e le frequenze al di sopra dei 6 GHz (onde millimetriche) per estendere la capacità di comunicazione rispetto ai sistemi attuali.

I risultati ottenuti evidenziano in generale la possibilità di avere una buona copertura utilizzando onde millimetriche e configurazioni LoS o quasi-LoS con droni che volano ad altezze intermedie, da pochi metri fino ad alcune decine di metri rispetto al livello medio dei tetti. In alcuni casi, in particolare con il drone che vola ad altezza "intermedia" (16-19 metri) è stato possibile evidenziare la presenza di alcuni cammini secondari causati da riflessioni o scattering sulle pareti di edifici più alti rispetto al livello medio dei tetti. Si è infine analizzato l'effetto dell'inclinazione dell'antenna direttiva montata sul drone, determinando il puntamento ottimale per il collegamento tra antenna ricevente e drone, al variare della distanza fra i 2 terminali.

## RIFERIMENTI

- [1] T. Tozer and D. Grace, "High-altitude platforms for wireless communications", *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, pp.127-137, 2001.
- [2] S. Rohde and C. Wietfeld, "Interference Aware Positioning of Aerial Relays for Cell Overload and Outage Compensation", in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, pp 1-5.
- [3] "Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace", Int. Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-R M.2171, Dec. 2009.
- [4] David W. Matolak, "Channel Characterization for Unmanned Aircraft System", Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC, USA, matolak@sc.edu
- [5] A. Osseiran et al., "Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: the Vision of the METIS Project", *IEEE Commun. Mag.*, vol.52, no. 5, May 2014, pp. 26-35.
- [6] Yong Zeng, Rui Zhang and Teng Joon Lim, "Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges", *IEEE Communications Magazine*, May 2016.
- [7] Federico Boccardi, Bell Labs, Alcatel-Lucent, Robert W. Heath Jr., The University of Texas at Austin, Angel Lozano, Universitat Pompeu Fabra, Thomas L. Marzetta, Bell Labs, Alcatel-Lucent, Petar Popovski, Aalborg University, "Five Disruptive Technology Directions for 5G".
- [8] H. L. Bertoni, "Radio Propagation for Modern Wireless Systems", Prentice Hall, Pearson 2001.
- [9] SAF Tehnika User manual Spectrum Compact VER 1.7(FW V3.31).
- [10] Roberto Cirillo "Mobile Radio Channel Measurements for Air-to-Ground and non-conventional Future Applications" Alma Mater Studiorum-Università di Bologna Campus Cesena dipartimento di Ingegneria dell'energia elettrica e dell'informazione "Guglielmo Marconi".
- [11] Lorenzo Nanni "Caratterizzazione sperimentale del canale radio "Air-to-Ground" " Alma Mater Studiorum-Università di Bologna Campus Cesena dipartimento di Ingegneria dell'energia elettrica e dell'informazione "Guglielmo Marconi".

