POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Eletttronica

Tesi di Laurea Magistrale

Misura e analisi delle emissioni irradiate non intenzionali di UAV per la progettazione e la realizzazione di un sistema di scoperta e identificazione

Relatore:
prof. Giuseppe Vecchi

Candidato:
Edoardo De Gaetano

Anno Accademico 2020/2021

Abstract

L'avanzamento tecnologico nell'ambito degli *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) ha portato a maggiori prestazioni e a una riduzione del loro prezzo sul mercato. Una più facile accessibilità ha fatto riscontrare l'aumento dell'utilizzo di questi sistemi a scopo malevolo, rendendo necessario lo sviluppo di contromisure per prevenire un loro utilizzo illegale.

L'obiettivo del presente lavoro è la progettazione e la realizzazione prototipale di un sistema per la scoperta e l'identificazione di UAV, attraverso la misura passiva delle loro emissioni irradiate, con maggiore attenzione per i disturbi elettromagnetici involontari nella banda di frequenze VHF/UHF.

Nella prima fase sono state eseguite delle misure di emissione irradiata in camera anecoica, attraverso uno scanner sferico, volte a caratterizzare i livelli di campo elettrico e conseguentemente valutare la possibilità, almeno in linea teorica, di una loro rilevazione ad una distanza operativamente significativa. L'idoneità di tali segnali è stata successivamente indagata con misure in campo aperto al fine di valutarne il comportamento radiativo ed escludere le eventuali componenti reattive.

La seconda fase si è concentrata sull'analisi dei segnali individuati al fine di valutare la loro distribuzione spaziale, tramite misure di radiation pattern, e di studiare il loro andamento temporale e/o contenuto spettrale. Tali informazioni sono state utilizzate come base per il conseguimento degli obiettivi del punto successivo.

In conclusione, è stato progettato e realizzato un sistema prototipale di scoperta e identificazione mediante lo sviluppo di una rete neurale per la classificazione della traccia EM, utilizzando una rete *feed-forward*. È stata eseguita una campagna di misure per la valutazione delle prestazioni del sistema sia in ambiente controllato (camera anecoica) che in ambiente rurale.

Keywords: tecnologie counter-UAV, scoperta e identificazione, rete neurale, emissioni irradiate non intenzionali

Indice

1 Introduzione **2**

1.1 Stato dell'arte 7

2 Sistema di Misura **10**

2.1 Assorbitori RF 11

2.1.1 Assorbitori Piramidali 12

2.2 Scanner Sferico 13

2.3 Camera di controllo 14

2.4 Capacità della camera anecoica 15

2.4.1 Progettazione del dipolo 15

2.4.2 Misura dei parametri del dipolo 16

3 Misure di emissione irradiata **26**

3.1 Caratterizzazione Emissioni 26

3.1.1 Mavic 2 27

3.1.2 Mavic Pro Platinum 29

3.1.3 Mavic mini 31

3.1.4 Autocostruito #1 33

3.1.5 Conclusioni 35

3.1.6 Parametri Agilent EXA N9010A 36

3.2 RBW=100Hz 37

3.2.1 Mavic 2 37

3.2.2 Mavic Pro Platinum 37

3.2.3 Autocostruito 1 37

3.3 Misure *Outdoor* 38

3.3.1 Conclusioni 45

3.3.2 Parametri Agilent EXA N9010A 45

4 Analisi dei segnali **46**

4.1 Misure al variare della RBW 46

4.1.1 Mavic 2 . . . 46
4.1.2 Mavic Pro Platinum . . . 47
4.1.3 Autocostruito #1 . . . 48
4.1.4 Conclusioni . . . 49
4.1.5 Parametri Agilent EXA N9010A . . . 50
4.2 Misure di radiation pattern . . . 50
4.2.1 Mavic 2 . . . 52
4.2.2 Mavic Pro . . . 54
4.2.3 Autocostruito #1 . . . 56
4.2.4 Analisi dei risultati . . . 57
4.3 Analisi e classificazione dei picchi . . . 58
4.3.1 Risultati . . . 60
4.3.2 Analisi dei risultati . . . 70

5 Sistema di scoperta e identificazione 72
5.1 Intelligenza Artificiale . . . 72
5.1.1 Deep Learning . . . 73
5.2 Addestramento *Indoor* . . . 74
5.2.1 Risultati *Indoor* . . . 75
5.3 Addestramento *Outdoor* . . . 77
5.3.1 Risultati *Outdoor* . . . 79
5.4 Parametri Real-Time Spectrum Analyzer 306B e Agilentt EXA N9010A . . . 86

6 Conclusioni 88

A Appendice I 90
A.1 Mavic 2 . . . 91
A.1.1 Average . . . 91
A.1.2 Max Hold . . . 94
A.2 Mavic Pro . . . 97
A.2.1 Average . . . 97
A.2.2 Max Hold . . . 100
A.3 Autocostruito #1 . . . 103
A.3.1 Average . . . 103
A.3.2 Max Hold . . . 106

Elenco delle figure

1.1 CL-89.[1] . . . 2
1.2 Le quattro macro categorie dei droni.[2] . . . 3
1.3 Architettura tipica di un drone[3]. . . . 5
1.4 Esempi di applicazione UAV in ambito civile e scientifico.[4] . . . 6
1.5 Droni soggetti alla sperimentazione. . . . 9

2.1 Schema del setup di misura. . . . 10
2.2 Onda incidente su un mezzo. . . . 11
2.3 Assorbitori piramidali. . . . 13
2.4 Scanner sferico. . . . 14
2.5 Modello (sinistra) e realizzazione (destra) del dipolo. . . . 16
2.6 Geometria del sistema di coordinate sferiche. . . . 17
2.7 Misure di co-polarizzazione. . . . 18
2.9 E-Plane e H-Plane . . . 20
2.10 Setup misura di guadagno. . . . 21
2.11 Gain. . . . 22
2.12 Antenna Factor. . . . 22
2.13 Setup misura del CPD. . . . 23
2.14 Cross polar discrimination. . . . 24
2.15 S11. . . . 25

3.1 Sistema di misura schematizzato. . . . 27
3.2 Scansione Mavic 2 . . . 27
3.3 Range [100 - 1000] MHz. . . . 28
3.4 Range [1000 - 2300] MHz. . . . 28
3.5 Range [2300 - 3600] MHz. . . . 29
3.6 Scansione Mavic Pro Platinum . . . 29
3.7 Range [100 - 1000] MHz. . . . 30
3.8 Range [2300 - 3600] MHz. . . . 30
3.9 Range [2300 - 3600] MHz. . . . 31

3.10 Scansione Mavic mini 31
3.11 Range [100 - 1000] MHz. 32
3.12 Range [1000 - 2300] MHz. 32
3.13 Range [2300 - 3600] MHz. 33
3.14 Scansione autocostruito #1 33
3.15 Range [100 - 1000] MHz. 34
3.16 Range [1000 - 2300] MHz. 34
3.17 Range [2300 - 3600] MHz. 35
3.21 Misura a $10m$. 39
3.22 Setup di misura. 40
3.23 Gain. 40
3.24 Gain. 41
3.25 Geometria del problema.[5] 42
3.26 A sinistra i risultati delle acquisizioni a $3m$ e $10m$ a destra l'attenuazione spaziale ottenuta con quella teorica. 44

4.1 Risultati mavic 2 al variare della RBWe modalità d'acquisizione. 47
4.2 Risultati mavic pro al variare della RBWe modalità d'acquisizione. 48
4.3 Risultati autocostruito#1 al variare della RBWe modalità d'acquisizione. 49
4.4 Sistema di riferimento sferico mavic 2. 52
4.5 Elenco dei picchi indagati mavic 2. 52
4.6 *Radiation pattern* di due segnali del mavic 2. 53
4.7 Sistema di riferimento sferico mavic pro. 54
4.8 Elenco dei picchi indagati mavic pro. 54
4.9 *Radiation pattern* di due segnali del mavic pro. 55
4.10 Sistema di riferimento sferico autocostruito #1. 56
4.11 Elenco dei picchi indagati autocostruito #1. 56
4.12 *Radiation pattern* di due segnali dell'autocostruito #1. 57
4.13 Picchi individuati del mavic 2. 58
4.14 Picchi individuati del mavic pro. 59
4.15 Picchi individuati dell'autocostruito #1. 59
4.16 Mavic 2: segnale CW alla $freq = 200MHz$. 61
4.17 Mavic 2: onda quadra alla $freq = 258MHz$. 62
4.18 Mavic 2: segnale incoerente alla $freq = 279.7MHz$. 63
4.19 Mavic pro: segnale CW alla $freq = 408MHz$. 64
4.20 Mavic pro: onda quadra alla $freq = 480MHz$. 65
4.21 Mavic pro: onda quadra alla $freq = 297MHz$ e segnale incoerente alla $freq = 300.3MHz$. 66

4.22 Autocostruito#1: segnale CW alla $freq = 363.9MHz$. 67
4.23 Autocostruito#1: segnale CW per le $RBW = 100Hz$ e $1kHz$ e segnale incoerente per la $RBW = 10kHz$ alla $freq = 336MHz$. 68
4.24 Autocostruito#1: onda quadra alla $freq = 389.9MHz$. 69
4.25 Autocostruito#1: segnale incoerente alla $freq = 188.4MHz$. 70

5.1 Flusso di lavoro dell'IA.[6] 72
5.2 Funzionamento dell'apprendimento supervisionato. 73
5.3 Architettura di una rete neurale.[7] 74
5.5 *Confusion matrix* al variare della *resolution bandwidth indoor.* 77
5.6 Flusso funzionamento della funzione. 79
5.11 *Confusion matrix* al variare della *resolution bandwidth outdoor.* 85

Elenco delle tabelle

2.1 Caratteristiche di riflettività degli assorbitori piramidali. 13

3.1 Parametri EXA per acquisizione del fondo, $RBW = 100kHz$. 36
3.2 Parametri EXA per acquisizione del mavic 2, mavic pro e mavic mini, $RBW = 100kHz$. 36
3.3 Parametri EXA per acquisizione dell'autocostruito, $RBW = 100kHz$. 36
3.4 Parametri EXA per acquisizione $RBW = 100Hz$. 38
3.5 Parametri EXA per acquisizione del mavic 2 e dell'autocostruito #1 in campo aperto, $RBW = 1kHz$. 45
3.6 Parametri EXA per acquisizione del mavic pro in campo aperto,, $RBW = 1kHz$. . . . 45

4.1 Parametri EXA per acquisizione del mavic 2 e dell'autocostruito #1 al variare della RBWe modalità d'acquisizione. 50
4.2 Parametri EXA per acquisizione del mavic pro al variare della RBWe modalità d'acquisizione. 50
4.3 Parametri EXA per scansione sferica. 51

5.1 Suddivisione campioni RSA *indoor*. 75
5.2 Suddivisione campioni EXA *indoor*. 75
5.3 Risultati test *indoor*. 77
5.4 Suddivisione campioni RSA *ouddoor*. 80
5.5 Suddivisione campioni EXA *ouddoor*. 80
5.6 Parametri RSA306B per addestramento *indoor*. 86
5.7 Parametri EXA per addestramento *indoor*. 87

Capitolo 1

Introduzione

Un aeromobile a pilotaggio remoto (APR), in inglese *unmanned aerial vehicle* (UAV), è una macchina volante con la caratteristica principale di non avere un pilota a bordo. Il suo volo può essere controllato da remoto da un operatore oppure programmato per una guida autonoma. Le prime forme di aeremobili a pilotaggio remoto nascono nell'800, sottoforma di mongolfiere caricate con l'esplosivo, impiegate dall'impero austriaco contro la città di Venezia. Nei successivi anni gli APR furono impiegati, nuovamente, nella Prima Guerra Mondiale e a seguire nella Seconda Guerra Mondiale dove vennero utilizzati, principalmente, dagli Stati Uniti come strumento di addestramento per l'artiglieria antiaerea.

In Italia il primo modello impiegato in missione dall'Esercito Italiano fu il CL-89 (fig. 1.1) dalla metà degli anni '60 nei reparti di artiglieria del 13° Gruppo acquisizione obiettivi "Aquileia". Il CL-89 veniva impiegato dalle forze terrestri per catturare, nei territori nemici, immagini da poter fornire all'artiglieria.

Figura 1.1: CL-89.[1]

Se inizialmente lo sviluppo dei droni era prettamente circonscritto all'ambito militare, grazie alla rapidissima crescita tecnologica avvenuta a partire dagli anni duemila, gli UAV sono approdati in modo pervasivo anche nel mondo civile. La loro diffusione è stata favorita da numerosi vantaggi, in particolare dalla possibilità di essere impiegati, a differenza degli aerei tradizionali, in situazioni con elevato richio per le vite umane o in zone inaccessibili.

Oggigiorno è presente una grande varietà di droni i quali differiscono tra loro sotto molteplici aspetti. A tal proposito risulta interessante effettuare una loro classificazione in modo da comprendere e inquadrare in che ambito si colloca il lavoro descritto nei capitoli successivi. Secondo il *Center for a New American Security* (CNAS) è possibile compiere una classificazione degli UAV dividendoli in quattro macro categorie (fig. 1.2) prendendo in considerazione il **grado di accessibilità** alle varie tipologie di utilizzatori e la **base tecnologica e l'infrastruttura** necessarie per il loro utilizzo e/o produzione [2].

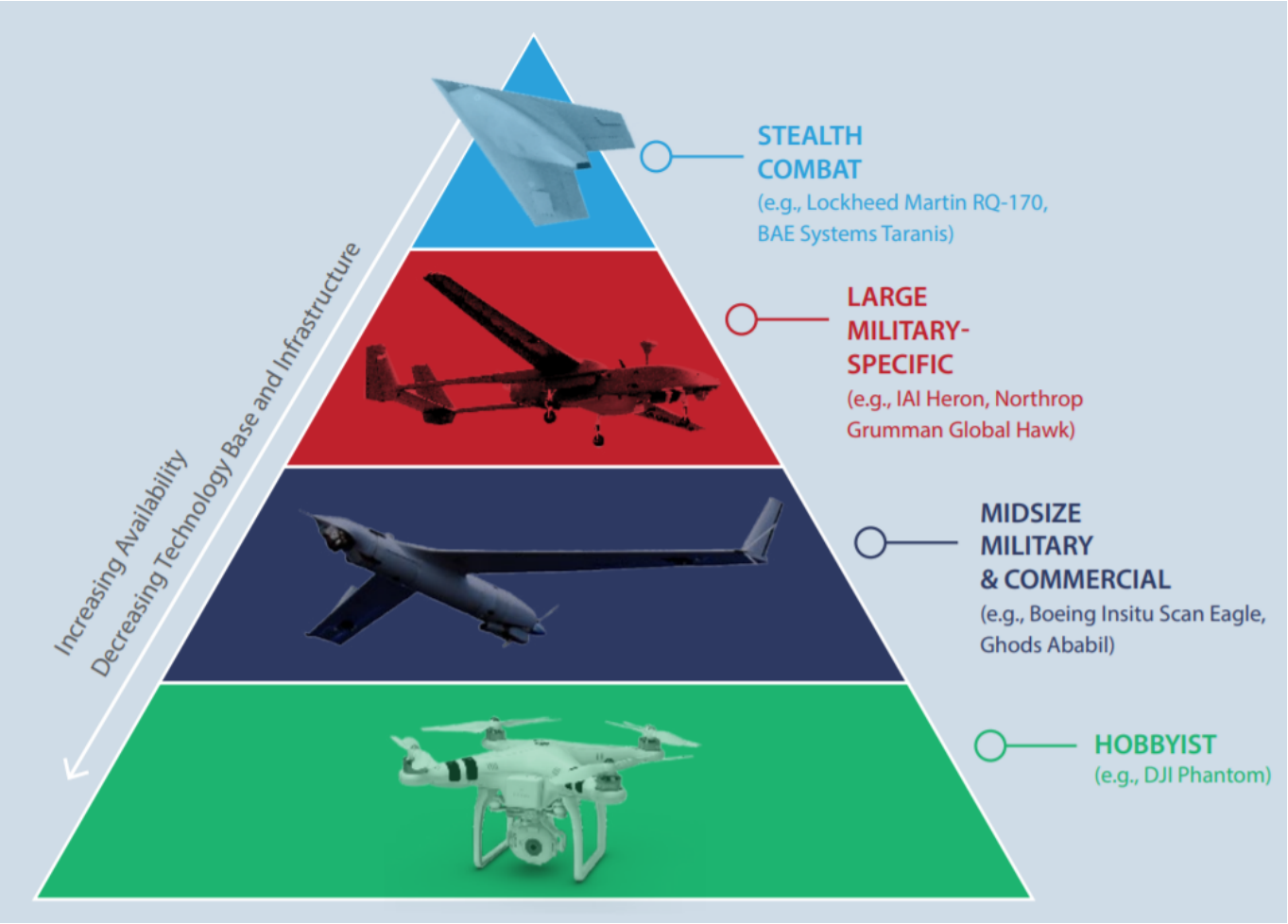


Figura 1.2: Le quattro macro categorie dei droni.[2]

Di seguito una breve descrizione delle quattro categorie:

- **droni stealth da combattimento:** fanno parte di questa categoria quegli aereomobili con tecnologie avanzatissime che, ad esempio, li rendono poco vulnerabili ai radar o altri dispositivi di individuazione. Gli elevati costi di produzione e di mantenimento limitano notevolmente la loro accessibilità rendendo, ad oggi, gli USA come gli unici operatori, noti, dotati di tali velivoli;
- **droni militari di grandi dimensioni:** tale categoria include droni armati accessibili, esclusivamente, alle forze armate. Sono dotati di tecnologie che gli permettono comunicazioni a grandi distanze, elevato carico utile e maggiore autonomia rispetto alla categorie successive. A differenza dei droni stealth non possiedono caratterische che li rendono meno rilevabili a sistemi avanzati di scoperta;
- **droni commerciali e militari di media grandezza:** sono quei velivoli che possono essere venduti a forze armate straniere oppure a enti non governativi. Essi possono essere impiegati, ad esempio, in missioni di *intelligence* o in missioni di approvigionamento. Tuttavia, i costi elevati e la necessità di infrastrutture adeguate rendono questi sistemi poco accessibili ai privati;
- **droni per hobbisti:** sono acquistabili nei negozi già assemblati e pronti all'uso oppure da assemblare autonomamente con costi contenuti (al più qualche migliaio di euro). A causa delle ridotte dimensioni non necessitano di infrastrutture particolari per il loro mantenimento e la semplicità di utilizzo permette a chiunque di accedere a questi sistemi senza conoscenze specifiche.

Il lavoro di questa tesi si è concentrato sulla categoria dei droni per hobbisti, per questo motivo, di seguito, è riportata una panoramica generale dell'architettura e dei componenti elettronici che caratterizzano tali sistemi. In fig. 1.3 viene mostrata l'architettura tipica di un *Unmanned Aerial System* (UAS), termine utilizzato per riferirsi non solamente all'aeromobile ma anche a tutti i sottosistemi che ne consentono il volo e agli eventuali accessori. A seguire sono descritti gli elementi che compongono un UAS generico.

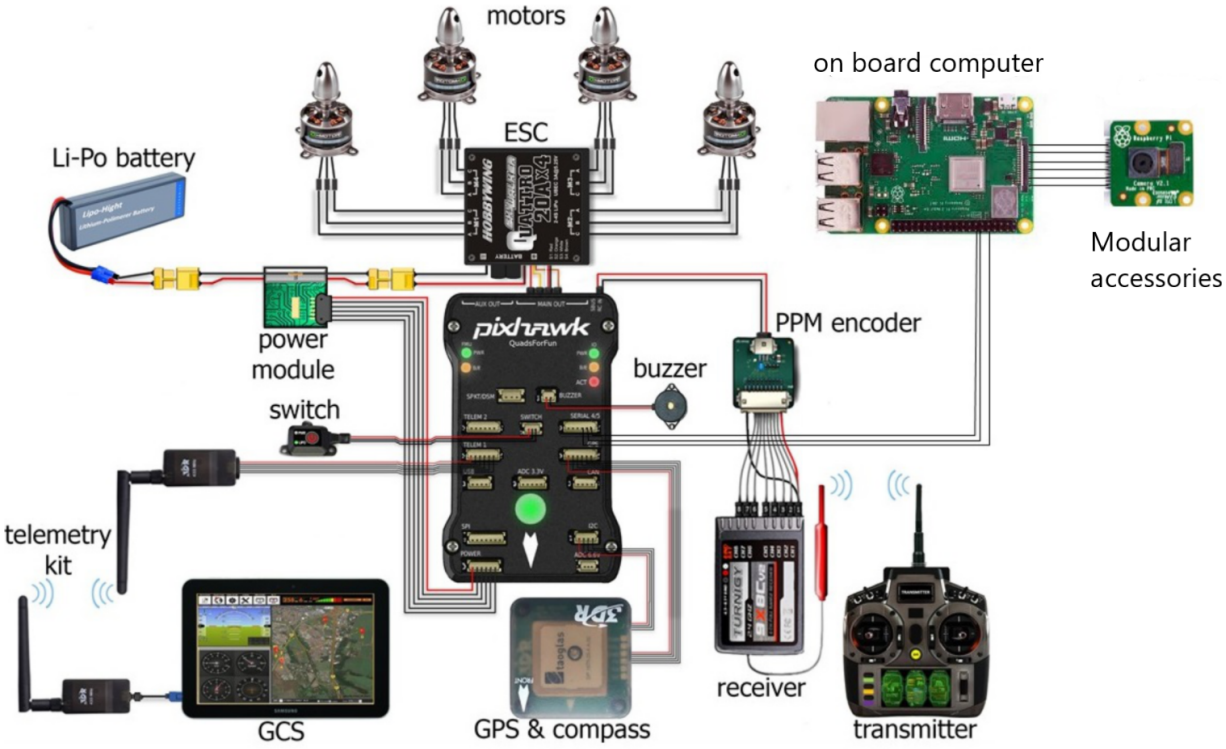


Figura 1.3: Architettura tipica di un drone[3].

- **Centralina di volo**: dispositivo che si occupa della gestione dei motori e della comunicazione con la stazione a terra. È responsabile, inoltre, dell'elaborazione dei dati ricevuti dai sistemi GNSS e dai sensori inerziali (accelerometri, giroscopi etc.) impiegati per stabilizzare il volo dell'UAV;
- **Ricevitore**: acquisisce i segnali dal telecomando trasferendoli alla centralina di volo che si occuperà della conversione in comandi per la configurazione e per il controllo del drone. La frequenza operativa impiegata da questi sistemi è, generalmente, centrata a 2.45 GHz con banda di circa 100 MHz;
- **Telemetria**: il canale di telemetria ha il compito di trasmettere informazioni sullo stato del drone, fornite dalla centralina di volo, alla stazione di terra. I dati inviati sono, ad esempio, altitudine, velocità, direzione, stato della batteria etc.
- **Computer di bordo**: se presente, si occupa della gestione degli **accessori** aggiuntivi (camera, altoparlante, etc.). Queste informazioni possono essere trasmesse alla stazione di terra oppure archiviate nella memoria al fine di risparmiare la carica della batteria;
- ***Electronic Speed Controllers* (ESC)**: forniscono l'alimentazione ai **motori** e ne regolano, individualmente, il numero di giri attraverso un segnale PWM;
- **Batteria Li-Po** e **modulo di alimentazione**: forniscono un'alimentazione stabile all'elettronica di bordo. Inoltre, il modulo permette la misurazione della tensione della batteria e del consumo di corrente per comunicare all'operatore lo stato di carica della batteria.

Di seguito vengono elencati alcune caratteristiche di questi UAV mettendo in evidenza capacità e

limitazioni.

Capacità:

- autonomia della batteria di circa 30 *minuti*;
- velocità media di circa 50 km/h;
- carico massimo trasportabile di 2 kg;
- possibilità di effettuare foto e video in HD con trasmissione *real time* alla la stazione di terra;
- mediante i sistemi GNSS di bordo possono essere essere programmate rotte di volo *way-point*;
- sistemi di rilevamento che permettono l'identificazione degli ostacoli e, se in modalità di volo autonomo, capacità decisionale sul loro superamento.

Limitazioni:

- ridotta resistenza meccanica;
- limitato raggio d'azione (al massimo pochi chilometri);
- elevata vulnerabilità al vento (circa $30km/h$);
- molti di questi droni utilizzano trasmissioni non criptate che possono essere facilmente intercettate;
- peso trasportabile non adatto per portare a bordo armi;
- bassa resistenza a sistemi come *spoofing* e/o *jamming GPS*.

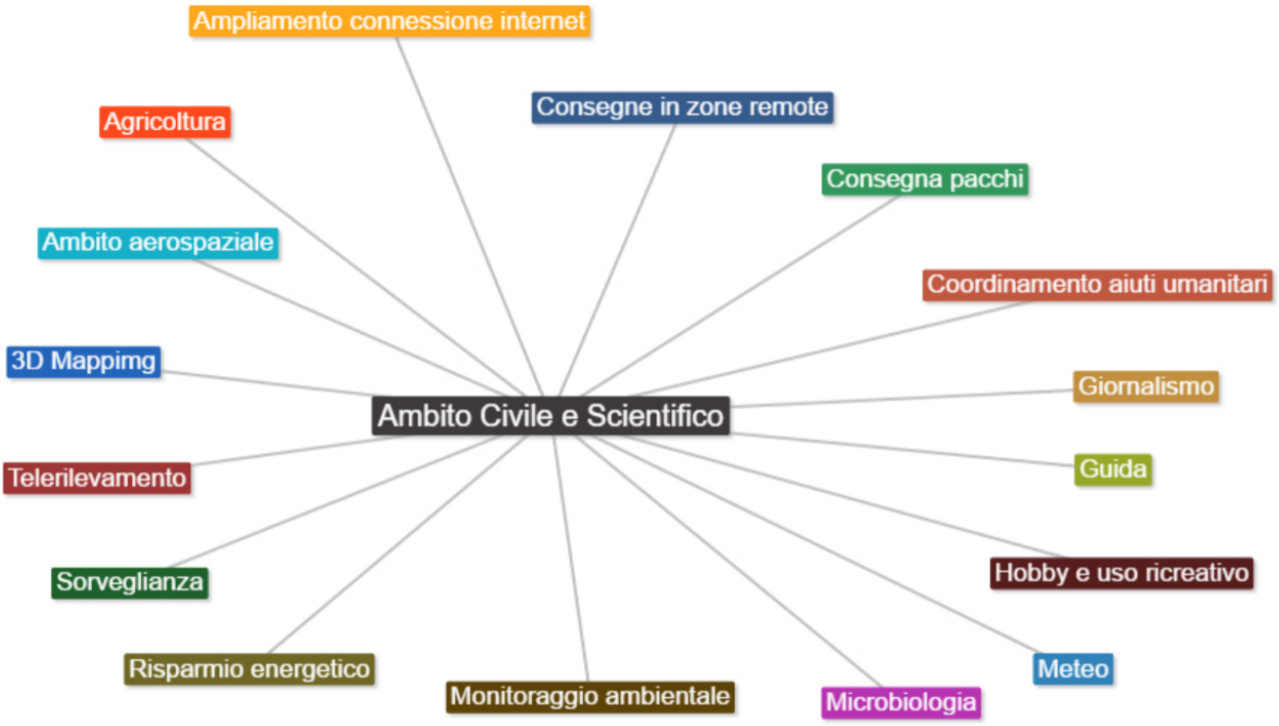


Figura 1.4: Esempi di applicazione UAV in ambito civile e scientifico.[4]

Mentre l'UAV passa dall'uso militare a quello civile, il valore commerciale dei droni continua a cre-

scere. La commercializzazione ha portato ad aumentare la produzione degli UAV civili a prezzi più accessibili[8]. Se da un lato la facilità di accesso e l'estrema flessibilità di questi sistemi ha esteso il loro impiego in situazioni con scopo benefico (in fig.1.4 vengono mostrati alcuni esempi) dall'altro le stesse caratteristiche hanno avvicinato i malintenzionati ad usufruire dei droni per scopi illegali.
A seguito dell'incursione da parte di un UAV avvenuta durante la campagna di rally del 2013 presieduta dalla Cancelliera Angela Merkel e dal Ministro della Difesa tedesco, è aumentata la consapevolezza sull'importanza dei sistemi counter-UAV (**CUAV**)[9]. Negli anni successivi sono avvenuti altri casi degni di nota, come il ritrovamento di un drone con tracce di materiale radioattivo sull'ufficio del Primo Ministro Giapponese nel 2015 [10]; oppure l'atterraggio accidentale di un UAV nell'area della Casa Bianca passato inosservato dai radar [11]; il tentativo di attacco al Presidente della Venezuela nel 2018 dove sette soldati sono rimasti feriti a seguito dell'esplosione di un drone [12] o ancora l'attacco del 2019 a due impianti dell'industria petrolifera, da parte di dieci droni, avvenuto in Arabia Saudita mettendo fuori gioco più della metà della produzione del Regno [13]. Questi avvenimenti e tanti altri non citati, dovrebbero farci riflettere su quanto sia importante gestire i rischi derivanti dall'uso malevolo di questi sistemi, sia da un punto di vista normativo sia tramite sistemi CUAV sempre più evoluti capaci di neutralizzare le eventuali minacce. Risulta interessante evidenziare che, secondo l'analisi effettuata dal Col. Pierpaolo Dotoli, i sistemi autonomi sono stati identificati in cima alla classifica fra le aree tecnologiche di maggiore interesse per la Difesa nazionale. [14].

1.1 Stato dell'arte

In questo paragrafo si vuole dare una breve panoramica dei sistemi, noti, di scoperta UAV che si sono sviluppati negli ultimi anni. Di seguito i principali:

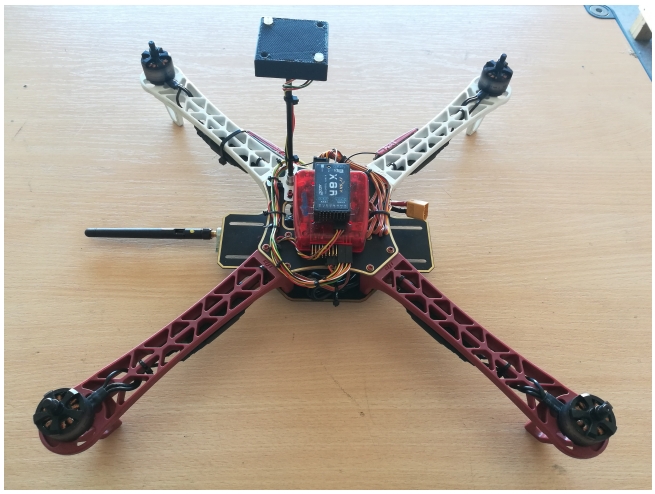
- **radar**: rileva la presenza di piccoli velivoli senza pilota dalla firma radar che viene generata quando l'aereomobile incontra gli impulsi di radiofrequenza emessi dal sistema di rilevamento. Questi sistemi, spesso, impiegano algoritmi per la distinzione tra droni e altri piccoli oggetti che volano a bassa quota, come gli uccelli;
- **radio-frequenza(RF) passivo**: rileva, localizza e in alcuni casi identifica i droni nelle vicinanze scansionando le frequenze di comunicazione tra i droni e le loro stazioni di terra;
- **elettro-ottico (EO)**: identifica e traccia i droni in base alla loro firma visiva.
- **infrarossi (IR)**: identifica e traccia i droni in base alla loro firma del calore;
- **acustico**: rileva i droni riconoscendo i suoni prodotti dai loro motori. I sistemi acustici si basano su una libreria di suoni prodotti da droni noti, che vengono poi abbinati ai suoni rilevati nell'ambiente operativo [15];
- **radar passivo DVB**: si basa sull'impiego di radar passivi che utilizzano la trasmissione della tv digitale terrestre per rilevare la presenza degli UAV. Come nel caso dei radar attivi, vengono utilizzati degli algoritmi per la distinzione tra droni e altri piccoli oggetti [16].

Da un'analisi approfondita di questi sistemi conseguono delle limitazioni sulla loro efficacia. Infatti, la maggior parte di questi sistemi risulta meno efficace nella rilevazione di oggetti di dimensioni ridotte, ad esempio nel caso dei radar minore sarà la dimensione dell'UAV minore sarà la sezione radar equivalente, in inglese *Radar Cross-Section* (RCS) rendendo più difficile la loro identificazione. I sistemi basati sull'intercettazione della comunicazione tra il drone e la stazione di controllo, risultano inefficaci nel caso in cui il drone sia programmato per volare in silenzio radio, con volo autonomo (per eseguire missioni su rotte pre-impostate) tramite sistemi di localizzazione, oppure nel caso in cui il modulo radio sia stato modificato, inserendo un modulo proprietario su frequenze personalizzate. Per tali motivi si è ritenuto d'interesse effettuare un'attività di ricerca e sperimentazione con lo scopo di aumentare le strategie e le tecnologie impiegabili per la scoperta e l'identificazione di UAV. Le attività di ricerca si sono svolte presso il Centro Polifunzionale di Sperimentazione dell'Esercito, sito a Montelibretti (Roma), il quale dispone di una camera anecoica dotata di scanner sferico, della strumentazione necessaria ad effettuare misure nell'ambito dell'elettromagnetismo e di una vasta area controllata. I droni messi a disposizione per la sperimentazione sono mostrati in fig.1.5.

(a) DJI Macic 2 Enterprise.

(b) DJI Macic Pro Platinum.

(c) DJI Macic Mini.



(d) Autocostruito #1.[1]

Figura 1.5: Droni soggetti alla sperimentazione.

[1]Al fine di limitare la potenza, in ricezione, degli strumenti durante le misure è stata sostituita l'antenna relativa alla comunicazione della telemetria con un carico a 50Ω.

Capitolo 2

Sistema di Misura

La prima fase di misurazioni è stata condotta all'interno della camera anecoica del Centro Polifunzionale di Sperimentazione dell'Esercito, la quale è dotata di un sistema di misura di campi elettromagnetici in regime di campo vicino, del tipo Spherical Near Field Antenna Test Range (SNF-TR). Si è quindi deciso di utilizzare tale camera per le misure di emissione irradiata dei droni a disposizione del Centro, in quanto, pur non avendo dei requisiti specifici in termini di schermatura elettromagnetica, offre un ambiente controllato e riproduce una condizione di spazio libero.

In fig.2.1 si riporta uno schema semplificato del sistema di misura che si è voluto utilizzare e nei paragrafi successivi una breve descrizioni degli elementi che lo compongono.

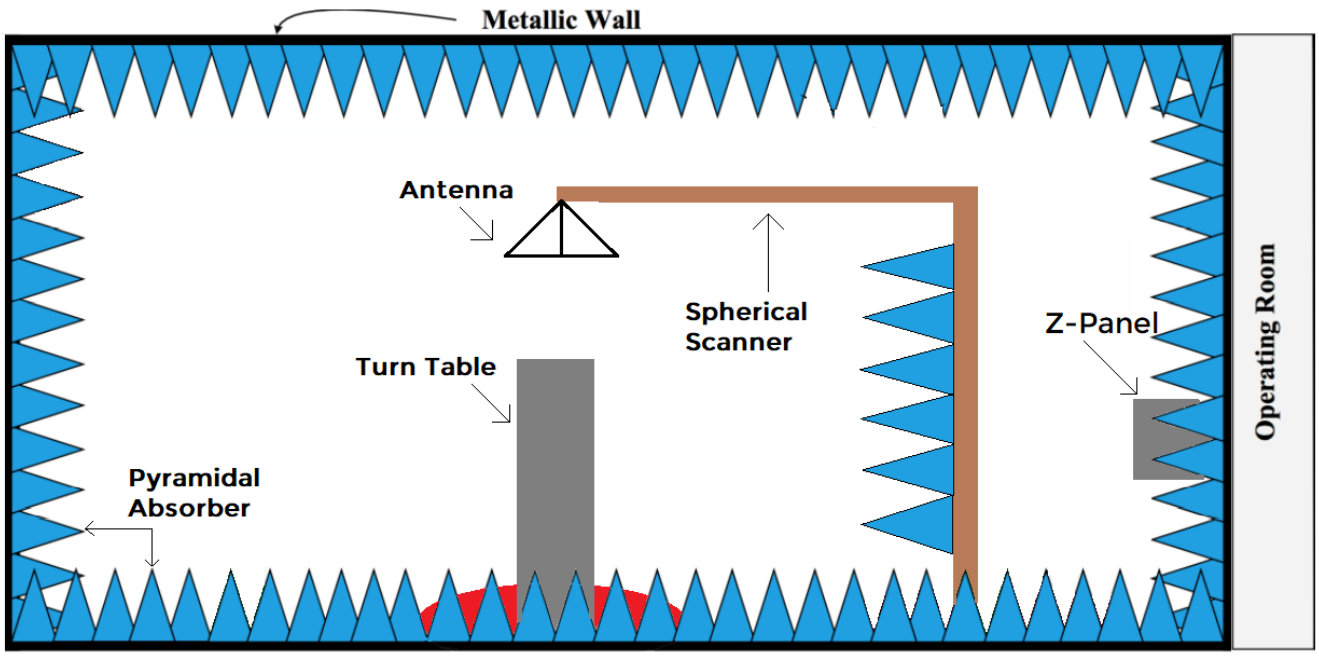


Figura 2.1: Schema del setup di misura.

2.1 Assorbitori RF

Le pareti della camera anecoica utilizzata per le misure sono ricoperte da coni assorbitori RF, in grado di dissipare l'energia di un'onda elettromagnetica in modo da limitarne la riflessione. Il range di funzionamento di una camera anecoica è definito principalmente dal tipo di assorbitori utilizzati, oltre che dalle sue dimensioni e forma. Le caratteristiche degli assorbitori sono definiti dalla permittività elettrica e dalla permeabilità magnetica. La prima può essere definita come la misura della resistenza generata quando un campo elettrico attraversa un mezzo, la seconda stabilisce la capacità del mezzo di assistere lo sviluppo del campo magnetico all'interno del mezzo stesso. Matematicamente, la permittività e la permeabilità possono essere rappresentati attraverso numeri complessi.
La fig.2.2 fornisce un'idea di ciò che accade quando un'onda incidente incontra il materiale assorbente all'interno della camera anecoica.

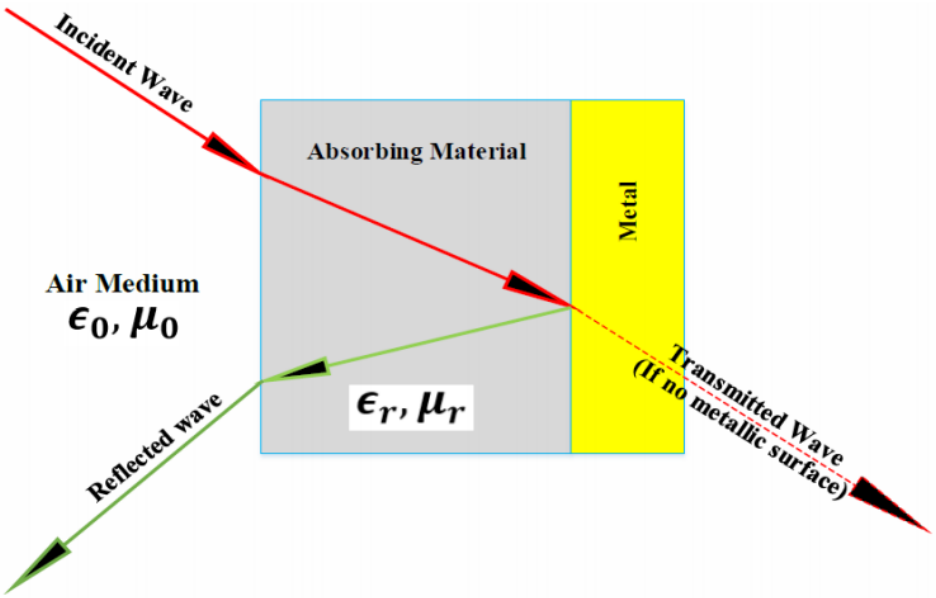


Figura 2.2: Onda incidente su un mezzo.

Dove i simboli nella fig.2.2 sono:

- $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m è la costante dielettrica del vuoto;
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m è la permeabilità magnetica del vuoto;
- $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ è la permittività elettrica del mezzo;
- $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$ è la permeabilità magnetica del mezzo.

Per quanto riguarda la permittività elettrica, la parte reale (ϵ'_r) è usata per rappresentare la forza dell'interazione tra il materiale e il campo elettrico ed è dipendente dalla frequenza; la parte immaginaria (ϵ''_r) è usata per descrivere la perdita di energia associata al campo elettrico dovuto al mezzo. Una descrizione equivalente può essere effettuta per la parte reale ed immaginaria della permeabilità

in riferimento al campo magnetico. Attraverso queste variabili è possibile valutare la *loss tangent* elettrica e magnetica come segue:

$$\tan(\delta_e) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \tag{2.1}$$

$$\tan(\delta_m) = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \tag{2.2}$$

La *loss tangent* di un materiale denota quantitativamente la dissipazione dell'energia elettromagnetica dovuta a diversi processi fisici come la conduzione elettrica, il rilassamento dielettrico, la risonanza dielettrica e la perdita da processi non lineari.

2.1.1 Assorbitori Piramidali

Gli assorbitori piramidali sono assorbitori dielettrici e sono il tipo di assorbitore più comune che viene utilizzato nella maggior parte delle camere anecoice per misure di antenna, di compatibilità elettromagnetica etc. Questi assorbitori sono generalmente realizzati con una schiuma di poliuretano o polistirene impregnata di carbonio conduttivo. L'assorbimento di energia RF dalle frequenze di 500MHz può essere ottenuto bilanciando la quantità di carbonio nella schiuma.[17] Le schiume caricate al carbonio vengono verniciate con colori differenti a richiesta del cliente. Tuttavia, le schiume sono per lo più verniciate con lattice blu per una buona riflettività della luce. Queste vernici sembrano non influenzare il funzionamento dell'assorbitore per lunghezze d'onda modeste, ma può disturbare a lunghezze d'onda più corte. Ad esempio, la vernice blu al lattice degrada la riflettività della camera di circa 5 dB alla frequenza di 95 GHz.[18]

Nella fig.2.3 vengono mostrati i coni utilizzati nella camera anecoica del CEPOLISPE con dimensioni L=610mm, W=610mm, H=305mm. Tali coni (modello APM 30 prodotti dalla Siepel) presentano una riflettività, alla frequenza di 500 MHz, pari a -24 dB. I valori al variare della frequenza sono riportati nella tabella 2.1.

Minimum reflectivity of HYFRAL APM in dB *												
Type	Height [mm]	80 MHz	200 MHz	300 MHz	500 MHz	1 GHz	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz	18 GHz	40 GHz
APM 3	28							-12	-13	-13	-14	-16
APM 5	55						-20	-25	-30	-35	-40	35
APM 9	89					-15	-21	-33	-40	-43	-45	-50
APM 12	115					-18	-30	-35	-43	-50	-50	-52
APM 20	210				-16	-30	-36	-45	-50	-52	-52	-52
APM 30	305				-24	-34	-37	-47	-52	-52	-52	-52
APM 45	455				-29	-40	-41	-50	-52	-52	-52	-52
APM 55	550			-25	-33	-43	-46	-50	-52	-52	-52	-52
APM 66	660	-6	-21	-27	-38	-45	-47	-52	-52	-52	-52	-52
APM 80	800	-10	-22	-28	-41	-48	-52	-52	-52	-52	-52	-52
APM 85	850	-10	-23	-28	-42	-49	-52	-52	-52	-52	-52	-52
APM 100	1000	-13	-26	-33	-43	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52
APM 110	1100	-15	-28	-38	-43	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52
APM 120	1200	-19	-28	-38	-43	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-52

Tabella 2.1: Caratteristiche di riflettività degli assorbitori piramidali.

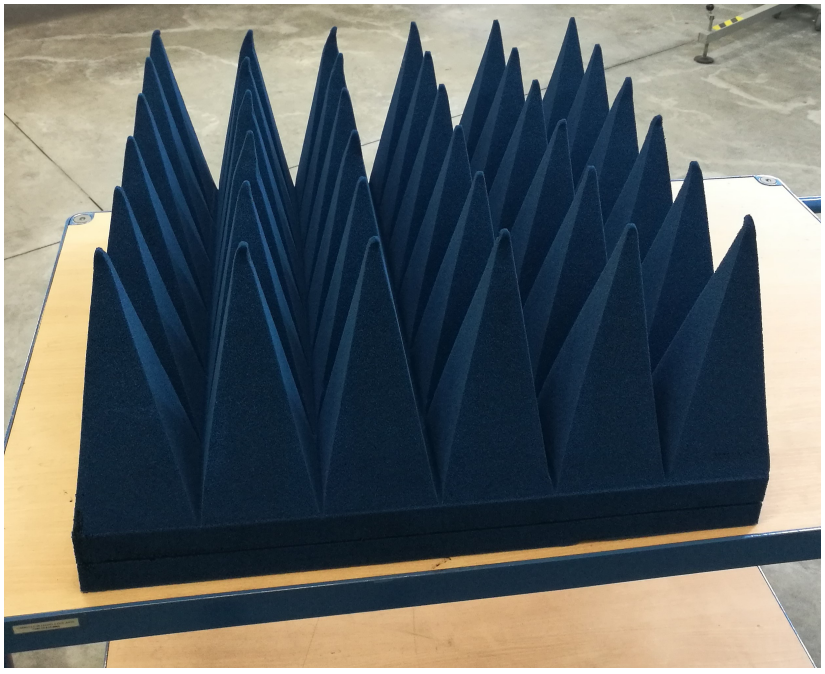


Figura 2.3: Assorbitori piramidali.

2.2 Scanner Sferico

La camera anecoica dispone di un sistema *Spherical Near Field Antenna Test Range*. In particolare lo scanner sferico (fig.2.4) è in grado di effettuare:

- una scansione in azimuth (Phi) tramite rotazione dell'EUT su apposita colonna di posizionamento, con range angolare di 360° e risoluzione di 0.03°;

- una scansione in elevazione (Theta) tramite movimentazione, lungo i meridiani della sfera, di un braccio con probe nella parte terminale con range angolare ±165° e risoluzione di 0.03°;
- rotazione della polarizzazione tramite apposito giunto rotante.

Per il posizonamento del drone al centro dello scanner è stato realizzato, tramite stampante 3D, un supporto in acrilonitrile butadiene stirene (ABS) in modo da allontanare il drone dalla colonna metallica di posizionamento. Così fecendo è stato ridotto l'accoppiamento elettromagnetico tra il drone e il metallo costituente la colonna.

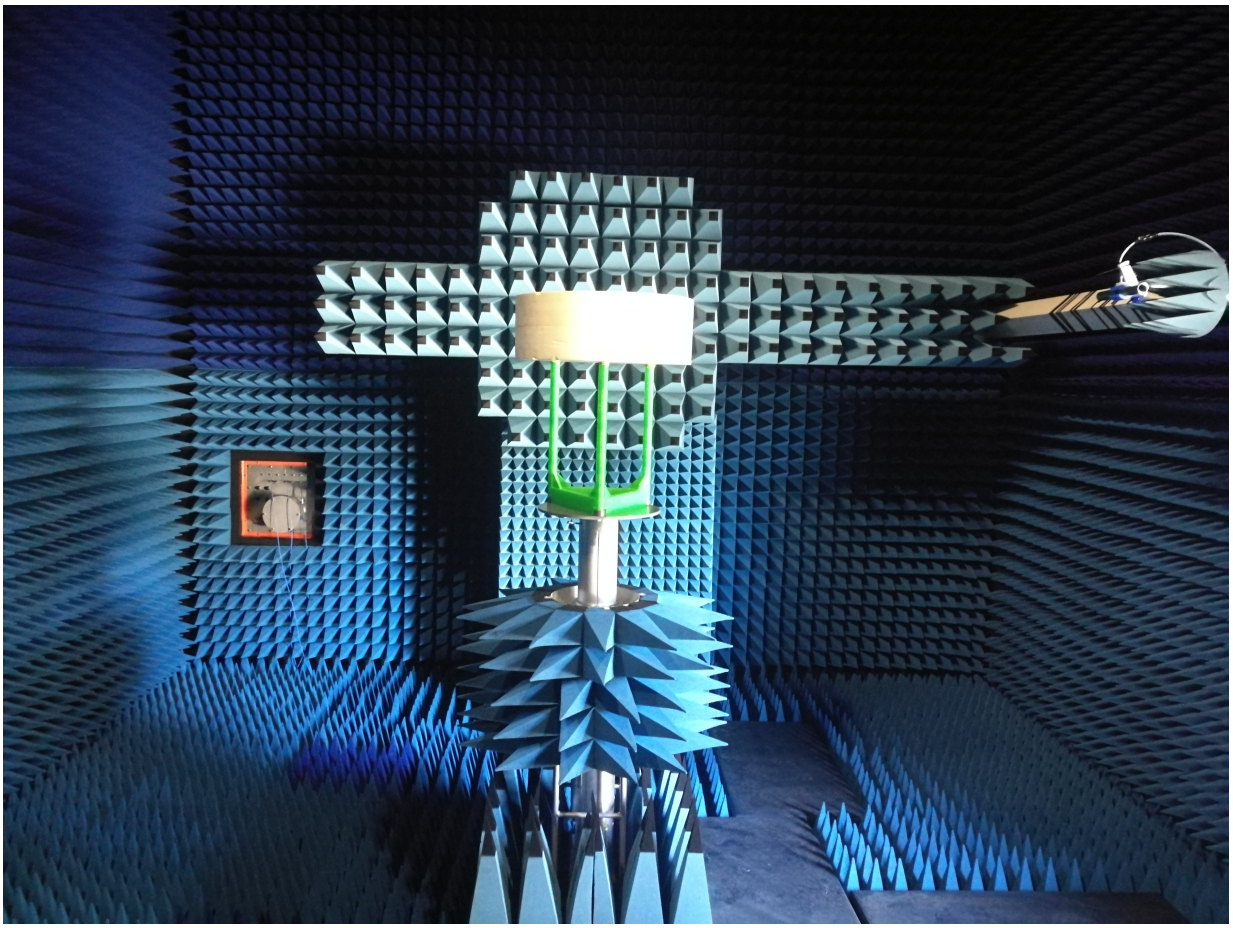


Figura 2.4: Scanner sferico.

2.3 Camera di controllo

La camera di controllo permette di monitorare, controllare lo scanner sferico ed effettuare le misurazioni senza influenzare le condizioni a contorno all'interno della camera stessa. Un pannello tecnico tra i due ambienti permette il passaggio dei cavi RF mantenendo la camera anecoica isolata. Le misurazioni e la movimentazione dello scanner sono controllati da remoto attraverso un progamma in linguaggio MATLAB, progettato e sviluppato appositamente per la campagna di misure sui droni. In particolare, lo script è connesso all'NCD (fig. INSERIRE NCD) con il quale è possibile decidere

le posizioni azimutali e zenitali dello scanner sferico e con gli strumenti di misura interessati per i diversi test che verranno descritti nelle varie misurazione effettuate.

2.4 Capacità della camera anecoica

La camera anecoica è stata progettata per effettuare musure delle caratteristiche di irradiazione di antenne nel range 1 - 40 GHz; poichè per l'analisi dell'emissioni non intenzionali si era identificata come banda di frequenza di interesse il range 100 MHz - 3.6 GHz, è stata realizzata un'antenna per coprire la banda 0.2 - 1 GHz. L'antenna in questione è stata progettata come un tradizionale dipolo $\lambda/2$ centrato alla frequenza di 500 MHz. La scelta di progettare un dipolo di dimensioni ridotte, invece che dimensionarlo per una frequenza centrale più bassa, è stata adottata al fine di ottenere un'antenna di misura che perturbasse il meno possibile i campi investigati; inoltre, in accordo con la definizione teorica di regione di campo lontano ($\frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$), il centro dello scanner sferico si trova in questo modo nella regione di campo lontano rispetto all'antenna progettata.

2.4.1 Progettazione del dipolo

Per la progettazione del dipolo è stato creato un modello su *CST STUDIO SUITE* al fine di ottenere le prestazioni desiderate sulle quali basare la realizzazione fisica dell'antenna. Con l'obiettivo di ottenere una larghezza di banda maggiore si è deciso di progettare un dipolo con una ridotta "snellezza" (rapporto tra la lunghezza e il raggio del dipolo)[1]; una minore snellezza dell'antenna, infatti, comporta una minore variazione della parte immaginaria e reale dell'impedenza d'ingresso al variare della frequenza, caratteristica necessaria se l'antenna deve lavorare su una banda di frequenze maggiore [5]. Sulla base delle considerazioni precedenti, si è scelto di utilizzare un diametro del dipolo pari a 32 mm e successivamente è stata effettua una simulazione parametrica della lunghezza e della distanza tra i due elementi del dipolo in modo da ottimizzare il *return loss* nella banda di interesse. Ottenute dalla simulazione le grandezze ottimizzate è stato realizzato un dipolo di lunghezza pari a 226 mm, gap tra i due elementi pari a 20 mm e ad esso è stato saldato un connettore SMA femmina per la connessione al cavo RF. Successivamente per minimizzare gli effetti dovuti allo sbilanciamento delle correnti sui due elementi del dipolo sono state aggiunte tre ferriti sul cavo RF in modo da realizzare un *balun* in corrente. In fig. 2.5 è riportato il modello dell'antenna e la sua realizzazione.

[1] Lo svantaggio di usare un dipolo con una bassa snellezza è quello di ottenere una minore *cross polar discrimination*.

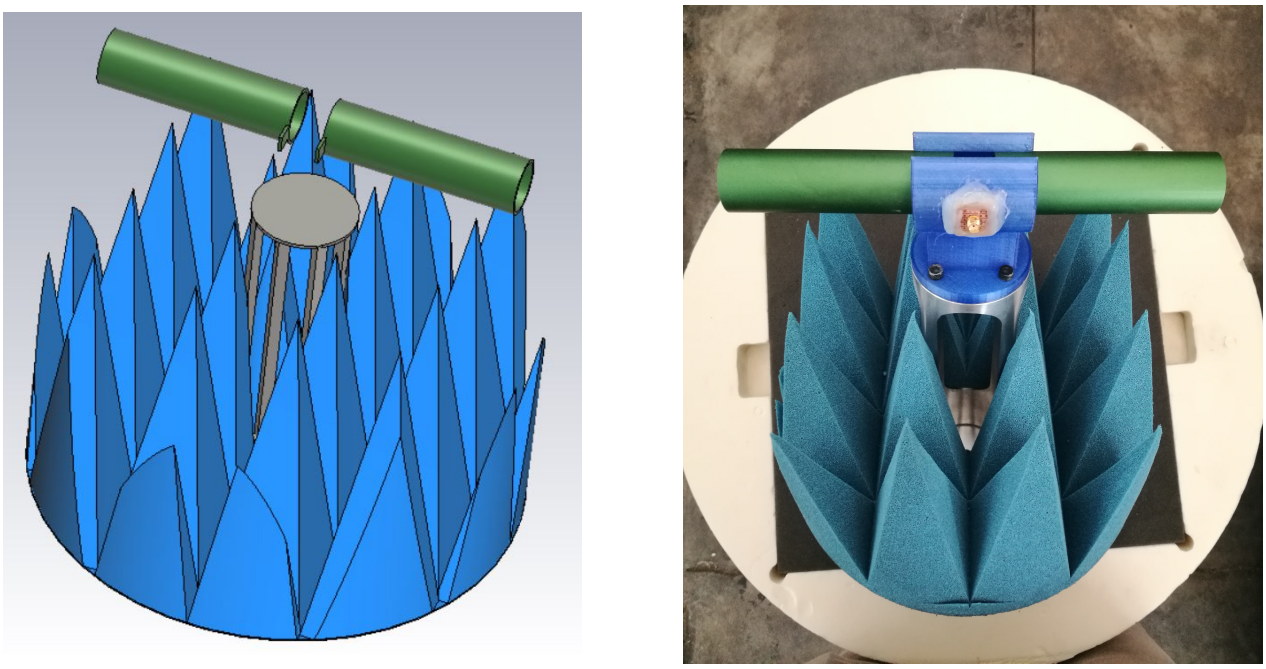


Figura 2.5: Modello (sinistra) e realizzazione (destra) del dipolo.

2.4.2 Misura dei parametri del dipolo

La capacità di irradiazione di un'antenna viene caratterizzata attraverso il ***radiation pattern***, la polarizzazione e il guadagno; queste figure di merito vengono misurate sulla superficie di una sfera a raggio costante. Poichè la distanza radiale è mantenuta costante, ogni punto sulla superficie è identificato solamente dalle due coordinate angolari θ e ϕ. Una rappresentazione delle caratteristiche di radiazione di un'antenna in funzione di θ e ϕ per una distanza radiale e frequenza costante è definita come radiation pattern di un'antenna [19]. Il sistema di coordinate sferiche standard utilizzato nelle misurazioni d'antenna è mostrato in fig.2.6 [20].

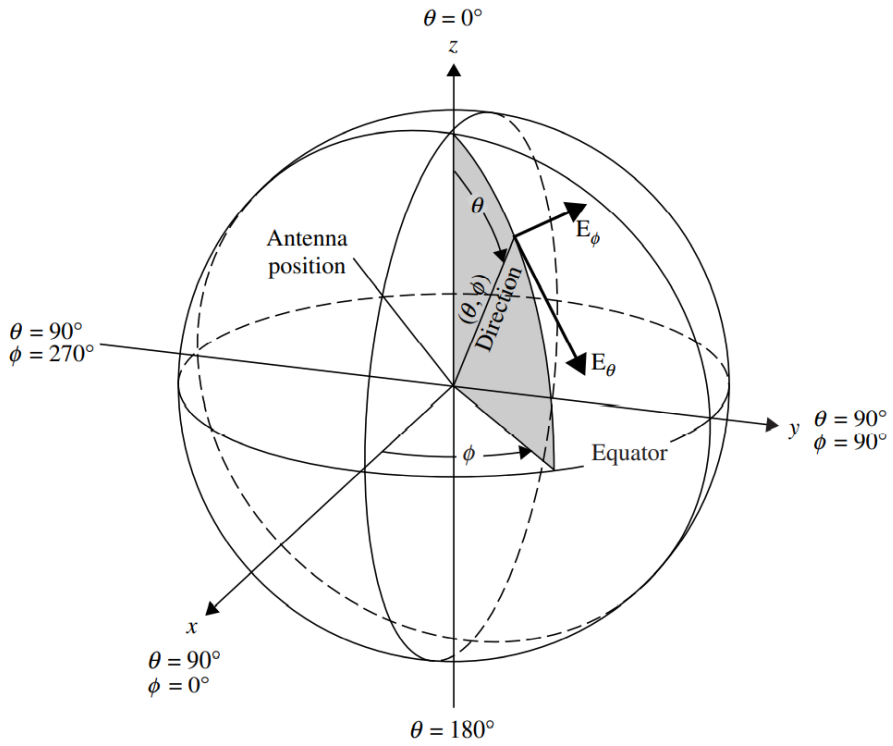
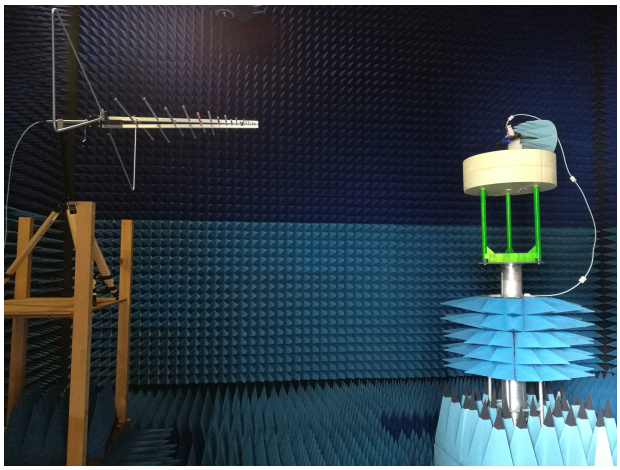


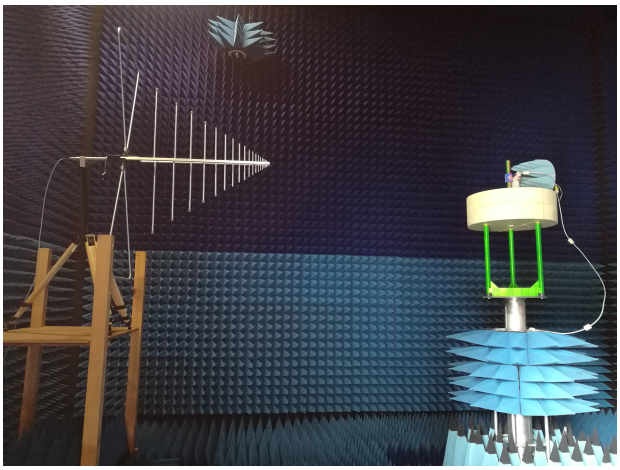
Figura 2.6: Geometria del sistema di coordinate sferiche.

Per la misura del *radiation pattern* sono stati misurati i due tagli per $\theta = 90°$ con $0° \leq \phi \leq 360°$ (*H-plane*) e per $\phi = 0°$ con $0° \leq \theta \leq 360°$ (*E-plane*). Il pattern può essere misurato in trasmissione o in ricezione. La modalità è dettata dall'applicazione. Grazie al teorema di reciprocità di Lorentz la misura può essere effettuata in entrambe le modalità[2]. Per la caratterizzazione è stata effettuata una misura di S_{21} attraverso un *vector network analyzer*, collegando alla porta 1 l'antenna log-periodica VULB 9163 e alla porta 2 l'AUT (*Antenna Under Test*). Nella fig. 2.7 sono riportate le due configurazioni utili per la caratterizzazione del dipolo nei due tagli fondamentali.

[2]Questo è vero se l'antenna è reciproca. Nella maggior parte dei casi, compreso il caso di un dipolo, questa condizione è soddisfatta.



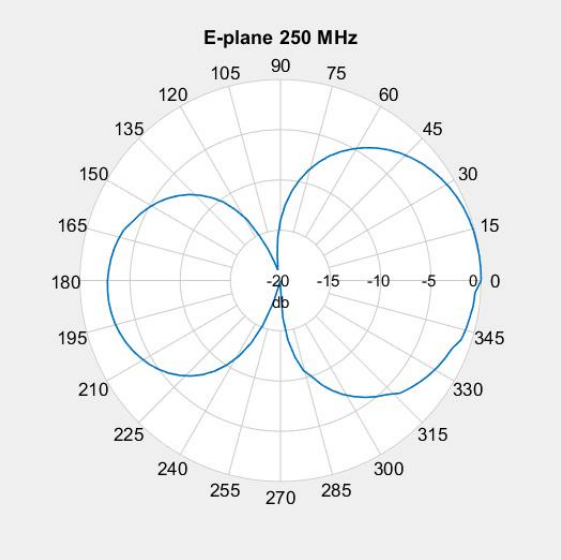
(a) E-plane.

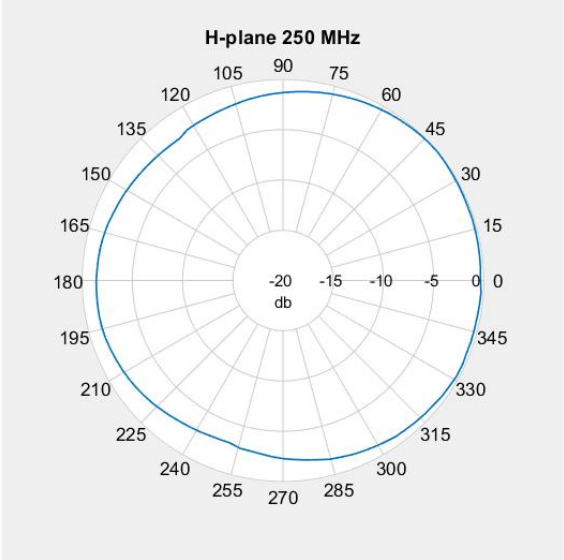


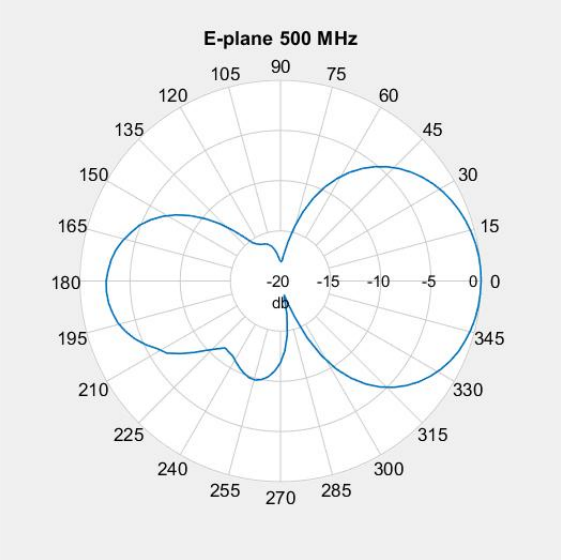
(b) H-plane.

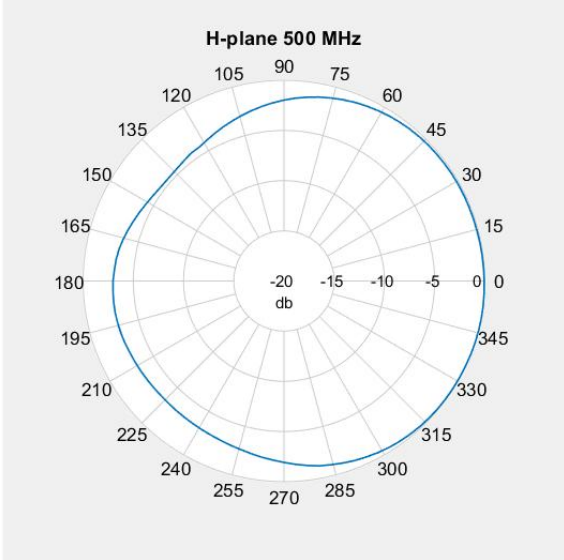
Figura 2.7: Misure di co-polarizzazione.

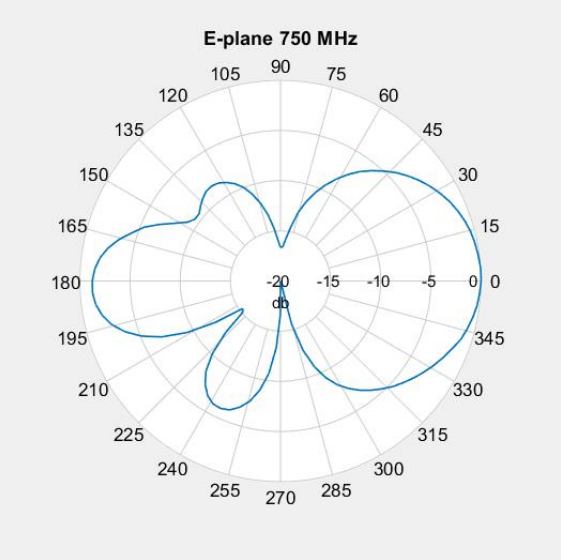
Nelle seguenti immagini sono stati riportati i risultati normalizzati alle frequenze campioni di: 250 MHz, 500 MHz, 750 MHz e 1000 MHz.

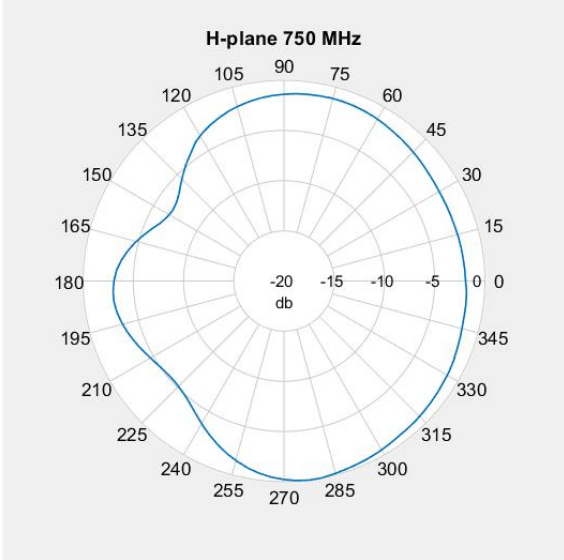

E-plane 250 MHz
90
75
60
45
30
15
0
105
120
135
150
165
180
195
210
225
240
255
270
285
300
315
330
345
-20
-15
-10
-5
0
db


H-plane 250 MHz
90
75
60
45
30
15
0
105
120
135
150
165
180
195
210
225
240
255
270
285
300
315
330
345
-20
-15
-10
-5
0
db


E-plane 500 MHz
90
75
60
45
30
15
0
105
120
135
150
165
180
195
210
225
240
255
270
285
300
315
330
345
-20
-15
-10
-5
0
db


H-plane 500 MHz
90
75
60
45
30
15
0
105
120
135
150
165
180
195
210
225
240
255
270
285
300
315
330
345
-20
-15
-10
-5
0
db


E-plane 750 MHz
90
75
60
45
30
15
0
105
120
135
150
165
180
195
210
225
240
255
270
285
300
315
330
345
-20
-15
-10
-5
0
db


H-plane 750 MHz
90
75
60
45
30
15
0
105
120
135
150
165
180
195
210
225
240
255
270
285
300
315
330
345
-20
-15
-10
-5
0
db

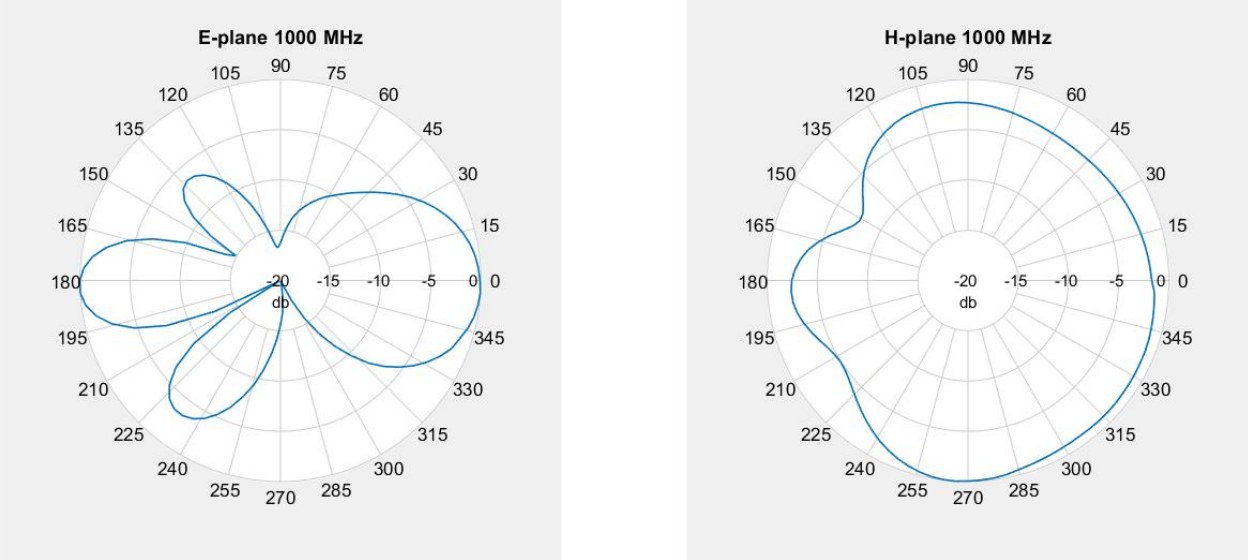


Figura 2.9: E-Plane e H-Plane

Il **guadagno** d'antenna viene solitamente misurato nella direzione del proprio massimo (detto guadagno di picco) o nella direzione di puntamento dell'antenna. La conoscenza del radiation pattern permette la determinazione del guadagno in ogni altra direzione [20]. Il guadagno è stato valutato mediante una misurazione condotta all'esterno della camera, in particolare è stata effettuata una misura di S_{21} attraverso un *Vector Network Analyzer*, collegando alla porta 1 l'antenna log-periodica VULB 9163 e alla porta 2 l'AUT. Le due antenne sono state poste alla distanza di 3 metri (dal centro della log periodica) e all'altezza di 2.10 metri; al fine di minimizzare i fenomeni dovuti alla riflessione del terreno, sono stati posti dei coni anecoici sul terreno fra le due antenne. Il setup di misura è mostrato in fig. 2.10.

Figura 2.10: Setup misura di guadagno.

Conoscendo il valore di S_{21}, quindi la differenza tra la potenza ricevuta al dipolo e la potenza trasmessa dalla log-periodica, la distanza e il guadagno dell'antenna in trasmissione si è derivato il guadagno dell'AUT attraverso l'equazione di trasmissione di Friis:

$$G_R|_{dBi} = S_{21}|_{dB} - G_T|_{dBi} - 20 \cdot \log \frac{\lambda}{4\pi R} \tag{2.3}$$

Ottenuto il guadagno è stato ricavato l'**antenna factor**, definito come il rapporto tra il campo elettrico e la differenza di potenziale indotta ai capi dell'antenna (con un carico adattato a 50 Ω), attraverso la seguente relazione:

$$AF|_{dB} = 19.8|_{dB} - G|_{dBi} - 20 \cdot \log \lambda \tag{2.4}$$

Nelle fig. 3.24 e fig. 2.12 sono riportati, rispettivamente, i risultati ottenuti del guadagno e dell'*antenna factor*.

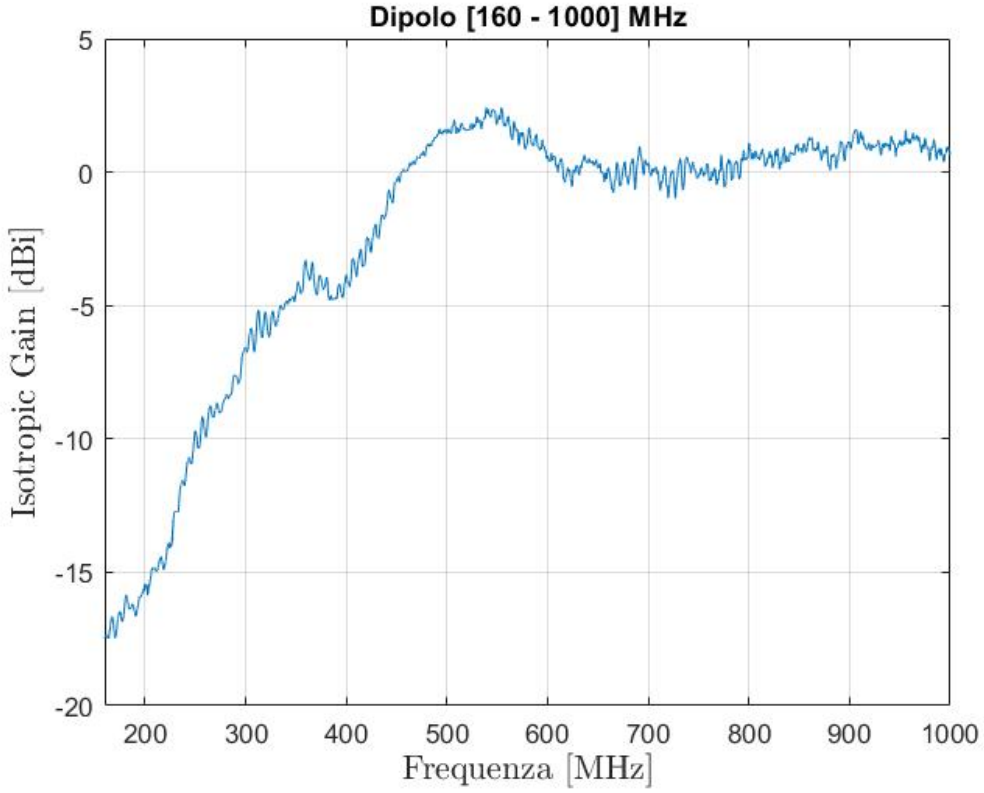


Figura 2.11: Gain.

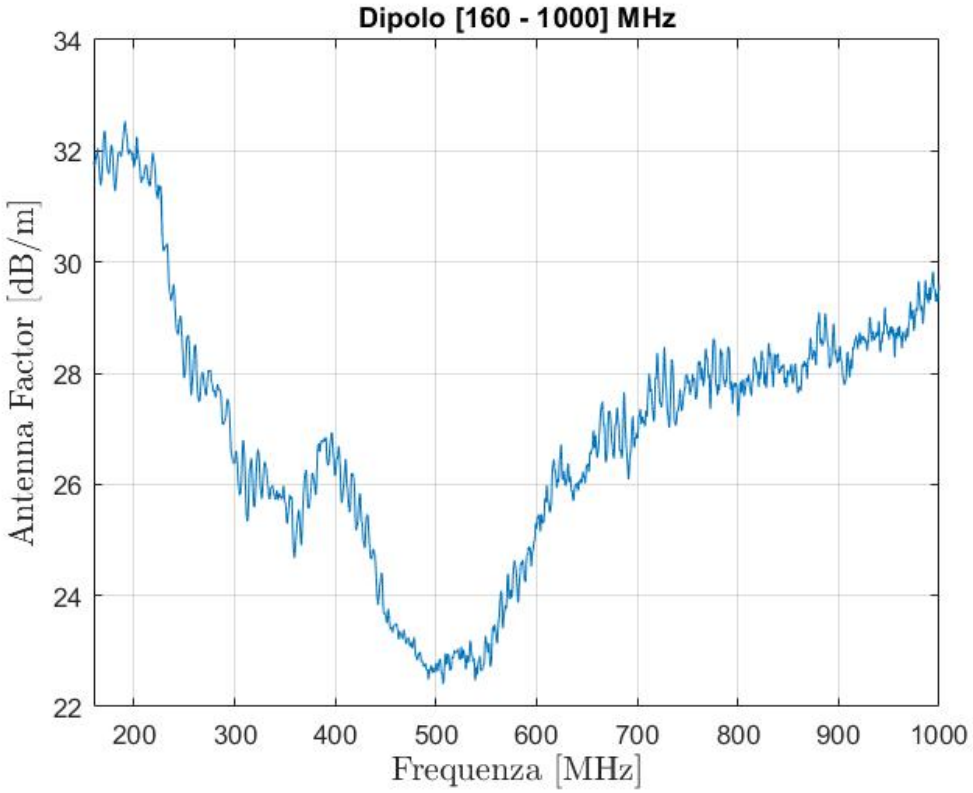


Figura 2.12: Antenna Factor.

All'esterno è stata condotta anche la misura di cross-polarizzazione (fig.2.13) per poter caratterizzare la **discriminazione di polarizzazione incrociata (CPD)**, in inglese *cross polar discrimination* (XPD); tale parametro fornisce l'informazione di quanto l'antenna risulti disaccoppiata rispetto a un onda elettromagnetica incidente polarizzata ortogonalmente ad essa. Esso è definito come il rapporto tra la componente co-polare e la componente cross-polare. Nella fig.2.14 è riportato l'andamento della CPD al variare della frequenza nella direzione di puntamento dell'antenna.

Figura 2.13: Setup misura del CPD.

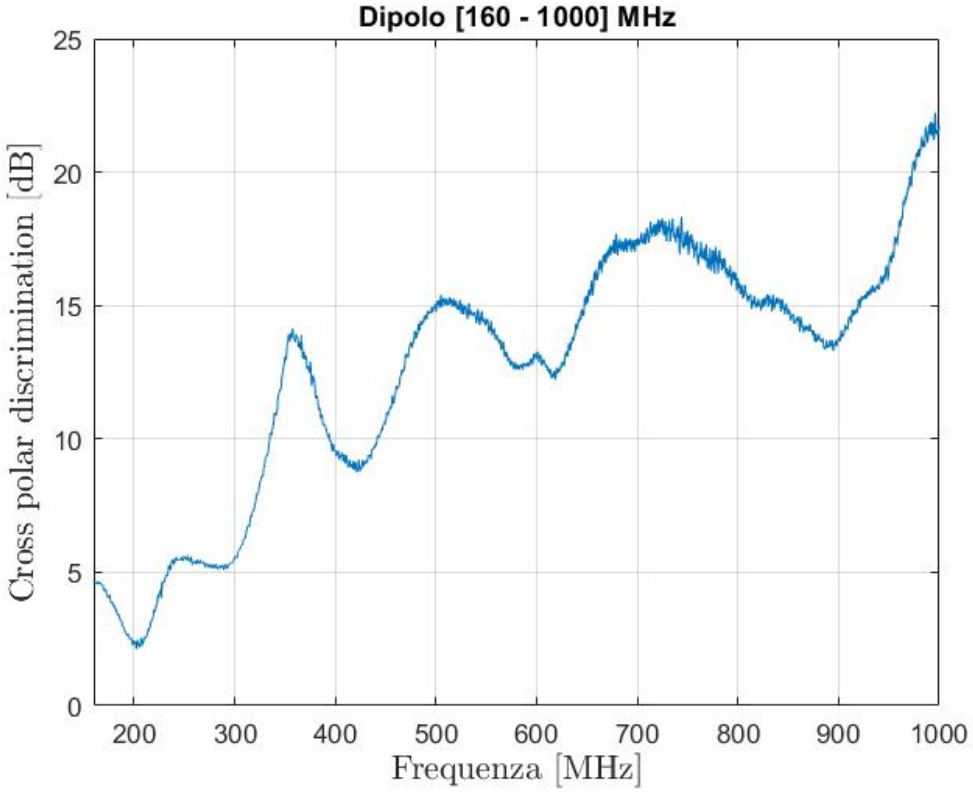


Figura 2.14: Cross polar discrimination.

Infine, in fig. 2.15 è stato riportato la misura di **S11**.

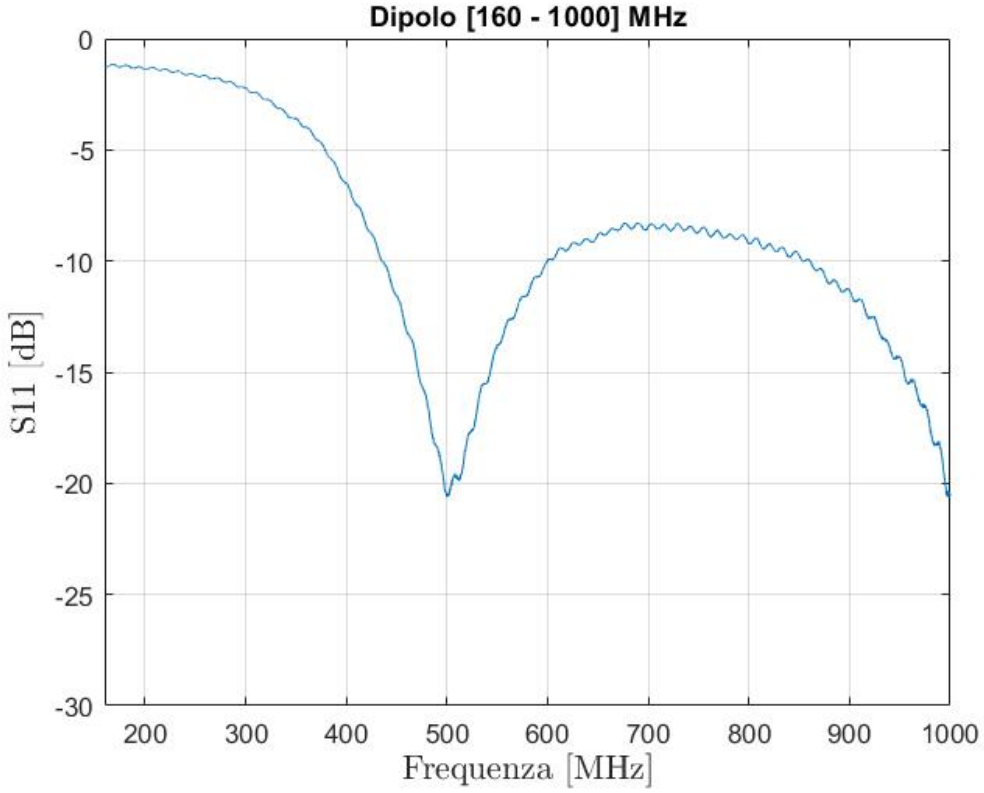


Figura 2.15: S11.

Capitolo 3

Misure di emissione irradiata

3.1 Caratterizzazione Emissioni

Nella prima fase sono state caratterizzate le emissioni irradiate degli UAV all'interno della camera anecoica. In particolare, per ogni drone, è stato misurato l'andamento spaziale del campo elettrico su una sfera di raggio 160 cm, con l'ausilio dello scanner sferico, nel range di frequenze 100 – 3600 MHz. Di seguito si riportano i range e gli step angolari della scansione sferica:

- **Azimuth**: [0°-360°] con step angolare di 20°;
- **Zenith**: [0°-140°] con step angolare di 20°.

Nei grafici successivi, per ogni frequenza, è stato riportato il valore di campo elettrico massimo tra tutte le combinazioni angolari. Le emissioni irradiate misurate hanno permesso di individuare i range di frequenza idonei all'identificazione degli UAV a disposizione. Ogni misura è stata effettuata in entrambe le polarizzazioni, successivamente alla caratterizzazione del rumore di fondo. In Fig. 3.1 si riporta lo schema del sistema di misura utilizzato e di seguito il dettaglio della strumentazione:

- EXA *signal analyzer* N9010A;
- *low noise amplifier* (LNA) MI-WAVE 955-00/50/30/KFAC;
- antenna a dipolo (200 MHz - 1 GHz);
- *double ridge horn* SH800 (1 GHz - 3.6 GHz);
- cavi RF;
- workstation.

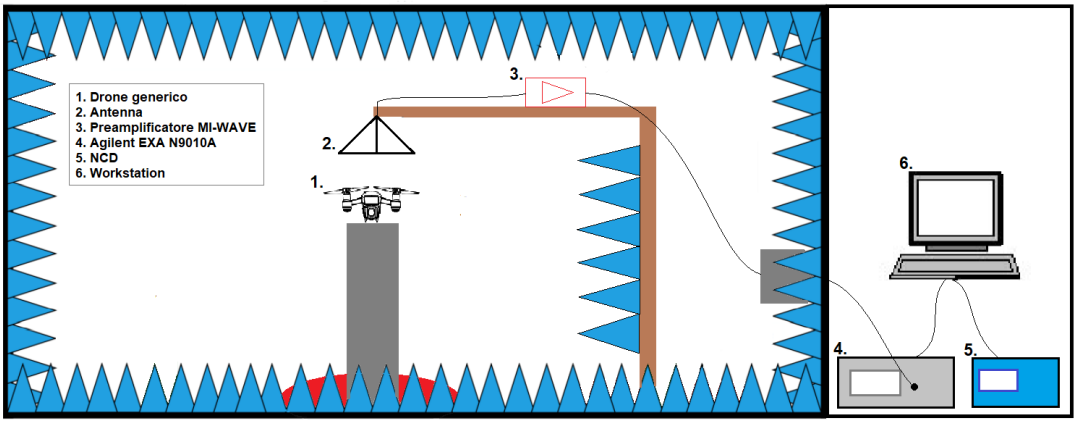


Figura 3.1: Sistema di misura schematizzato.

In ogni grafico sono stati riportati le misure e il rumore di fondo corrispettivo evidenziando i segnali di radiocontrollo/telemetria per discriminarli dalle emissioni non intenzionali. Per quanto riguarda la caratterizzazione del rumore di fondo, i parametri utilizzati sono riportati nella tabella 3.1.

3.1.1 Mavic 2

La scansione è stata effettuata mantenendo il drone con i motori al minimo (dopo aver verificato che la loro velocità non influenzasse l'emissioni irradiate) e con il telecomando acceso. In Fig. 3.2 il setup di misura.

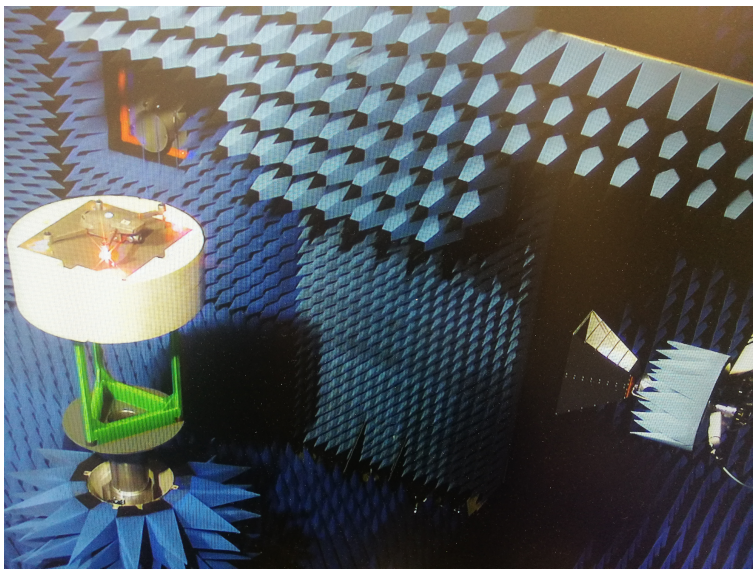


Figura 3.2: Scansione Mavic 2

Nella tabella 3.2 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito i risultati ottenuti.

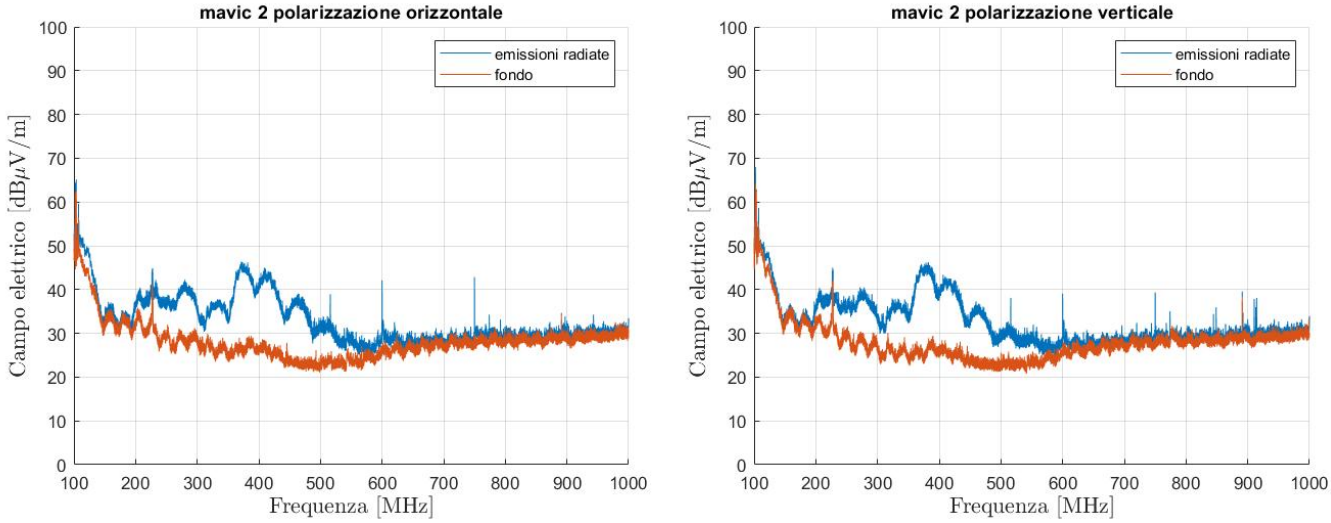


Figura 3.3: Range [100 - 1000] MHz.

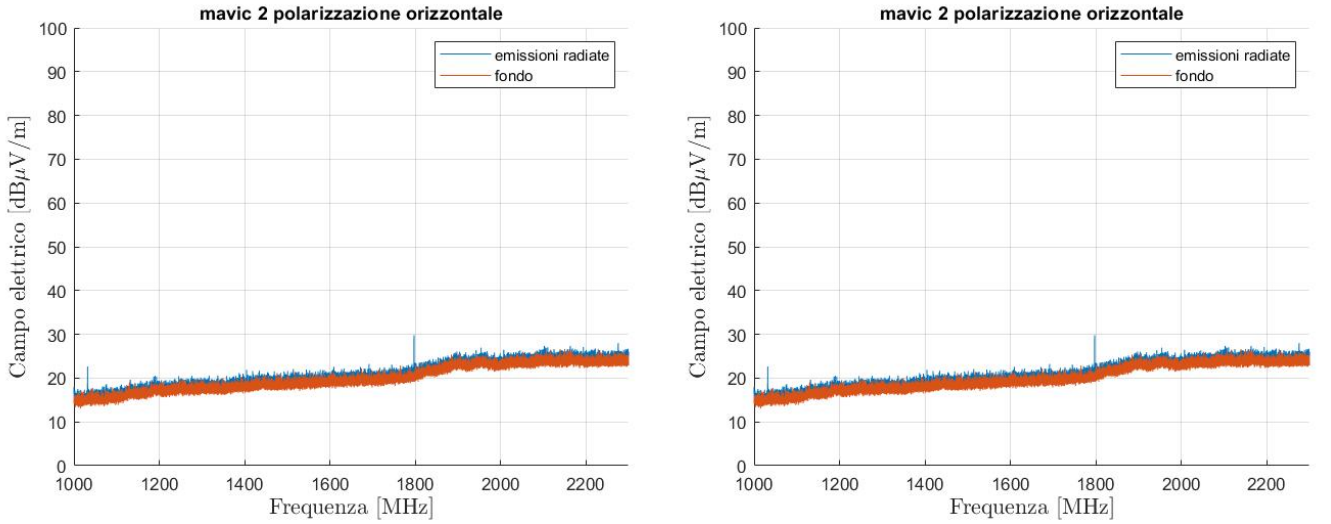


Figura 3.4: Range [1000 - 2300] MHz.

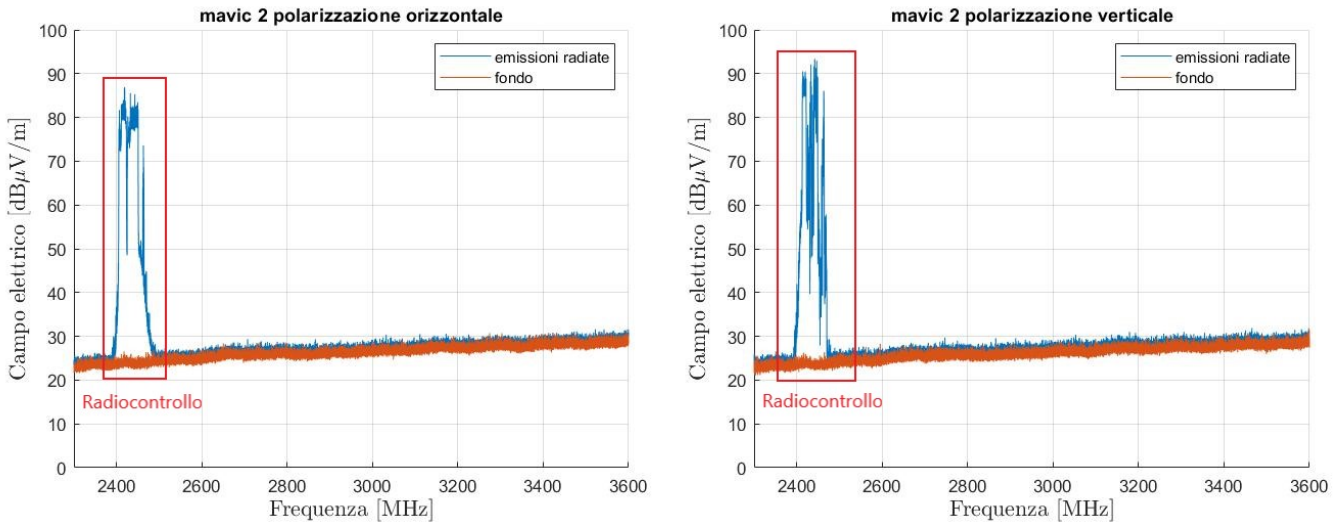


Figura 3.5: Range [2300 - 3600] MHz.

Commenti:

Nella banda 100 – 1000 MHz sono presenti delle emissioni non intenzionali che raggiungono i 40 $dB\mu V/m$; le bande successive sono prive di segnali spuri.

3.1.2 Mavic Pro Platinum

La scansione è stata effettuata mantenendo il drone con i motori al minimo (dopo aver verificato che la velocità con cui girassero i motori non influenzassero l'emissioni radiate) e con il telecomando spento.

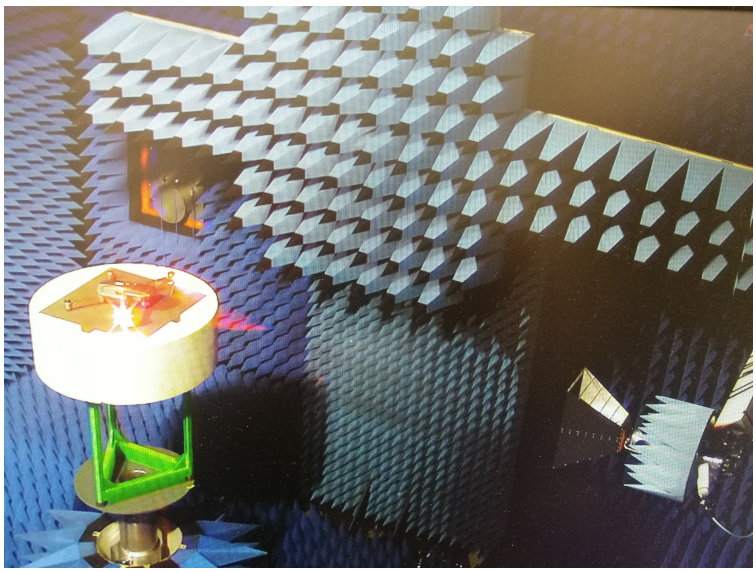


Figura 3.6: Scansione Mavic Pro Platinum

Nella tabella 3.2 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito i risultati ottenuti.

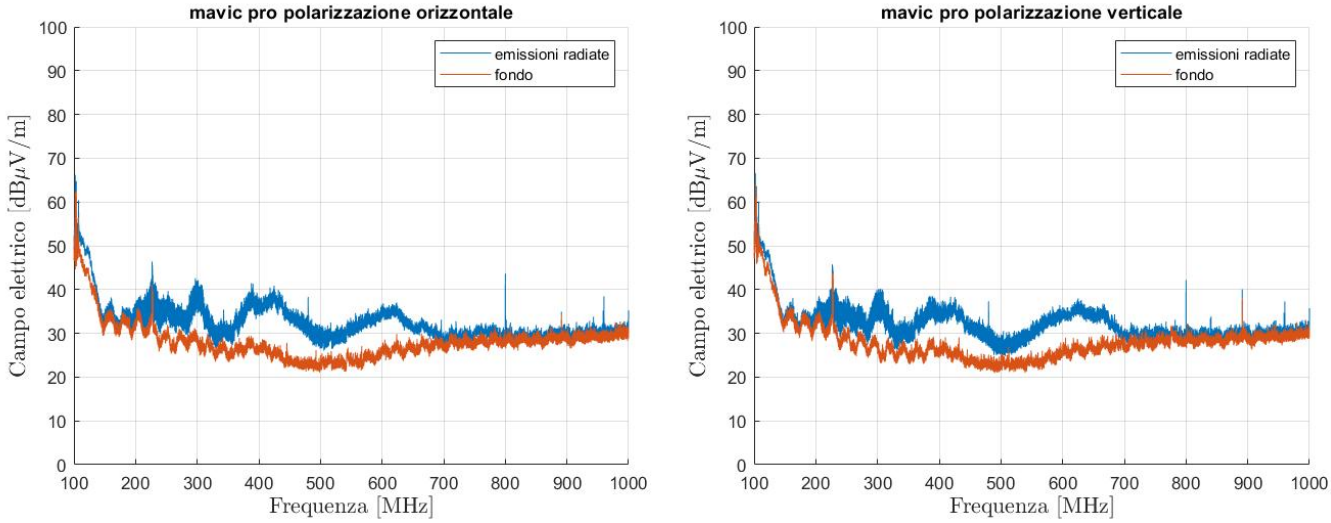


Figura 3.7: Range [100 - 1000] MHz.

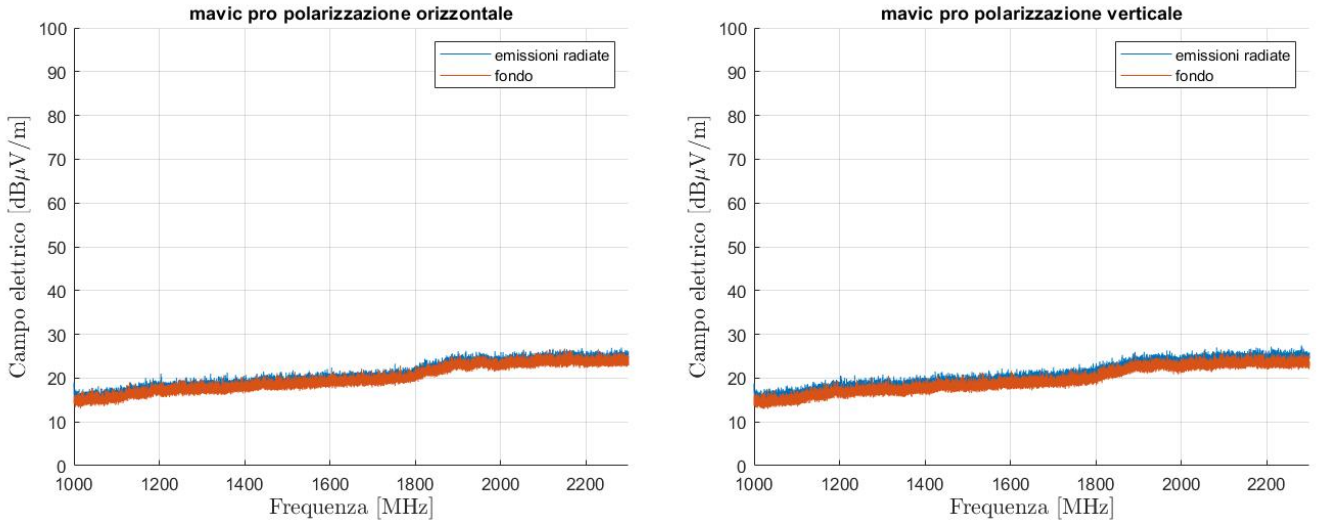


Figura 3.8: Range [2300 - 3600] MHz.

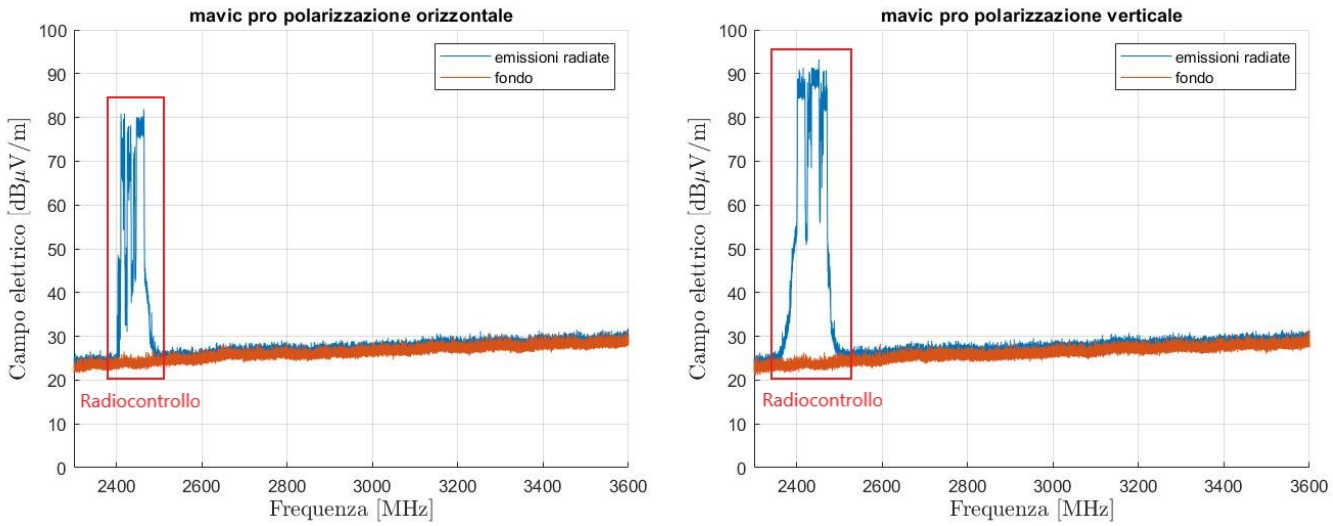


Figura 3.9: Range [2300 - 3600] MHz.

Commenti:
Nella banda 100 – 1000 MHz sono presenti dei segnali spuri con picchi che raggiungono i $40 dB\mu V/m$; le bande successive sono prive di segnali spuri.

3.1.3 Mavic mini

La scansione è stata effettuata mantenendo il drone con i motori al minimo (dopo aver verificato che la velocità con cui girassero i motori non influenzassero l'emissioni radiate) e con il telecomando acceso.

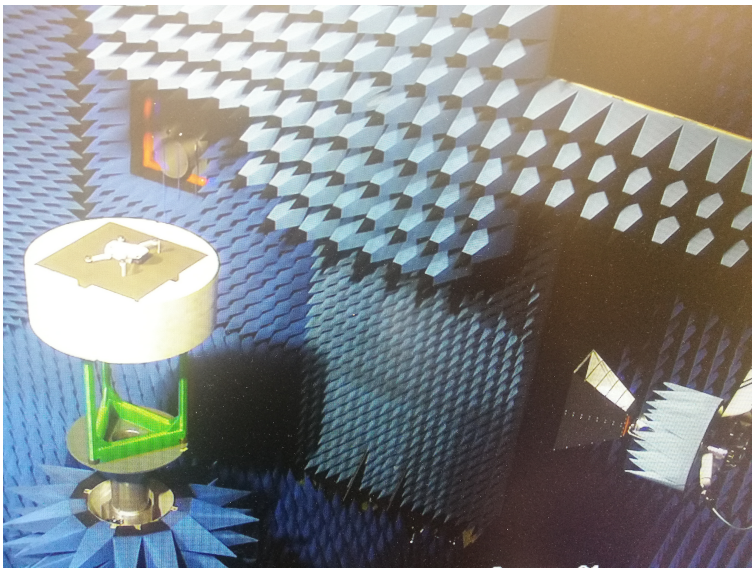


Figura 3.10: Scansione Mavic mini

Nella tabella 3.2 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito i risultati ottenuti.

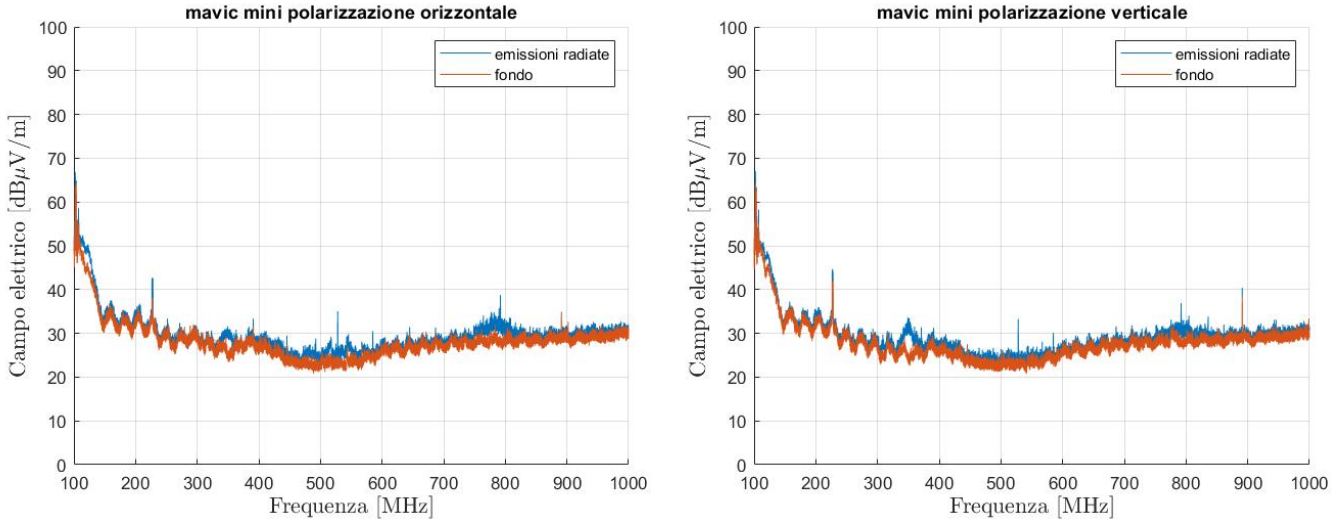


Figura 3.11: Range [100 - 1000] MHz.

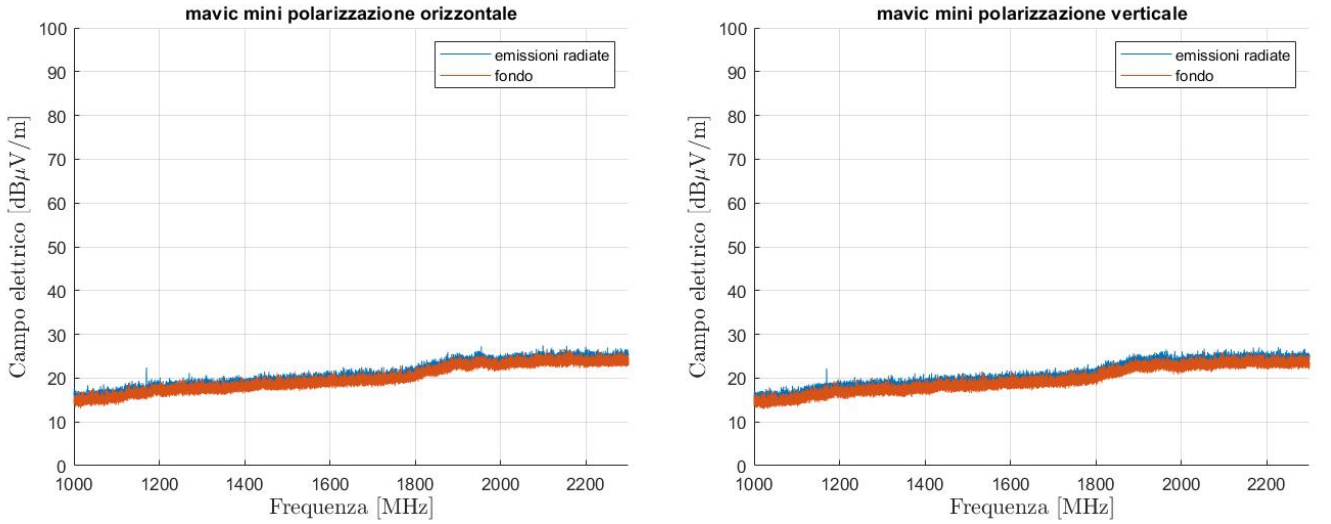


Figura 3.12: Range [1000 - 2300] MHz.

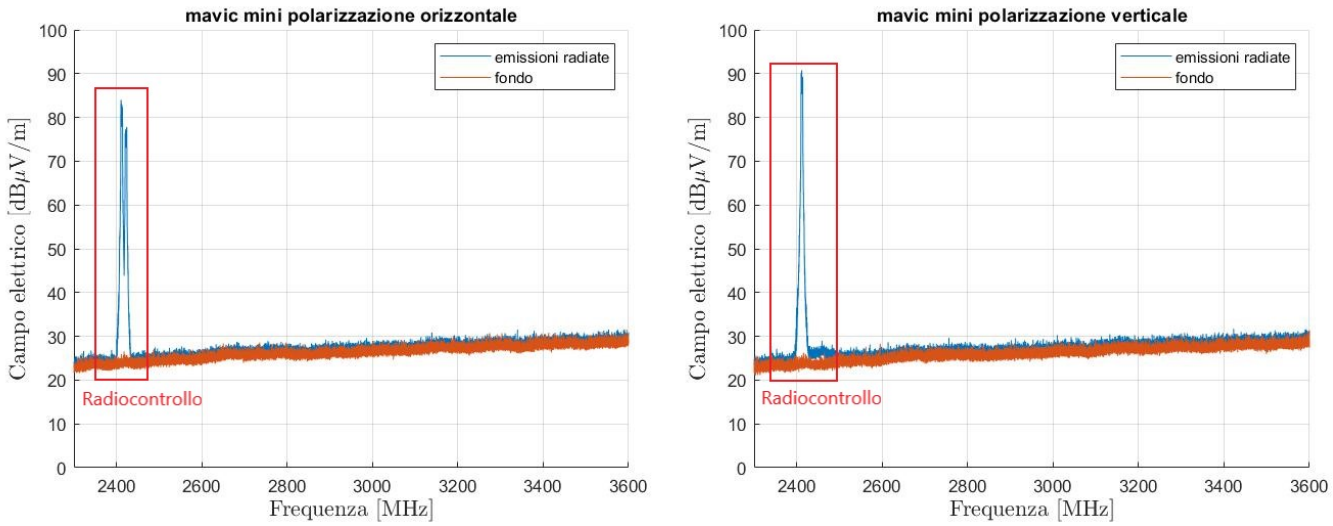


Figura 3.13: Range [2300 - 3600] MHz.

Commenti:
Il Mavic Mini presenta delle emissioni elettromagnetiche ridotte rispetto agli altri droni analizzati. Per questo motivo in questo lavoro ci si è concentrati sugli altri modelli di UAV e non sono state eseguite ulteriori misure su questo drone.

3.1.4 Autocostruito #1

La scansione è stata effettuata mantenendo il drone con i motori a metà potenza (dopo aver verificato che la velocità con cui girassero i motori non influenzassero l'emissioni radiate) e con il telecomando spento.

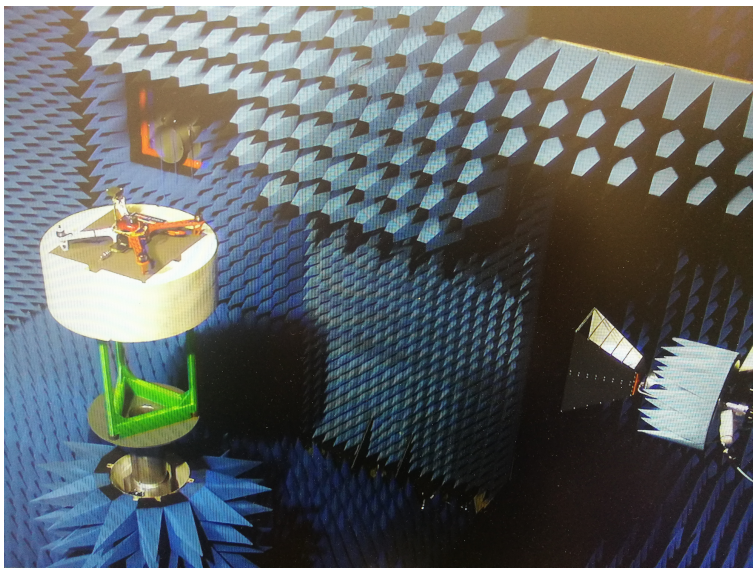


Figura 3.14: Scansione autocostruito #1

Nella tabella 3.3 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito i risultati ottenuti.

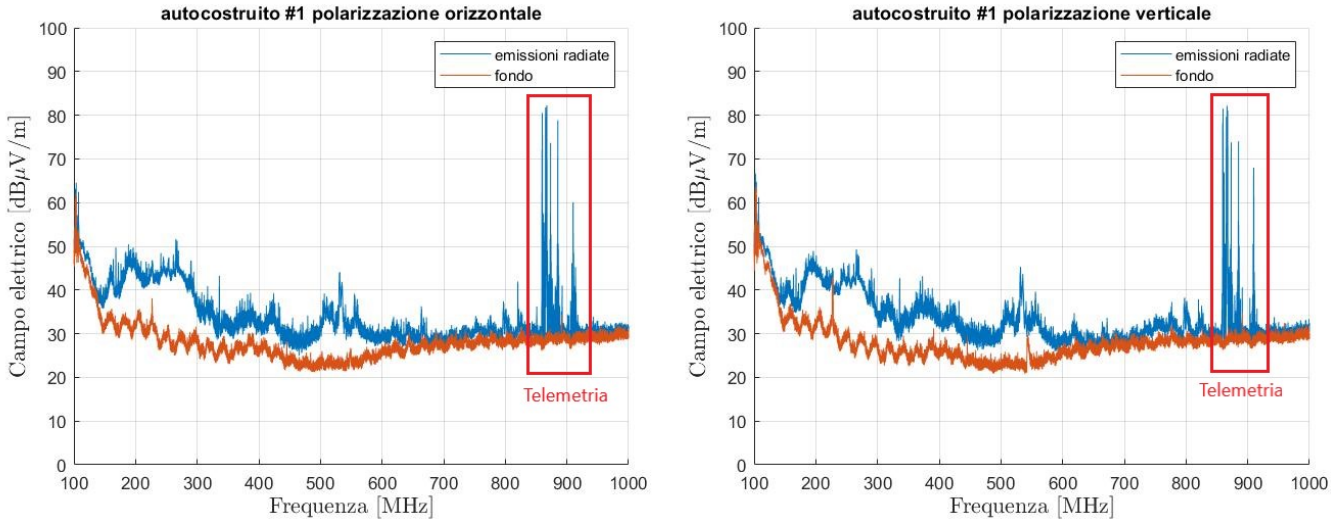


Figura 3.15: Range [100 - 1000] MHz.

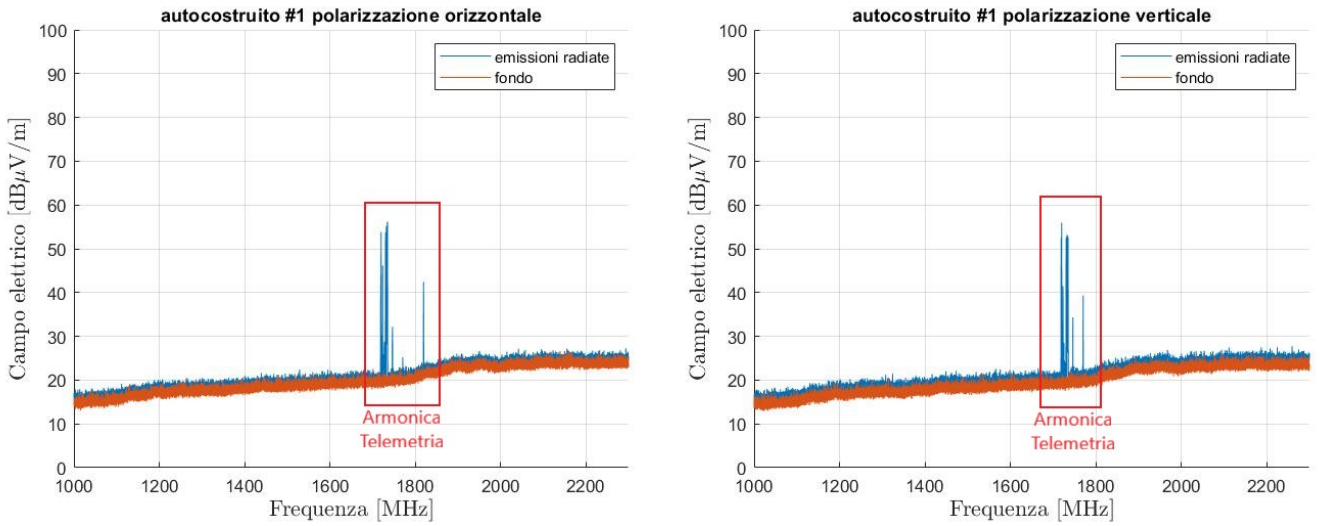


Figura 3.16: Range [1000 - 2300] MHz.

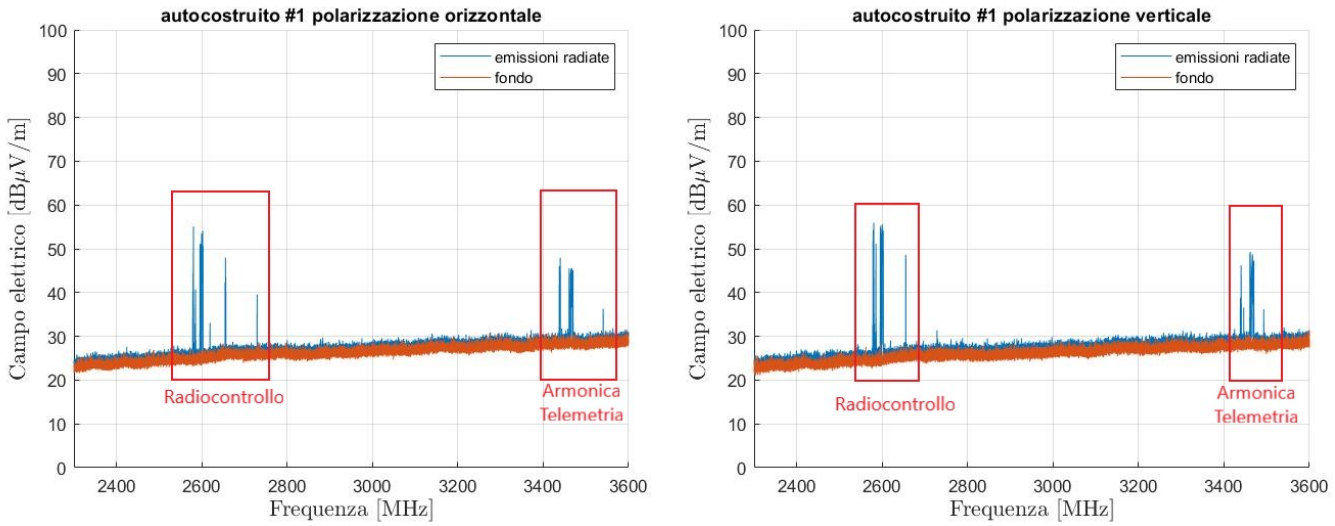


Figura 3.17: Range [2300 - 3600] MHz.

Commenti:

Il range di frequenza 1000 - 3600 MHz è popolato esclusivamente dalle armoniche della telemetria e dalla ricerca del telecomando da parte del drone. I segnali idonei ad un'analisi più approfondita risultano presenti nella banda 100 – 1000 MHz con picchi che raggiungono i $50 dB\mu V/m$.

3.1.5 Conclusioni

Grazie alle precedenti misure, la banda di frequenze 100 MHz - 1 GHz è stata identificata di interesse per i successivi studi. Sono stati registrati livelli di campo elettrico anche superiori a 40 $dB\mu V/m$, segnali che, se a banda relativamente stretta, possono essere rilevabili anche a chilometri di distanza, con antenne direttive. Le successive analisi sono state condotte per il Mavic 2, il Mavic pro e l'autocostruito #1, nella banda 160-600 MHz.

3.1.6 Parametri Agilent EXA N9010A

Trace	Max Hold
Detector	Peak
Numero scansioni	3000
Numero punti	40001
RBW	100kHz
VBW	1MHz
Attenuazione	0 dB
Sweep Type	Swept
Sweep time [100-1000] MHz	85.3 ms
Sweep time [1000-2300] MHz	120 ms
Sweep time [2300-3600] MHz	120 ms

Tabella 3.1: Parametri EXA per acquisizione del fondo, $RBW = 100kHz$.

Trace	Max Hold
Detector	Peak
Numero scansioni	200
Numero punti	40001
RBW	100kHz
VBW	1MHz
Attenuazione	0 dB
Sweep Type	Swept
Sweep time [100-1000] MHz	85.3 ms
Sweep time [1000-2300] MHz	120 ms
Sweep time [2300-3600] MHz	120 ms

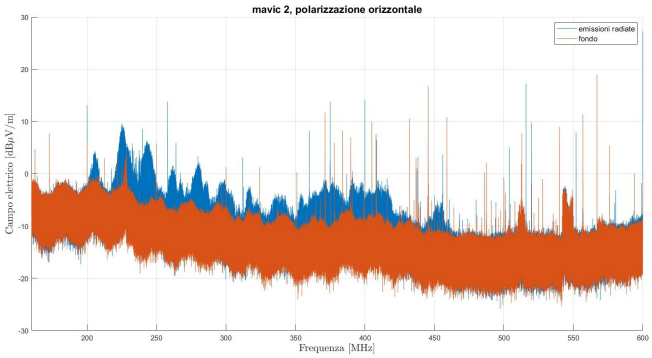
Tabella 3.2: Parametri EXA per acquisizione del mavic 2, mavic pro e mavic mini, $RBW = 100kHz$.

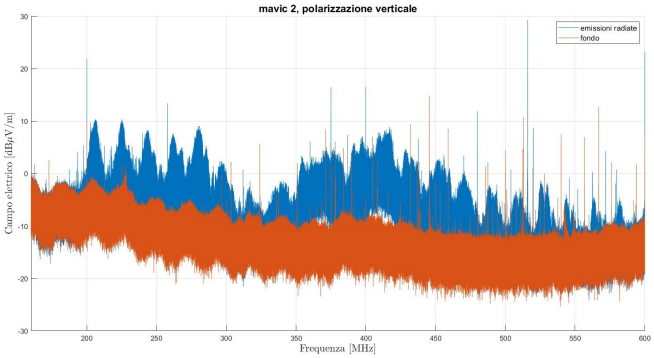
Trace	Max Hold
Detector	Peak
Numero scansioni	300
Numero punti	40001
RBW	100kHz
VBW	1MHz
Attenuazione	0 dB
Sweep Type	Swept
Sweep time [100-1000] MHz	85.3 ms
Sweep time [1000-2300] MHz	120 ms
Sweep time [2300-3600] MHz	120 ms

Tabella 3.3: Parametri EXA per acquisizione dell'autocostruito, $RBW = 100kHz$.

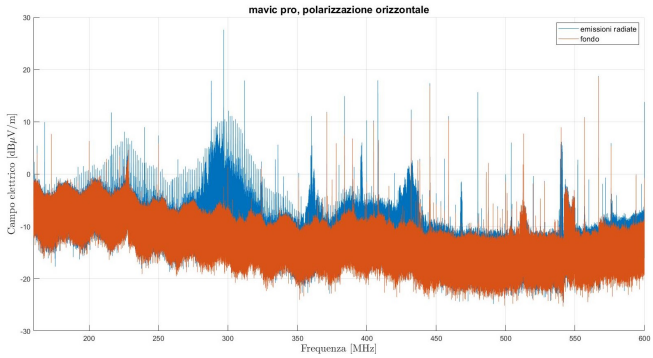
3.2 RBW=100Hz

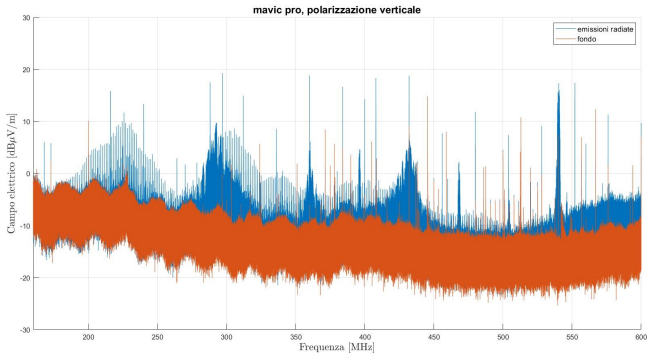
3.2.1 Mavic 2



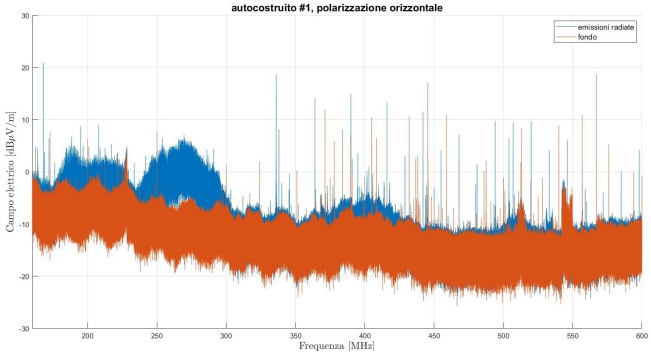


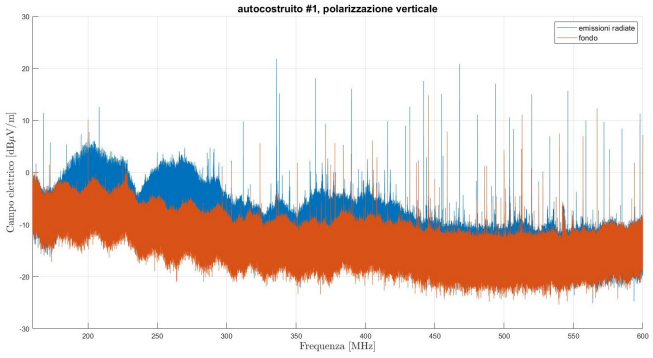
3.2.2 Mavic Pro Platinum





3.2.3 Autocostruito 1





Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	10
Numero punti	40001
RBW	100Hz
VBW	100Hz
Numero sottobande [160-600] MHz	400
Span	1.1 MHz
Attenuazione	10 dB
Sweep Type	FFT
Sweep time	≈336ms

Tabella 3.4: Parametri EXA per acquisizione $RBW = 100Hz$.

3.3 Misure *Outdoor*

In questa fase sono state svolte delle misurazioni all'aperto con lo scopo di determinare la natura propagativa dei segnali individuati precedentemente. A tal proposito le acquisizioni sono state condotte per due diverse distanze (3m e 10m) in modo tale da studiarne il decadimento spaziale all'aumentare della distanza. Di seguito la catena di misura:

- antenna log-periodica VULB 9163;
- filtro passa-alto REALCTEL INC 5H6-X200-S11 (per filtrare i segnali inferiori a 100 MHz ed evitare la possibile saturazione del ricevitore);
- *low noise amplifier* (LNA) COM-POWER PAM-103;
- EXA *Signal Analyzer* N9010A;
- cavi RF.

La misura è stata effettuata per la sola polarizzazione orizzontale, con antenna e drone posizionati a 205 cm da terra.

Figura 3.21: Misura a $10m$.

Le misure ottenute sono state opportunamente filtrate in modo da visualizzare solo le frequenze non coperte dal rumore ambientale, comparandole con le misure effettuate in camera anecoica in modo da eliminare eventuali componenti aggiuntive causate da variazioni del rumore ambientale, in quanto tempo-variante. Nelle figure successive sono riportati i risultati ottenuti.

Nella tabella 3.5 vengono riportati i parametri dell'EXA utilizzati per il mavic 2 e per l'autocostruito #1, nella tabella 3.6 i parametri utilizzati per il mavic pro.

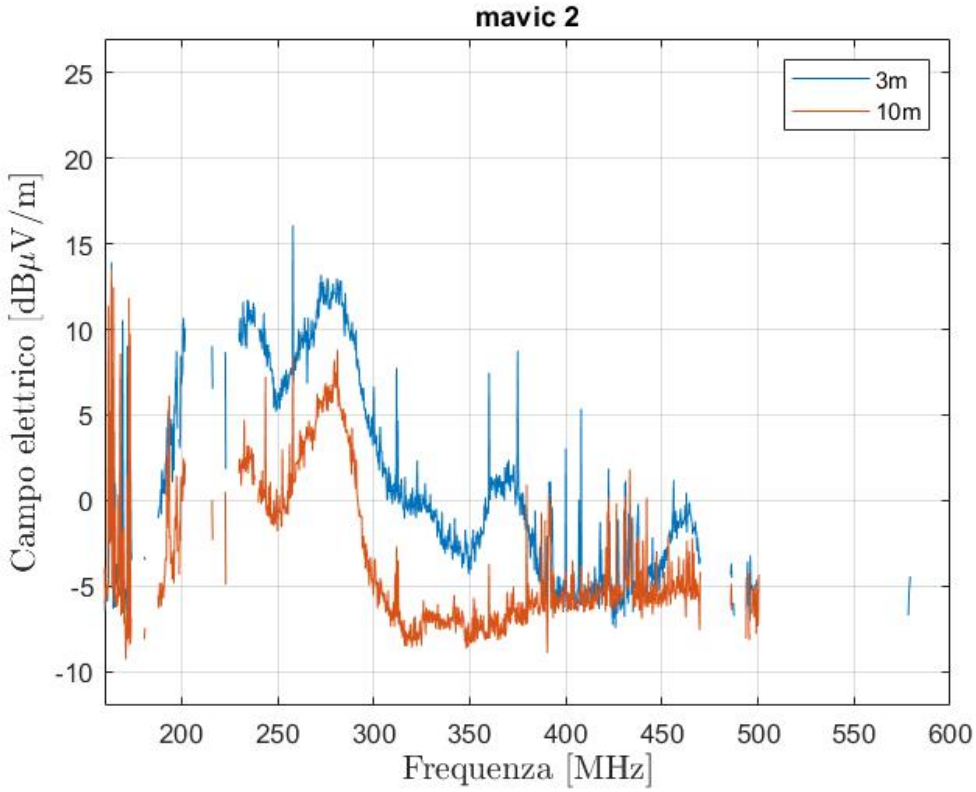


Figura 3.22: Setup di misura.

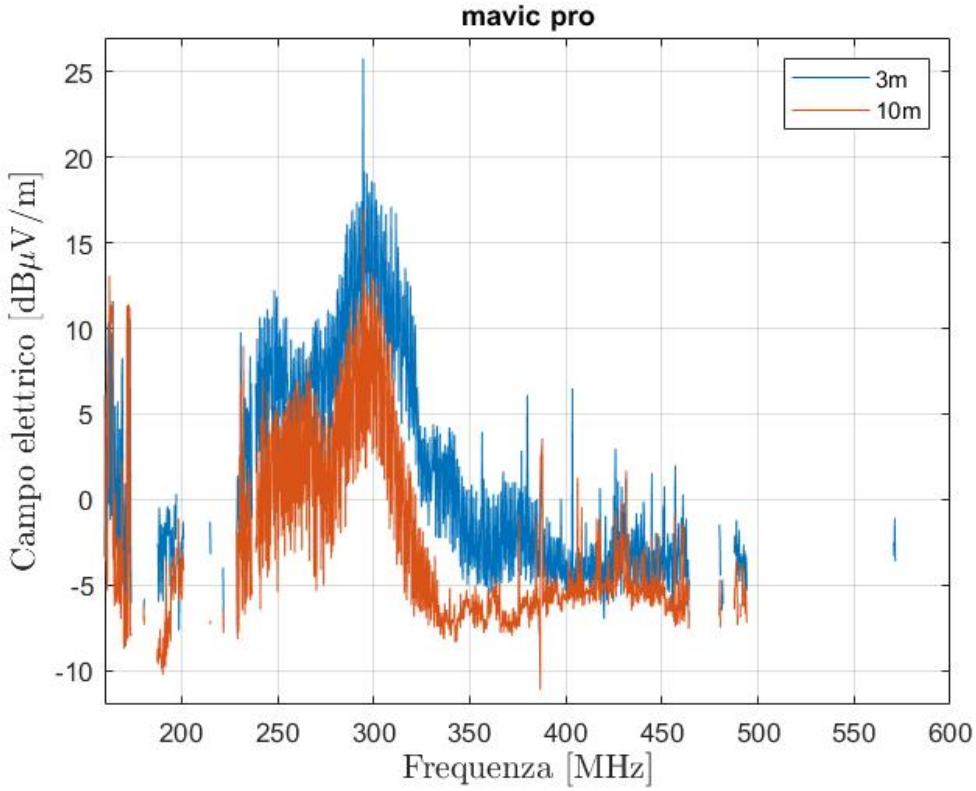


Figura 3.23: Gain.

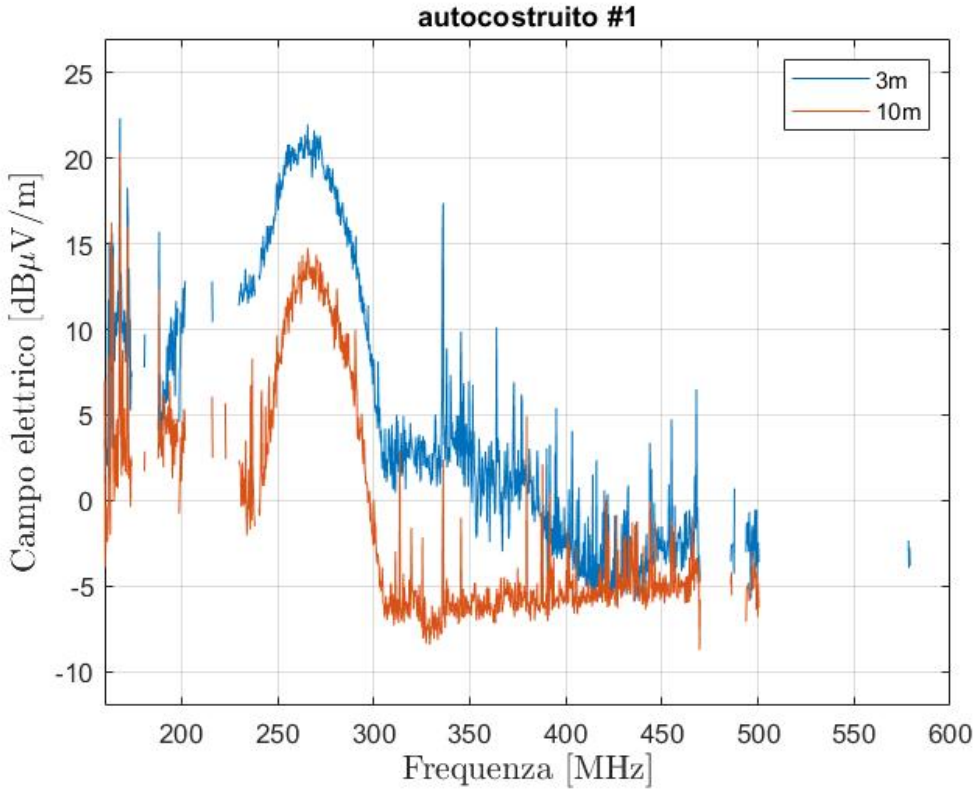


Figura 3.24: Gain.

Successivamente è stato utilizzato un modello propagativo a due raggi per verificare che il decadimento spaziale dei campi misurati fosse di tipo radiativo. In fig. 3.25 si riporta la geometria del problema.

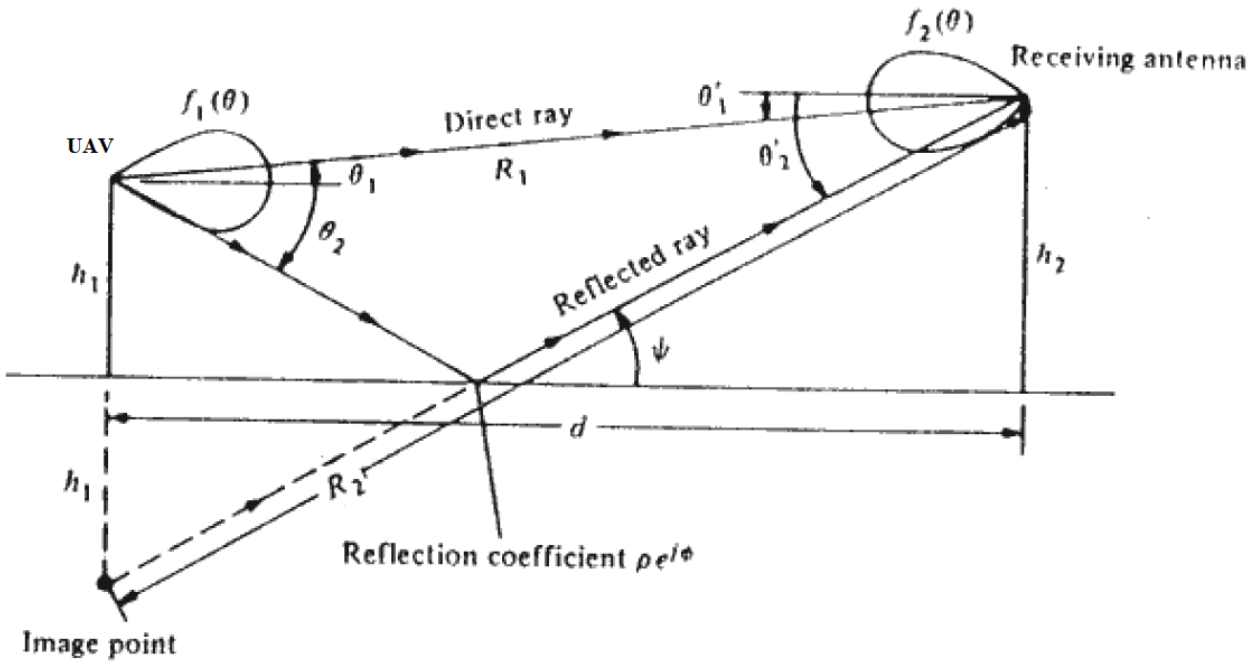


Figura 3.25: Geometria del problema.[5]

In regime di campo lontano, basandosi su un'approssimazione di ottica geometrica, il campo elettrico ricevuto dall'antenna di misura è proporzionale alla somma della componente LOS e la componente riflessa. Di seguito si riporta la formula considerata, valida per un'onda piana TEM polarizzata con il campo elettrico perpendicolare al piano di incidenza (polarizzazione orizzontale) [5]:

$$E_{ric}(d, h_1, h_2, \omega) \propto f_1(\theta_1) f_2(\theta_1^{'}) \frac{e^{-jk_0 R_1}}{4\pi R_1} + \rho e^{j\phi} f_1(\theta_2) f_2(\theta_2^{'}) \frac{e^{-jk_0 R_2}}{4\pi R_2} \tag{3.1}$$

dove:

- E_{ric} è il campo elettrico ricevuto in corrispondenza dell'antenna ricevente (in questo caso la componente orizzontale);
- f_1 è la funzione direttività della sorgente, cioè l'UAV nel setup in considerazione;
- f_2 è la funzione direttività della sorgente dell'antenna di misura in ricezione utilizzata;
- θ_1, $\theta_1^{'}$, θ_1 e $\theta_1^{'}$ sono gli angoli formati dal raggio diretto e dal raggio riflesso così come riportato in FIGURA;
- R_1 è la lunghezza del raggio diretto;
- R_2 è la lunghezza del raggio riflesso;
- d è la distanza tra l'UAV e l'antenna in ricezione;
- h_1 e h_2 sono rispettivamente le altezze dal terreno del drone e dell'antenna;
- $\rho e^{j\phi}$ è il coefficiente di riflessione del terreno.

Per la modellizzazione del coefficiente di riflessione del terreno è stata utilizzata la seguente espressione [5]:

$$\rho e^{j\phi} = \frac{\sin\Psi - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2\psi}}{\sin\Psi + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2\psi}} \tag{3.2}$$

dove

- Ψ è angolo d'incidenza;
- ϵ_r è la permettività elettrica relativa;
- $\chi = \sigma/\omega\epsilon_0$, dove σ è la conducibilità elettrica del terreno.

La permettività elettrica relativa ϵ_r è stata considerata pari a 10 e la conducibilità del terreno σ pari a $50 \cdot 10^{-3}\ S/m$.

Il fattore di decadimento spaziale ($F_{dec-teo}$) teorico tra 3 e 10 metri è stato modellizato attraverso la seguente formula:

$$F_{dec-teo}(\omega) = \frac{E_{ric}(d = 3m, h_1 = 2.05m, h_2 = 2.05m, \omega)}{E_{ric}(d = 10m, h_1 = 2.05m, h_2 = 2.05m, \omega)} \tag{3.3}$$

Successivamente è stato confrontato con il fattore di decadimento spaziale risultante dar rapporto tra le misure di emissione irradiata a 3 m e 10 m. Di seguito si riportano i risultati per i tre droni analizzati.

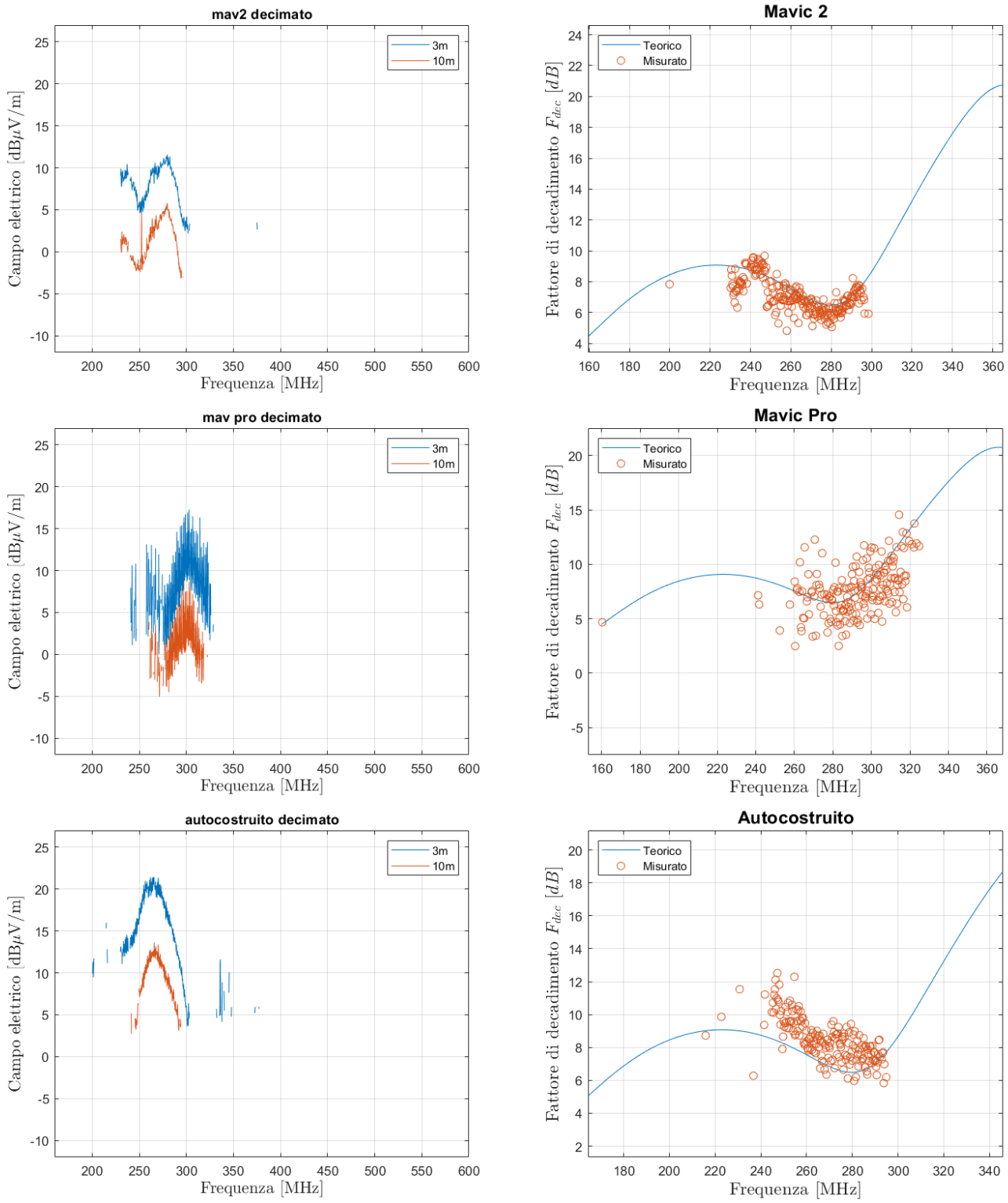


Figura 3.26: A sinistra i risultati delle acquisizioni a $3m$ e $10m$ a destra l'attenuazione spaziale ottenuta con quella teorica.

3.3.1 Conclusioni

Il buon accordo tra le misure e il modello propagativo, conferma sperimentalmente l'ipotesi che le emissioni non intenzionali misurate sono di tipo radiativo e per questo misurabili a distanze più elevate, a differenza delle componenti reattive.

3.3.2 Parametri Agilent EXA N9010A

Trace	Max Hold
Detector	Peak
Numero scansioni	50
Numero punti	40001
RBW	1kHz
VBW	1kHz
Numero sottobande [160-600]MHz	40
Span	11 MHz
Attenuazione	10 dB
Sweep Type	FFT
Sweep time	≈1.18s

Tabella 3.5: Parametri EXA per acquisizione del mavic 2 e dell'autocostruito #1 in campo aperto, $RBW = 1kHz$.

Trace	Max Hold
Detector	Peak
Numero scansioni	50
Numero punti	40001
RBW	1kHz
VBW	1kHz
Attenuazione	10 dB
Sweep Type	FFT
Numero sottobande [160-600]MHz	40
Span	11 MHz
Sweep time	≈1.18s
Numero sottobande [600-700]MHz	10
Span	10 MHz
Sweep time	≈1.08s

Tabella 3.6: Parametri EXA per acquisizione del mavic pro in campo aperto,, $RBW = 1kHz$.

Capitolo 4

Analisi dei segnali

Dopo aver individuato le bande di interesse popolate dalle emissioni irradiate non intenzionali, aver valutato che i livelli di campo elettrico fossero teoricamente idonei per una loro scoperta a distanze significative ed aver verificato sperimentalmente il loro comportamento radiativo, sono stati effettuati ulteriori approfondimenti e misure per caratterizzare il comportamento temporale dei segnali individuati e il conseguente contenuto spettrale. In questa fase ci si è concentrati solamente su misure in polarizzazione orizzontale in quanto si voleva realizzare un primo prototipo di sistema di rilevamento ad un'unica polarizzazione. Il grado di polarizzazione di un segnale, comunque, è una rilevante informazione al fine della scoperta e identificazione di un drone e per questo un sistema futuro dovrebbe sfruttare entrambe le polarizzazioni.

4.1 Misure al variare della RBW

Per prima cosa sono state effettuate delle acquisizioni con *resolution bandwidth* (RBW) maggiori rispetto a quella precedentemente utilizzata (100 kHz). Sono state quindi utilizzate come RBW 10 kHz e 1 kHz e le misure sono state eseguite in modaltà *trace max hold* e *trace average* Il range di frequenza su cui è stata effettuata l'acquisizione è stata suddivisa in sottobande al fine di ottenere un numero di punti dello strumento di misura che risultasse quattro volte il rapporto tra lo *span* in frequenza e la RBW utilizzati. Di seguito le misure eseguite sui droni.

4.1.1 Mavic 2

Durante l'acquisizione i motori dell'UAV non erano in moto al fine di risparmiare la carica della batteria e il telecomando era spento. Nella tabella 4.1 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito i risultati ottenuti.

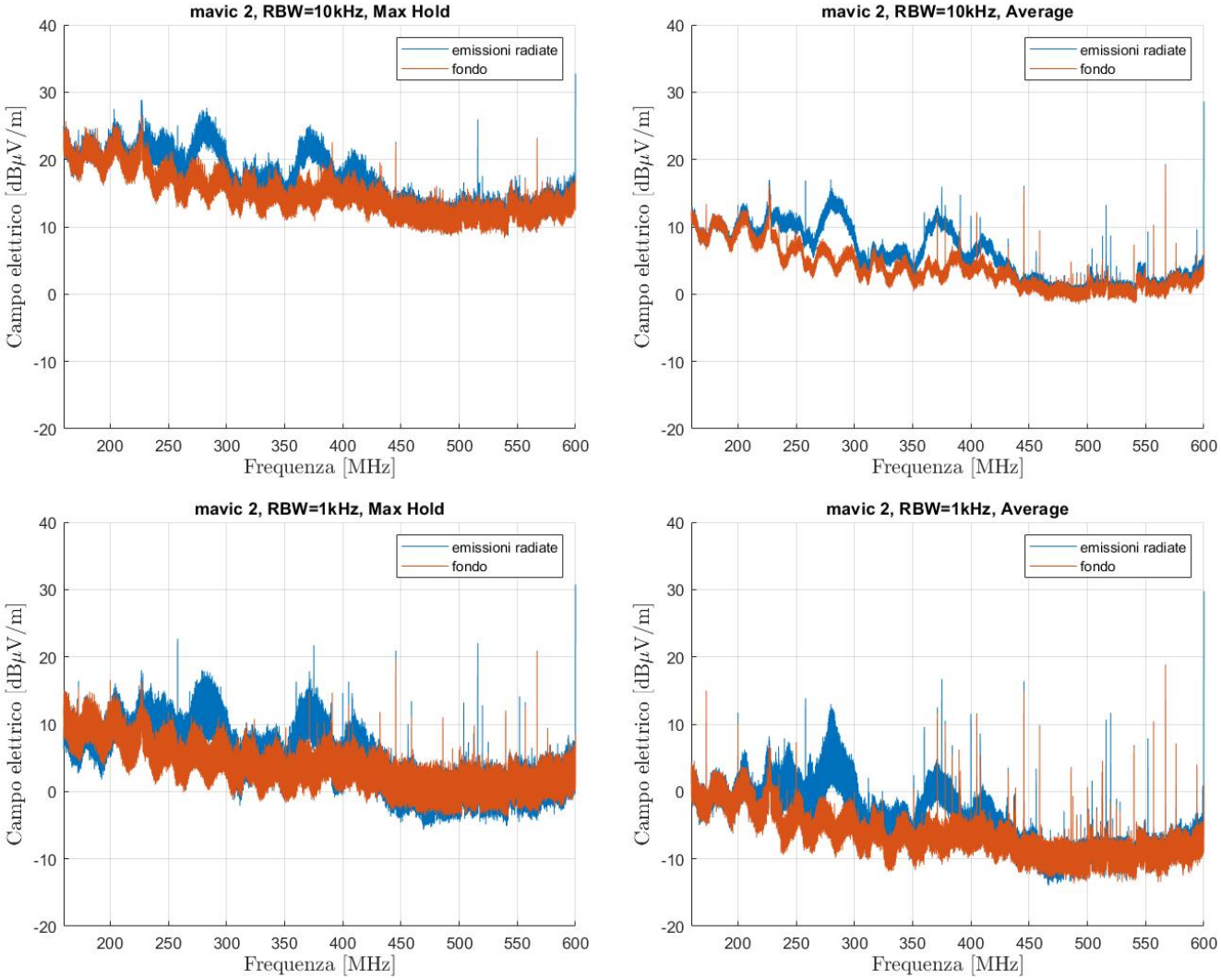


Figura 4.1: Risultati mavic 2 al variare della RBW e modalità d'acquisizione.

4.1.2 Mavic Pro Platinum

Durante l'acquisizione i motori sono stati lasciati al minimo e il telecomando spento. Nella tabella 4.2 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito le misure.

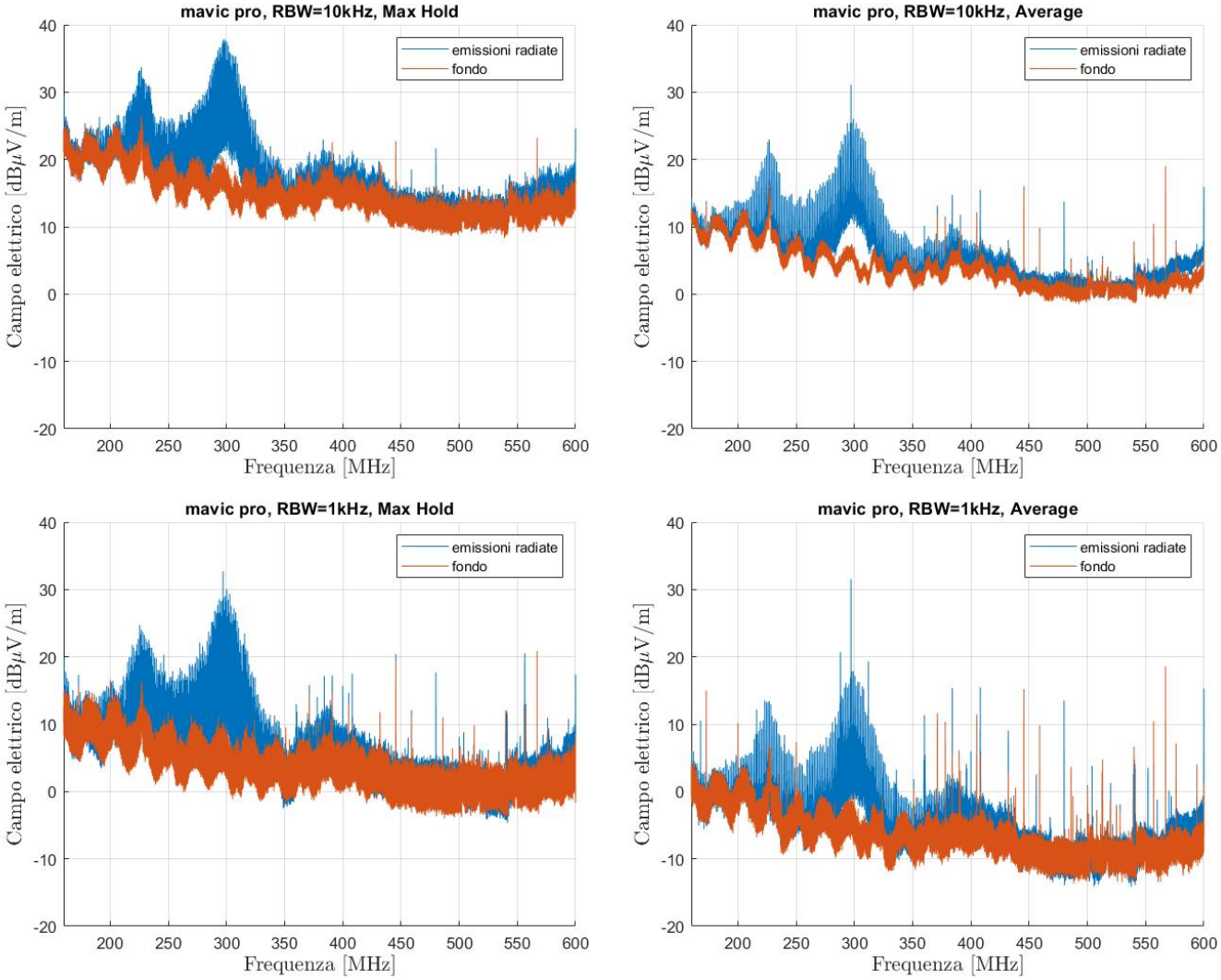


Figura 4.2: Risultati mavic pro al variare della RBW e modalità d'acquisizione.

4.1.3 Autocostruito #1

Durante l'acquisizione i motori sono stati lasciati fermi al fine di risparmiare batteria e con il telecomando spento. Nella tabella 4.1 vengono riportati i parametri dell'EXA e di seguito i risultati ottenuti.

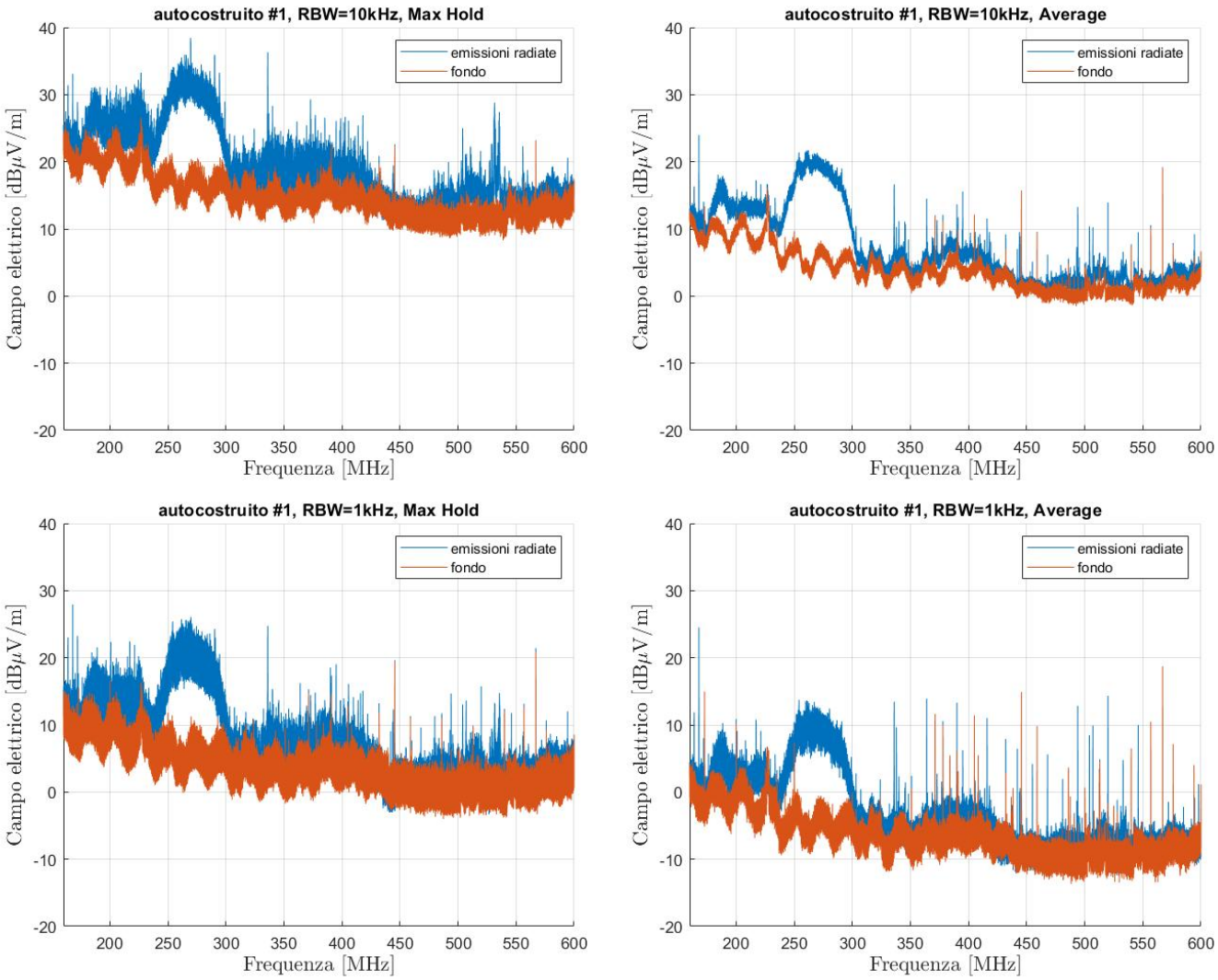


Figura 4.3: Risultati autocostruito#1 al variare della RBW e modalità d'acquisizione.

4.1.4 Conclusioni

Dai risultati ottenuti si può vedere come diminuendo la *resolution bandwidth* o a parità di RBW passando da una misura *trace max hold* a una *trace average*, molti segnali misurati tendono a un livello di campo elettrico inferiore, ciò è dovuto al fatto che tali segnali sono a banda larga rispetto alla RBW di 10 kHz. Al contrario i segnali che non hanno subito considerevoli variazioni in ampiezza al variare della RBW sono a banda stretta. Quest'ultimi sono più adatti ad una loro misurazione a distanze maggiori in quanto permettono di ottenere livelli di rapporto segnale-rumore più elevati al diminuire della RBW.

4.1.5 Parametri Agilent EXA N9010A

RBW	1 kHz		10 kHz	
Trace	Max Hold	Average	Max Hold	Average
Detector	Peak	Sample	Peak	Sample
VBW	10 kHz	10 kHz	100 kHz	100 kHz
Attenuazione	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
Numero scansioni	50	50	100	100
Numero punti	40001	40001	40001	40001
Sweep Type	FFT	FFT	Swept	Swept
Numero sottobande	40	40	4	4
Span	11 MHz	11 MHz	110 MHz	110 MHz
Sweep time	≈1.18s	≈1.18s	1.02s	3.21s

Tabella 4.1: Parametri EXA per acquisizione del mavic 2 e dell'autocostruito #1 al variare della RBW e modalità d'acquisizione.

RBW	1 kHz		10 kHz	
Trace	Max Hold	Average	Max Hold	Average
Detector	Peak	Sample	Peak	Sample
VBW	10 kHz	10 kHz	100 kHz	100 kHz
Attenuazione	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
Numero scansioni	50	50	100	100
Numero punti	40001	40001	40001	40001
Sweep Type	FFT	FFT	Swept	Swept
Numero sottobande [160-600]MHz	40	40	4	4
Span	11 MHz	11 MHz	110 MHz	110 MHz
Sweep time	≈1.18s	≈1.18s	1.02s	3.21s
Numero sottobande [600-700]MHz	10	10	1	1
Span	10 MHz	10 MHz	100 MHz	100 MHz
Sweep time	≈1.08s	≈1.08s	925ms	2.92s

Tabella 4.2: Parametri EXA per acquisizione del mavic pro al variare della RBW e modalità d'acquisizione.

4.2 Misure di radiation pattern

In questa fase sono state condotte delle scansioni sferiche sui picchi più significativi dei droni analizzati, in modo da studiare la distribuzione spaziale dei campi misurati. In particolare per ogni segnale

caratterizzato è stata condotta una misurazione di *max hold* e di *average* con i seguenti range e risoluzioni angolari:

- **Azimuth:** [0° - 360°] con step angolare di 20°;
- **Zenith:** [0° - 140°] con step angolare di 20°.

Nella tabella 4.3 vengono riportati i parametri dell'EXA utilizzati per tutti i drone.

Trace	Max Hold	Average
Detector	Peak	Sample
Numero scansioni	200	200
Numero punti	40001	40001
RBW	1kHz	1kHz
VBW	10kHz	10kHz
Span	100 kHz	100 kHz
Attenuazione	10 dB	10 dB
Sweep Type	FFT	FFT
Sweep time	≈5.53ms	≈5.53ms

Tabella 4.3: Parametri EXA per scansione sferica.

Sono state eseguite solamente misurazioni della componente ϕ del campo elettrico (dipolo in polarizzazione orizzontale) in quanto il prototipo del sistema di scoperta che si è voluto realizzare (descritto nel successivo capitolo) si basava su misure in polarizzazione orizzontale. Si è comunque definito che per una caratterizzazione più precisa del grado di polarizzazione e del radiation pattern sarebbe auspicabile utilizzare dei dipoli a banda stretta con una maggiore *cross polar discrimination*.

I risultati riportati sono mostrati sia in coordinate sferiche sia in coordinate cartesiane. Per brevità in questo capitolo sono presentati solo due caratterizzazioni dei segnali per ogni drone, i risultati completi sono forniti in appendice.

4.2.1 Mavic 2

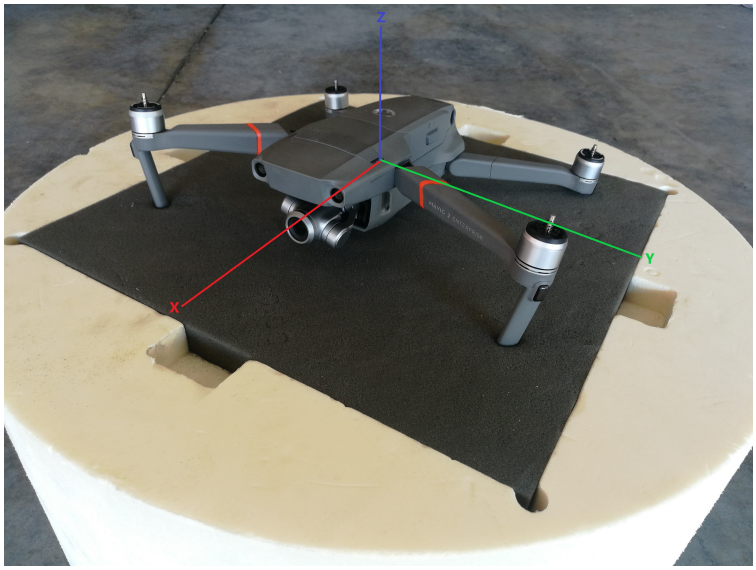


Figura 4.4: Sistema di riferimento sferico mavic 2.

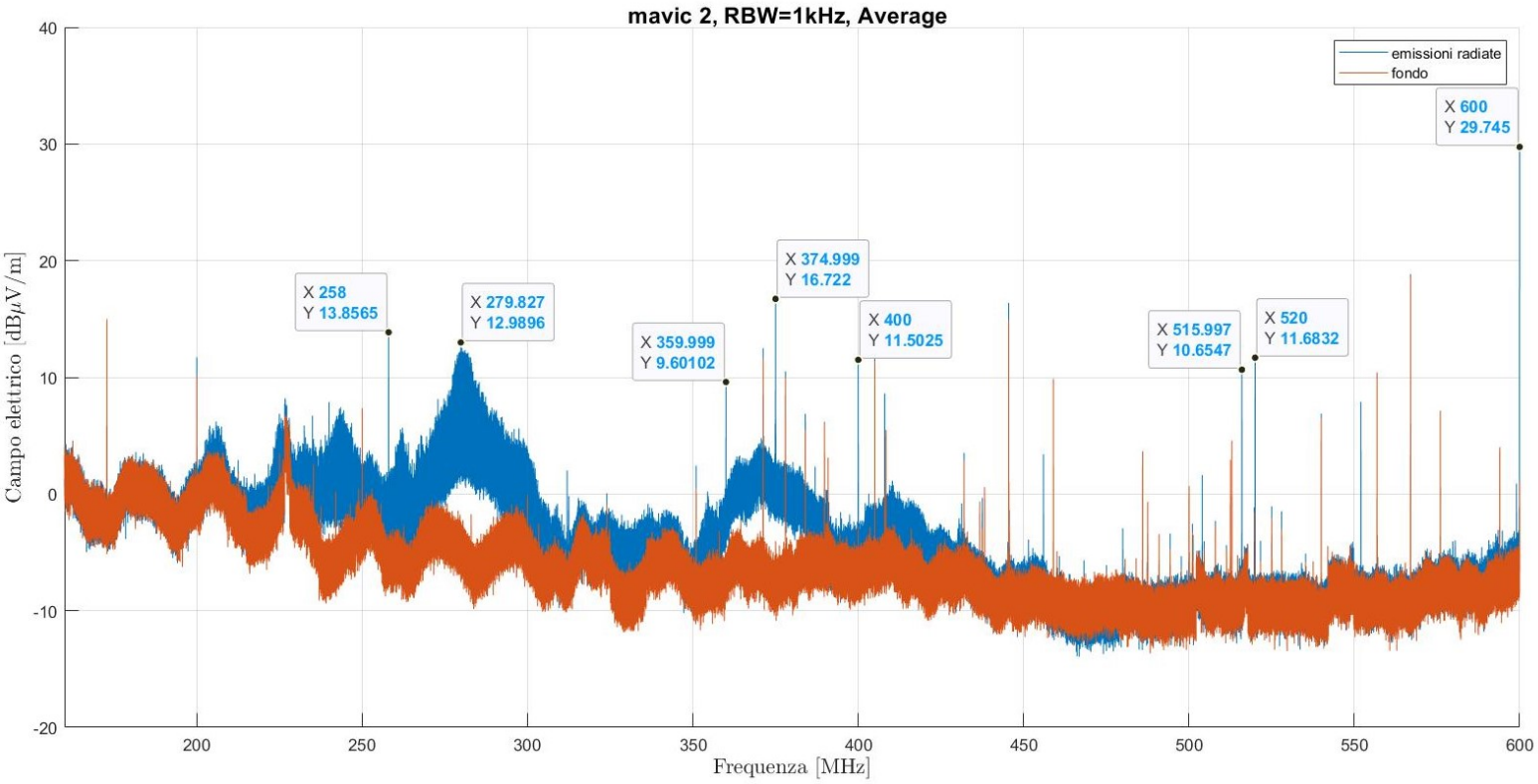


Figura 4.5: Elenco dei picchi indagati mavic 2.

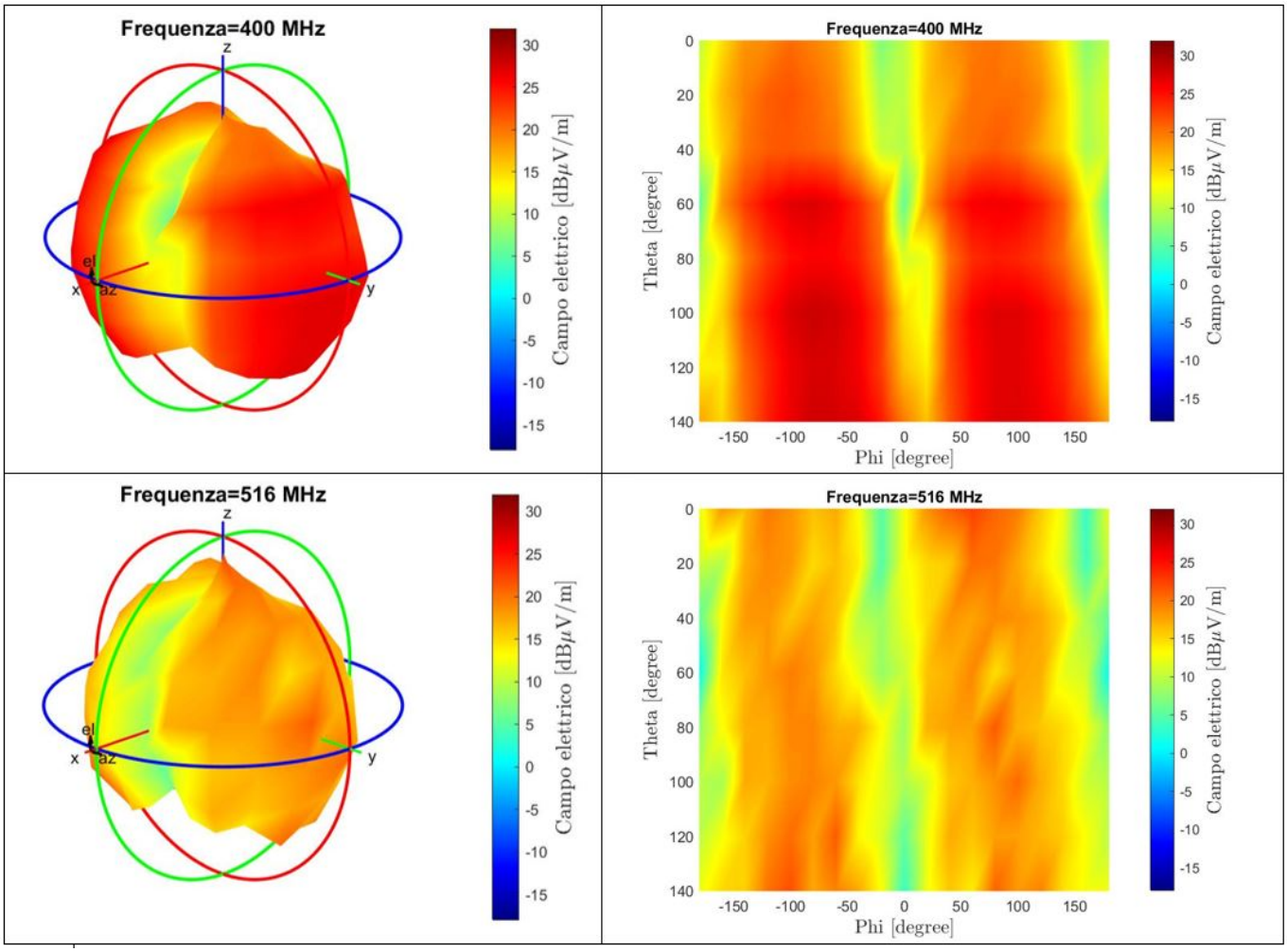


Figura 4.6: *Radiation pattern* di due segnali del mavic 2.

4.2.2 Mavic Pro

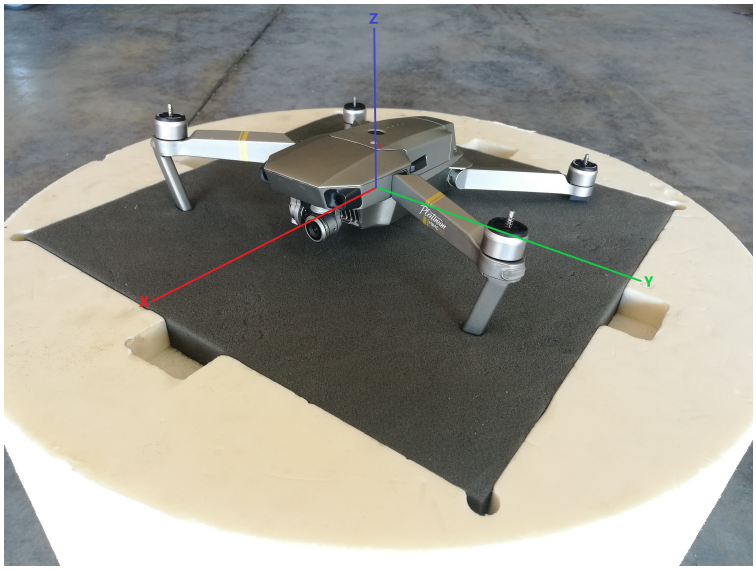


Figura 4.7: Sistema di riferimento sferico mavic pro.

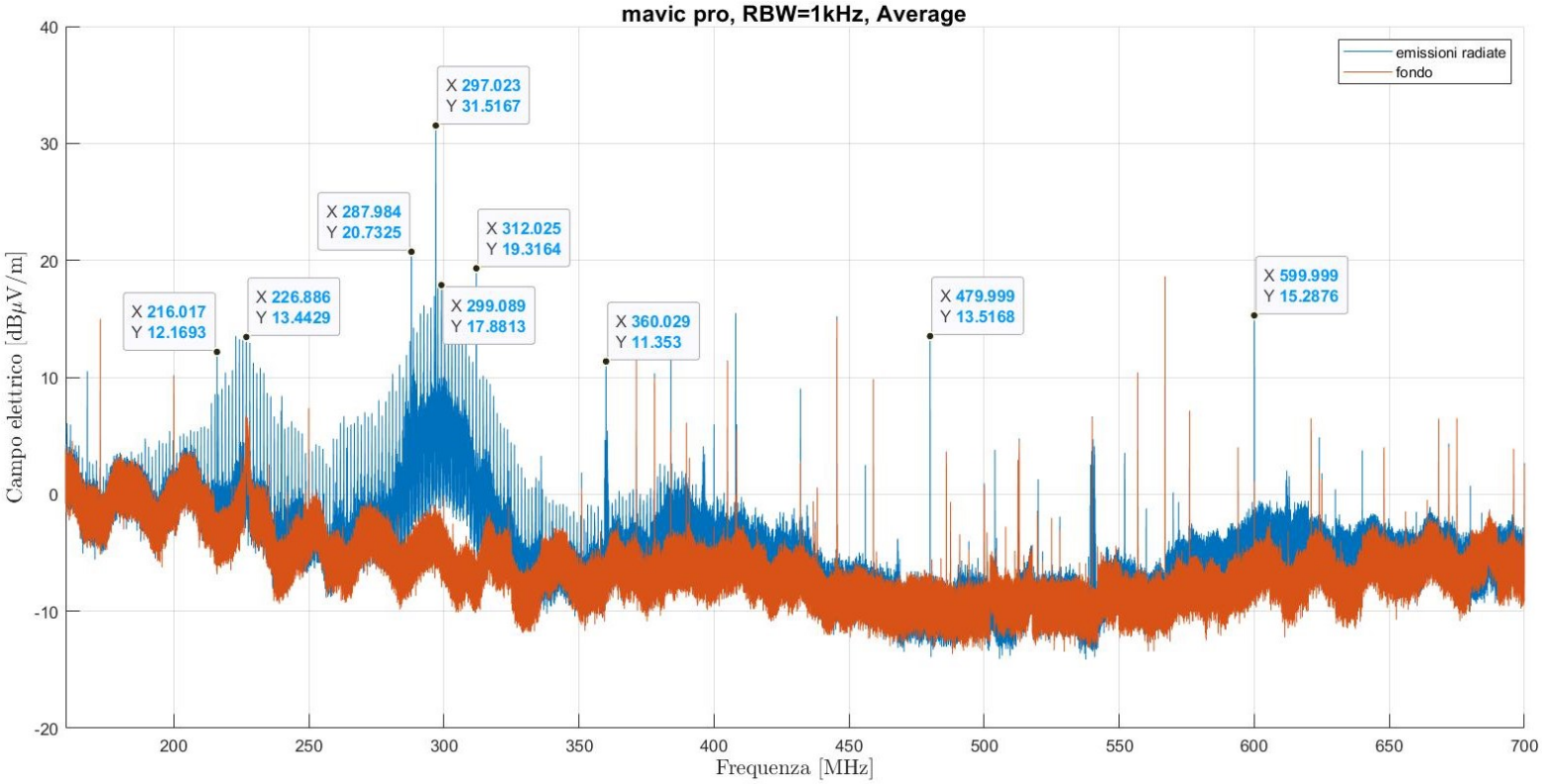


Figura 4.8: Elenco dei picchi indagati mavic pro.

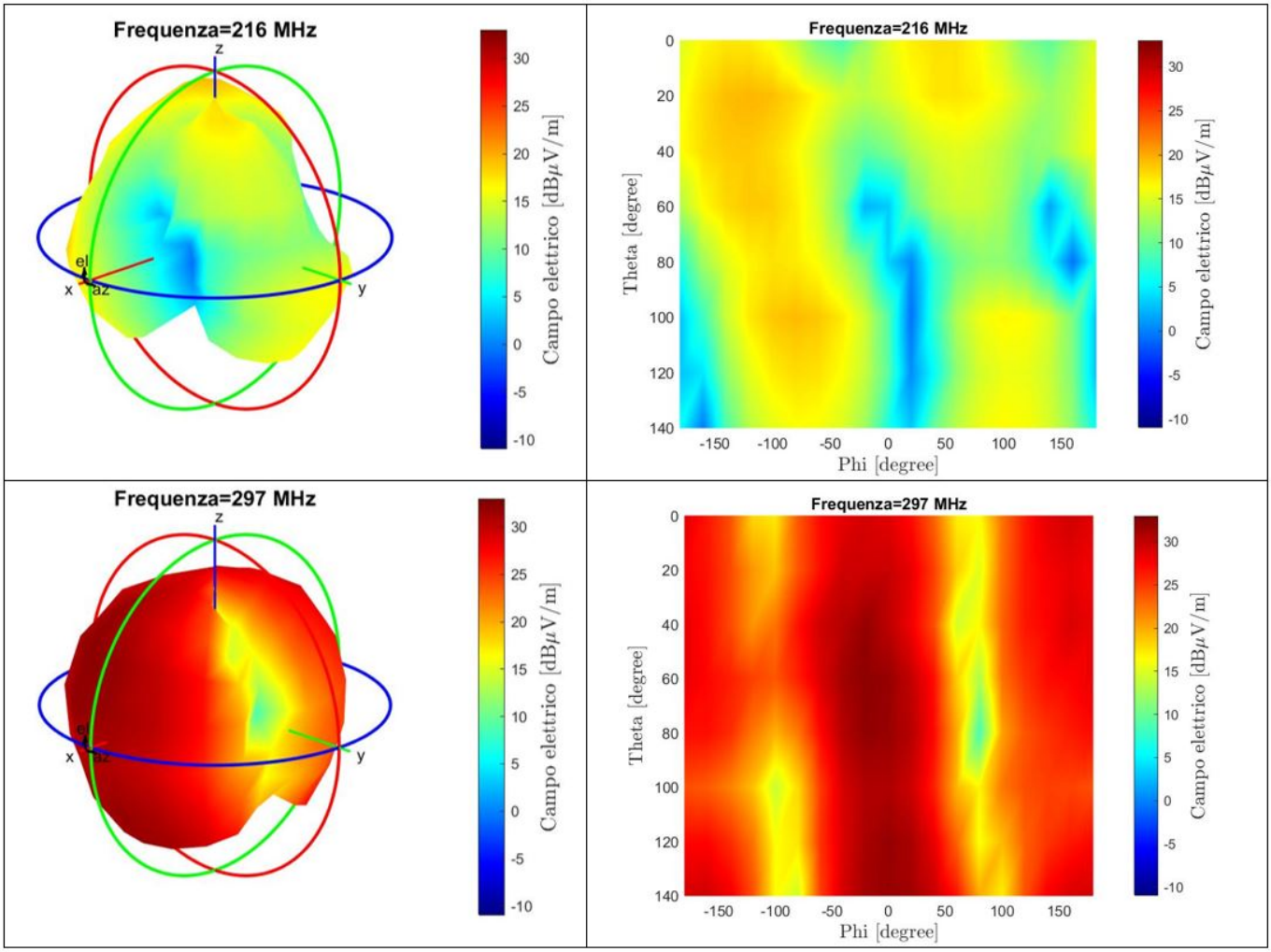


Figura 4.9: *Radiation pattern* di due segnali del mavic pro.

4.2.3 Autocostruito #1

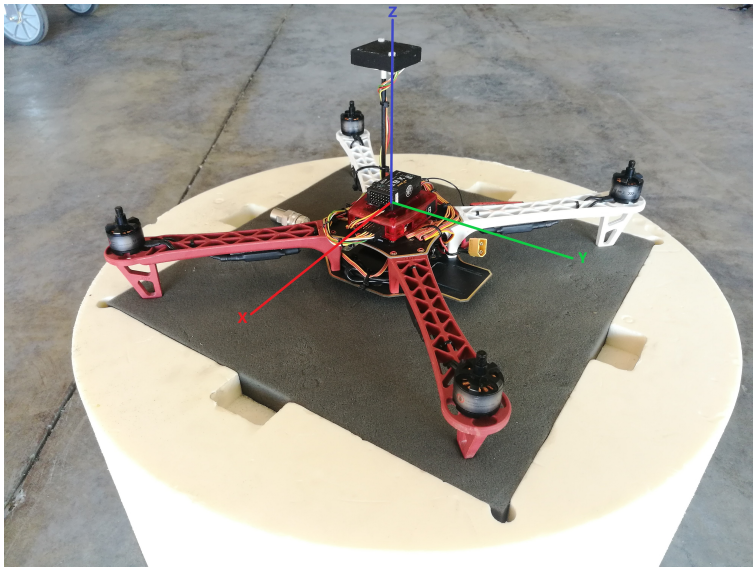


Figura 4.10: Sistema di riferimento sferico autocostruito #1.

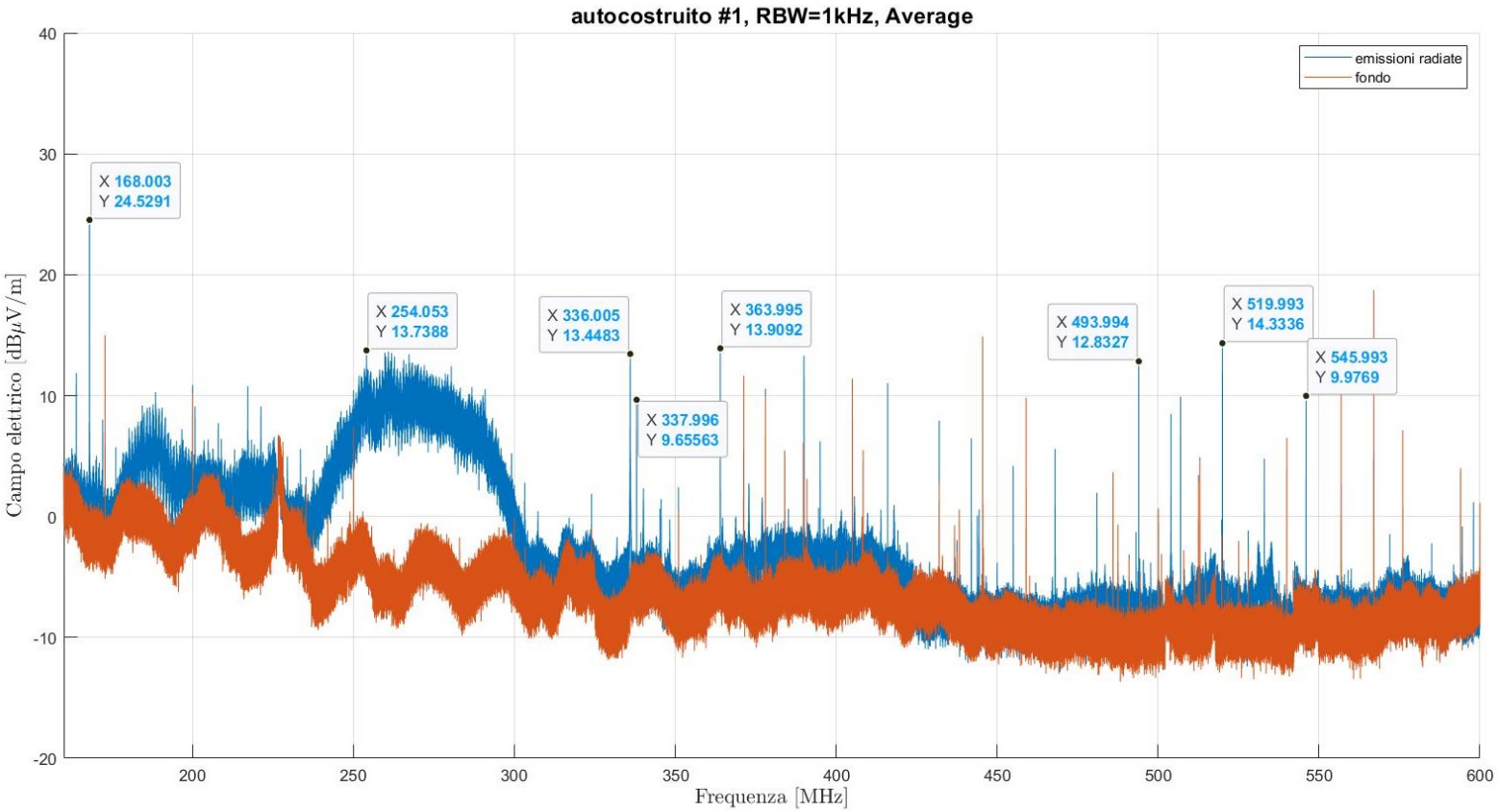


Figura 4.11: Elenco dei picchi indagati autocostruito #1.

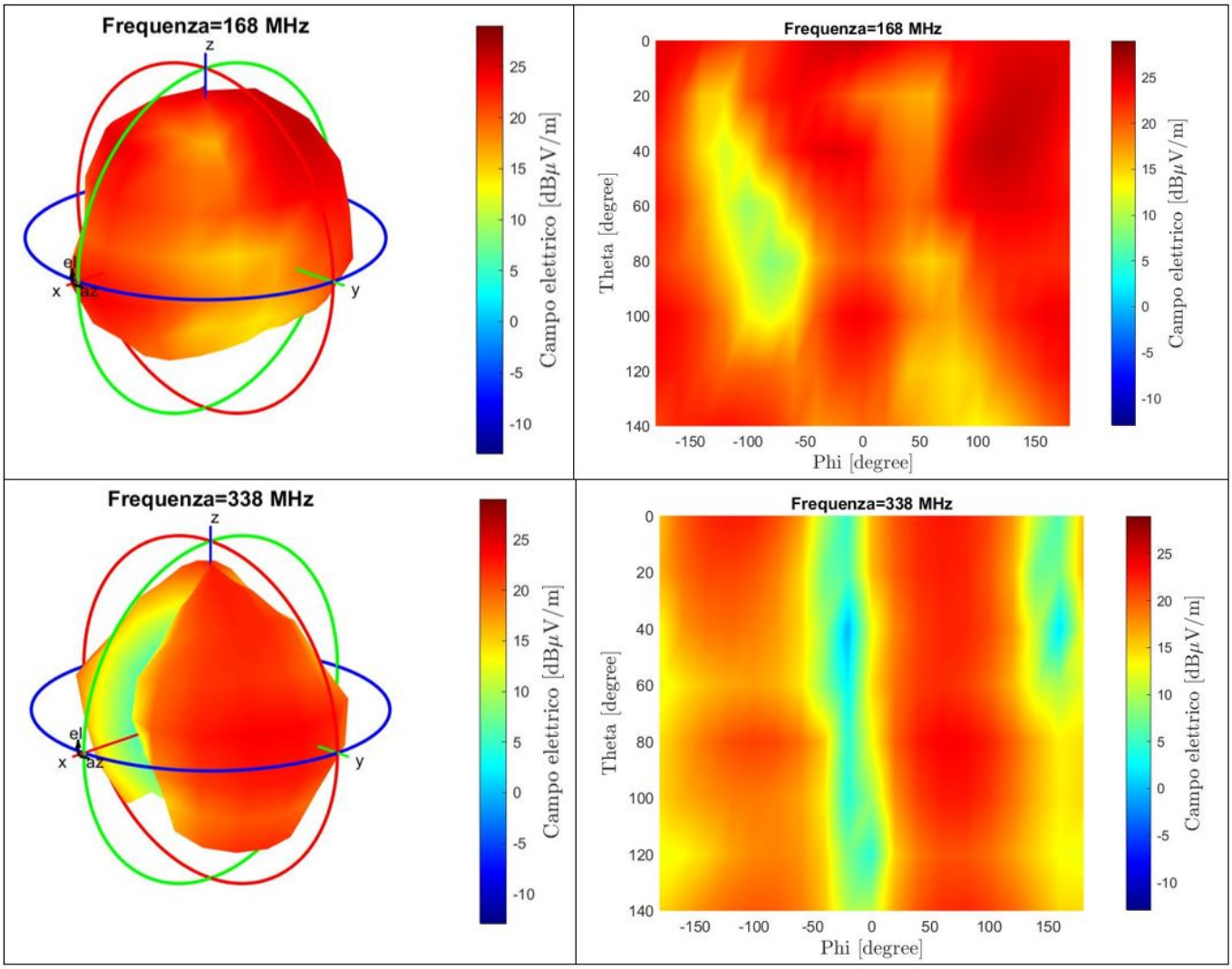


Figura 4.12: *Radiation pattern* di due segnali dell'autocostruito #1.

4.2.4 Analisi dei risultati

Dalle misure di *radiation pattern* si può osservare che alcuni segnali emessi dai droni hanno una distribuzione spaziale tipica dei dipoli elettrici; in fig. 4.6, per entrambi i segnali riportati del Mavic 2, è possibile apprezzare la distribuzione spaziale della componente ϕ del campo elettrico tipica di un dipolo orientato in direzione dell'asse x; in fig. 4.9 per il segnale a $297MHz$ del Mavic pro, è possibile osservare la distribuzione spaziale tipica di un dipolo elettrico orientato in direzione dell'asse y; infine in 4.12, per quanto riguarda l'emissione a 338 MHz del drone autocostruito, è possibile osservare la distribuzione della componente ϕ tipica di un dipolo elettrico orientato in direzione dell'asse x. Gli altri segnali, molti dei quali riportati in appendice, hanno diverse distribuzioni spaziali, alcune tendenzialmente isotropiche, altre più complicate, ma molte sono soggette anche ad un errore di misura dovuto al fatto che tali componenti possono variare nel tempo, non permettendo di visualizzare una distribuzione del campo tempo-invariante. Grazie a queste misure è stato possibile comprendere

che le varie emissioni irradiate misurate hanno diverse distribuzioni angolari, e per questo motivo nel capitolo successivo si è deciso di addestrare la rete neurale del sistema prototipale, la quale si basa sulle misure di emissione, per diverse angolazioni di misura rispetto all'UAV.

4.3 Analisi e classificazione dei picchi

Come ultima analisi sui segnali, prima di iniziare a lavorare sulla progettazione del sistema di scoperta, si è deciso di approfondire la conoscenza dell'andamento temporale dell'inviluppo dei segnali individuati e di conseguenza il loro contenuto spettrale. A questo scopo è stato sviluppato un sistema automatico che fosse in grado di identificare i picchi che soddisfacessero dei requisiti scelti, e successivamente effettuare delle misure al variare della *Resolution Bandwidth* (100 Hz, 1 kHz, 10 kHz) e in modalità *zero span*. Sono stati scartati automaticamente dal programma i segnali che avevano un rapporto segnale-rumorei nferiore a 10 dB; il numero di quelli individuati è stato ridotto ulteriormente, prendendo in considerazione solo i più significativi all'interno di step di frequenza di 412 kHz. Nelle seguenti immagini vengono riportati picchi sottoposti a successive analisi.

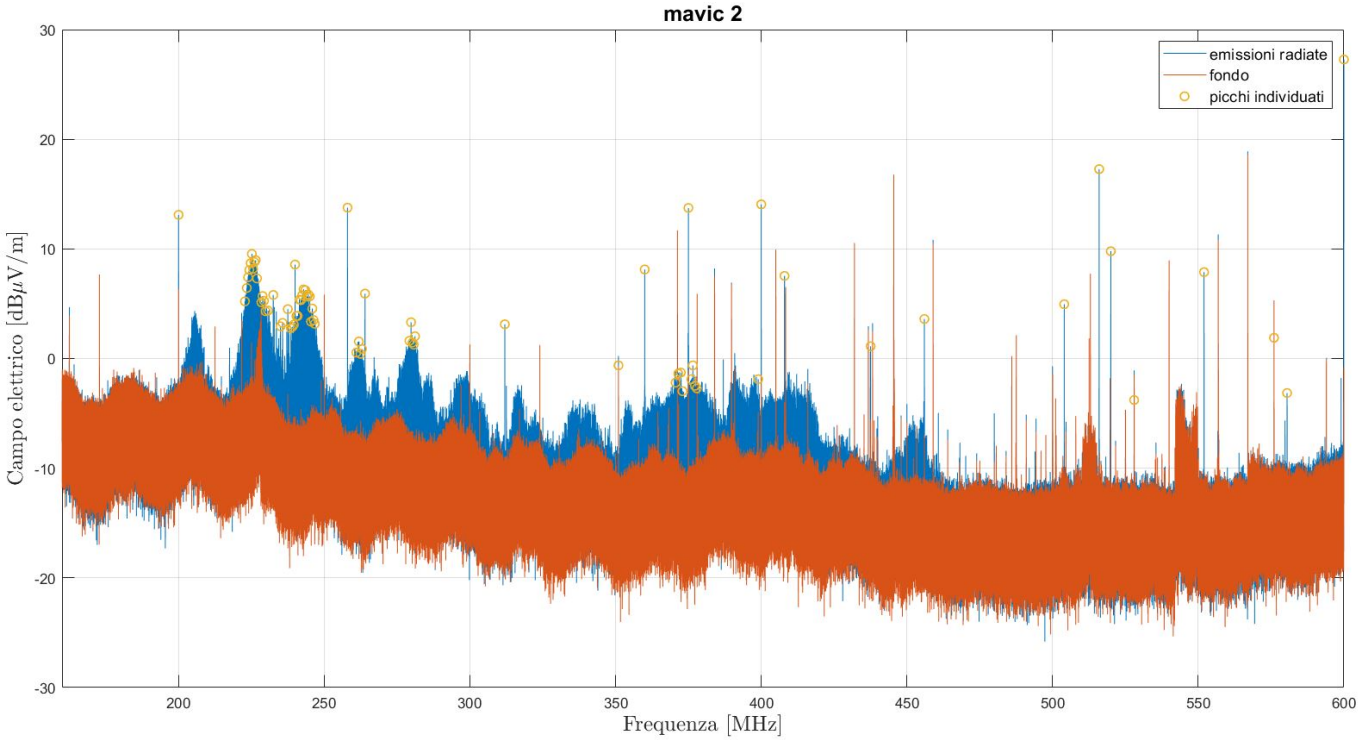


Figura 4.13: Picchi individuati del mavic 2.

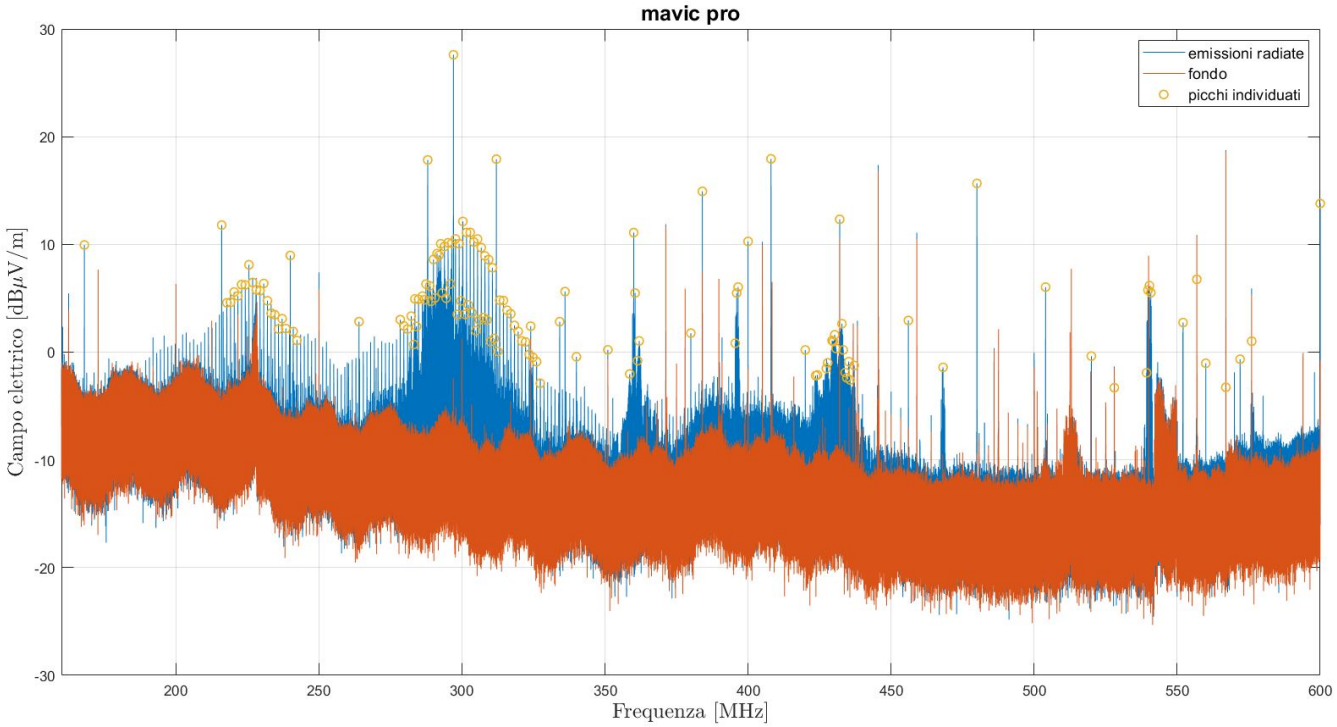


Figura 4.14: Picchi individuati del mavic pro.

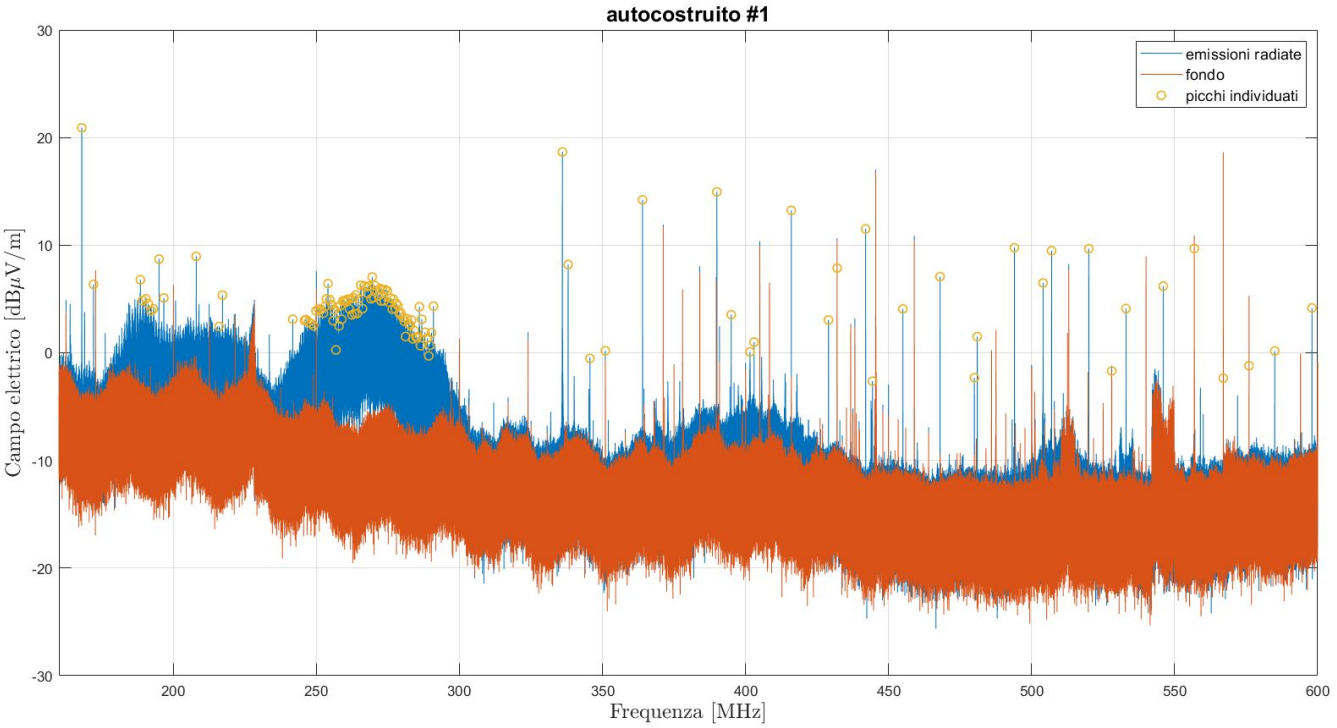


Figura 4.15: Picchi individuati dell'autocostruito #1.

Una volta scelti i picchi da voler analizzare il sistema, connesso all'EXA, esegue la seguente routine:

- imposta, come centrale, la frequenza precedentemente identificata con uno *span*=1.1 kHz in modalità FFT;
- utilizzando una RBW=100 Hz, VBW=100 Hz, un numero di punti pari a 10001 e un detector di *Peak* effettua 50 acquisizioni restituendo la traccia RMS;
- trovato il picco lo strumento si centra sulla frequenza corrispondente al fine di correggere eventuali disallineamenti dovuti alla risoluzione in frequenza;
- centrato sulla frequenza corretta lo strumento viene impostato in modalità *zero span*;
- per ogni *Resolution Bandwidth* sotto esame viene acquisita una traccia con una permanenza temporale di 1 secondo, valutato il valore di picco, il valore RMS e calcolato il *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR).

4.3.1 Risultati

Di seguito si riportano alcuni dei segnali misurati per i vari droni oggetto delle misure.

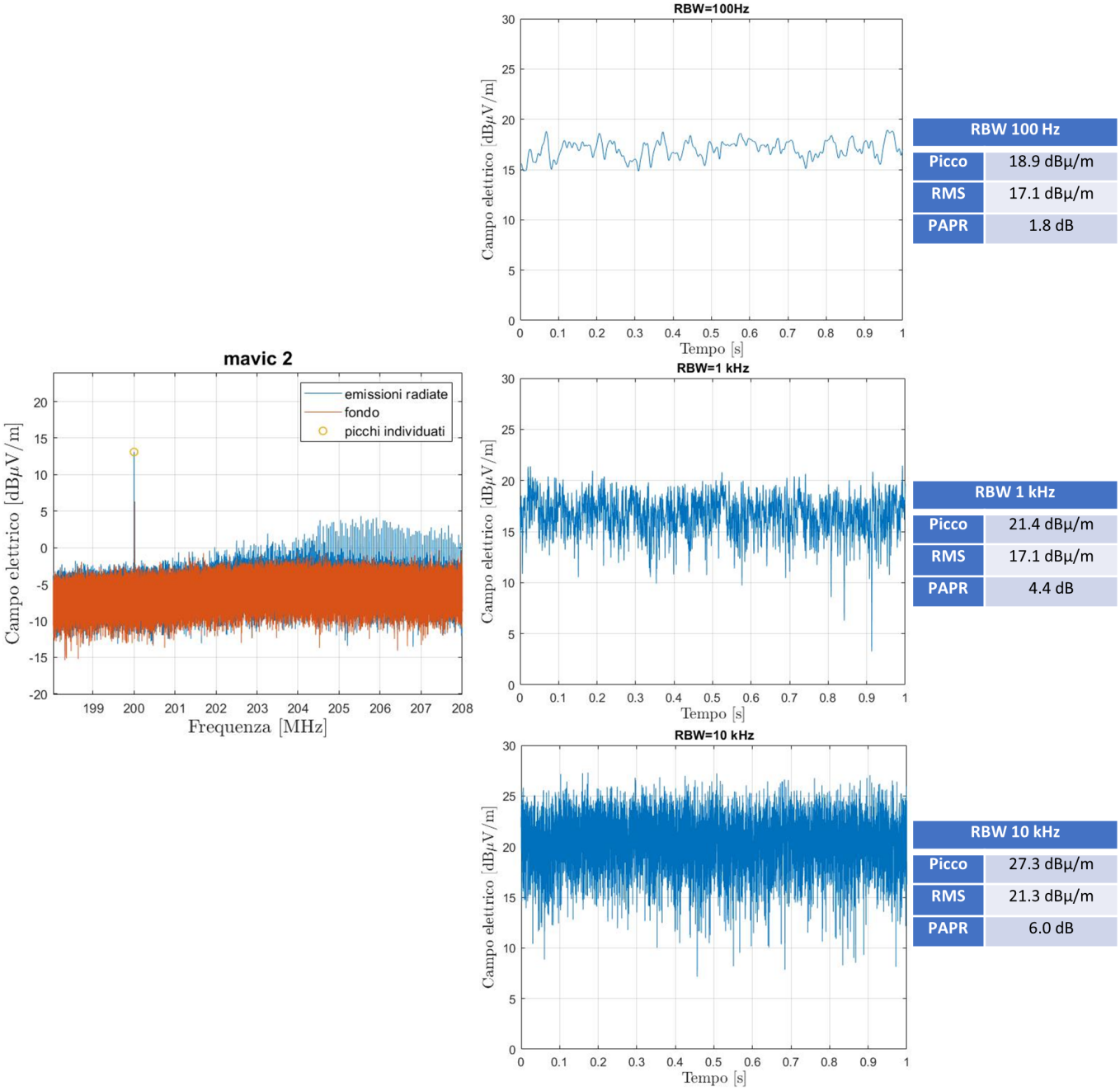


Figura 4.16: Mavic 2: segnale CW alla $freq = 200MHz$.

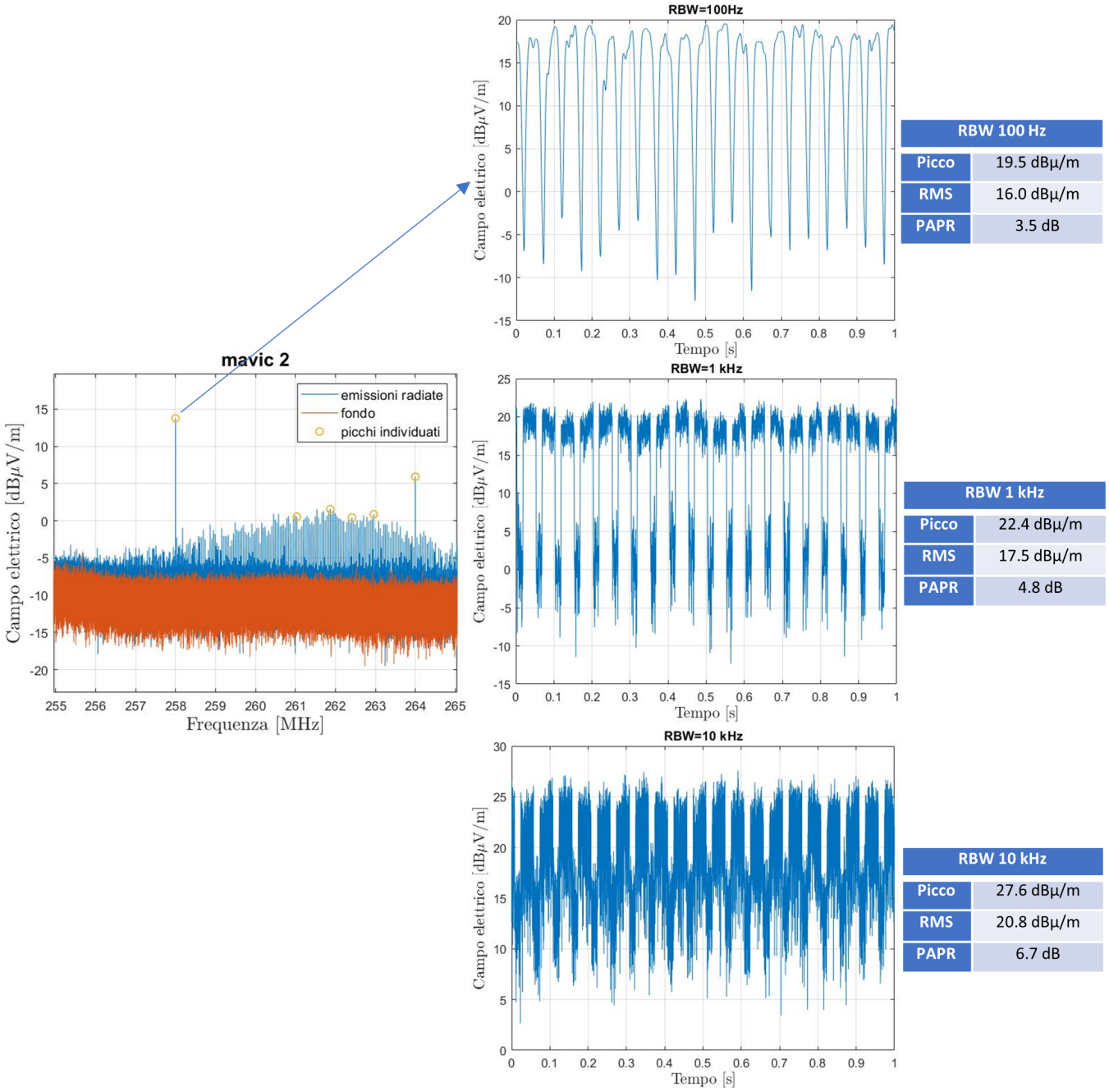


Figura 4.17: Mavic 2: onda quadra alla $freq = 258MHz$.

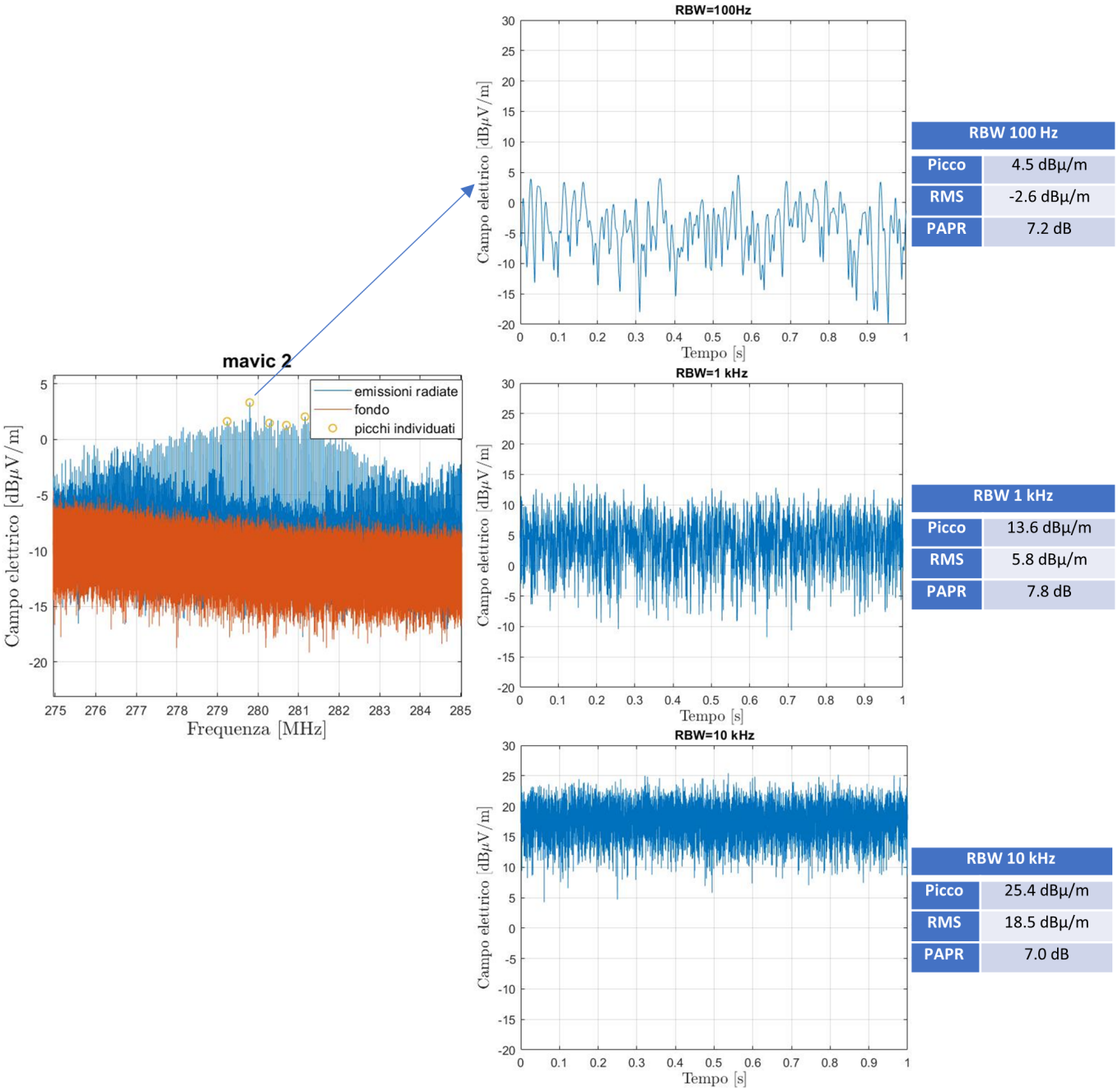


Figura 4.18: Mavic 2: segnale incoerente alla $freq = 279.7MHz$.

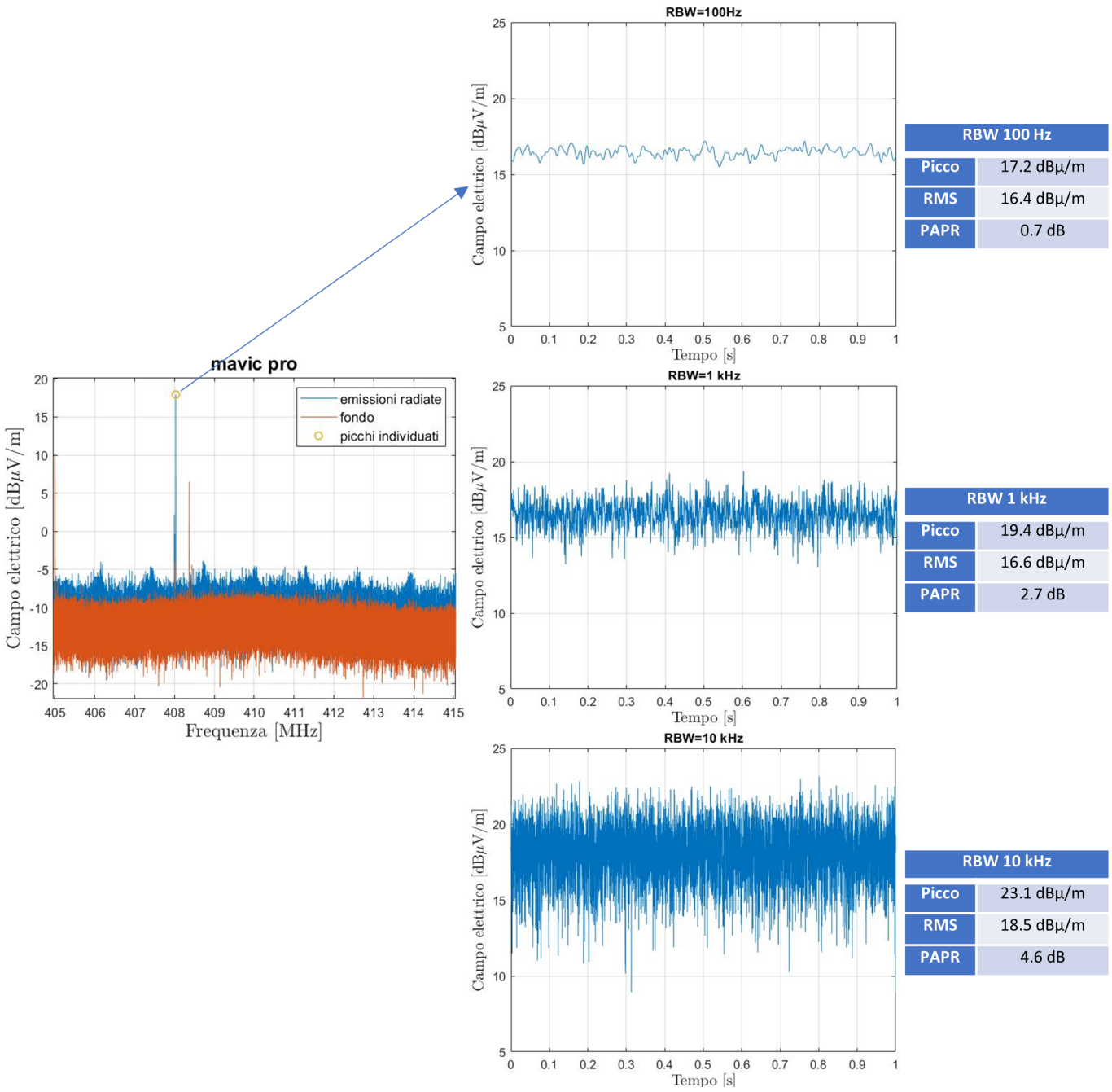
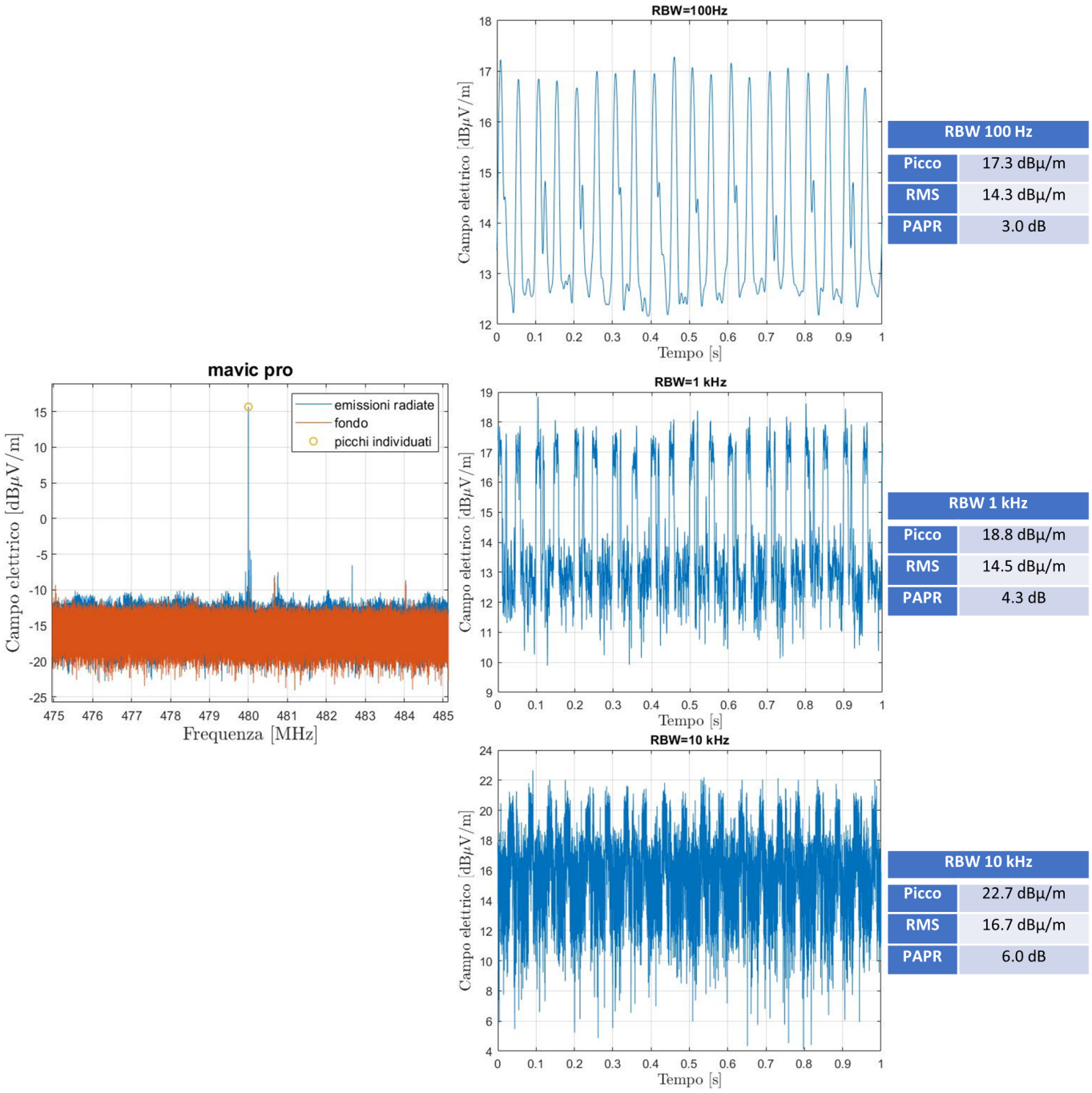


Figura 4.19: Mavic pro: segnale CW alla $freq = 408MHz$.



RBW 100 Hz	
Picco	17.3 dBμ/m
RMS	14.3 dBμ/m
PAPR	3.0 dB

RBW 1 kHz	
Picco	18.8 dBμ/m
RMS	14.5 dBμ/m
PAPR	4.3 dB

RBW 10 kHz	
Picco	22.7 dBμ/m
RMS	16.7 dBμ/m
PAPR	6.0 dB

Figura 4.20: Mavic pro: onda quadra alla $freq = 480MHz$.

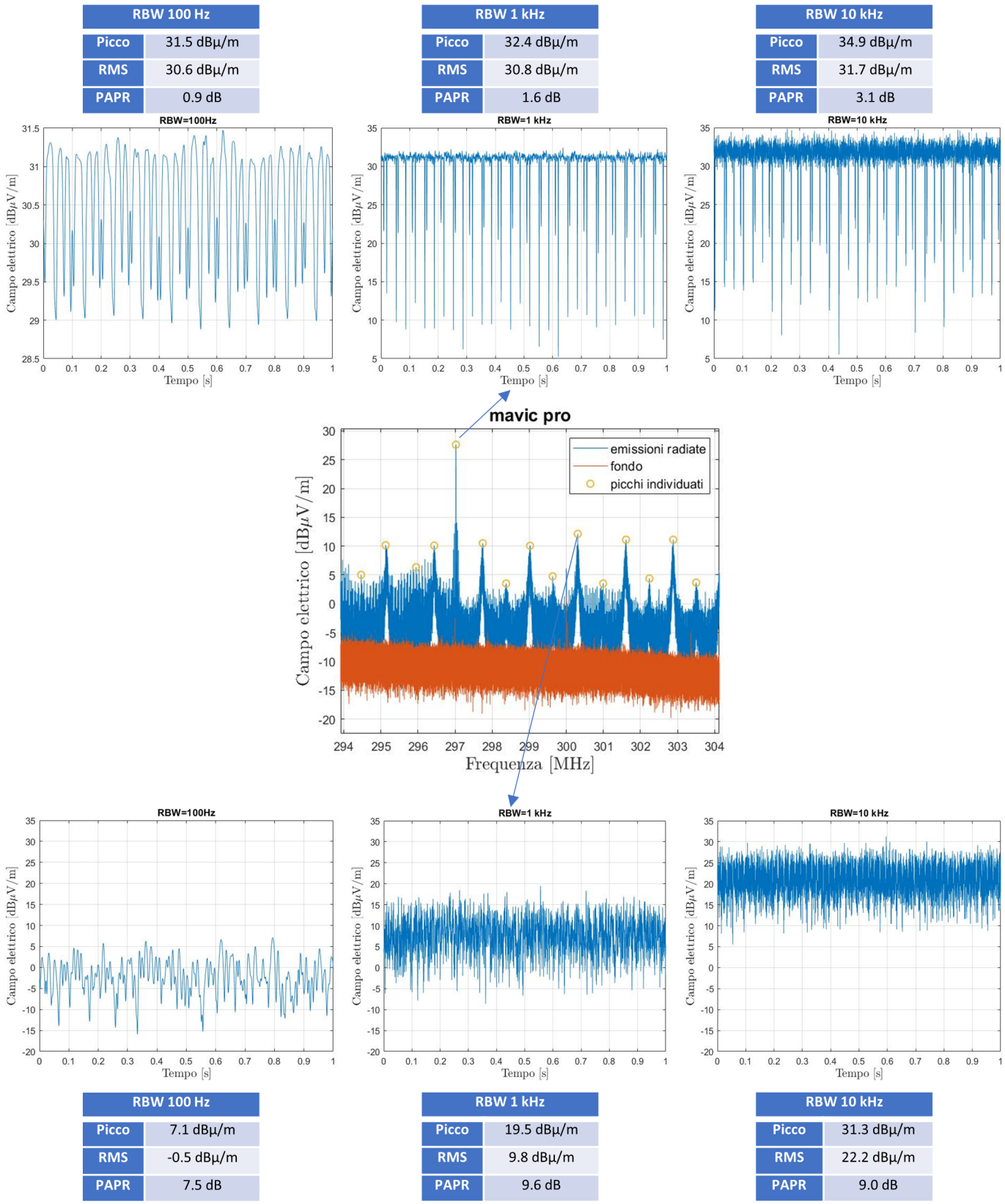
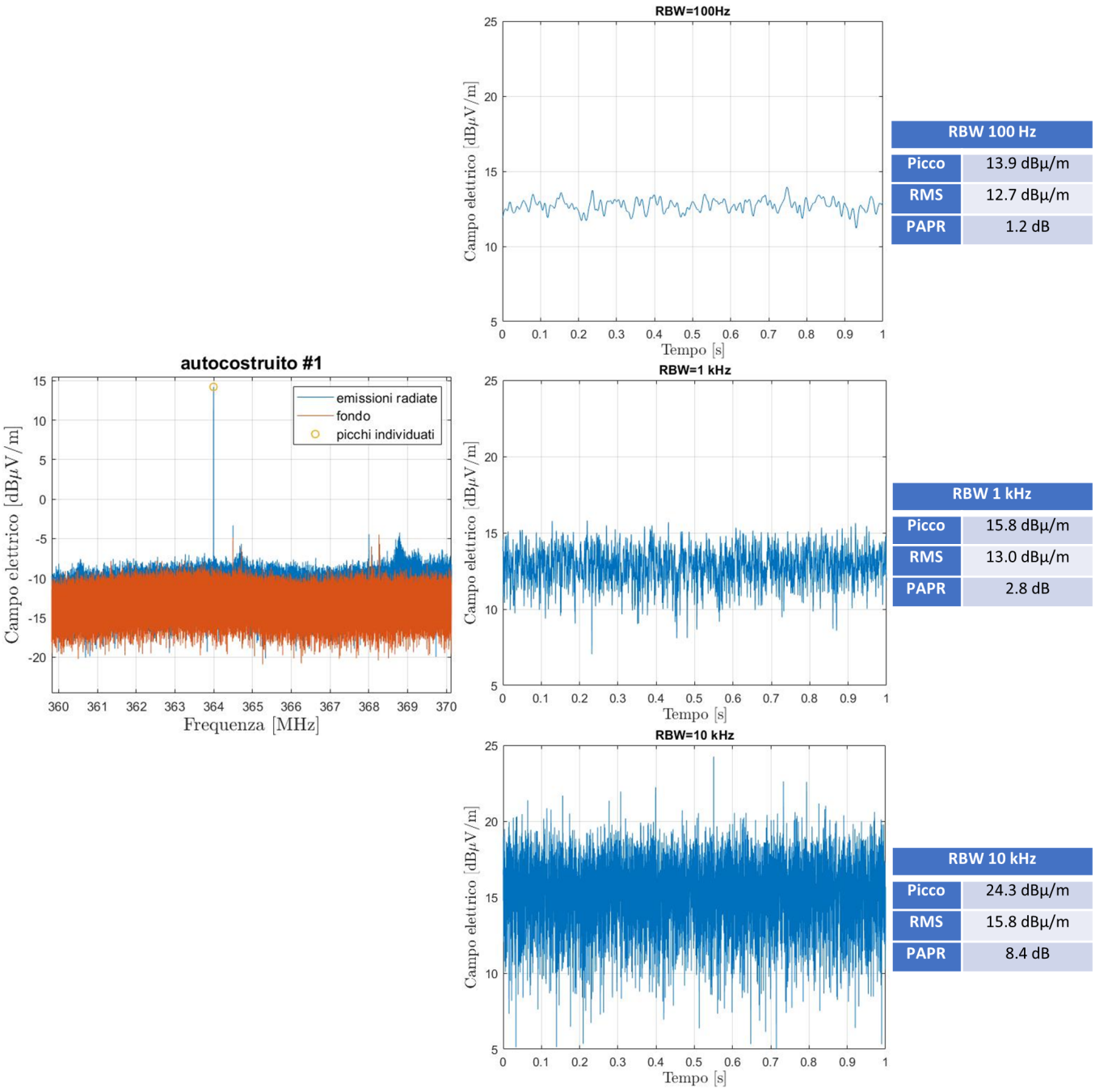


Figura 4.21: Mavic pro: onda quadra alla $freq = 297MHz$ e segnale incoerente alla $freq = 300.3MHz$.



RBW 100 Hz	
Picco	13.9 dBμ/m
RMS	12.7 dBμ/m
PAPR	1.2 dB

RBW 1 kHz	
Picco	15.8 dBμ/m
RMS	13.0 dBμ/m
PAPR	2.8 dB

RBW 10 kHz	
Picco	24.3 dBμ/m
RMS	15.8 dBμ/m
PAPR	8.4 dB

Figura 4.22: Autocostruito#1: segnale CW alla $freq = 363.9MHz$.

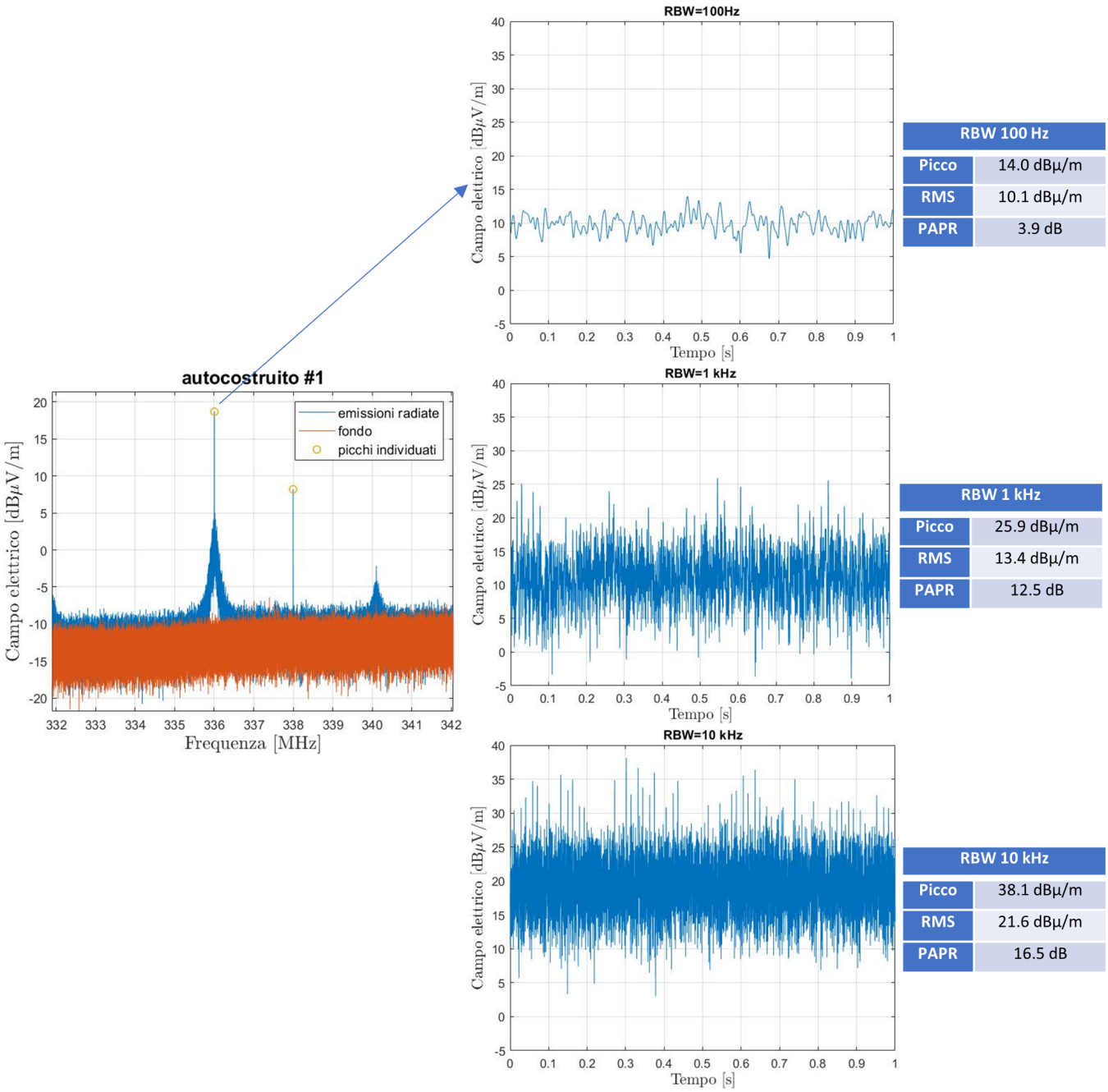


Figura 4.23: Autocostruito#1: segnale CW per le $RBW = 100Hz$ e $1kHz$ e segnale incoerente per la $RBW = 10kHz$ alla $freq = 336MHz$.

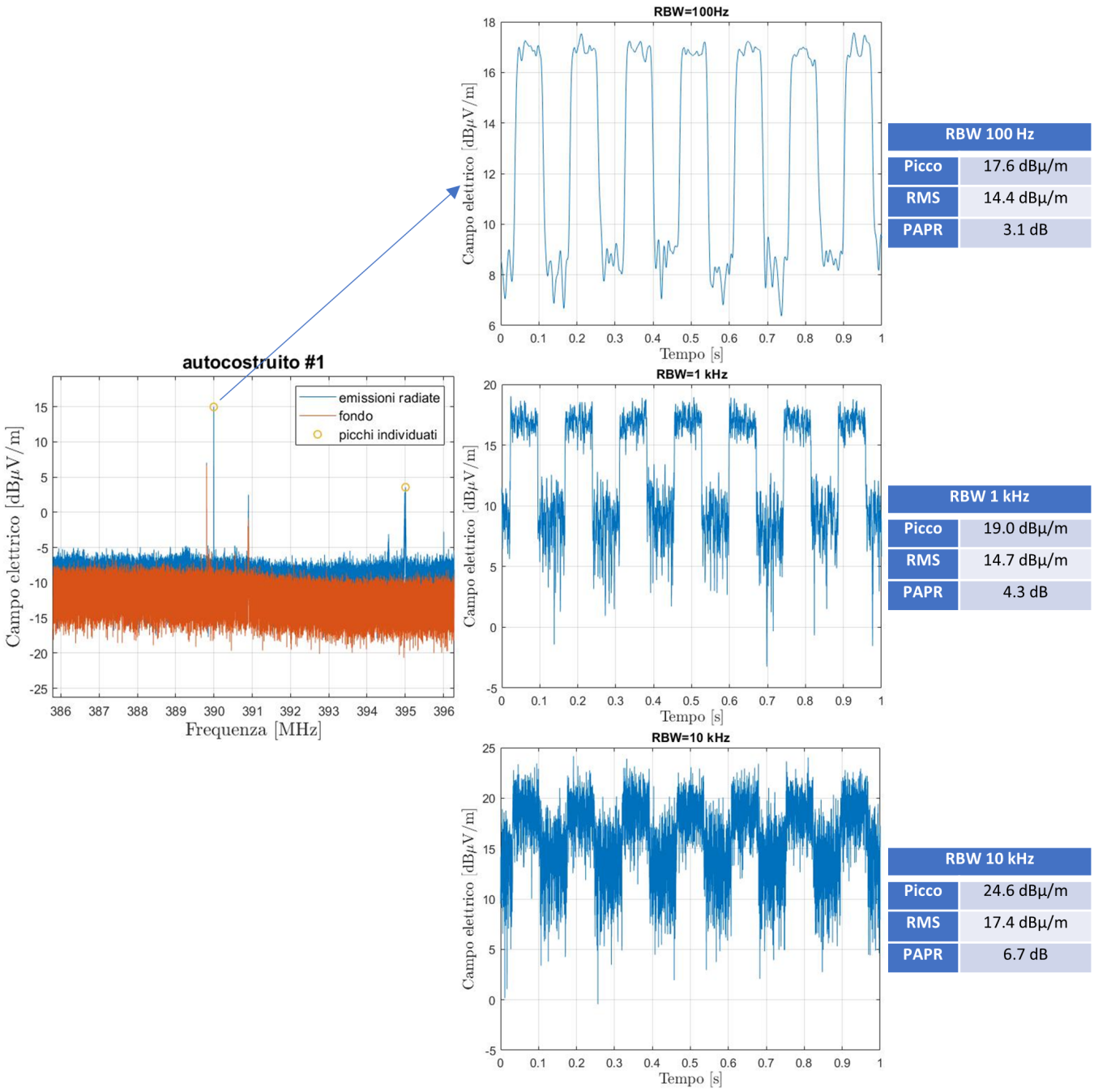


Figura 4.24: Autocostruito#1: onda quadra alla $freq = 389.9MHz$.

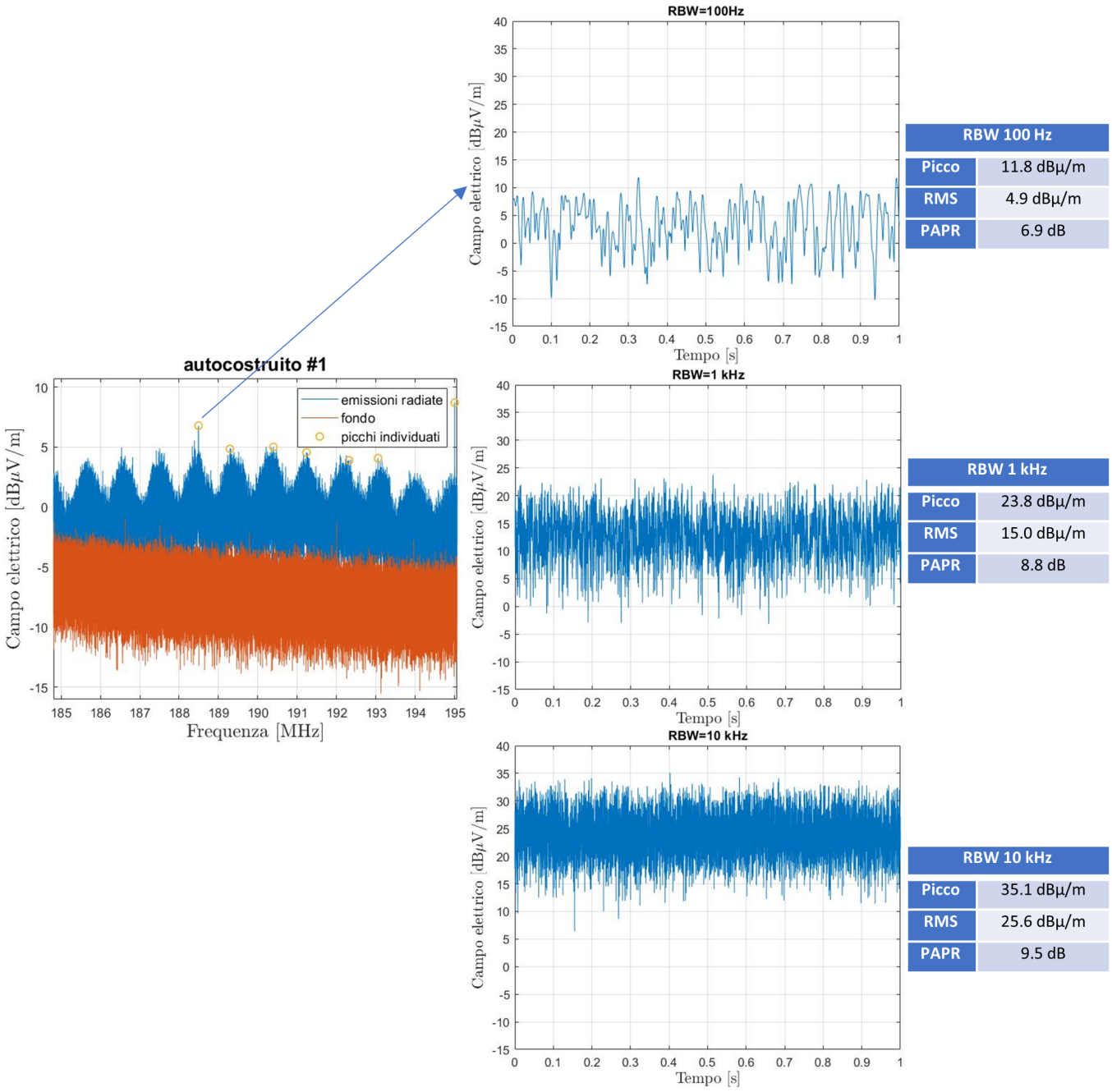


Figura 4.25: Autocostruito#1: segnale incoerente alla $freq = 188.4MHz$.

4.3.2 Analisi dei risultati

Dalle misure precedentemente riportate si evince come alcuni dei segnali individuati siano dei *continuous wave* (CW) o onde quadre. Tali segnali sono interessanti in quanto la maggior parte del loro contenuto energetico è contenuto all'interno della della *resolution bandwidth*, anche con RBW pari a 100 Hz. Segnali a banda stretta di questo genere sono adatti ad essere misurati, con antenne direttive, a distanze significative.

Essendo, tuttavia, il tempo di acquisizione inversamente proporzionale alla *Resolution Bandwidth*,

per il sistema di scoperta descritto nel successivo capitolo, si è deciso di concentrare la sua scansione in frequenza per le RBW di 100Hz e 1 kHz, solamente sulle componenti a banda stretta individuate dal sistema di analisi dei picchi.

Capitolo 5

Sistema di scoperta e identificazione

5.1 Intelligenza Artificiale

Si può descrivere l'Intelligenza Artificiale, anche detta IA, come un sistema in grado di simulare il funzionamento del cervello umano e di prendere decisioni sulla base delle analisi dei dati elaborati. Diventa così possibile fare svolgere a delle macchine compiti quali riconoscimento vocale e visivo, processi decisionali e predittivi che potrebbero risultare complessi per l'uomo.

Per lo sviluppo di una intelligenza artificiale un flusso di lavoro IA efficiente deve comprendere la preparazione dei dati per la creazione di un *dataset*, l'elaborazione di un modello, la progettazione di un sistema che interagisca con l'IA e la distribuzione dell'intero sistema.[6]

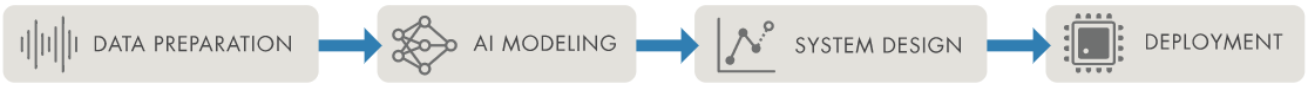


Figura 5.1: Flusso di lavoro dell'IA.[6]

- **Preparazione dei dati per l'intelligenza artificiale**
  L'acquisizione dei dati e successiva elaborazione per la creazione di un modello che risulti efficiente nella fase di addestramento è il passaggio più complesso quando si parla di sviluppo di un'intelligenza artificiale. Nel caso dell'identificazione del drone attraverso la misura e analisi dello spettro di frequenza, la preparazione dei dati risulta ridotta poiché le componenti in frequenza sono esse stesse i dati che compongono il dataset. Quindi il lavoro, in questa fase, si concentra nella preparazione di un *dataset* che risulti il più flessibile possibile dinnanzi alle variazioni dei segnali da analizzare.
- **Modellazione mediante IA**
  Una volta pronto il *dataset* deve essere sviluppato un modello che sia in grado di effettuare delle previsioni e/o prendere delle decisioni. Per questo sistema è stata utilizzata una tecnica di

apprendimento automatico supervisionato dove lo scopo è quello di costruire un modello, partendo da dei dati di input noti e dalle corrispettive etichette, in modo tale da effettuare delle previsioni sui dati futuri. In fig. 5.2 è mostrato lo schema concettuale del funzionamento della tecnica dell'apprendimento automatico supervisionato.

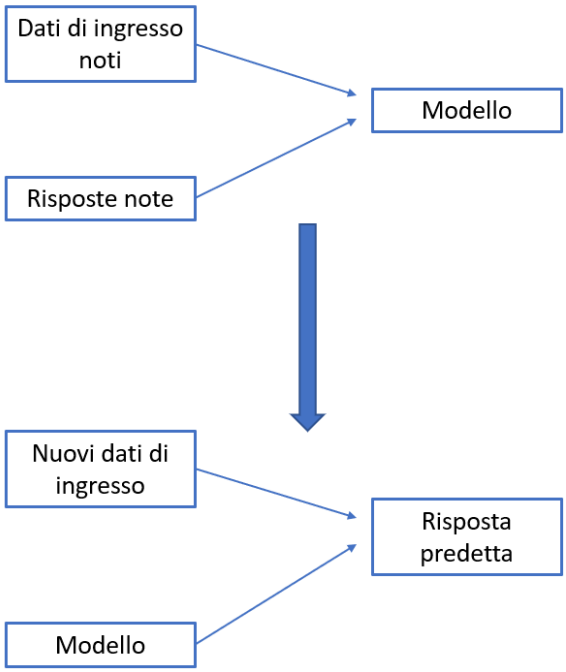


Figura 5.2: Funzionamento dell'apprendimento supervisionato.

- **Progettazione del sistema**
  Il sistema è basato su uno *script* Matlab connesso agli strumenti di misura al fine di acquisire lo spettro di frequenza, correggere ed effettuare la conversione dei dati in valore di campo elettrico per poter fornire i dati come input alla rete neurale e ottenere come uscita del sistema la previsione.
- **Distribuzione**
  I modelli delle reti neurali in Matlab sono forniti sotto forma di funzioni. Queste funzioni sono particolarmente leggere e quindi risultano facilmente trasportarbili su chiavette USB o inviate agli operatori sul campo. Inoltre, per i modelli di *deep learning* è possibile la conversione in linguaggio di programmazione C, attraverso il *toolbox* MATLAB Coder™, per la distribuzione su schede Arm oppure Intel eliminando il vincolo dell'utilizzo di Matlab.

5.1.1 Deep Learning

Il Deep Learning, che può essere descritto come un insieme di algoritmi e di metodi di programmazione, è un sistema in grado di apprendere autonomamente e di imparare dai propri errori simulando

il comportamento cellulare del cervello umano migliorando le prestazioni attraverso l'apprendimento continuo.

Una rete neurale è costituita da vari livelli di unità non lineari in cascata (gli *hidden layers*) per svolgere compiti di estrazione di caratteristiche e di trasformazione. Come si può vedere in fig.5.3 consiste di un livello di input, diversi livelli nascosti e un livello di output. Gli strati sono interconnessi tramite nodi, o comunemente chiamati neuroni, che lavorano in parallelo utilizzando gli output del livello precedente come input.

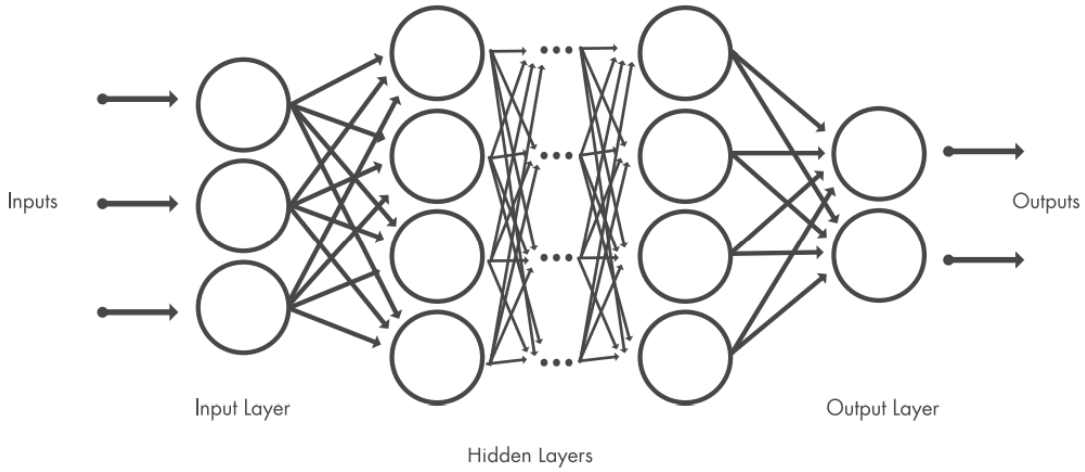


Figura 5.3: Architettura di una rete neurale.[7]

L'addestramento della rete neurale è stata effettuata su MATLAB R2018b attraverso il Deep Learning Toolbox, in particolare usando **Neural Net Pattern Recognition tool**. Questa fase è stata eseguita su un Intel Xeon CPU E5-2630 v4 @2.20GHz con 2 processori e 120 GB di memoria RAM installata.

5.2 Addestramento *Indoor*

Il *dataset* impiegato per la fase di addestramento all'interno della camera anecoica è stato generato acquisendo i dati utilizzando la stesso sistema di misura mostrato in fig.3.1. Le misure sono state condotte attraverso il **Real-Time Spectrum Analyzer 306B (RSA306B)** per le *Resolution Bandwidth* di $10kHz$, $100kHz$, $1MHz$, $8MHz$ e l'**EXA** per le misure di picchi con RBW di $100Hz$, $1kHz$ (i parametri utilizzati per le acquisizioni sono riportate nelle tabelle 5.6 e 5.7).

La scelta di adottare un sistema basato su più RBW è dettata dal fatto di utilizzare le acquisizioni dei picchi ($100Hz$ e $1kHz$) per una scoperta a distanze significative e impiegare quelle sulle l'intera banda di frequenze, contenenti maggiore informazioni spettrali, per l'identificazione e/o sfruttare, eventuali, segnali coerenti a banda "larga" che guadagnino $20dB$ ogni fattore $10dB$ della *resolution bandwidth*. In fig. è mostrato il sistema di misura. INSERIRE SISTEMA CON SPLITTER

Per ogni drone e per il rumore di fondo, sono state registrate 576 diverse firme elettromagnetiche con l'RSA306B e 80 con l'EXA al variare dell'orientazione angolare in modo tale da rendere la rete neurale la più flessibile possibile alle variazioni dei campi dovuti all'orientazione spaziale. Per la fase di addestramento i campioni sono stati suddivisi in maniera casuale come riassunto nella tabella 5.1 per l'RSA360B e tabella 5.2 per l'EXA.

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	1614
Validation	15%	345
Testing	15%	345

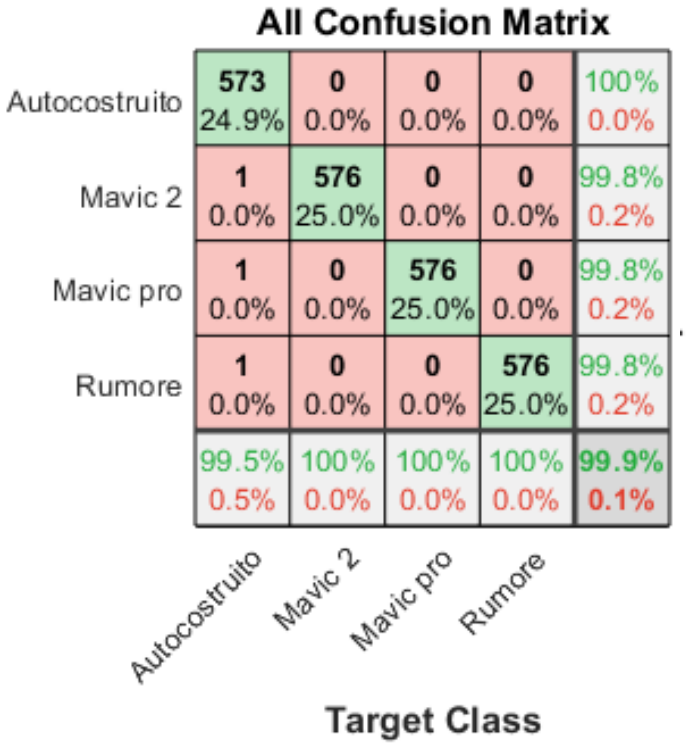
Tabella 5.1: Suddivisione campioni RSA *indoor*.

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	224
Validation	15%	48
Testing	15%	48

Tabella 5.2: Suddivisione campioni EXA *indoor*.

5.2.1 Risultati *Indoor*

In fig. 5.5 vengono riportati i risultati della fase di addestramento.

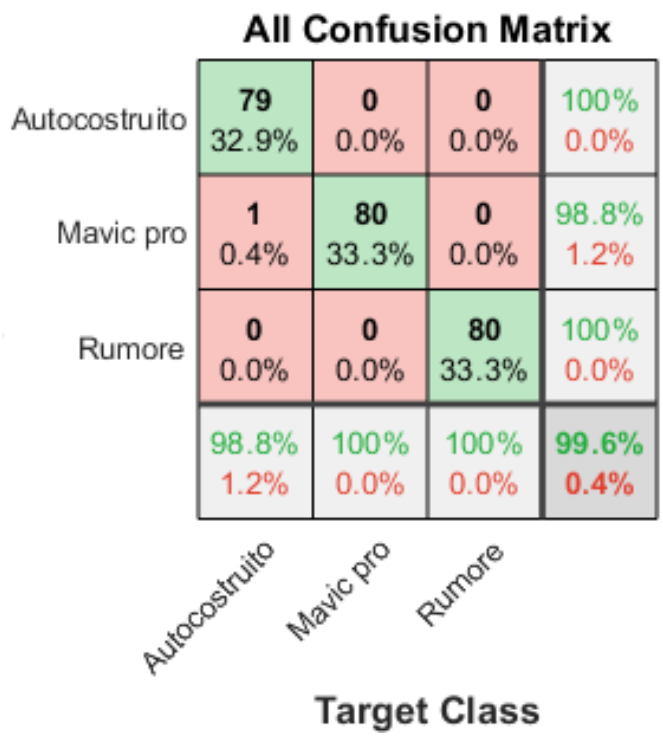


(a) $RBW = 8MHz$

(b) $RBW = 1MHz$

(c) $RBW = 100kHz$

(d) $RBW = 10kHz$



(a) $RBW = 1kHz$

(b) $RBW = 100Hz$

Figura 5.5: *Confusion matrix* al variare della *resolution bandwidth indoor*.

Successivamente sono stati esportati i modelli delle reti neurali ed utilizzati per effettuare un test in tempo reale eseguendo la classificazione di 20 acquisizioni per classe, per verificarne il corretto funzionamento. Nella tabella 5.3 viene riportata la probabilità media per ciascuna classe per le diverse *resolution bandwidth*.

	Autocostruito#1	Mavic 2	Mavic pro	Rumore
8 MHz	99.99%	99.07%	99.98%	99.98%
1 MHz	99.94%	99.00%	99.91%	99.90%
100 kHz	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
10 kHz	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
100 kHz	99.67%	100.00%	100.00%	99.93%

Tabella 5.3: Risultati test *indoor*.

5.3 Addestramento *Outdoor*

Al fine di realizzare un dimostratore si è deciso di impiegare il sistema in campo aperto per testarne l'efficacia per distanze più elevate e robustezza se sottoposto ad un rumore di fondo più elevato e mu-

tabile nel tempo. Per rendere il sistema più flessibile e facilmente impiegabile sullo scenario operativo, è stata scritta una funzione Matlab in grado di generare un dataset sintetico per l'addestramento a partire dalle misurazioni ottenute in camera anecoica e dalla caratterizzazione del rumore di fondo dell'ambiente in cui si intende impiegare il sistema. Il punto di forza di questa applicazione è quella di non dovere effettuare acquisizioni delle firme elettromagnetiche dei droni ogni volta che si intende utilizzare il sistema in uno scenario differente e quindi la possibilità di creare un *database* da potere aggiornare risparmiando tempo, risorse e non dovere avere a disposizione ogni volta tutti i droni.

La funzione, inizialmente, discrimina i segnali appertenenti al drone che abbiano un SNR desiderato incrociando le acquisizioni in camera anecoica del drone e del rumore di fondo. A seguire, utilizzando la caratterizzazione del rumore *outdoor*, viene generata la traccia sintetica che si otterrebbe se si fosse effettuata l'acquisizione in campo aperto. In fig. 5.6 viene mostrato un esempio del funzionamento.

Per addestrare l'IA al riconoscimento al variare della distanza, la funzione applica ai segnali appartenenti al drone un'attenuazione in modo tale da realizzare un *dataset* che tenga conto della variazione dei campi elettrici dovuti all'attenuazione spaziale. Inoltre, piuttosto che attribuire una singola classe a tutte le tracce, generate, appertenenti ad un UAV, si è deciso di suddividerle in tre categorie, in base all'attenuazione applicata, per facilitare il lavoro della rete neurale. Nello specifico, le etichette sono state distribuite nel modo seguente:

- **SNR alto:** per le attenuazioni comprese nel range (-3,+7)dB;
- **SNR medio:** per le attenuazioni comprese nel range (+9,+21)dB;
- **SNR basso:** per le attenuazioni comprese nel range (+23,35)dB.

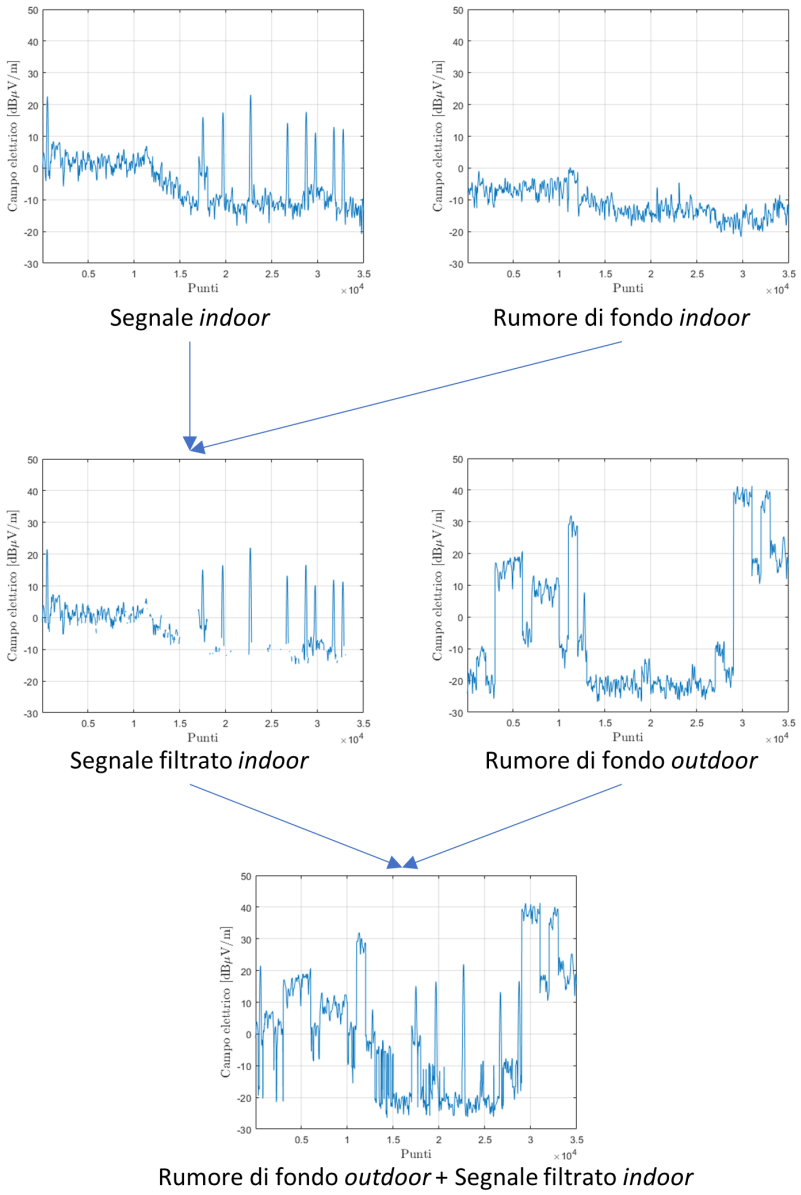


Figura 5.6: Flusso funzionamento della funzione.

5.3.1 Risultati *Outdoor*

Le acquisizioni del rumore di fondo in campo aperto sono state effettuate con gli stessi parametri riportati nelle tabelle 5.6 e 5.7 con l'unica differenza che per l'RSA306B è stato utilizzato un $ref.level = -10dBm$ al fine di non saturare lo strumento a causa di un rumore più elevato. Con l'EXA sono state acquisite 440 tracce, mentre con l'RSA306B 930. Per le $RBW = 8MHz$ e $RBW = 1MHz$ si è riscontrata una maggiore efficacia con acquisizioni di *Max Hold*, mentre per

$RBW = 100kHz$ e $RBW = 10kHz$ è stata usata quella di *Average RMS*. Di seguito vengono riportate le tabelle con le relative suddivisioni per la fase di addestramento:

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	16602
Validation	15%	3558
Testing	15%	3558

(a) $RBW = 8MHz$

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	17254
Validation	15%	3698
Testing	15%	3698

(b) $RBW = 1MHz$

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	17228
Validation	15%	3692
Testing	15%	3692

(c) $RBW = 100kHz$

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	18644
Validation	15%	3995
Testing	15%	3995

(d) $RBW = 10kHz$

Tabella 5.4: Suddivisione campioni RSA *ouddoor*.

Per quanto concerne il *dataset* della $RBW = 100Hz$ si è deciso di utilizzare per ogni drone una rete neurale che lavorasse solo sui picchi corrispettivi; inoltre, per aumentare l'efficienza dell'IA, i dati sono stati generati combinando ciascun campione dei segnali acquisiti in camera anecoica con le tracce del rumore di fondo in campo aperto in modo tale da tenere, il più possibile, in considerazione la variabilità del rumore. Nella tabella 5.5 vengono riportate le suddivisioni dei campioni per la fase di addestramento.

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	119566
Validation	15%	25621
Testing	15%	25621

(a) Mavic 2.

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	123496
Validation	15%	26464
Testing	15%	26464

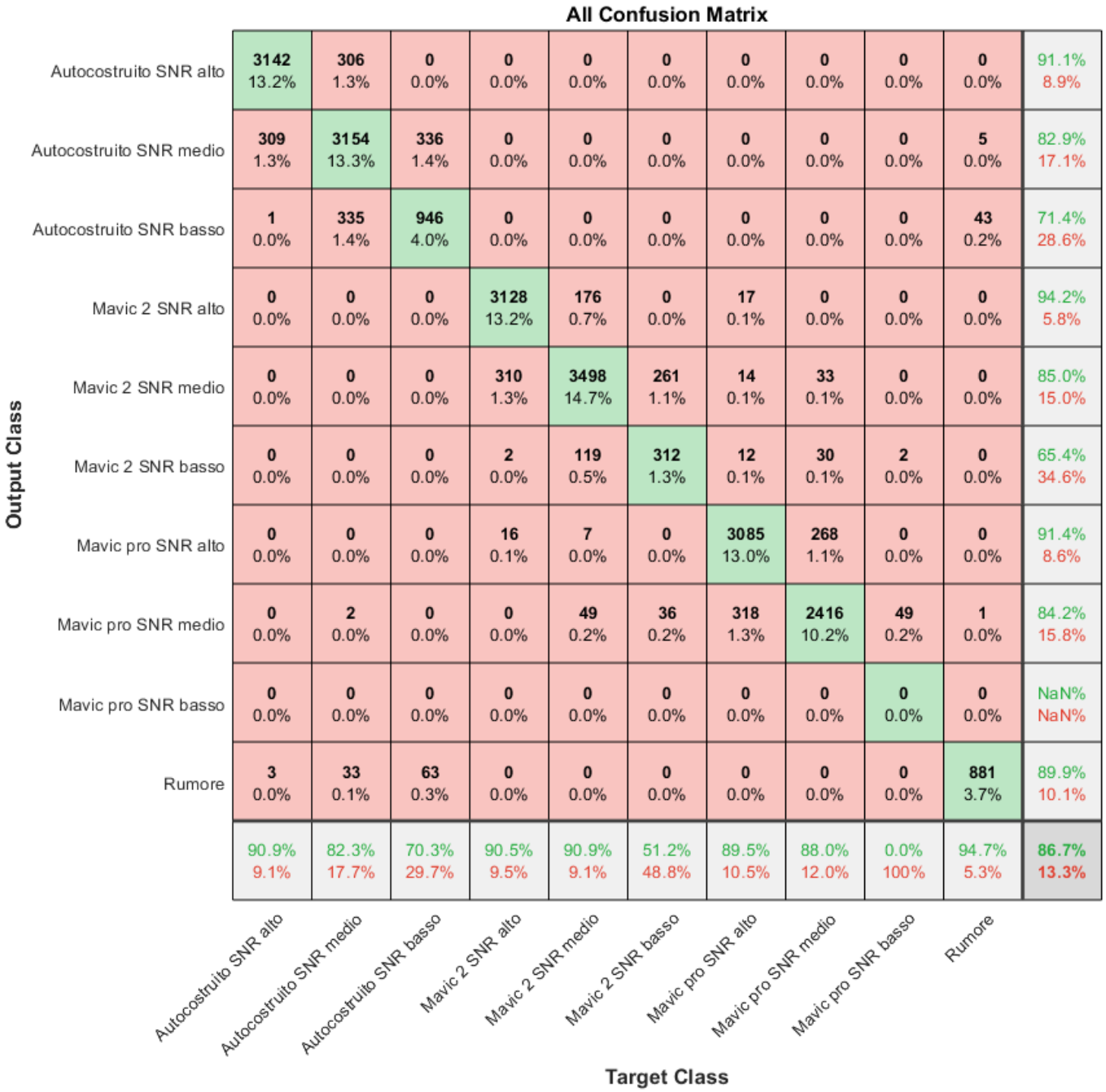
(b) Mavic pro.

Modalità Utilizzo	Percentuale Campioni	Numero Campioni
Training	70%	120871
Validation	15%	25901
Testing	15%	25901

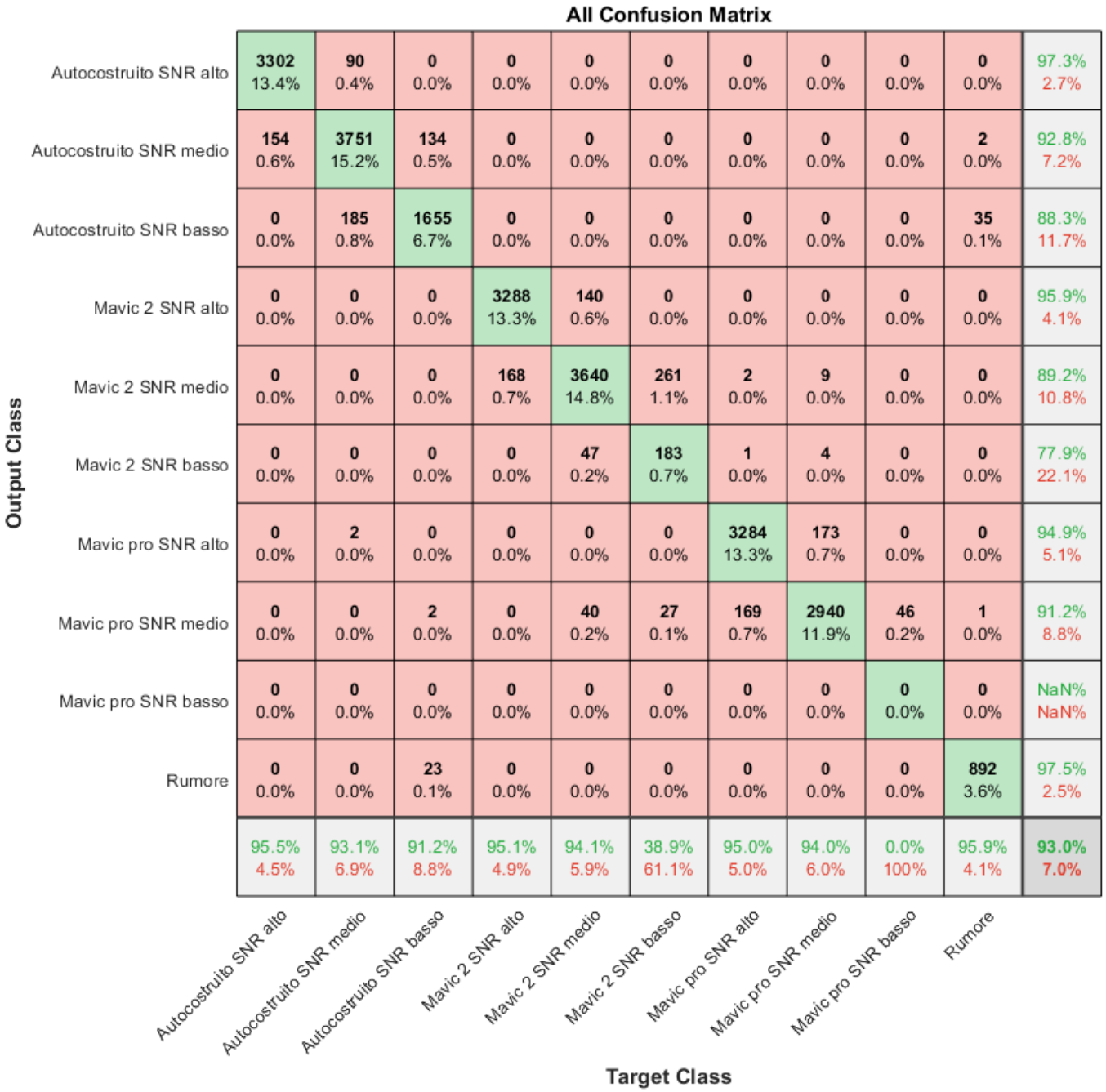
(c) Autocostruito #1.

Tabella 5.5: Suddivisione campioni EXA *ouddoor*.

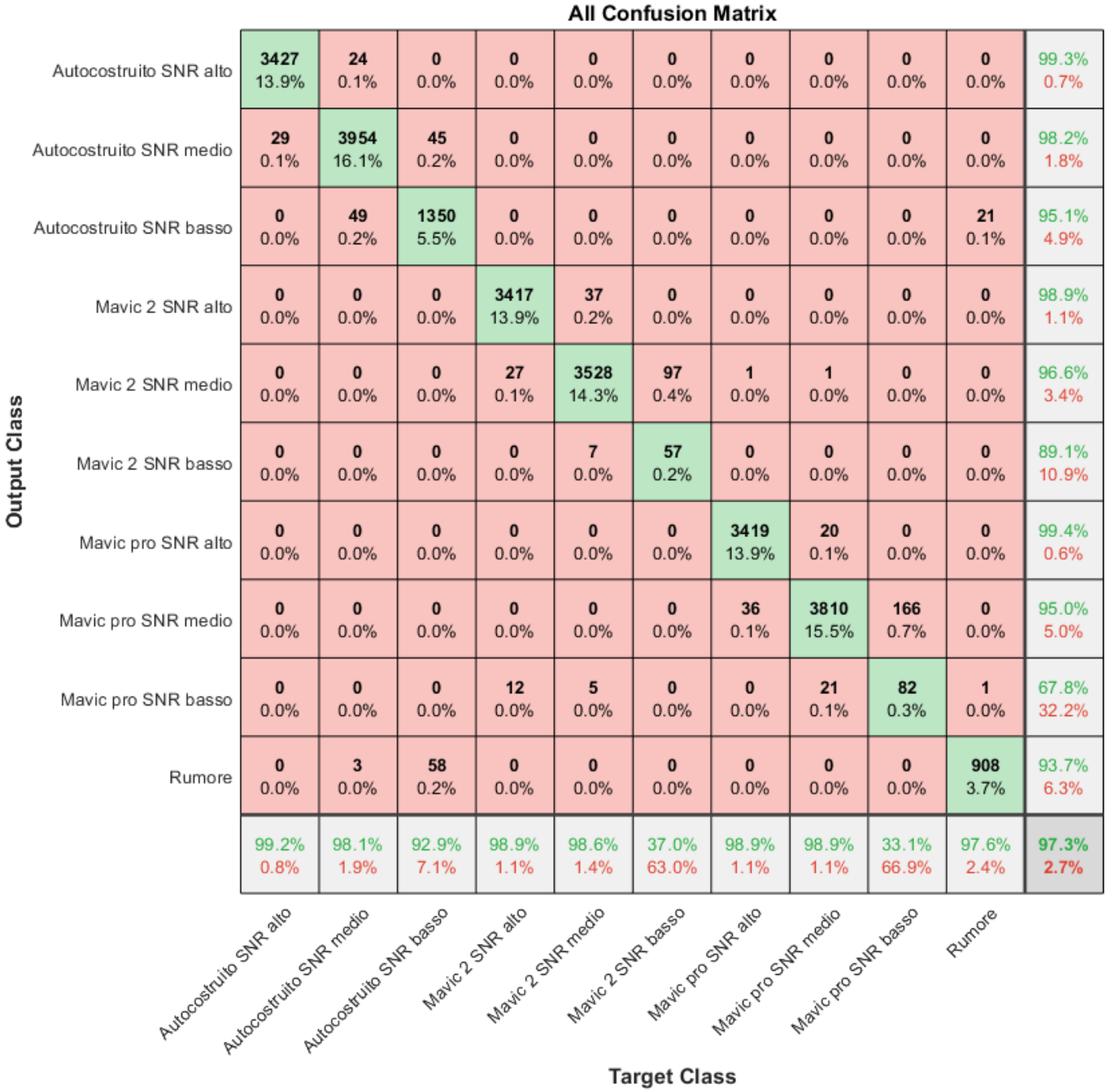
Risultati:


All Confusion Matrix
Output Class
Target Class
Autocostruito SNR alto
Autocostruito SNR medio
Autocostruito SNR basso
Mavic 2 SNR alto
Mavic 2 SNR medio
Mavic 2 SNR basso
Mavic pro SNR alto
Mavic pro SNR medio
Mavic pro SNR basso
Rumore
3142 13.2% | 306 1.3% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 91.1% 8.9%
309 1.3% | 3154 13.3% | 336 1.4% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 5 0.0% | 82.9% 17.1%
1 0.0% | 335 1.4% | 946 4.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 43 0.2% | 71.4% 28.6%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3128 13.2% | 176 0.7% | 0 0.0% | 17 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 94.2% 5.8%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 310 1.3% | 3498 14.7% | 261 1.1% | 14 0.1% | 33 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 85.0% 15.0%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 2 0.0% | 119 0.5% | 312 1.3% | 12 0.1% | 30 0.1% | 2 0.0% | 0 0.0% | 65.4% 34.6%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 16 0.1% | 7 0.0% | 0 0.0% | 3085 13.0% | 268 1.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 91.4% 8.6%
0 0.0% | 2 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 49 0.2% | 36 0.2% | 318 1.3% | 2416 10.2% | 49 0.2% | 1 0.0% | 84.2% 15.8%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | NaN% NaN%
3 0.0% | 33 0.1% | 63 0.3% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 881 3.7% | 89.9% 10.1%
90.9% 9.1% | 82.3% 17.7% | 70.3% 29.7% | 90.5% 9.5% | 90.9% 9.1% | 51.2% 48.8% | 89.5% 10.5% | 88.0% 12.0% | 0.0% 100% | 94.7% 5.3% | 86.7% 13.3%

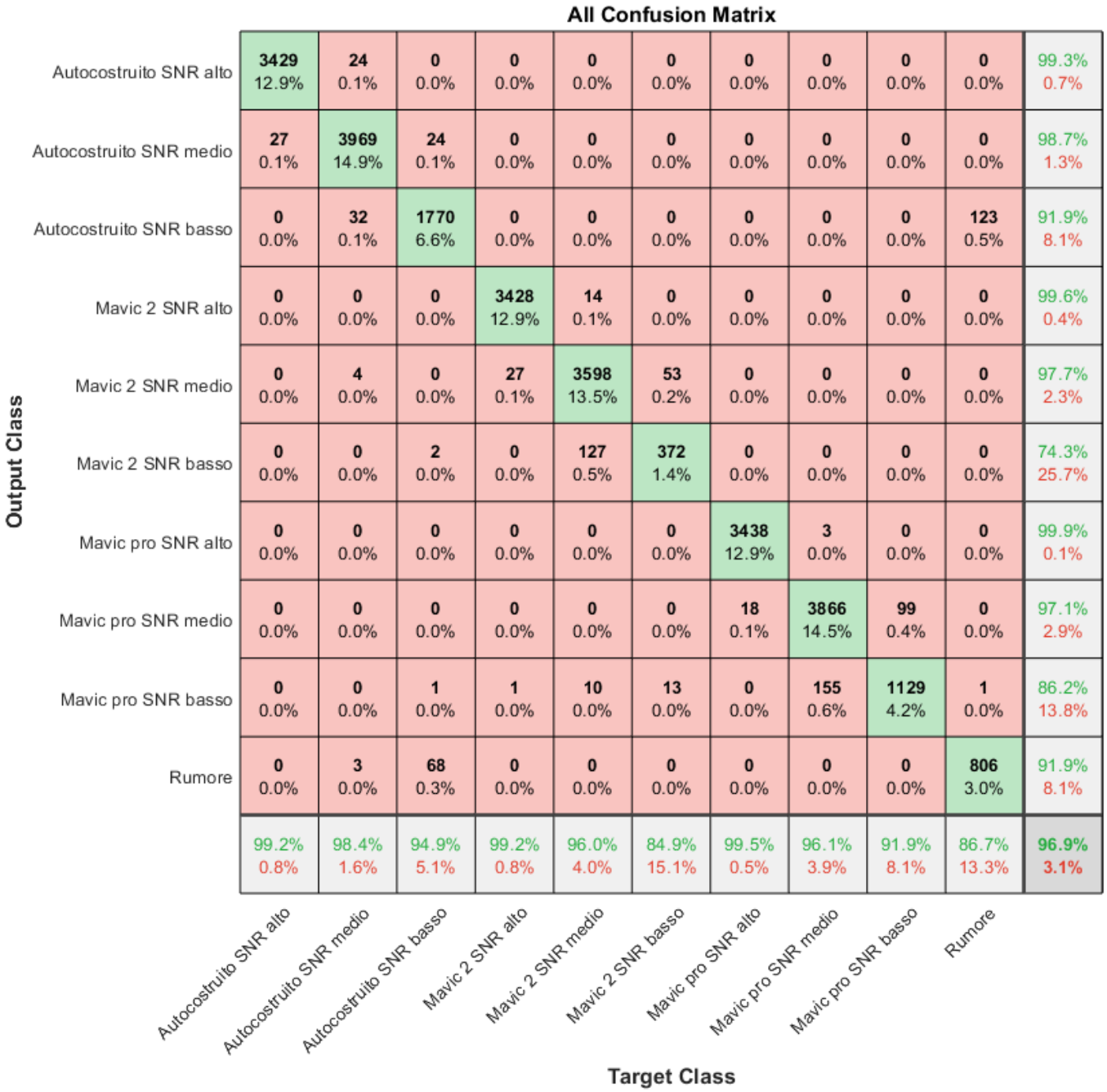
(a) $RBW = 8MHz$


All Confusion Matrix
Output Class
Target Class
Autocostruito SNR alto
Autocostruito SNR medio
Autocostruito SNR basso
Mavic 2 SNR alto
Mavic 2 SNR medio
Mavic 2 SNR basso
Mavic pro SNR alto
Mavic pro SNR medio
Mavic pro SNR basso
Rumore
3302 13.4% | 90 0.4% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 97.3% 2.7%
154 0.6% | 3751 15.2% | 134 0.5% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 2 0.0% | 92.8% 7.2%
0 0.0% | 185 0.8% | 1655 6.7% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 35 0.1% | 88.3% 11.7%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3288 13.3% | 140 0.6% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 95.9% 4.1%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 168 0.7% | 3640 14.8% | 261 1.1% | 2 0.0% | 9 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 89.2% 10.8%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 47 0.2% | 183 0.7% | 1 0.0% | 4 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 77.9% 22.1%
0 0.0% | 2 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3284 13.3% | 173 0.7% | 0 0.0% | 0 0.0% | 94.9% 5.1%
0 0.0% | 0 0.0% | 2 0.0% | 0 0.0% | 40 0.2% | 27 0.1% | 169 0.7% | 2940 11.9% | 46 0.2% | 1 0.0% | 91.2% 8.8%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | NaN% NaN%
0 0.0% | 0 0.0% | 23 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 892 3.6% | 97.5% 2.5%
95.5% 4.5% | 93.1% 6.9% | 91.2% 8.8% | 95.1% 4.9% | 94.1% 5.9% | 38.9% 61.1% | 95.0% 5.0% | 94.0% 6.0% | 0.0% 100% | 95.9% 4.1% | 93.0% 7.0%

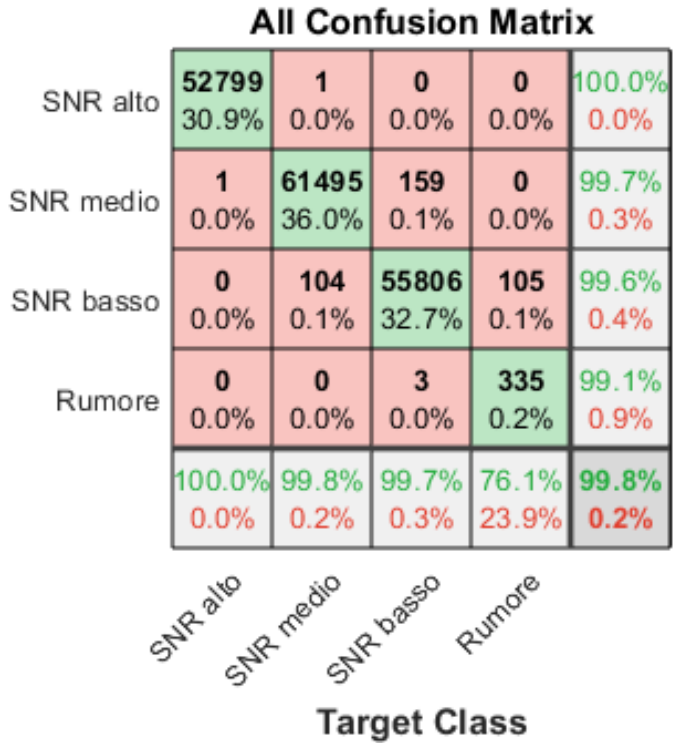
(b) $RBW = 1MHz$


All Confusion Matrix
Output Class
Target Class
Autocostruito SNR alto
Autocostruito SNR medio
Autocostruito SNR basso
Mavic 2 SNR alto
Mavic 2 SNR medio
Mavic 2 SNR basso
Mavic pro SNR alto
Mavic pro SNR medio
Mavic pro SNR basso
Rumore
3427 13.9% | 24 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 99.3% 0.7%
29 0.1% | 3954 16.1% | 45 0.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 98.2% 1.8%
0 0.0% | 49 0.2% | 1350 5.5% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 21 0.1% | 95.1% 4.9%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3417 13.9% | 37 0.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 98.9% 1.1%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 27 0.1% | 3528 14.3% | 97 0.4% | 1 0.0% | 1 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 96.6% 3.4%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 7 0.0% | 57 0.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 89.1% 10.9%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3419 13.9% | 20 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 99.4% 0.6%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 36 0.1% | 3810 15.5% | 166 0.7% | 0 0.0% | 95.0% 5.0%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 12 0.0% | 5 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 21 0.1% | 82 0.3% | 1 0.0% | 67.8% 32.2%
0 0.0% | 3 0.0% | 58 0.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 908 3.7% | 93.7% 6.3%
99.2% 0.8% | 98.1% 1.9% | 92.9% 7.1% | 98.9% 1.1% | 98.6% 1.4% | 37.0% 63.0% | 98.9% 1.1% | 98.9% 1.1% | 33.1% 66.9% | 97.6% 2.4% | 97.3% 2.7%

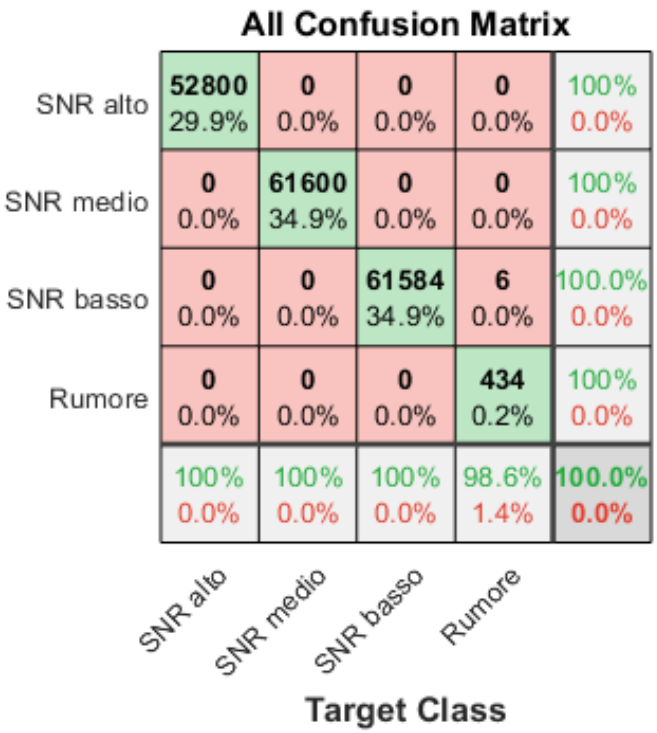
(c) $RBW = 100kHz$


All Confusion Matrix
Output Class
Target Class
Autocostruito SNR alto
Autocostruito SNR medio
Autocostruito SNR basso
Mavic 2 SNR alto
Mavic 2 SNR medio
Mavic 2 SNR basso
Mavic pro SNR alto
Mavic pro SNR medio
Mavic pro SNR basso
Rumore
3429 12.9% | 24 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 99.3% 0.7%
27 0.1% | 3969 14.9% | 24 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 98.7% 1.3%
0 0.0% | 32 0.1% | 1770 6.6% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 123 0.5% | 91.9% 8.1%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3428 12.9% | 14 0.1% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 99.6% 0.4%
0 0.0% | 4 0.0% | 0 0.0% | 27 0.1% | 3598 13.5% | 53 0.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 97.7% 2.3%
0 0.0% | 0 0.0% | 2 0.0% | 0 0.0% | 127 0.5% | 372 1.4% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 74.3% 25.7%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 3438 12.9% | 3 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 99.9% 0.1%
0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 18 0.1% | 3866 14.5% | 99 0.4% | 0 0.0% | 97.1% 2.9%
0 0.0% | 0 0.0% | 1 0.0% | 1 0.0% | 10 0.0% | 13 0.0% | 0 0.0% | 155 0.6% | 1129 4.2% | 1 0.0% | 86.2% 13.8%
0 0.0% | 3 0.0% | 68 0.3% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 806 3.0% | 91.9% 8.1%
99.2% 0.8% | 98.4% 1.6% | 94.9% 5.1% | 99.2% 0.8% | 96.0% 4.0% | 84.9% 15.1% | 99.5% 0.5% | 96.1% 3.9% | 91.9% 8.1% | 86.7% 13.3% | 96.9% 3.1%

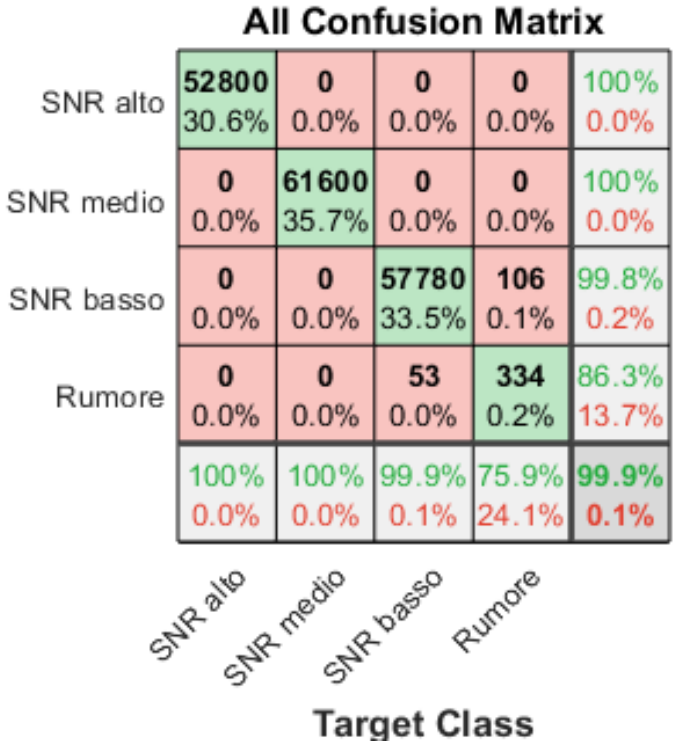
(d) $RBW = 10kHz$



(e) Mavic 2.



(f) Mavic pro.



(g) Autocostruito #1.

Figura 5.11: *Confusion matrix* al variare della *resolution bandwidth outdoor*.

5.4 Parametri Real-Time Spectrum Analyzer 306B e Agilentt EXA N9010A

Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	30
Numero punti	801
RBW	8MHz
VBW	8MHz
Ref. Level	-30 dBm
Sweep Type	FFT

(a) $RBW = 8MHz$

Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	30
Numero punti	2401
RBW	1MHz
VBW	1MHz
Ref. Level	-30 dBm
Sweep Type	FFT

(b) $RBW = 1MHz$

Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	30
Numero punti	16001
RBW	100kHz
VBW	100kHz
Ref. Level	-30 dBm
Sweep Type	FFT

(c) $RBW = 100kHz$

Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	30
Numero punti	64001
RBW	10kHz
VBW	10kHz
Ref. Level	-30 dBm
Sweep Type	FFT

(d) $RBW = 10kHz$

Tabella 5.6: Parametri RSA306B per addestramento *indoor*.

Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	6
Numero punti	1001
RBW	1kHz
VBW	1kHz
Span	11 kHz
Attenuazione	0 dB
Sweep Type	FFT
Sweep time	≈2.9ms

(a) $RBW = 1kHz$

Trace	Average RMS
Detector	Peak
Numero scansioni	6
Numero punti	1001
RBW	100Hz
VBW	100Hz
Span	1.1 kHz
Attenuazione	0 dB
Sweep Type	FFT
Sweep time	≈19.3ms

(b) $RBW = 100Hz$

Tabella 5.7: Parametri EXA per addestramento *indoor*.

Capitolo 6

Conclusioni

Nella prima fase sono state eseguite delle misure di emissione irradiata in camera anecoica, attraverso uno scanner sferico, volte a caratterizzare i livelli di campo elettrico dei droni e conseguentemente valutare la possibilità, almeno in linea teorica, di una loro rilevazione ad una distanza operativamente significativa. Sono stati registrati livelli di campo elettrico anche superiori a $40dB\mu V/m$, segnali che, se a banda relativamente stretta, possono essere rilevabili anche a chilometri di distanza, con antenne direttive. La banda di frequenze individuata per il sistema di scoperta è compresa tra 100 e 1000 MHz. Di seguito vengono riportati i risultati di uno dei droni analizzati.

L'idoneità dei segnali individuati è stata indagata con misure in campo aperto al fine di valutarne il comportamento radiativo ed escludere le eventuali componenti reattive. A tal proposito le acquisizioni sono state condotte per due diverse distanze (3 m e 10 m) in modo tale da studiarne il decadimento spaziale tramite un modello di propagazione teorico a due raggi. Il buon accordo tra le misure e il modello propagativo, conferma sperimentalmente l'ipotesi che le emissioni non intenzionali misurate sono di tipo radiativo e per questo misurabili a distanze più elevate, a differenza delle componenti reattive.

Nella seconda fase sono stati effettuati ulteriori approfondimenti e misure per caratterizzare il comportamento temporale dei segnali individuati e il conseguente contenuto spettrale. In primo luogo sono state effettuate delle acquisizioni utilizzando come RBW 10kHz e 1kHz eseguendo le misure in modalità trace max hold e trace average. Dai risultati ottenuti si è visto come diminuendo la resolution bandwidth o a parità di RBW passando da una misura trace max hold a una trace average, molti segnali misurati tendono a un livello di campo elettrico inferiore, ciò è dovuto al fatto che tali segnali sono a banda larga rispetto alla RBW di 10 kHz. Al contrario i segnali che non hanno subito considerevoli variazioni in ampiezza al variare della RBW sono a banda stretta. Quest'ultimi sono più adatti ad essere misurati a distanze maggiori in quanto permettono di ottenere livelli di rapporto segnale-rumore più elevati al diminuire della RBW. Sono state, inoltre, eseguite delle scansioni sferiche sui picchi più significativi dei droni analizzati al fine di valutare la distribuzione spaziale dei campi misurati. Infine, è stato sviluppato un programma che fosse in grado di identificare

i picchi che soddisfacessero dei requisiti scelti ed effettuare delle misure al variare della resolution bandwidth (100 Hz, 1 kHz, 10kHz), in modalità zero span, in modo da approfondire la conoscenza dell'andamento temporale dell'inviluppo dei segnali individuati e di conseguenza il loro contenuto spettrale.

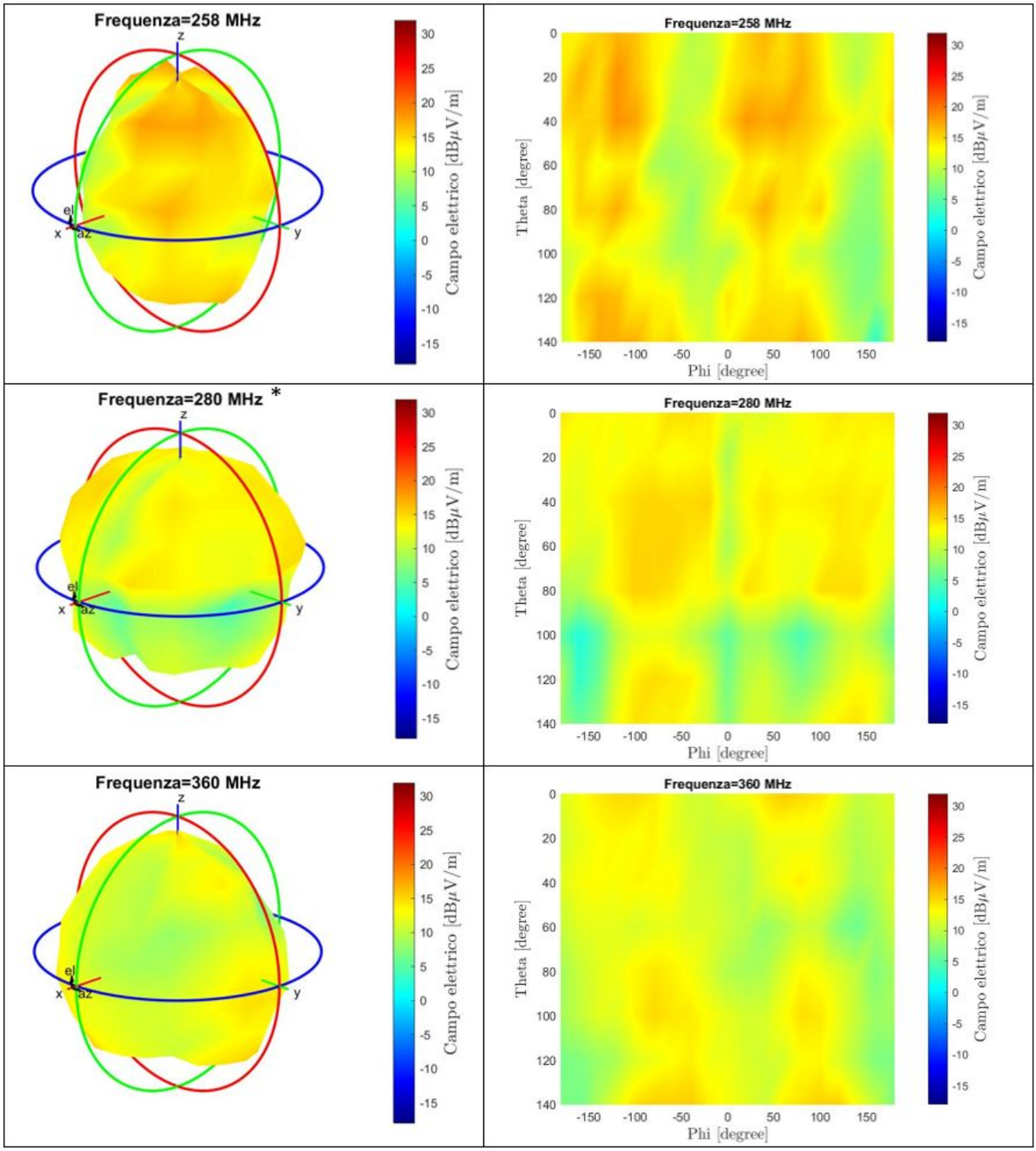
Le informazioni ottenute dalle analisi precedenti, in conclusione, sono state utilizzate al fine di generare un dataset per lo sviluppo di una rete neurale in grado di classificare la traccia EM degli UAV, utilizzando una rete feed-forward. Per rendere il sistema più flessibile e facilmente impiegabile nello scenario operativo, è stata scritta una funzione Matlab in grado di generare un dataset sintetico per l'addestramento a partire dalle misurazioni ottenute in camera anecoica e dalla caratterizzazione del rumore di fondo dell'ambiente in cui si intende impiegare il sistema. Inoltre, si è scelto di adottare un sistema basato su più RBW in modo tale da utilizzare le acquisizioni con RBW minori (100 Hz e 1 kHz) per la scoperta a distanze maggiori, e impiegare quelle con RBW maggiori (10kHz, 100kHz, 1MHz e 8MHz), contenenti più informazioni spettrali, per l'identificazione e/o sfruttare eventuali segnali coerenti a banda "larga" che potenzialmente guadagnino più di 10 dB ogni incremento di un fattore 10 della resolution bandwidth. In conclusione è stata eseguita una campagna di misure per la valutazione delle prestazioni del sistema sia in ambiente controllato (camera anecoica) che in ambiente rurale.

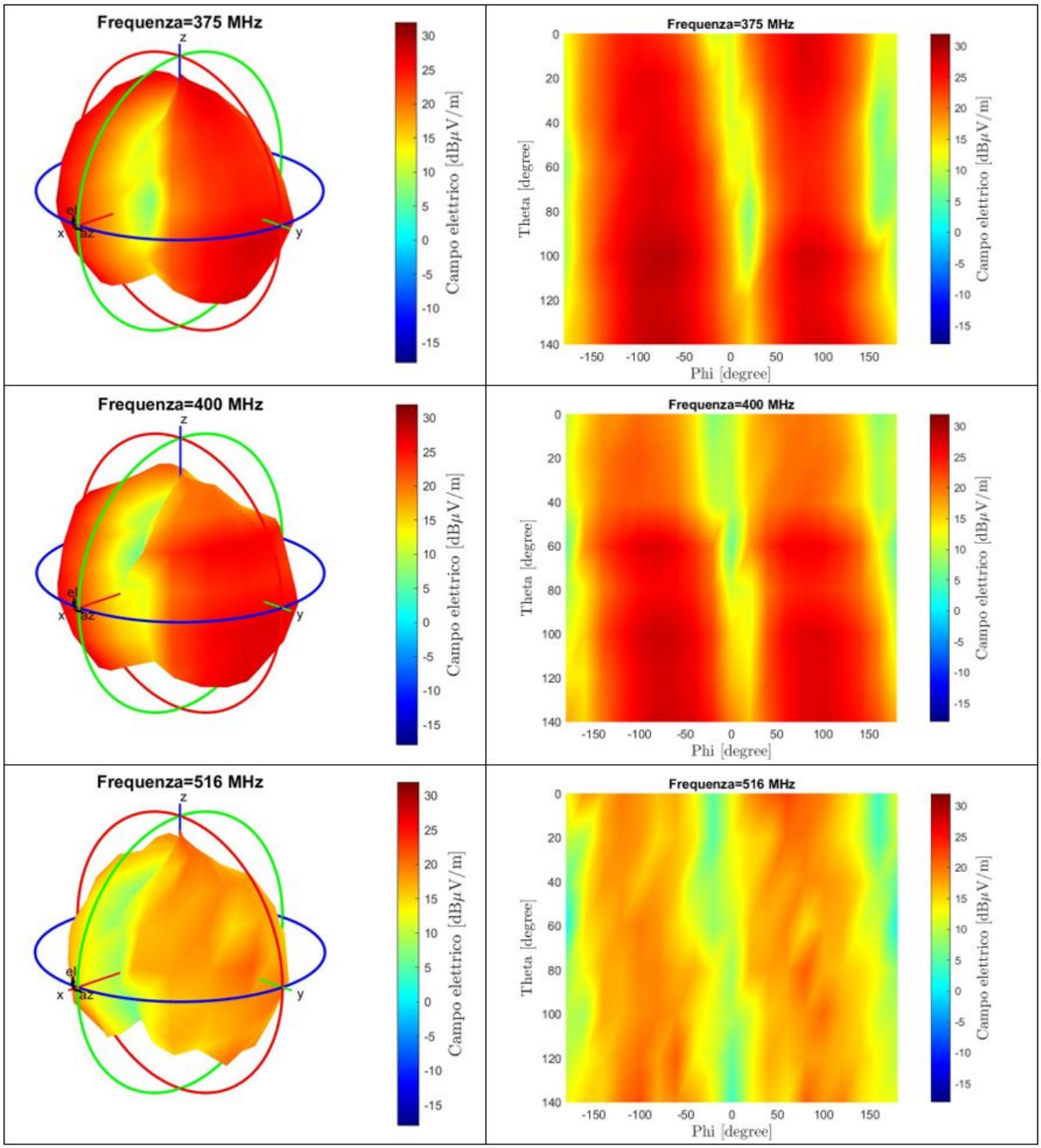
Appendice A

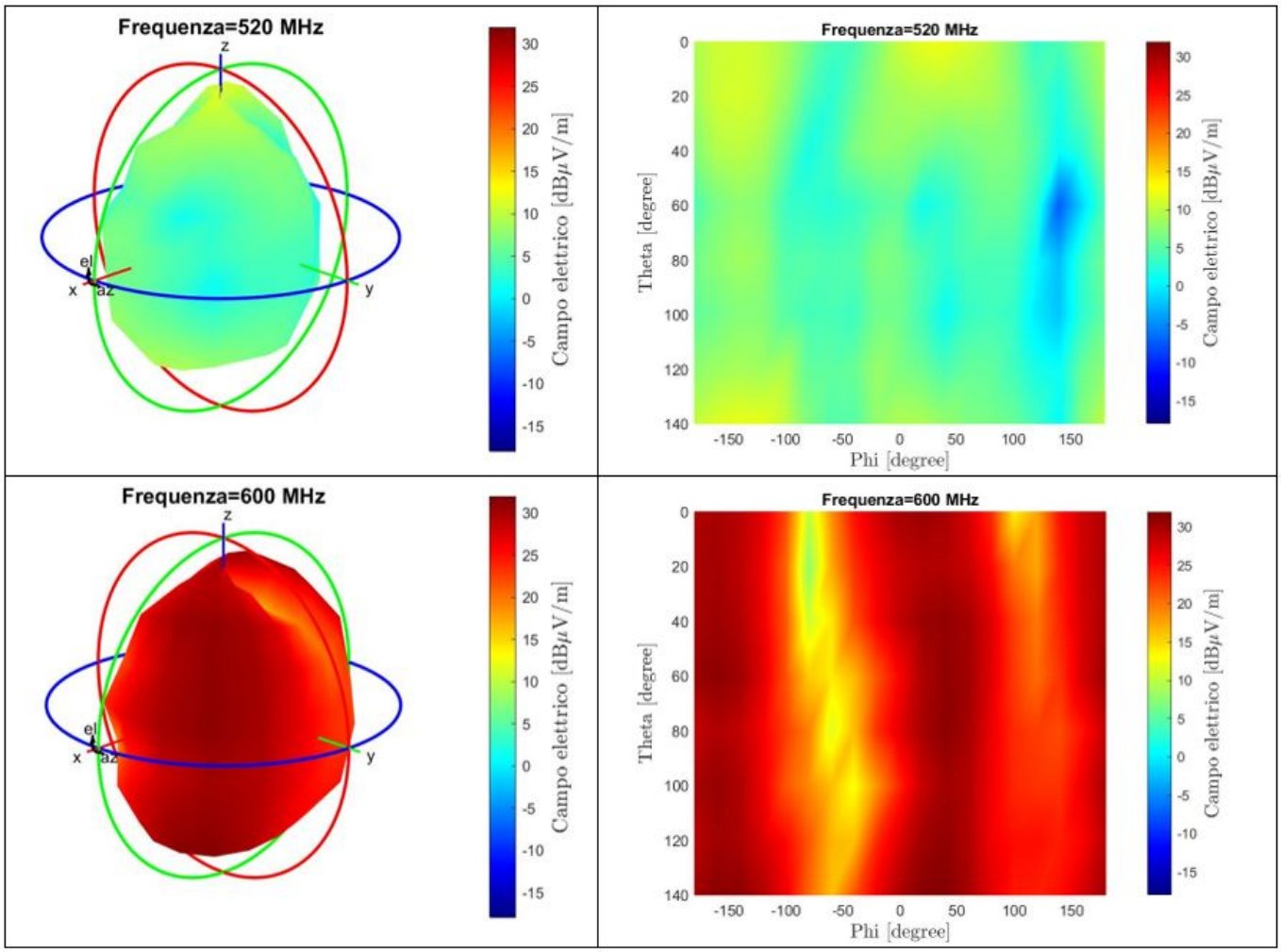
Appendice I

A.1 Mavic 2

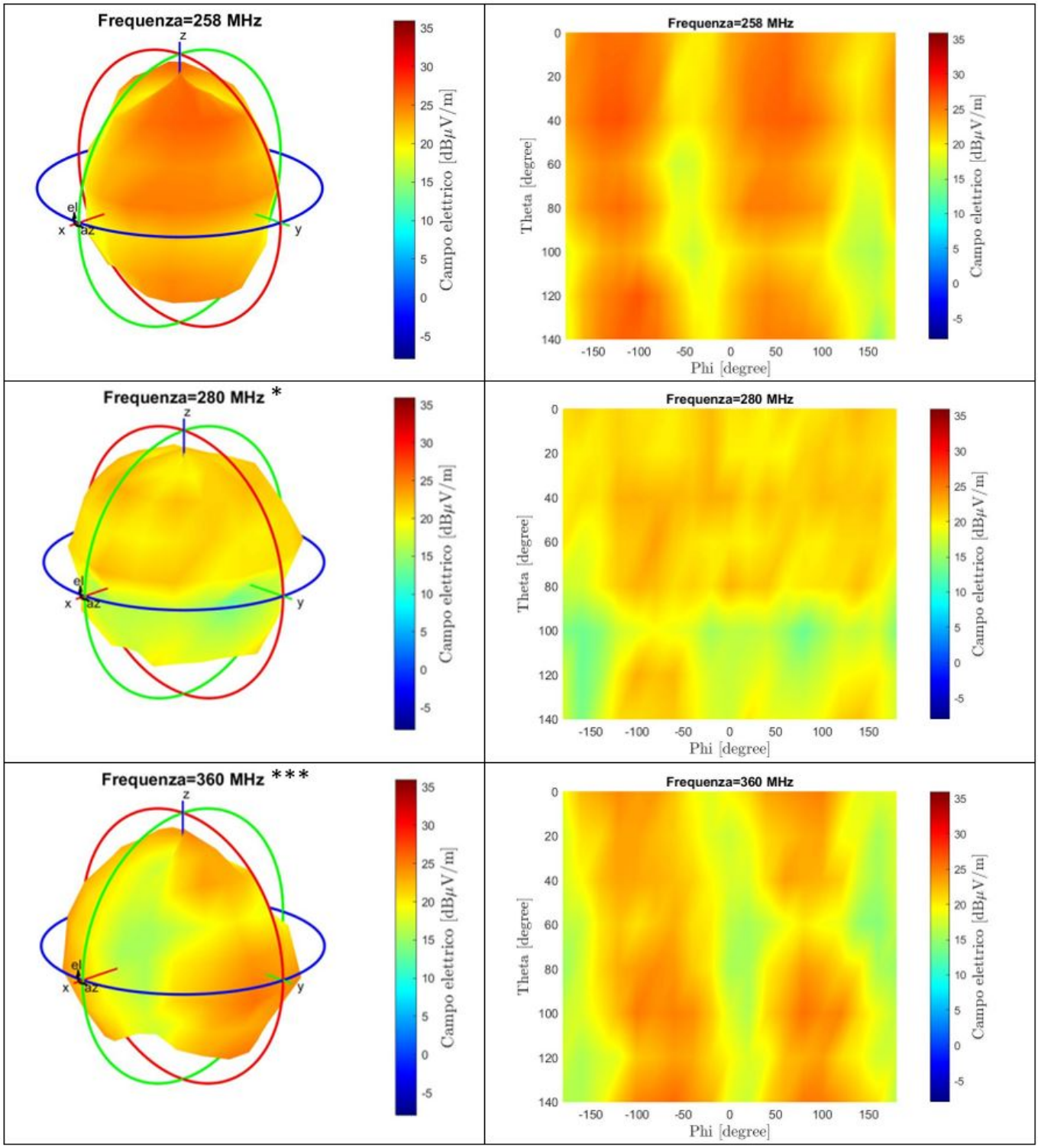
A.1.1 Average

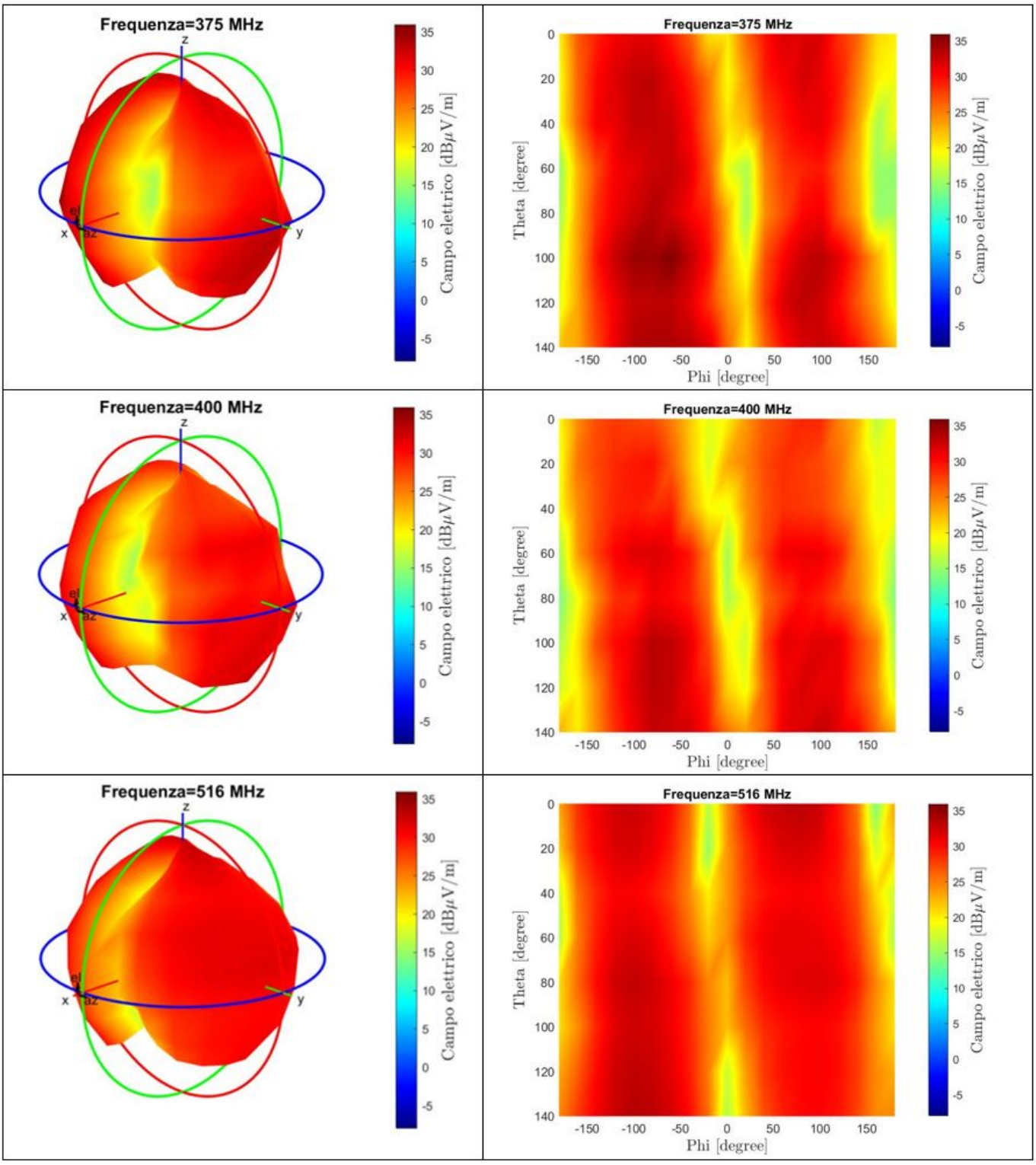


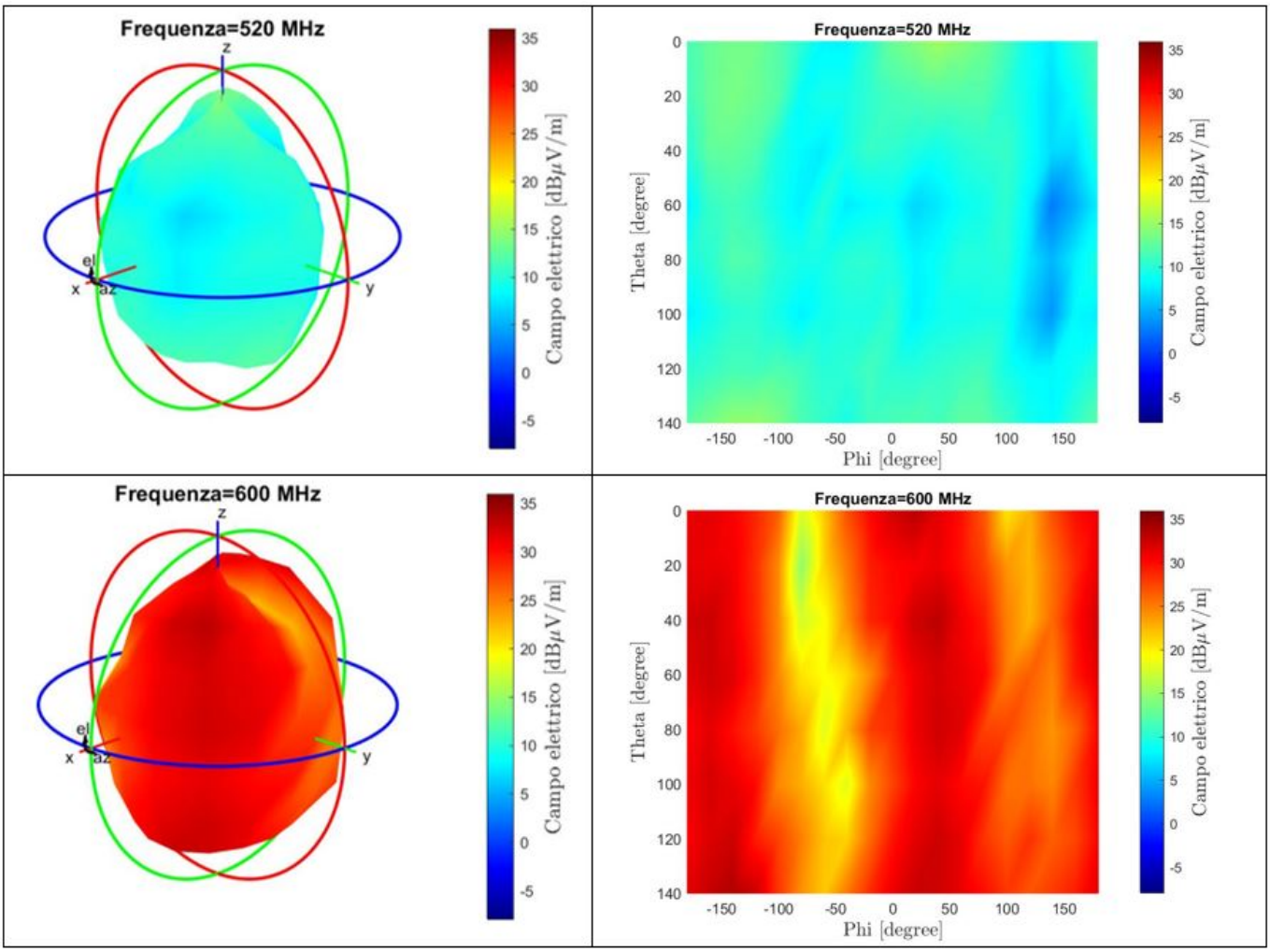

Frequenza=375 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
Frequenza=375 MHz
Theta [degree]
0
20
40
60
80
100
120
140
-150
-100
-50
0
50
100
150
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=400 MHz
Frequenza=400 MHz
Frequenza=516 MHz
Frequenza=516 MHz


Frequenza=520 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=520 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=600 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=600 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]

A.1.2 Max Hold

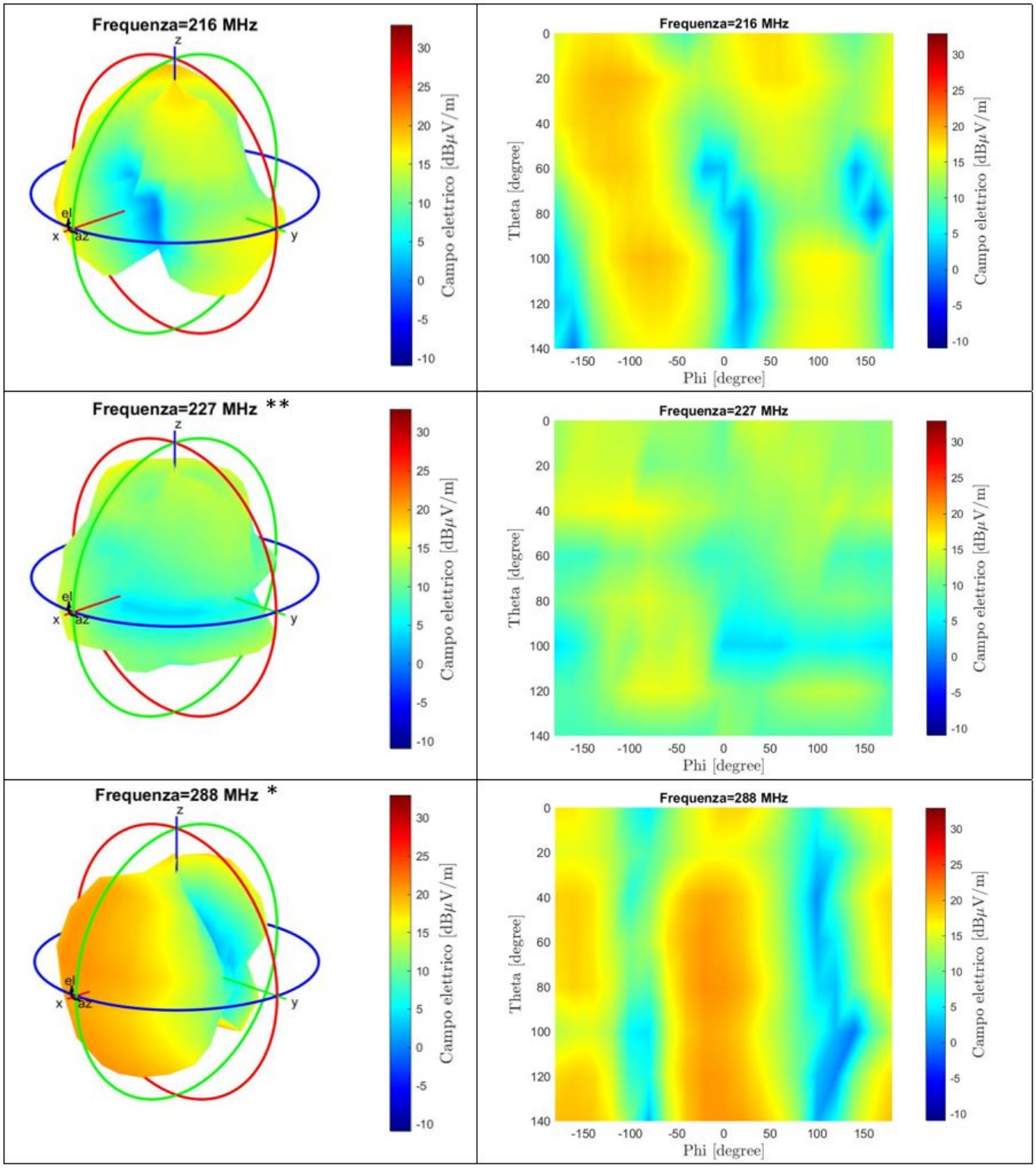

Frequenza=258 MHz
Frequenza=258 MHz
Frequenza=280 MHz *
Frequenza=280 MHz
Frequenza=360 MHz ***
Frequenza=360 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Theta [degree]
Phi [degree]
z
el
x
az
y

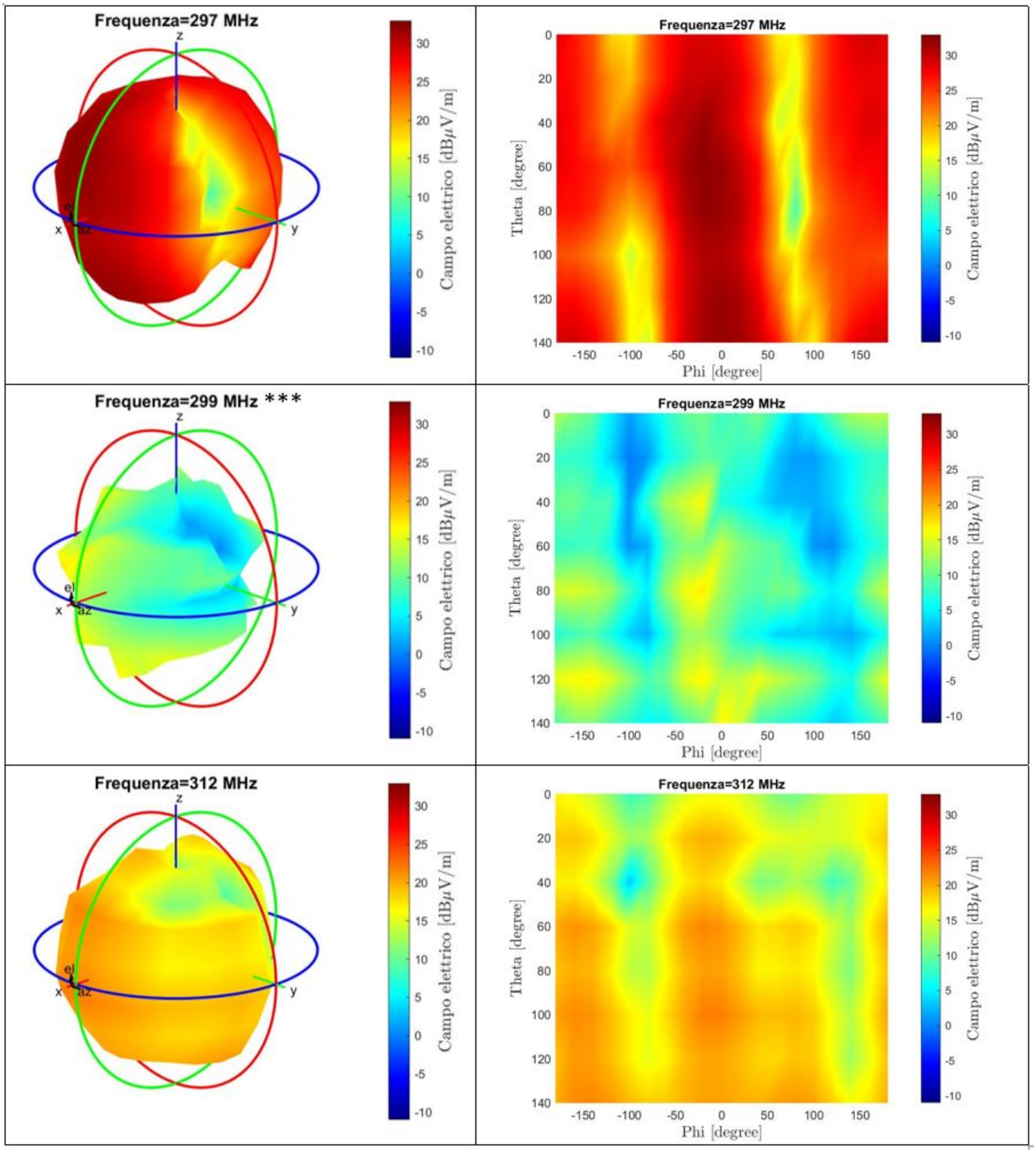

Frequenza=375 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=375 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=400 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=400 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=516 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=516 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]

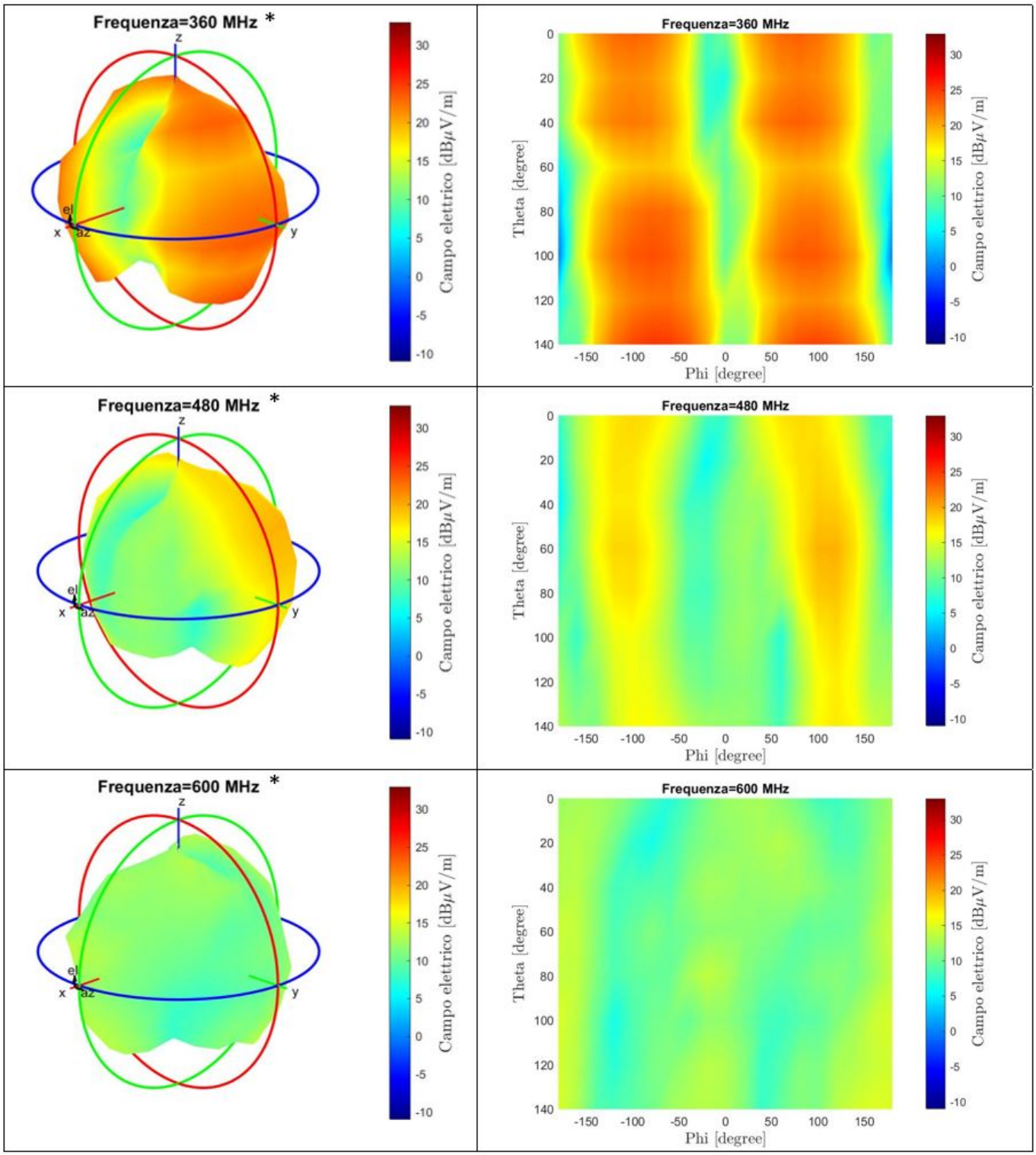

Frequenza=520 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
Frequenza=520 MHz
Theta [degree]
0
20
40
60
80
100
120
140
-150
-100
-50
0
50
100
150
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=600 MHz
Frequenza=600 MHz

A.2 Mavic Pro

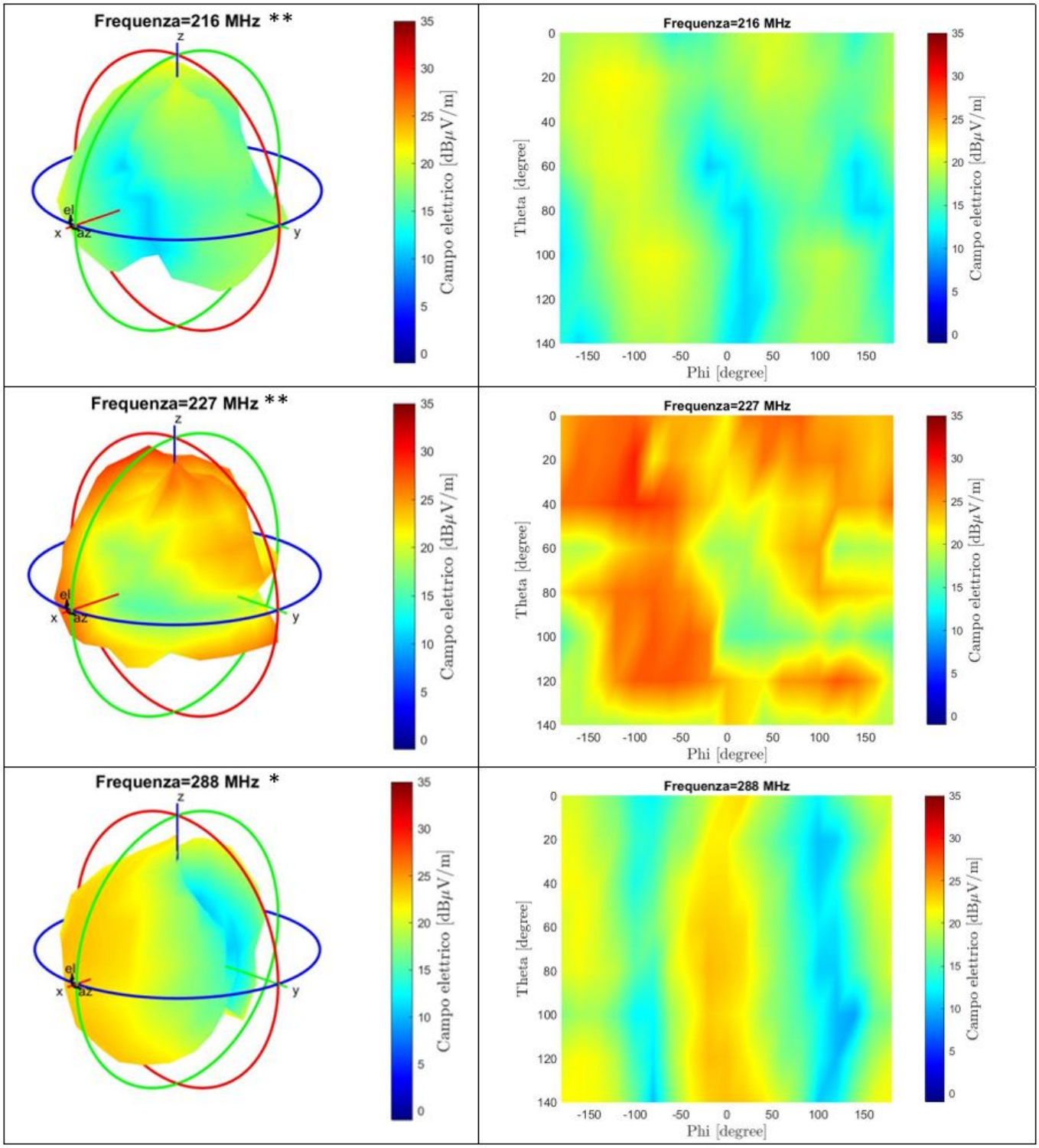
A.2.1 Average

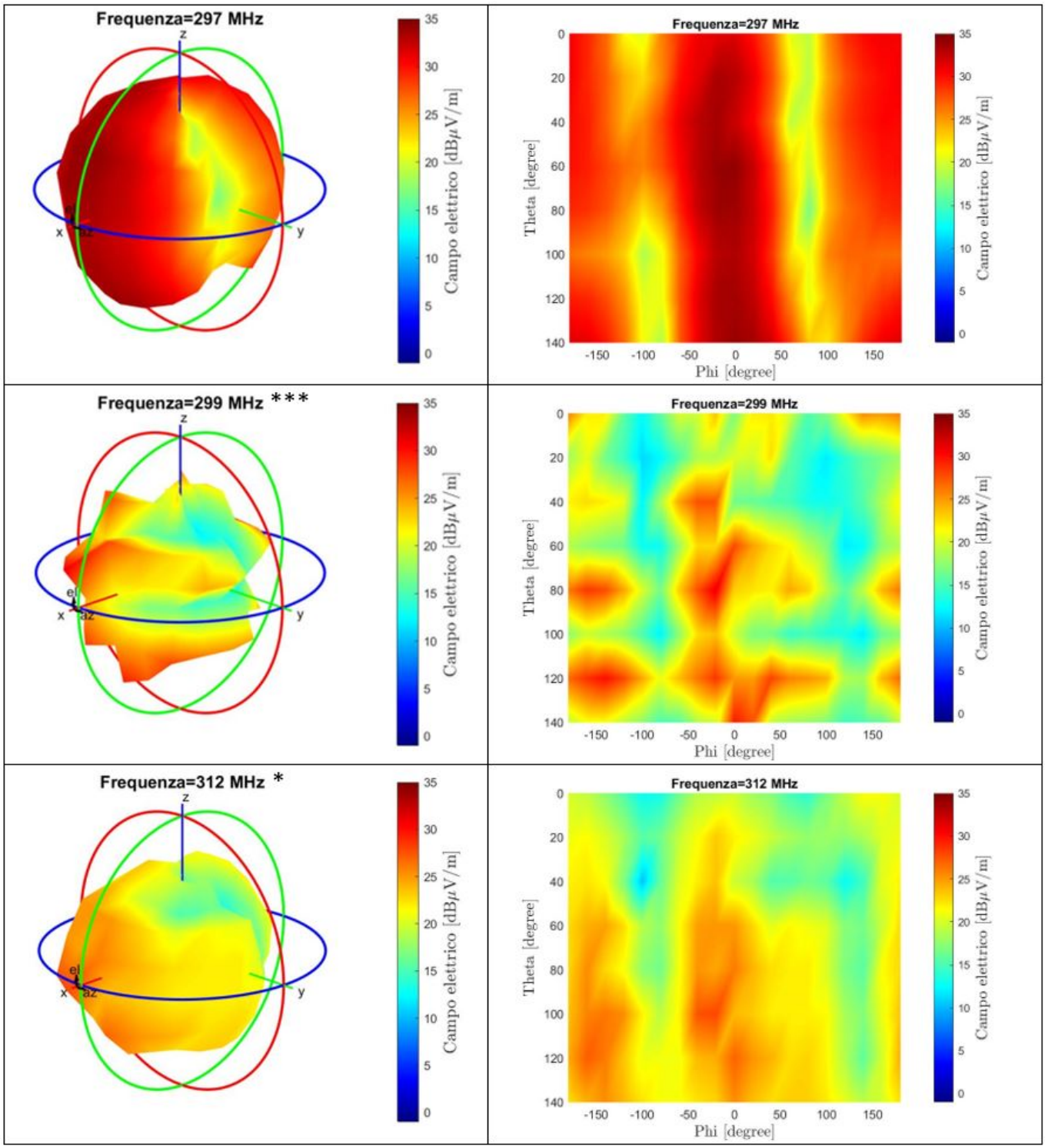


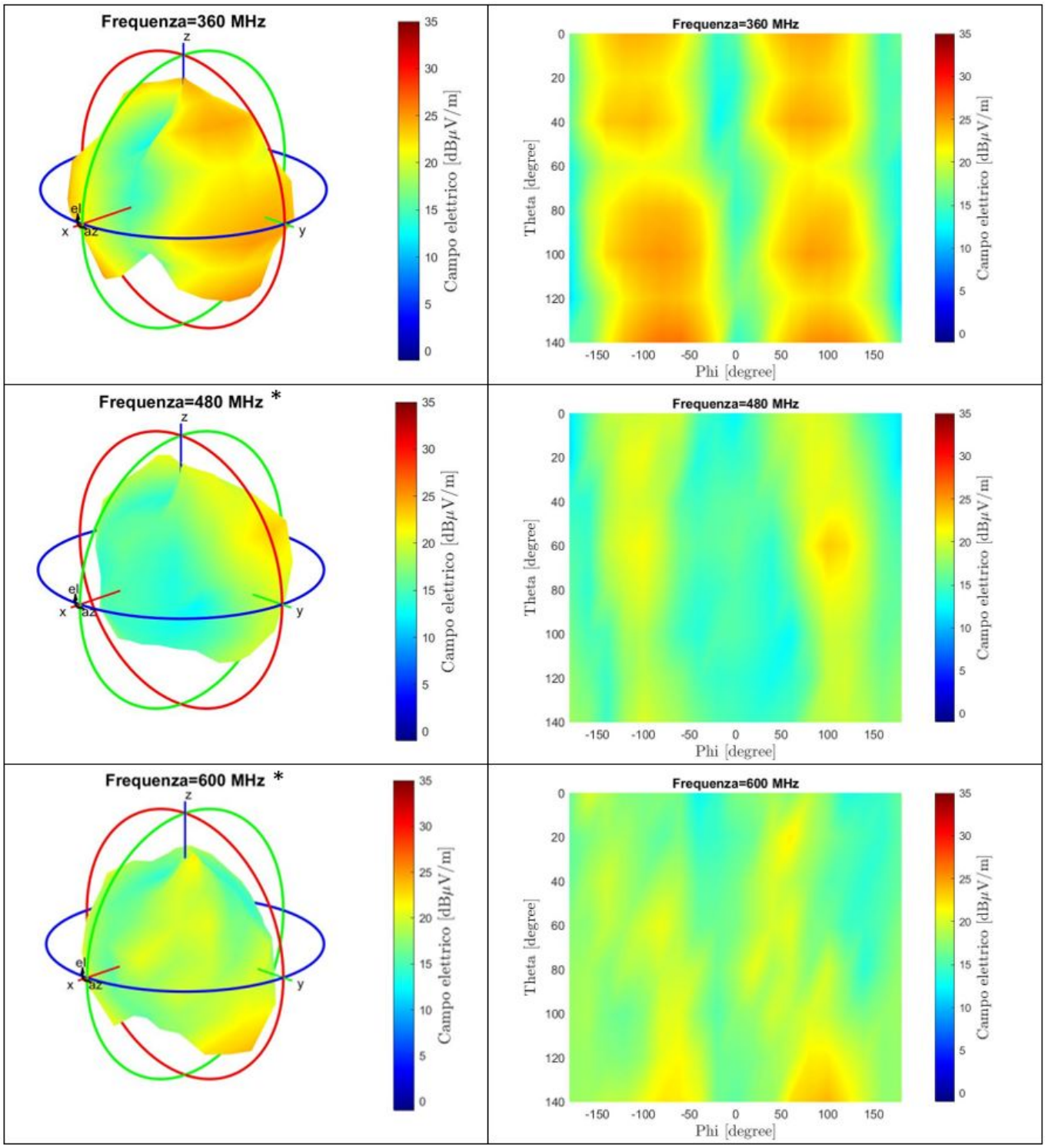

Frequenza=297 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=297 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=299 MHz ***
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=299 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=312 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=312 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]


Frequenza=360 MHz *
Frequenza=360 MHz
Frequenza=480 MHz *
Frequenza=480 MHz
Frequenza=600 MHz *
Frequenza=600 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Theta [degree]
Phi [degree]
z
el
x
az
y

A.2.2 Max Hold

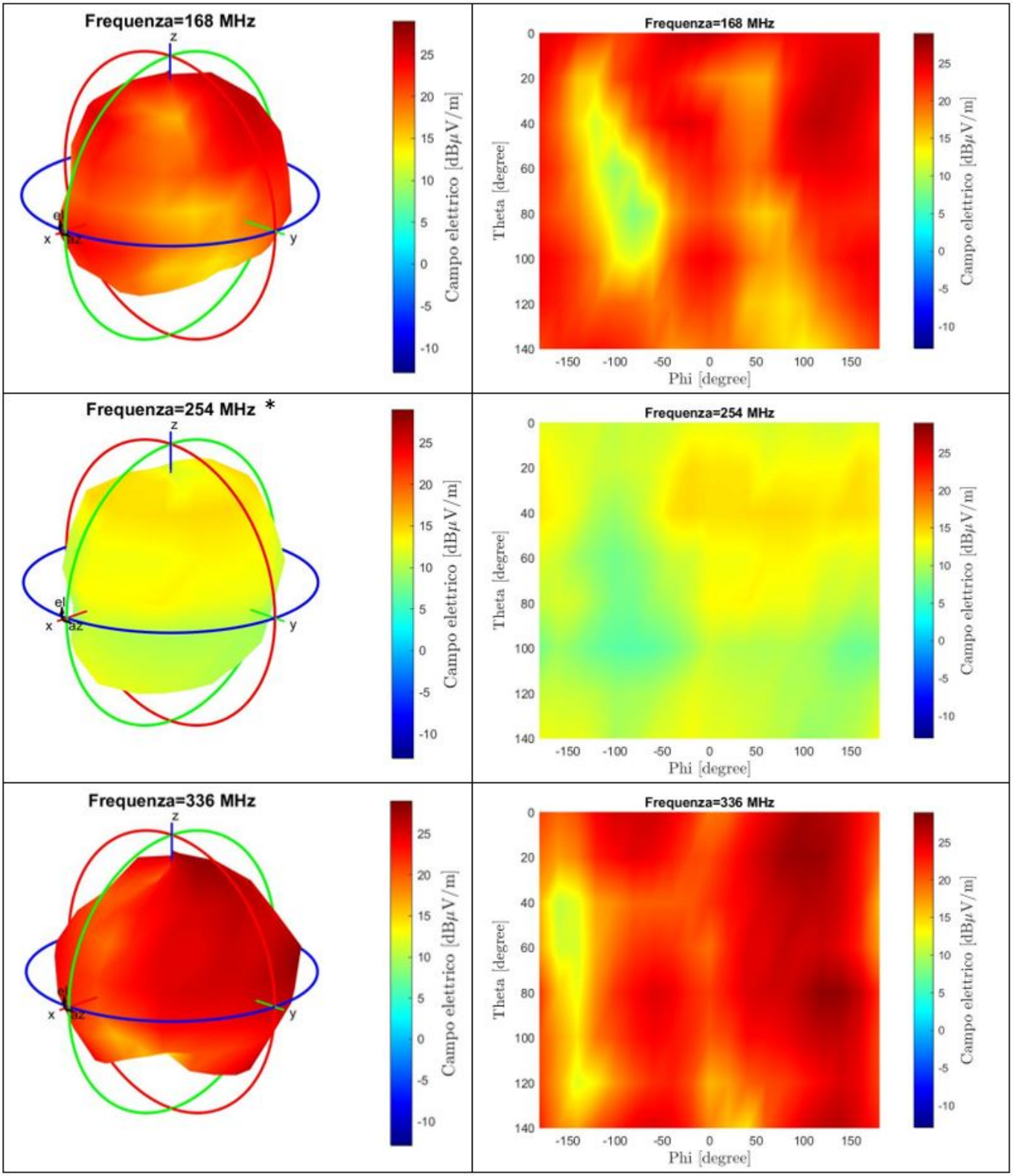

Frequenza=216 MHz **
Frequenza=216 MHz
Frequenza=227 MHz **
Frequenza=227 MHz
Frequenza=288 MHz *
Frequenza=288 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Theta [degree]
Phi [degree]
z
x
y
el
az

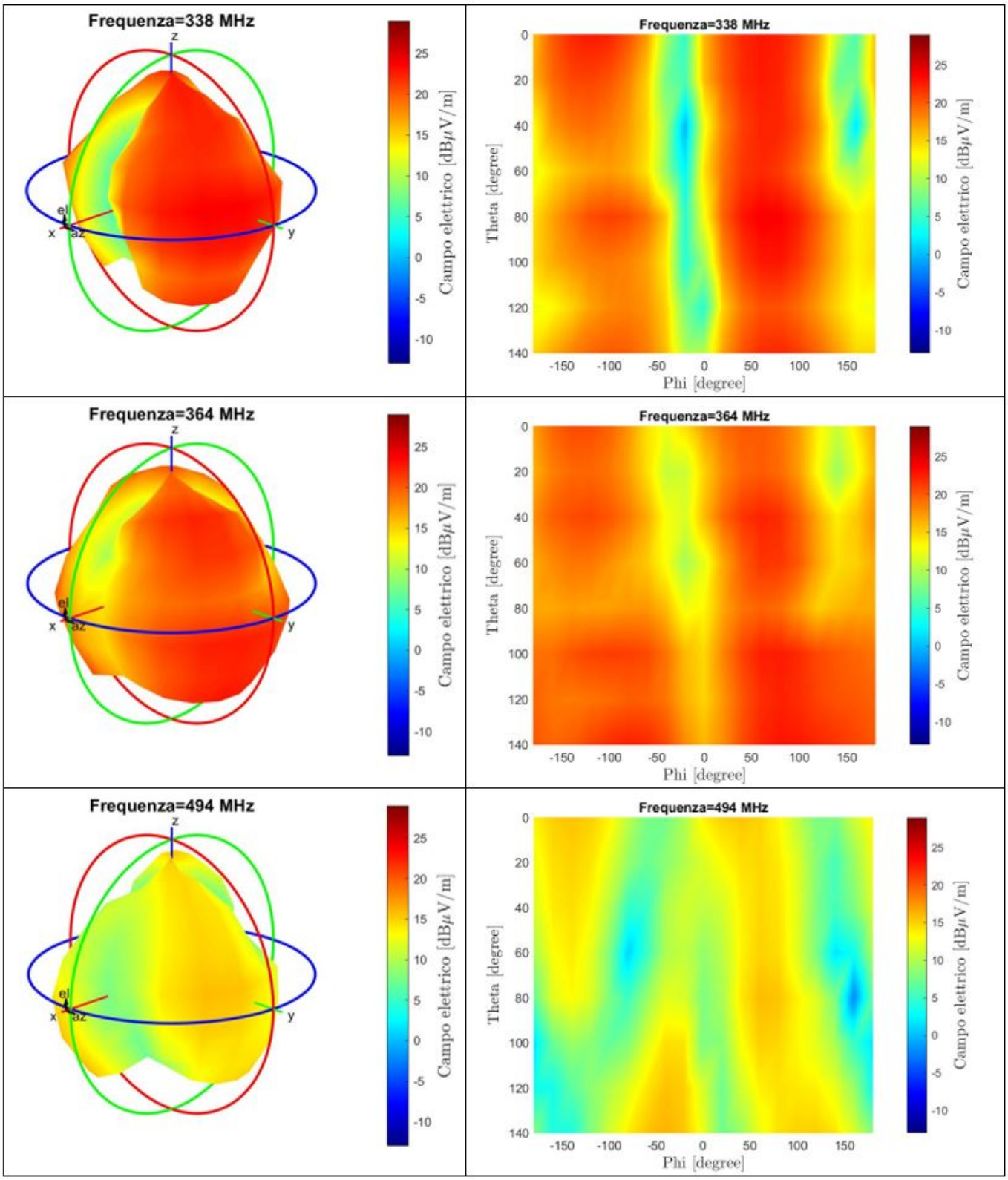

Frequenza=297 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=297 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=299 MHz ***
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=299 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=312 MHz *
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=312 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]

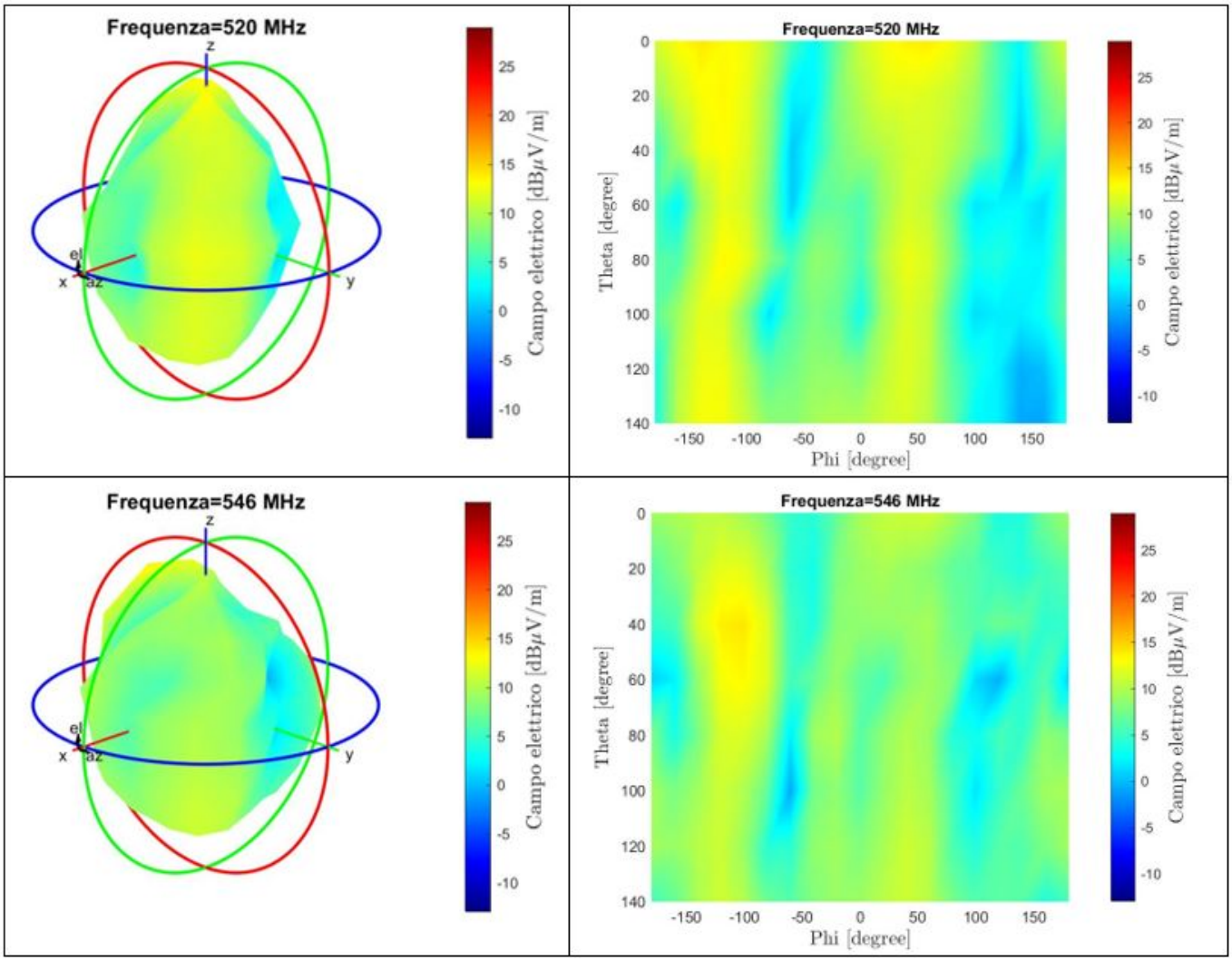

Frequenza=360 MHz
Frequenza=480 MHz *
Frequenza=600 MHz *
Campo elettrico [dBμV/m]
Theta [degree]
Phi [degree]
z
x
y
el
az

A.3 Autocostruito #1

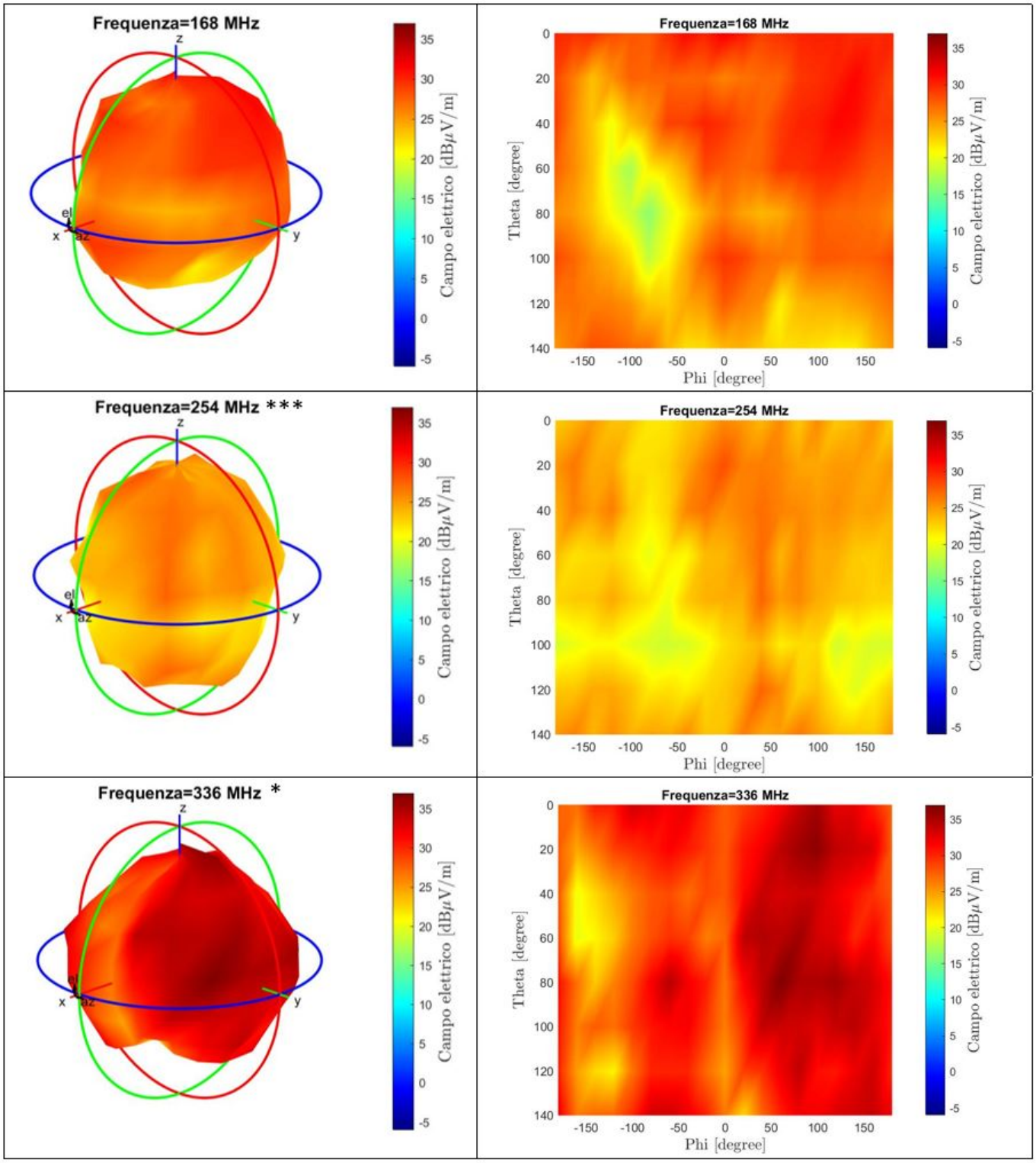
A.3.1 Average

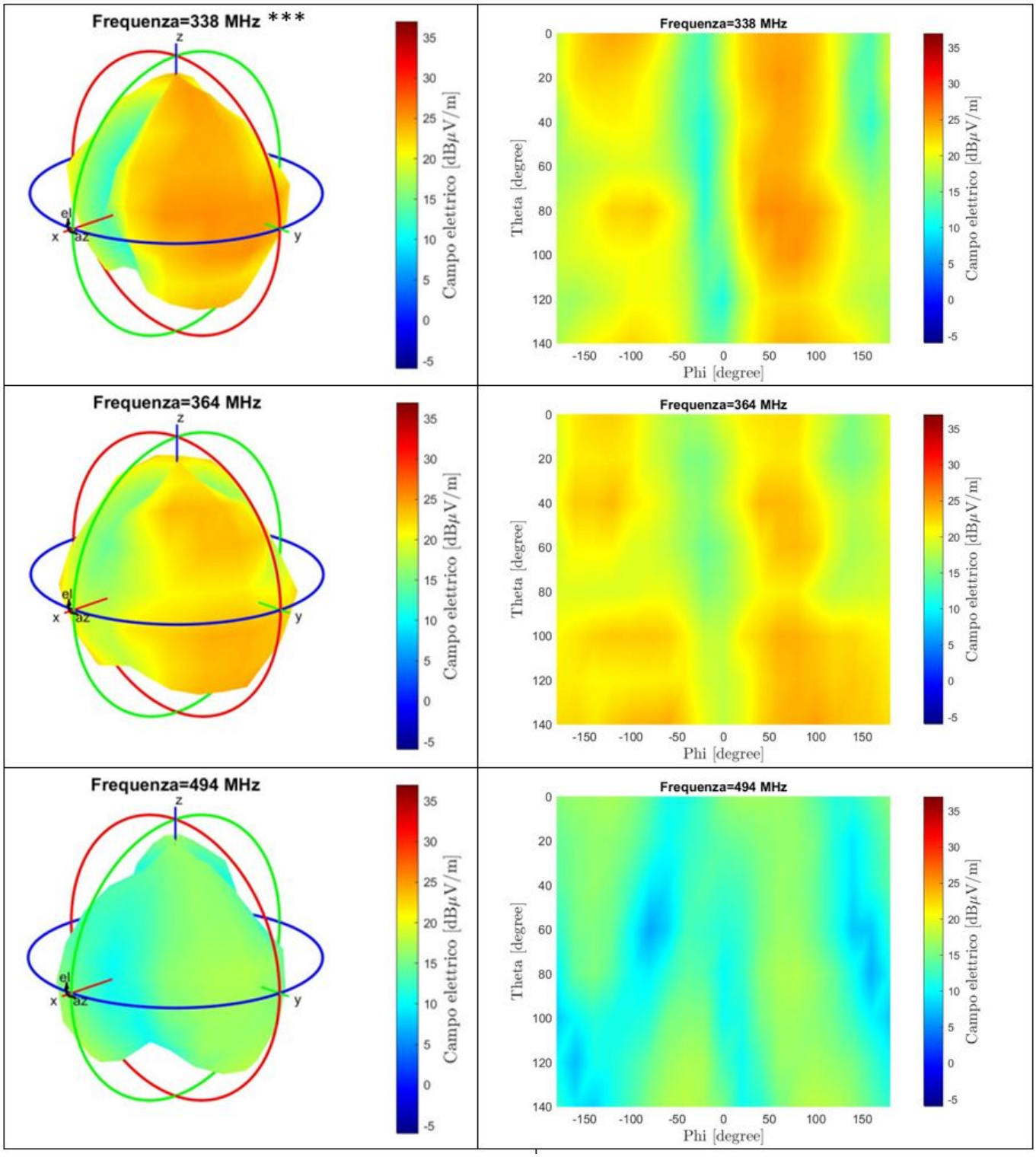


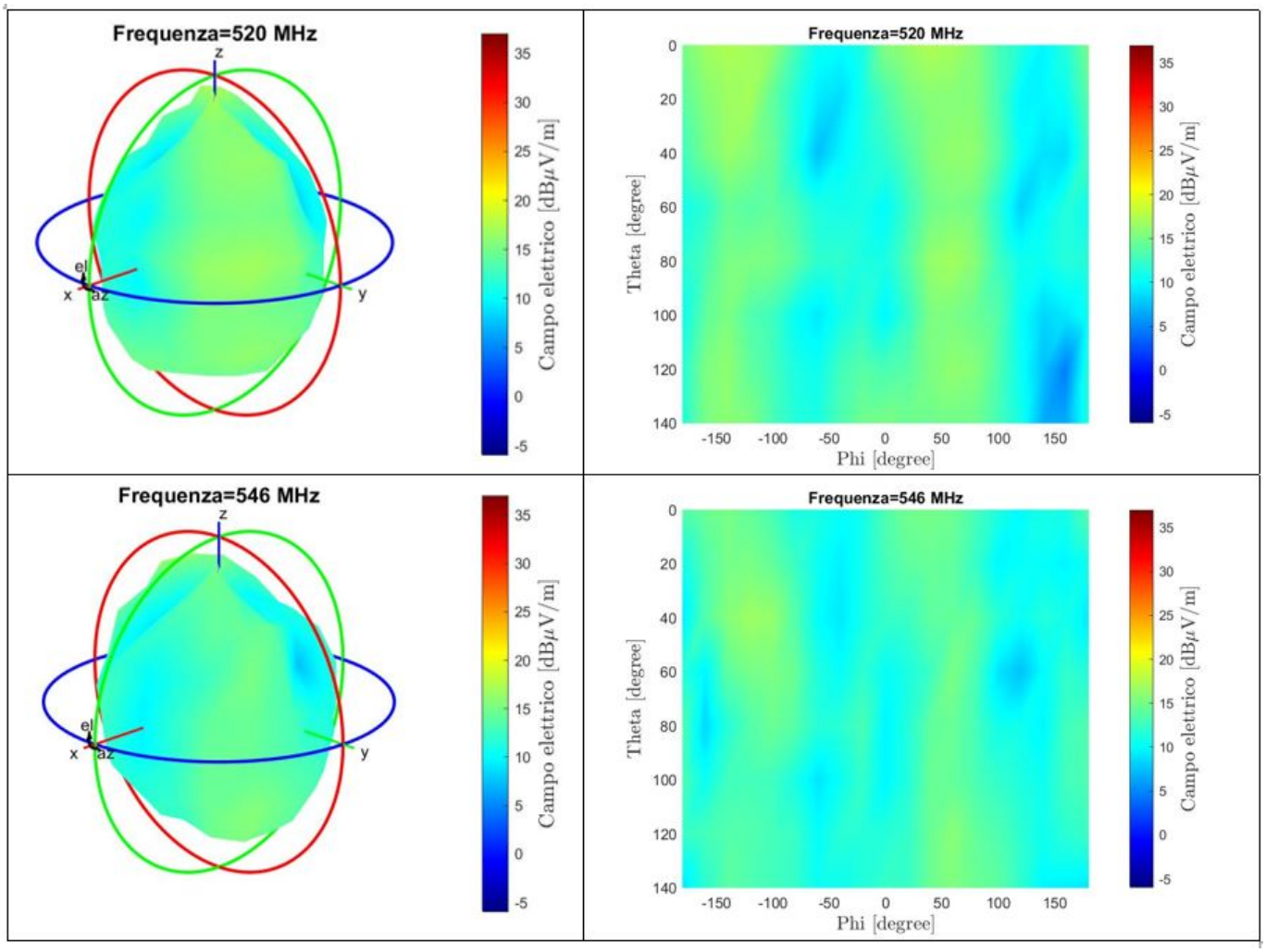

Frequenza=338 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=338 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=364 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=364 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=494 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=494 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]


Frequenza=520 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
25
20
15
10
5
0
-5
-10
Frequenza=520 MHz
Theta [degree]
0
20
40
60
80
100
120
140
-150
-100
-50
0
50
100
150
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=546 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=546 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]

A.3.2 Max Hold


Frequenza=168 MHz
Frequenza=168 MHz
Frequenza=254 MHz ***
Frequenza=254 MHz
Frequenza=336 MHz *
Frequenza=336 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Theta [degree]
Phi [degree]
z
x
y
el
az


Frequenza=338 MHz ***
Frequenza=338 MHz
Frequenza=364 MHz
Frequenza=364 MHz
Frequenza=494 MHz
Frequenza=494 MHz
Campo elettrico [dBμV/m]
Theta [degree]
Phi [degree]
z
el
x
az
y


Frequenza=520 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=520 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=546 MHz
z
el
x
az
y
Campo elettrico [dBμV/m]
Frequenza=546 MHz
Theta [degree]
Phi [degree]
Campo elettrico [dBμV/m]

Bibliografia

[1] Wikipedia, "Canadair cl-89." https://en.wikipedia.org/wiki/Canadair_CL-89. Accessed: 2021-04-22.

[2] K. Sayler, "A world of proliferated drones," *Center for a New American Security*, 2015.

[3] J. Wubben, F. Fabra, C. T. Calafate, T. Krzeszowski, J. M. Marquez-Barja, J.-C. Cano, and P. Manzoni, "Accurate landing of unmanned aerial vehicles using ground pattern recognition," *Electronics*, vol. 8, no. 12, p. 1532, 2019.

[4] L. Bononi, G. Giacomello, and M. Allegretti, "Unmanned aerial vehicle: tecnologie e prospettive future,"

[5] R. E. Collin, "Antennas and radiowave propagation," 1985.

[6] MATLAB, "Che cos'è l'intelligenza artificiale (ia)?." https://it.mathworks.com/discovery/artificial-intelligence.html. Accessed: 2021-02-06.

[7] MATLAB, "Cos'è una rete neurale?." https://it.mathworks.com/discovery/neural-network.html. Accessed: 2021-02-10.

[8] H. Xu and F. Chen, "Design of civil uav counter system based on bds," in *2019 4th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, pp. 578–5784, IEEE, 2019.

[9] M. Naim, "The next global security threat: Explosive devices on small drones," *The Atlantic*, 2013.

[10] W. Ripley, "Drone with radioactive material found on japanese prime minister's roof," *CNN. com*, vol. 22, 2015.

[11] M. D. Shear and M. S. Schmidt, "White house drone crash described as a us worker's drunken lark," *New York Times*, vol. 28, 2015.

[12] C. Koettl and B. Marcolini, "A closer look at the drone attack on maduro in venezuela," *The New York Times*, 2018.

[13] S. Kalin, R. Gamal, and D. Zhdannikov, "Attacks on saudi oil facilities knock out half the kingdom's supply," *Reuters*, 2019.

[14] T. C. I. P. DOTOLI, "Tecnologie emergenti e possibili impieghi futuri in campo militare le prospettive internazionali,"

[15] A. H. Michel, *Counter-drone systems*. Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018.

[16] D. Poullin, "Countering illegal uav flights: passive dvb radar potentiality," in *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 1–10, IEEE, 2018.

[17] S. Khadka, "Evaluation of radio anechoic chamber," 2017.

[18] L. H. Hemming, *Electromagnetic anechoic chambers: a fundamental design and specification guide*. Wiley Interscience, 2002.

[19] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2015.

[20] G. Hurd, "Ieee standard test procedures for antennas," *Electronics and Power*, vol. 26, no. 9, p. 749, 1980.