

# Politecnico di Milano

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria



## Simulatore radar per il monitoraggio della cenere vulcanica

Relatore: Prof. Michele D'Amico

Tesi di laurea di:  
Libero Chianello, Matricola 878098

Anno accademico: 2017-2018



**Ai sacrifici della mia famiglia. . . . .**

*A tutti coloro che in me han creduto fin dall'inizio ma specialmente a coloro che mi han dato del pazzo quando mi sono iscritto; il bello arriverà, sappiate aspettare. . . . .*



# Introduzione

Negli ultimi anni l'utilizzo del trasporto aereo sta crescendo in modo esponenziale, viene utilizzato per viaggi di lavoro, vacanze e il trasporto di merci da e per ogni nazione nel mondo. Questo utilizzo intensivo richiede la copertura dell'intero spazio aereo disponibile per mezzo di rotte che, talvolta, attraversano zone del pianeta soggette a condizioni climatiche ed ambientali pericolose per la sicurezza dei voli e l'incolumità delle persone a bordo.

In particolare, la presenza di vulcani attivi, espone i passeggeri e i motori degli aeroplani alle nubi di cenere vulcanica e alle polveri fini trasportate a lunga distanza dal vento. Quest'ultime rappresentano una minaccia insidiosa in quanto possono attraversare i sistemi di filtraggio dell'aria ed essere dunque inalate dall'equipaggio esponendo ad una serie di possibili complicazioni.

Attualmente, nel corso di un'eruzione le procedure avioniche di emergenza prevedono di deviare in modo molto conservativo le rotte e nei casi di estrema entità impongono la soppressione dei voli.

Questo tipo di approccio crea non pochi problemi all'affidabilità del sistema di trasporto e incrementa in modo significativo, l'inquinamento atmosferico derivante dalle distanze molto maggiori che i velivoli devono percorrere.

Nel corso degli ultimi anni questa tematica ha attirato l'attenzione della comunità scientifica che ha provato ad affrontare il problema utilizzando varie tecnologie e metodologie, gettando di fatto le basi per un'intensa attività di ricerca e sviluppo.

L'interesse principale risiede nell'osservazione e la profilazione delle nubi di cenere che si sviluppano a seguito di una eruzione vulcanica in modo da poterne stimare la consistenza e tracciarne la dispersione. Queste informazioni possono rendere il ricalcolo delle rotte più intelligente ed efficiente.

Dopo aver constatato le proprietà elettromagnetiche delle particelle di cenere, si è pensato di impiegare le tecnologie radar, già ampiamente utilizzate per l'osservazione di bersagli di svariata natura e la meteorologia.

Lo sfruttamento del fenomeno di scattering derivante dall'interazione delle particelle di cenere con le onde elettromagnetiche, da una parte ha reso possibile l'osservazione e il riconoscimento della tipologia di particelle, dall'altra ha posto in evidenza numerose criticità dettate dal fatto che la cenere presenta delle caratteristiche propagative e fisiche particolari, dal quale i segnali possono essere pesantemente influenzati.

## Struttura della tesi

In questo lavoro di tesi viene descritto un simulatore radar scritto in ambiente Matlab, che si pone l'obiettivo di generare una sequenza di segnali in fase e quadratura comparabile con quella generata da un radar atto al monitoraggio di una nube di cenere vulcanica.

In particolare, la trattazione è strutturata secondo il seguente schema:

- Nella prima parte del primo capitolo viene descritta e caratterizzata la cenere vulcanica dal punto di vista della conformazione e dei processi eruttivi che la coinvolgono. In seguito vengono analizzati i rischi per l'aviazione e la salute umane derivanti dalle caratteristiche delle particelle immesse in atmosfera. Nella seconda parte del capitolo vengono descritte le interazioni con le onde elettromagnetiche con particolare attenzione alle proprietà di scattering e dielettriche.
- Nel secondo capitolo vengono richiamate le tecnologie radar e le principali applicazioni con particolare attenzione ai radar impiegati in meteorologia. Nella seconda parte vengono dettagliate le criticità di funzionamento e dimensionamento legate alla frequenza operativa e alle caratteristiche dei bersagli da osservare. Nella seconda parte viene presentata la cenere vulcanica come bersaglio radar e le grandezze radar osservabili.
- Nel terzo capitolo viene presentato il nostro contributo, il simulatore radar, un software scritto in ambiente Matlab che permette di ricostruire la sequenza di campioni ricevuti da un radar di terra partendo dalle informazioni del radar stesso, della cella e dell'ambiente di osservazione.
- Nel quarto capitolo vengono presentati i risultati delle simulazioni eseguite nell'ambito di vari scenari operativi e sotto precise ipotesi di dimensionamento, dimostrando la coerenza di quanto ottenuto con la teoria e con gli studi del passato ed evidenziando la flessibilità e le potenzialità del software.
- Nel quinto capitolo vengono riassunti gli obiettivi raggiunti e valutati gli scopi del presente lavoro evidenziando le future prospettive di sviluppo dei vari moduli.
- Nella parte finale della presente trattazione, in appendice, verranno allegati i codici Matlab del simulatore e dei vari moduli utilizzati per il calcolo delle grandezze necessarie all'algoritmo.

# Indice

<b>1</b>	<b>La cenere vulcanica</b>	<b>5</b>
1.1	Il processo eruttivo . . . . .	5
1.1.1	Proprietà fisiche e composizione . . . . .	7
1.1.2	Spazio aereo e dispersione . . . . .	8
1.2	Il trasporto aereo . . . . .	9
1.2.1	Motori a turbina e rischi per il volo . . . . .	9
1.3	Apparato respiratorio . . . . .	10
1.3.1	Rischi per la salute . . . . .	11
1.4	Caratterizzazione elettromagnetica . . . . .	11
1.4.1	Costante dielettrica e attenuazione . . . . .	11
1.4.2	Influenza della frequenza del segnale . . . . .	12
1.4.3	Effetti di scattering . . . . .	13
1.4.4	La cenere come bersaglio radar . . . . .	13
<b>2</b>	<b>I sistemi radar</b>	<b>15</b>
2.1	Tecnologie e applicazioni . . . . .	17
2.2	Il radar meteorologico . . . . .	18
2.2.1	Diffusione delle onde elettromagnetiche . . . . .	18
2.2.2	Valutazione della potenza ricevuta . . . . .	19
2.2.3	La costante del radar . . . . .	21
2.2.4	La riflettività Z . . . . .	22
2.3	Osservazione delle nubi di cenere . . . . .	23
2.3.1	PSD e popolazione di particelle . . . . .	23
2.3.2	Valutazione della riflettività radar . . . . .	24
2.3.3	Stima della potenza ricevuta . . . . .	26
2.3.4	Lo spettro Doppler . . . . .	26
2.4	Dalle grandezze radar ai parametri microfisici . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Il simulatore radar</b>	<b>29</b>
3.1	Obiettivi e struttura del simulatore . . . . .	29
3.2	Modello spettrale e ambientale . . . . .	30
3.2.1	Parametri del radar . . . . .	31
3.2.2	Integrazione funzioni PSD . . . . .	32

3.2.3	Parametri ambientali e cella radar . . . . .	33
3.3	Descrizione dell'algoritmo . . . . .	34
3.3.1	Calcolo riflettività teorica . . . . .	34
3.3.2	Equazione del radar . . . . .	35
3.3.3	Calcolo spettro Doppler . . . . .	35
3.3.4	Ricostruzione segnali IQ . . . . .	36
3.3.5	Stima parametri cenere . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Risultati</b>	<b>39</b>
4.1	Configurazione radar . . . . .	39
4.2	Stima potenza ricevuta e riflettività Z . . . . .	39
4.2.1	PSD: polvere fine, 16 campioni IQ . . . . .	40
4.2.2	PSD: cenere grossolana, 16 campioni IQ . . . . .	41
4.2.3	PSD: lapilli, 16 campioni IQ . . . . .	42
4.2.4	PSD: polvere fine, 32 campioni IQ . . . . .	43
4.2.5	PSD: cenere grossolana, 32 campioni IQ . . . . .	44
4.2.6	PSD: lapilli, 32 campioni IQ . . . . .	45
4.2.7	PSD: polvere fine, 64 campioni IQ . . . . .	46
4.2.8	PSD: cenere grossolana, 64 campioni IQ . . . . .	47
4.2.9	PSD: lapilli, 64 campioni IQ . . . . .	48
4.2.10	PSD: polvere fine, 128 campioni IQ . . . . .	49
4.2.11	PSD: cenere grossolana, 128 campioni IQ . . . . .	50
4.2.12	PSD: lapilli, 128 campioni IQ . . . . .	51
4.3	Stima velocità media . . . . .	52
4.4	Considerazioni . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>55</b>
5.1	Ipotesi operative . . . . .	55
5.2	Sviluppi futuri . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Codici Matlab</b>	<b>57</b>
6.1	Simulatore_cenere.m . . . . .	57
6.2	Z_from_PSD_Marzano.m . . . . .	80
6.3	Ang_3D . . . . .	84
6.4	Pulse Pair Processor . . . . .	86
	<b>Bibliografia</b>	<b>95</b>



# Lista figure

1.1	Struttura della colonna vulcanica . . . . .	6
1.2	Grafico comparativo di Muller . . . . .	7
1.3	Occlusione lamelle turbina . . . . .	10
2.1	Diffusione onde elettromagnetiche . . . . .	15
2.2	Diagramma temporale impulsi trasmessi . . . . .	19
2.3	Volume di risoluzione radar . . . . .	20
2.4	Misure riflettività radar banda C . . . . .	25
2.5	Componenti vettore velocità dei bersagli . . . . .	26
3.1	Schema a blocchi simulatore radar . . . . .	30
3.2	Linea spettrale dovuta alla singola cella . . . . .	31
3.3	Modello cella radar . . . . .	33
3.4	Velocità radiale particelle . . . . .	33
3.5	Schema a blocchi calcolo riflettività . . . . .	34
4.1	PSD: polvere fine, 16 campioni IQ . . . . .	40
4.2	PSD: cenere grossolana, 16 campioni IQ . . . . .	41
4.3	PSD: lapilli, 16 campioni IQ . . . . .	42
4.4	PSD: polvere fine, 32 campioni IQ . . . . .	43
4.5	PSD: cenere grossolana, 32 campioni IQ . . . . .	44
4.6	PSD: lapilli, 32 campioni IQ . . . . .	45
4.7	PSD: polvere fine, 64 campioni IQ . . . . .	46
4.8	PSD: cenere grossolana, 64 campioni IQ . . . . .	47
4.9	PSD: lapilli, 64 campioni IQ . . . . .	48
4.10	PSD: polvere fine, 128 campioni IQ . . . . .	49
4.11	PSD: cenere grossolana, 128 campioni IQ . . . . .	50
4.12	PSD: lapilli, 128 campioni IQ . . . . .	51
4.13	Spettro Doppler simulato . . . . .	52
4.14	Confronto velocità media spettro Doppler e PPP . . . . .	52



# Capitolo 1

## La cenere vulcanica

Lo scopo di questo primo capitolo è quello di descrivere il processo eruttivo e le principali dinamiche che intervengono nella dispersione del materiale vulcanico emesso; successivamente si analizzano le principali caratteristiche di forma e composizione del particolato facendo riferimento ai numerosi rilievi eseguiti sui maggiori siti attivi nel mondo e documentati in letteratura. Nella sezione centrale, si riconducono le caratteristiche delle particelle al funzionamento dei motori a turbina e alla salute umana con particolare attenzione ai fattori di rischio e alle conseguenze derivanti da una prolungata esposizione. La parte finale del capitolo descrive la cenere come bersaglio radar evidenziandone le caratteristiche elettromagnetiche e descrivendone i meccanismi di interazione con le onde dei segnali.

### 1.1 Il processo eruttivo

Nel mondo sono presenti numerosi siti vulcanici ancora oggi attivi e, nonostante ognuno di essi presenti differenti dinamiche eruttive, è possibile riconoscere alcuni parametri fondamentali che permettono di stimarne il comportamento e studiarne le dinamiche ricordando tuttavia, che è impossibile descrivere in modo chiuso e deterministico tutte le possibili casistiche.

Tra questi parametri troviamo l'altezza della colonna, la composizione chimica del materiale e la durata dei fenomeni; utilizzando questi parametri e integrandoli con altre informazioni quali l'andamento dei venti e il monitoraggio meteorologico, siamo in grado di stimare e mappare il grado e l'estensione della contaminazione atmosferica nonché lo spostamento della nube.

Numerose istituzioni scientifiche e centri di ricerca INGV et al. hanno sviluppato negli anni propri modelli di simulazione e predizione delle colonne vulcaniche e dei processi di dispersione e deposito [1].

Nel corso di una eruzione vulcanica, il materiale magmatico e il particolato vengono espulsi in modo più o meno violento a seconda della pressione dei gas accumulatasi all'interno delle sacche laviche dando origine quindi a eventi di differente entità e violenza.

L'esplosività dei fenomeni fornisce un'idea sulla quantità di cenere immessa in atmosfera e sulla probabile altezza della colonna di cenere; a tal proposito i vulcanologi hanno sviluppato un'indice di esplosività (VEI) [2] al quale associare delle stime di questi parametri al fine di caratterizzare in modo rapido quanto sta accadendo.

Nel migliore dei casi, si assiste a delle colate laviche lungo i pendici del vulcano mentre nei casi più estremi si verificano delle vere e proprie esplosioni che spingono il materiale magmatico ad altezze molto elevate sopra il cratere. Analizzando quest'ultimo caso si possono riconoscere delle macro fasi che riassumono l'intero processo:

- Una prima fase esplosiva, spesso accompagnata da terremoti, spinge con grande violenza il magma e le particelle vulcaniche al di fuori del vulcano e molto al di sopra di esso assieme a grandi quantità di gas, raggiungendo alcuni km di altezza per le particelle più piccole.
- in un secondo momento complice la presenza di vento e regolato dalla dimensione delle particelle inizia il processo di dispersione e deposito al suolo del materiale eruttato.
- La fase finale è anche la più insidiosa in quanto caratterizzata principalmente da particelle residue molto fini e leggere che possono percorrere distanze lunghissime, anche dell'ordine di migliaia di chilometri permanendo in sospensione per tempi anche pari ad uno o due anni [3]

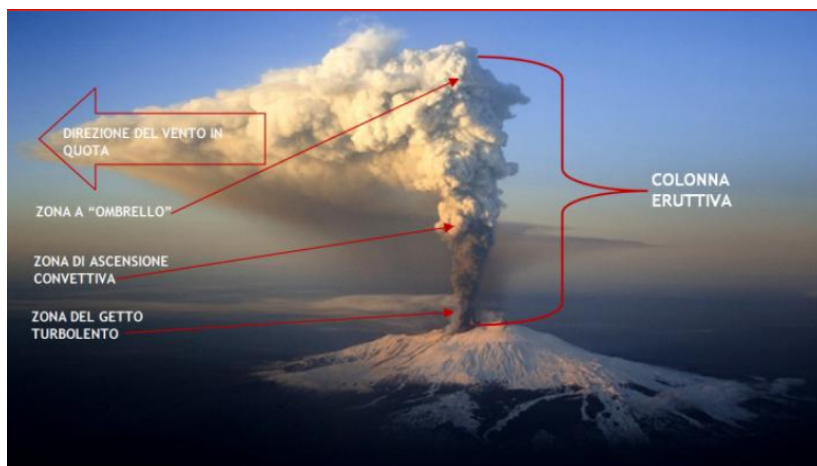


Figura 1.1: Struttura della colonna vulcanica

In figura 1.1 è mostrata una colonna vulcanica dove si può chiaramente distinguere la parte residua di particelle fini trasportate secondo la direzione e l'intensità del vento.

In tutto questo, l'immissione in atmosfera di grandi quantità di polveri sottili e gas corrosivi comporta inevitabilmente delle conseguenze sul clima e sulla popolazione nonché su tutto l'ambiente coinvolto. Come si può immaginare e come verrà approfondito nelle prossime sezioni, la contaminazione dell'atmosfera e dello spazio aereo espone l'aviazione e il traffico aereo in generale ad una serie di complicazioni che possono compromettere la sicurezza e la salute degli equipaggi.

### 1.1.1 Proprietà fisiche e composizione

La composizione del materiale piroclastico differisce da un sito vulcanico all'altro in quanto dipende in modo diretto dalla combinazione di diversi minerali e materiali presenti nel sottosuolo; in generale si trovano prevalentemente silicati e altri minerali in quantità minori quali alluminio, ferro e sodio. I silicati vetrosi presentano una durezza elevata, secondo la scala di Mohs paragonabile a quella del quarzo [2] e in media presentano forme molto appuntite e frastagliate che conferiscono alla cenere una forte capacità abrasiva soprattutto in forma polverizzata.

I numerosi rilievi eseguiti in-situ a differenti intervalli di distanza dal vulcano mostrano che le particelle sono classificabili, secondo Dellino e La Volpe (1996), in modo piuttosto robusto utilizzando alcuni indici dedicati [4]:

- **Fattore di forma FF:** descrive il grado di irregolarità della superficie
- **Rapporto di forma AR:** misura del grado di elongazione totale, non distingue tra forme quadrate o circolari
- **Compattezza CC:** indice di compattezza generale
- **Rapporto rettangolare RT:** rapporto tra perimetro e sezione trasversa

Sfruttando il calcolo dei parametri FF ed RT si possono dunque distinguere 5 classi di forma in accordo con la tabella comparativa definita da Russel, Taylor, and Pettijohn (in Muller 1967)

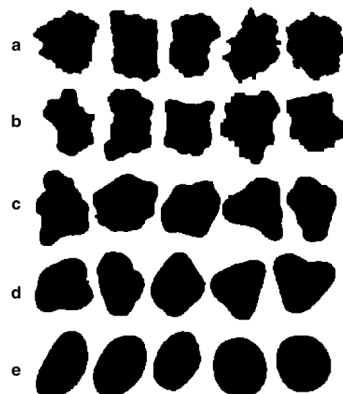


Figura 1.2: Grafico comparativo di Muller

Figura 1.2: : **a)** Frammenti spigolosi **b)** Frammenti poco spigolosi **c)** Contorni smusati **d)** Contorni poco arrotondati **e)** Contorni ben arrotondati.

Quando si parla di cenere vulcanica spesso si tende a inglobare tutte le possibili classi di particelle sotto un unico grande termine; in realtà è bene distinguere la **cenere** dalla **polvere** in quanto presentano delle differenze non trascurabili sia in termini dispersivi che di composizione. Utilizzando il diametro medio come fattore discriminante è possibile rappresentare la cenere in distinte classi di appartenenza [5]:

- **Polvere vulcanica:** fino a  $62 \mu\text{m}$
- **Cenere:** fino a 2 mm
- **Lapilli:**  $> 2$  mm

In linea generale mantenere una corretta distinzione tra le varie tipologie di cenere e la polvere vulcanica permette di analizzare in modo più accurato ed esaustivo i fattori di rischio e le misure di sicurezza da adottare.

### 1.1.2 Spazio aereo e dispersione

Nella sezione precedente si è presentata la distinzione delle varie tipologie di cenere e la differenza corpuscolare rispetto alla polvere; in termini dispersivi la trattazione deve iniziare da quanto accade subito dopo le esplosioni iniziali.

Come mostrato in figura 1.1, una volta espulso, il materiale viene separato dal naturale processo di dispersione e deposito, in particolare:

- La porzione di Lapilli più pesanti e rocce vulcaniche ricade al suolo in tempi molto brevi, direttamente proporzionali alla dimensione
- La parte più grossolana percorre una distanza maggiore ma ricade al suolo anch'essa in tempi non troppo lunghi
- La polvere vulcanica più fine invece, partendo da altezze maggiori per via del peso e con il contributo del vento rimane in sospensione per tempi molto più lunghi e percorre distanze molto elevate.

I numerosi rilievi effettuati in-situ subito dopo le prime fasi eruttive hanno permesso di caratterizzare e classificare in modo qualitativo le varie tipologie di particelle, in modo da poterne modellizzare altre caratteristiche cinetiche quali la velocità di ricaduta al suolo e il coefficiente di resistenza [4].

## 1.2 Il trasporto aereo

Il traffico aereo oggigiorno è sempre più intenso e sta acquisendo un'importanza strategica sempre più forte nel trasporto delle merci e dei viaggiatori in giro per il mondo. La vastità dello spazio aereo unita alla rapidità ed efficienza dei collegamenti e dei velivoli ha permesso di ricoprire in modo capillare e quasi totale l'intera superficie terrestre. Questa crescente capillarità, unita alla domanda sempre crescente del trasporto aereo rende inevitabilmente necessario l'attraversamento di porzioni dell'atmosfera interessate dai fenomeni vulcanici.

Prima di descrivere i rischi e le conseguenze di una prolungata esposizione ad atmosfera contaminata da polvere vulcanica occorre introdurre alcuni concetti funzionali che renderanno più chiara ed evidenti le successive sezioni.

### 1.2.1 Motori a turbina e rischi per il volo

In un velivolo dotato di motori a turbina, il decollo è reso possibile dalla forza di spinta che si genera quando un flusso di aria continuo viene spinto ad alta velocità in direzione opposta a quella del volo. Sulla base di questa teoria, il motore a turbina necessita di una grande massa di aria che dovrà essere risucchiata e convogliata al fine di aumentarne la velocità, la pressione e la temperatura prima di essere miscelata al carburante per la fase finale di combustione ed espulsione.

Durante questo processo al flusso viene trasferita un'elevata energia che permetterà, una volta espulso, di ottenere la forza di reazione necessaria al decollo. Per loro natura dunque, i motori dei velivoli non possono essere indifferenti alle masse di aria contaminate dal particolato vulcanico e la presenza di elevate temperature ben al di sopra del punto di fusione di quest'ultimo, espongono l'aviazione a una serie di possibili conseguenze. Una volta risucchiate infatti, le particelle vengono spinte verso lo stadio finale della turbina, dove possono impattare parti meccaniche più fredde causandone la solidificazione [5]. La solidificazione e l'eventuale accumulo possono portare alla parziale occlusione delle pale della turbina stessa causando:

- **Spegnimento:** l'accumulo di materiale sulle lamelle modifica radicalmente la direzione del flusso d'aria in uscita e comporta una variazione di pressione all'interno della camera di combustione, causando quindi un possibile arresto del motore.
- **Surriscaldamento:** i vari stadi delle turbine sono progettati per convogliare una parte di aria attorno alle parti più calde in modo da mantenerne la temperatura a livelli ottimali; il materiale solidificato può ostruire queste vie di raffreddamento e quindi portare ad aumenti critici della temperatura.

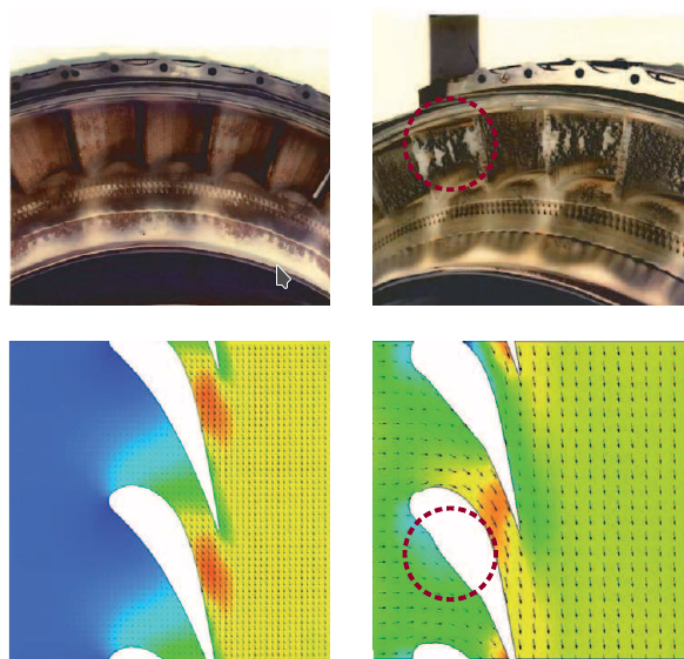


Figura 1.3: Occlusione lamelle turbina

In figura 1.3 è mostrato l'accumulo di materiale solidificato sulle lamelle della turbina e la variazione delle linee di flusso con conseguente aumento della temperatura.

In effetti, tutte le particelle che vengono risucchiate nel motore vengono fuse ma solo quelle più grandi hanno una probabilità maggiore di impattare su parti più fredde e dunque solidificare; quelle più fini di polvere vengono espulse ancora in stato di fusione e solidificano all'esterno del motore non creando di fatto grossi problemi al funzionamento dello stesso. Le parti meccaniche del motore e quelle esterne del velivolo tuttavia sono esposte all'azione abrasiva delle particelle e all'effetto corrosivo derivante dalla presenza di anidride solforosa che si mescola all'umidità dell'atmosfera [5] [2].

### 1.3 Apparato respiratorio

L'apparato respiratorio dispone di alcuni meccanismi di difesa naturali che impediscono a determinati corpi estranei di penetrare nella regione polmonare composta dagli alveoli. Inizialmente infatti, la mucosa nasale trattiene le particelle più grandi tipicamente superiori a 10 micron, permettendone l'espulsione tramite starnuti e colpi di tosse.

Il particolato molto fine, tipicamente sotto il micron, riesce a penetrare la mucosa nasale ma non crea particolari problemi in quanto non viene trattenuto dagli alveoli e viene espulso con la normale respirazione. [5]



### 1.3.1 Rischi per la salute

Il problema diventa di una certa importanza quando siamo in presenza di particelle la cui dimensione ricade tra il micron e i 10 micron, infatti queste, restano intrappolate nelle celle degli alveoli e possono creare difficoltà cardiache e respiratorie. Questo aggiunge un ulteriore livello di importanza al monitoraggio dello spazio aereo e alla progettazione dei sistemi di filtraggio che quindi non può prescindere da un'attenta discriminazione e quanto più accurata possibile stima delle caratteristiche del particolato emesso in atmosfera.

## 1.4 Caratterizzazione elettromagnetica

Uno dei fenomeni elettrostatici più comuni dovuti alla cenere vulcanica risiede nella generazione di forti scariche elettriche che possono, per periodi più o meno brevi, interferire con il funzionamento della strumentazione di controllo e delle trasmissioni ostacolando le comunicazioni con le stazioni di terra. La pericolosità e la complessità del fenomeno hanno portato nel corso degli anni allo sviluppo e alla ricerca di tecnologie e metodologie con cui monitorare e profilare la cenere vulcanica al fine di aggirarne la traiettoria in modo efficace e soprattutto sicuro. Viste le sue proprietà corpuscolari ed elettrostatiche [2], la ricerca si è da subito interrogata sulle interazioni di queste particelle con le onde elettromagnetiche al fine di testarne l'idoneità e la compatibilità con alcune tecnologie impiegate per altri scopi.

In particolare, per poter analizzare e caratterizzare la cenere sotto il profilo elettromagnetico occorre investigare su tutti gli aspetti attenuativi e propagativi tipici dei corpuscoli di piccole e medie dimensioni tenendo anche in considerazione l'impatto della frequenza.

### 1.4.1 Costante dielettrica e attenuazione

Un primo aspetto molto importante è rappresentato dalle caratteristiche dielettriche e attenuative del materiale che compone la cenere vulcanica, queste infatti possono influenzare in modo significativo il campo elettrico dei segnali incidenti influenzandone la propagazione. Per valutare correttamente gli effetti sul campo elettrico occorre stimare con una certa accuratezza la parte reale e immaginaria della costante dielettrica  $\epsilon$  definita come  $(\epsilon' - \epsilon'')$ ; la parte reale influenza la posizione degli zeri del campo elettrico mentre la parte immaginaria caratterizza le perdite [6].

La costante dielettrica della cenere mostra una certa dipendenza dalla percentuale di concentrazione di elementi quali il Silicio mentre non risulta condizionata in modo significativo dalla lunghezza d'onda del segnale. In particolare è stato mostrato [6] che, per concentrazioni di Silicio che variano dal 50% al 75%, si ha  $\epsilon' = 6 \pm 0.5$  mentre per la parte immaginaria si ottengono valori che spaziano da 0.08 a 0.27. La costante dielettrica concorre alla formazione del parametro di riflettività  $K$  definito come :

$$K = |(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)|^2 \quad (1.1)$$

La parte reale e immaginaria della costante dielettrica tendono ad aumentare al diminuire della concentrazione di  $SiO_2$  ma è stato dimostrato [6] che si possono con sicurezza utilizzare valori di K compresi tra  $0.39 \pm 0.02$ . Il parametro K ha un ruolo importante nel calcolo dell'attenuazione e delle sezioni di scattering come verrà evidenziato nelle prossime sezioni.

### 1.4.2 Influenza della frequenza del segnale

Come mostrato nella sezione precedente la frequenza e dunque la lunghezza d'onda non hanno un impatto significativo sulle proprietà dielettriche della cenere vulcanica, che quindi su questo aspetto è considerabile indipendente. Ci sono tuttavia altri aspetti da considerare e legati in modo molto forte alla frequenza delle onde elettromagnetiche interessate, tra cui l'attenuazione e i fenomeni di scattering innescati dalla forma e irregolarità delle particelle.

Nello specifico la dimensione delle particelle e la lunghezza d'onda sono due parametri cruciali che separano la trattazione del regime di Rayleigh da quello di Mie; per ognuno le ipotesi approssimative sono molto differenti e le grandezze in esame devono essere rivalutate di conseguenza.

La relazione che intercorre tra diametro delle particelle e frequenza di lavoro, che mantiene valide le ipotesi di Rayleigh sono riepilogate nella seguente tabella [7]:

Band	Frequency range (Ghz)	Wavelength range (cm)	Rayleigh maximum diameter (mm)
<b>L</b>	1 - 2	30.0 - 15.0	19.49 - 9.75
<b>S</b>	2 - 4	15.0 - 7.50	9.75 - 4.87
<b>C</b>	4 - 8	7.50 - 3.75	3.57 - 2.44
<b>X</b>	8 - 12	3.75 - 2.50	2.44 - 1.62
<b>Ku</b>	12 - 18	2.50 - 1.67	1.62 - 1.08
<b>K</b>	18 - 27	1.67 - 1.11	1.08 - 0.72
<b>Ka</b>	27 - 40	1.11 - 0.75	0.72 - 0.49
<b>V</b>	40 - 75	0.75 - 0.40	0.49 - 0.26
<b>W</b>	75 - 110	0.40 - 0.27	0.26 - 0.18

L'attenuazione specifica in particolare, oltre che dalla dimensioni fisiche delle particelle considerate dipende anche in modo inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda [7] e, in regime di Rayleigh segue la relazione [7]:

$$k = \frac{2\pi^5}{3\lambda^4} |K^2| D^6 + \frac{\pi^2}{\lambda} Im[K] D^3 \quad (1.2)$$

con K fattore di riflettività e D diametro della particella.

### 1.4.3 Effetti di scattering

Un'onda elettromagnetica che propaga in un mezzo disomogeneo è soggetta a vari effetti, tra questi compare lo scattering elettromagnetico o processo di diffusione. Il fenomeno dello scattering elettromagnetico, rappresentato dal rapporto tra la potenza riflessa dallo scatteratore e la potenza incidente sullo stesso viene modellizzato tramite la sezione di backscattering; questo parametro racchiude nella sua forma, la forte dipendenza dalla dimensione delle particelle e dalla frequenza del segnale incidente assumendo quindi una forma differente nel dominio di Rayleigh e Mie. In dettaglio ma senza troppe dimostrazioni che esulano dalla presente trattazione, in regime di Rayleigh la sezione di backscattering è rappresentabile come [8] :

$$\sigma_{bs} = 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} \frac{|m^2 - 1|^2}{|m^2 + 2|^2} a^6 \quad (1.3)$$

dove  $m$  è l'indice di rifrazione complesso mentre  $a$  è il raggio della particella. Quando la propagazione e lo scattering avvengono sotto le condizioni dettate dal regime di Mie allora la sezione di backscattering assume una forma un pò più complessa:

$$\sigma_{bs} = \frac{\pi a^2}{\alpha^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) (-1)^n (a_n - b_n) \right|^2 \quad (1.4)$$

dove  $\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda}$  mentre  $a_n$  e  $b_n$  sono i coefficienti ricavati dalla teoria di Mie. Grazie a questo fenomeno le onde trasmesse possono raggiungere destinazioni situate oltre l'orizzonte o essere reindirizzate verso il trasmettitore; questo secondo scenario è quello maggiormente interessante dal punto di vista elettromagnetico perchè se la cenere vulcanica riflette una parte di energia trasmessa verso il trasmettitore allora si può pensare di monitorarne la presenza utilizzando tecnologie fondate su questo principio come i sistemi radar.

### 1.4.4 La cenere come bersaglio radar

Le caratteristiche presentate nelle sezioni precedenti mostrano che si può ragionevolmente trattare la cenere come un osservabile bersaglio radar, soprattutto quando si presenta agglomerata in grandi nubi disperse in atmosfera.

Occorre tenere presente però che il contributo della singola particella non è particolarmente significativo, conviene piuttosto ragionare in termini di *popolazione*, ottenendo dei risultati interessanti ed esaustivi. In particolare, unendo le informazioni sulla concentrazione e sulla distribuzione dei diametri delle particelle è possibile caratterizzare e stimare l'andamento della potenza ricevuta in presenza di un sistema con predeterminate caratteristiche operative.



## Capitolo 2

### I sistemi radar

La tecnologia radar rappresenta uno degli impieghi più interessanti e flessibili delle onde elettromagnetiche, inizialmente sviluppato come strumento bellico, è ad oggi largamente utilizzato anche in ambito scientifico e per scopi civili.

[9] Il funzionamento di un sistema radar è basato sulla generazione e trasmissione di un segnale radio, continuo o a treno di impulsi, in una determinata direzione e angolazione; il fronte d'onda durante la propagazione incontra o per meglio dire *illumina* vari ostacoli e conformazioni del paesaggio che influenzano in modo differente il segnale propagante. Le onde elettromagnetiche sono dunque soggette a:

- **Attenuazione:** l'intensità del capo elettrico viene decimata dalle proprietà dissipative ed attenuative dei materiali attraversati.
- **Diffrazione:** soprattutto in presenza di spigoli irregolari, piccole cavità e brusche discontinuità delle superfici, il fronte piano dell'onda viene *diffuso* in molte direzioni.
- **Diffrazione:** l'onda incidente viene diffusa in tutte le direzioni quando incide su uno spigolo vivo e superfici molto irregolari e frastagliate.

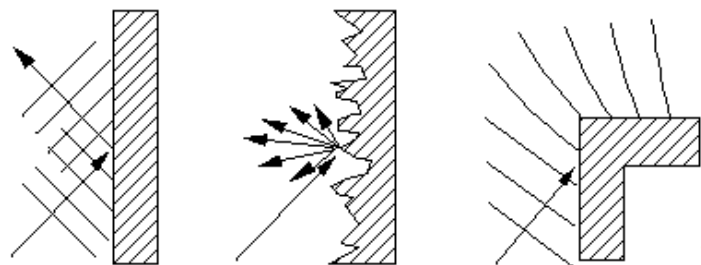


Figura 2.1: Diffusione onde elettromagnetiche

In figura 2.1 da sinistra a destra, **riflessione**, **scattering** e **diffrazione**.

In termini applicazioni, il *backscattering* risulta l'effetto più interessante in quanto una parte della potenza trasmessa viene riflessa all'indietro verso il trasmettitore permettendo di rilevare il bersaglio e la sua posizione [9]. In realtà esistono anche applicazioni dove l'obiettivo è quello di ostacolare la capacità del radar di identificare i bersagli, soprattutto in ambito bellico e militare, utilizzando materiali e conformazioni geometriche che tendono ad assorbire la potenza incidente per minimizzare al massimo la riflessione verso il radar stesso [10].

Le frequenze tipicamente utilizzate nei sistemi radar appartengono allo spettro delle microonde:

Nome sottobanda	Frequenze
<b>L</b>	1 - 2 GHz
<b>S</b>	2 - 4 GHz
<b>C</b>	4 - 8 GHz
<b>X</b>	8 - 12 GHz
<b>Ku</b>	12 - 18 GHz
<b>K</b>	18 - 27 GHz
<b>Ka</b>	27 - 40 GHz
<b>V</b>	40 - 75 GHz
<b>W</b>	75 - 110 GHz

Tabella 2.1: Banda radar IEEE (1 - 110 GHz)

Il funzionamento del radar è regolato da alcuni parametri fondamentali che caratterizzano i bersagli e il sistema stesso, in particolare la sezione di backscattering possiede le caratteristiche di un'area efficace e permette di quantificare la percentuale di potenza riflessa all'indietro in rapporto a quella totale incidente sulla superficie.

La conoscenza della sezione di backscattering di un oggetto, unita alla definizione dei parametri operativi del radar impiegato per illuminarlo permette di valutare la quantità di potenza riflessa verso il trasmettitore.

Tra i parametri operativi di un sistema radar troviamo:

- **frequenza di lavoro**
- **Frequenza di ripetizione**
- **Guadagno (in trasmissione e ricezione)**
- **Potenza trasmessa**
- **Area efficace antenna ricevente**

Grazie ai radar è possibile rilevare la posizione, la conformazione e la velocità degli oggetti; la tecnologia impiegata e il tipo di obiettivo nonchè le caratteristiche da rilevare sono dettate dall'applicazione.

## 2.1 Tecnologie e applicazioni

Come già introdotto, il radar per sua flessibilità è attualmente utilizzato in molte applicazioni civili e non, sfruttando principi di propagazione dalla complessità differente:

- **Radar per rilevamento e ricerca**
- **Radar per monitoraggio meteorologico**
- **Radar acquisizione bersagli**
- **Sistemi radar di navigazione**
- **Radar per mappatura geologica**

**Rilevamento e ricerca** I radar da ricerca e rilevamento utilizzano onde corte (inferiori al metro) per scansionare periodicamente una porzione di spazio in una determinata direzione; i bersagli più sensibili sono le navi e gli aerei che, essendo principalmente composti da metalli, riflettono le onde permettendo di misurarne la distanza.

Per il calcolo della distanza si misura il tempo trascorso dalla trasmissione alla ricezione dell'impulso riflesso, si divide per due e si moltiplica per la velocità della luce.

**Radar meteorologico** Il radar meteorologico è una delle applicazioni più interessanti, si sfrutta la riflessione causata dalla presenza di masse umide e particelle composte di acqua quali ghiaccio e grandine per monitorare le perturbazioni e le precipitazioni. L'utilizzo di sistemi radar Doppler permette di misurare anche la velocità di movimento di queste masse e l'intensità della pioggia.

**Aggancio bersagli** In ambito bellico, alcuni velivoli e armi a lungo raggio dispongono di piccoli radar integrati che permettono di identificare e *agganciare* un bersaglio per poi calcolare il percorso da seguire per colpirlo, come accade nei missili teleguidati.

**Radar di navigazione** Questi sistemi richiamano il principio utilizzato dai radar da ricerca e vengono principalmente impiegati da navi e velivoli per il monitoraggio del traffico e il controllo della navigazione al fine di evitare collisioni.

**Mappatura geologica** L'utilizzo di onde radio permette di sondare il terreno al fine di identificare la composizione geologica e l'eventuale presenza di oggetti nel sottosuolo. Ancora una volta, viene sfruttato il fenomeno della riflessione e dovuto alla differente composizione del terreno e allo scattering causato dalla presenza di oggetti e o irregolarità nel sottosuolo.

## 2.2 Il radar meteorologico

Il radar meteorologico utilizza le onde elettromagnetiche per sondare l'atmosfera e identificare gli ostacoli quali la pioggia, la grandine e le nubi al fine di quantificare la distribuzione e l'entità delle precipitazioni. Questo sistema permette di monitorare aree molto vaste con una singola installazione ma, di contro, richiede una calibrazione molto fine e meticolosa e inoltre la conversione delle grandezze misurate non è un'operazione univoca.

Al fine di comprendere il funzionamento e i risultati derivanti dall'impiego del radar meteorologico occorre richiamare quanto accade in presenza di una singola particella per poi estendere la trattazione alle distribuzioni estese di particelle, caso più verosimile ai fenomeni atmosferici in esame.

### 2.2.1 Diffusione delle onde elettromagnetiche

Prima di analizzare le proprietà di scattering occorre fare delle assunzioni sul regime di diffusione e sui campi coinvolti:

1. Il campo esterno deve poter essere considerato omogeneo ovvero, la dimensione delle particelle deve essere  $\ll \frac{\lambda}{2\pi}$
2. La dimensione delle particelle deve essere sufficientemente piccola rispetto alla lunghezza d'onda *all'interno* della particella stessa.

#### Diffusione da singola particella

Le ipotesi di cui sopra collocano la trattazione nel regime di Rayleigh e permettono di semplificare notevolmente la valutazione delle grandezze in esame.

Se si considera una singola particella *piccola*, immersa in un campo elettrico omogeneo  $\mathbf{E}_0$ , in accordo con le due relazioni del punto precedente è possibile definire il momento di dipolo indotto nella particella come :  $\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}_0$  dove  $\alpha$  è il fattore di polarizzazione e assume forma scalare se le particelle hanno forma sferica.

L'onda incidente eccita la particella che si comporta come un dipolo hertziano con momento  $\mathbf{p}$ ; Il campo elettrico  $E_0^s$  dell'onda diffusa, a distanza  $r$  è definito come [11]:

$$E_0^s = \beta^2 p \sin \theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} \quad (2.1)$$

con  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Il calcolo del fattore  $\alpha$  in presenza di particelle sferiche è ottenuta da [11]:

$$\alpha = \frac{3(m^2-1)}{4\pi(m^2+2)} V = \frac{m^2-1}{m^2+2} a^3 \quad (2.2)$$

dove  $a$  è il raggio della sfera,  $m$  è l'indice di rifrazione complesso e  $V$  è il volume della sfera. L'ampiezza del campo in direzione contraria a quella incidente è data da:

$$S_{bs} = \frac{\beta^2 p}{E_0} \quad (2.3)$$



da cui si ricava la sezione di backscattering per il regime di Rayleigh citata in precedenza:

$$\sigma_{bs} = 4\pi |S_{jj}^2| = 4\pi\beta^4\alpha^2 = 64\frac{\pi^5|m^2-1|^2}{\lambda^4|m^2+2|^2}a^6 \quad (2.4)$$

### Diffusione da dispersione di particelle

In meteorologia i bersagli tipici sono costituiti da dispersioni di particelle (idrometeore) di forma, dimensione e orientazione differente. Per valutarne correttamente le proprietà elettromagnetiche occorre conoscere la distribuzione delle dimensioni o dei diametri anche detta DSD, Drop Size Distribution.

La DSD  $N(D)dD$  è definita come il numero di idrometeore per unità di volume il cui diametro cade nell'intervallo  $[D - \frac{dD}{2}, D + \frac{dD}{2}]$ .

Nel caso di bersagli meteorologici la posizione dei diffusori considerati è assolutamente casuale e può essere dimostrato che in termini di backscattering e quindi di potenza ricevuta i contributi delle singole particelle possono essere sommati senza tenere conto dei termini di fase introdotti dalla posizione delle stesse rispetto ad un'origine fissata.

### 2.2.2 Valutazione della potenza ricevuta

In presenza di ostacoli, gli impulsi trasmessi dal radar vengono riflessi all'indietro dopo  $\Delta T$  secondi; per valutare la potenza ricevuta si può sommare in modo incoerente il contributo di ogni idrometeora [12] se valgono le seguenti ipotesi:

- Le idrometeore della stessa dimensione hanno la stessa forma e sono equiorientate
- La diffusione multipla è trascurabile

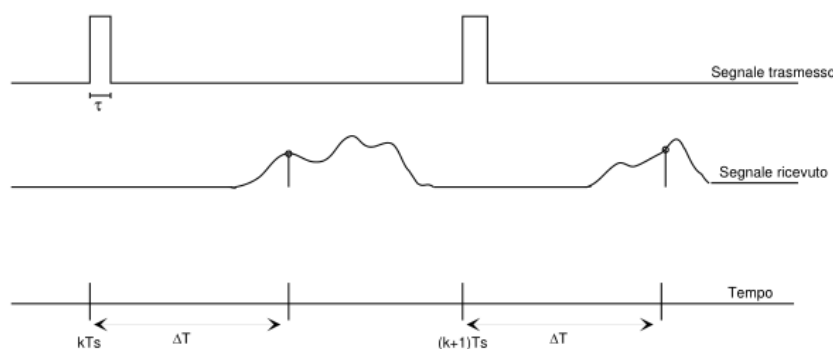


Figura 2.2: Diagramma temporale impulsi trasmessi

Nel seguito, le idrometeore che concorreranno alla potenza ricevuta sono quelle incluse nel volume di risoluzione radar, definito da un campione del segnale ricevuto  $\Delta T$  secondi dopo la trasmissione dell'impulso.

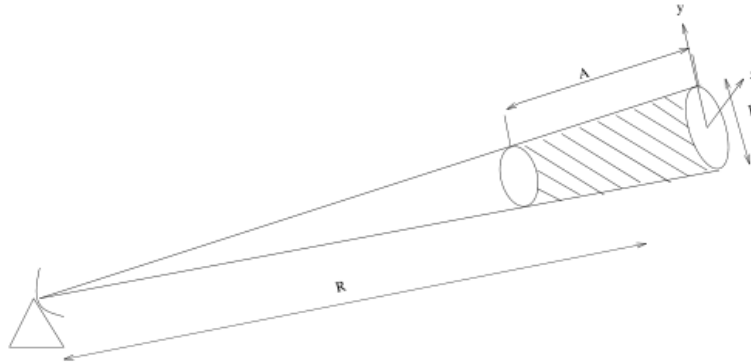


Figura 2.3: Volume di risoluzione radar

In Figura 2.3 è rappresentato geometricamente il volume di risoluzione radar dove  $A = \frac{c\tau}{2}$ ,  $B = \frac{\pi R^2 \Theta^2}{4}$  ed  $R = \frac{c\Delta T}{2}$ ;  $\tau$  e  $\Theta$  sono rispettivamente la durata dell'impulso e la larghezza del fascio d'antenna a -3dB.

Se si considera  $P_{tx}$  la potenza di picco trasmessa dall'antenna radar la densità di potenza che incide in un generico punto di coordinate  $P(r, \theta, \phi)$  vale:

$$S_i = L_a \frac{P_{tx} G f(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (W \text{ cm}^{-2}) \quad (2.5)$$

dove  $f(\theta, \phi)$  è la funzione di direttività dell'antenna, G è il guadagno ed  $L_a$  è un termine supplementare che racchiude tutte le eventuali attenuazioni aggiuntive oltre a quella di spazio libero; se  $k(l)$  è la costante di propagazione complessa lungo la direzione r,  $L_a$  è definita come [12]:

$$L_a = \left| e^{-j2 \int_0^r k(l) dl} \right| \quad (2.6)$$

Se nel punto P è localizzato un ostacolo, una frazione della potenza incidente viene retrodiffusa verso il radar; nel volume  $dV$  centrato in P sarà presente una dispersione di idrometeore e dunque la potenza  $dP$  complessivamente reirradiata dal volume elementare sarà :

$$dP = C_{dv} S_i dV \quad (cm^2) \quad (2.7)$$

con  $C_{dv}$ , integrale delle sezioni di backscattering delle particelle presenti nel volume elementare  $dV$ .

Il contributo  $dS_r$  proveniente dal volume elementare e che raggiunge l'antenna radar é:

$$dS_r = \frac{C_{dv} S_i}{4\pi r^2} L_a dV \quad (W \text{ cm}^{-2}) \quad (2.8)$$

Infine, per ottenere il contributo alla potenza  $dP_r$  dovuto al volume elementare  $dV$  è

necessario moltiplicare per l'area efficace dell'antenna radar ottenendo quindi:

$$dP_r = dS_r G \frac{\lambda^2}{4\pi} f(\theta, \phi) dV \quad (W) \quad (2.9)$$

La potenza totale ricevuta dal radar si ottiene integrando sull'intero volume di risoluzione i contributi  $dP_r$ :

$$P_r = \int_{RV} dP_r = \int_{RV} dS_r G \frac{\lambda^2}{4\pi} f(\theta, \phi) dV \quad (W) \quad (2.10)$$

da cui, sostituendo i termini troviamo l'equazione del radar completa:

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 G^2}{(4\pi)^3} \int_{RV} \frac{f^2(\theta, \phi) C_{bs} L_a^2}{r^4} dV \quad (W) \quad (2.11)$$

La quantità sotto il segno di integrale ha un significato di particolare interesse, rappresenta la media pesata delle sezioni di backscattering delle particelle contenute nel volume di risoluzione; le funzioni peso sono la distanza e la funzione di direttività dell'antenna.

### 2.2.3 La costante del radar

Dalla precedente sezione si è ricavata la formula integrale che descrive la potenza ricevuta da un volume di risoluzione contenente una certa quantità di particelle; è possibile riscrivere la stessa formula separando i termini costanti che non dipendono dalla posizione all'interno del volume:

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 G^2 L_a^2 C_{bs}}{(4\pi)^3 r^4} \int_{RV} f^2(\theta, \phi) dV \quad (W) \quad (2.12)$$

Una volta nota la funzione di direttività  $f(\theta, \phi)$  e la funzione peso lungo la direzione  $r$  [13], è possibile raggruppare tutti i termini che dipendono dalle caratteristiche del sensore radar in un'unica costante ed esprimere la potenza ricevuta come :

$$P_r = \frac{KL_a^2 \eta}{r^2} \quad (W) \quad (2.13)$$

dove per il calcolo dell'integrale sulla funzione di direttività, che per semplicità si è assunta gaussiana, è stata utilizzata la dimostrabile relazione [11]:

$$\int_{RV} f^2(\theta, \phi) dV = A \cdot B \frac{1}{2 \ln 2} \quad (m^3) \quad (2.14)$$

in cui A e B sono la profondità e l'area trasversa del volume di risoluzione calcolato nella sezione precedente.

La costante del radar K assume dunque la forma :

$$K = \frac{P_t \lambda^2 G^2 \Theta^2 (c\tau)}{512 \pi^2 (2 \ln 2)} \quad (2.15)$$

### 2.2.4 La riflettività Z

La potenza ricevuta come mostrato, dipende dalla distanza della cella radar secondo il rapporto  $\frac{1}{r^2}$  da cui si evince che la stessa popolazione di idrometeore genera degli echi la cui intensità decresce con il quadrato della distanza.

In radarmeteorologia solitamente ci si riferisce a una grandezza che svincola dalla misura della distanza, la riflettività Z definita come:

$$Z = 10^6 \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD \quad \left( \frac{mm^6}{m^3} \right) \quad (2.16)$$

dove N(D) è la Drop Size Distribution e D il diametro delle idrometeore.

La riflettività non dipende dalla distanza ma solo dalla *popolazione* di idrometeore.

Se la frequenza del radar è sufficientemente bassa da rendere le gocce *piccole* rispetto alla lunghezza d'onda interna [11], si può scrivere la sezione di backscattering utilizzando la relazione di Rayleigh della sezione 2.2.1 utilizzando questa volta il diametro D anziché il raggio:

$$\sigma_{bs} = 10^{-8} \frac{\pi^5 |m^2 - 1|^2}{\lambda^4 |m^2 + 2|^2} D^6 \quad (cm^2) \quad (2.17)$$

Al fine di valutare la sezione *totale* di diffusione dovuta alla distribuzione di particelle occorre integrare sulla distribuzione di diametri:

$$C_{bs} = \int_0^{D_{max}} \sigma_{bs}(D) N(D) dD \quad (cm^2 m^{-3}) \quad (2.18)$$

e da questa, sostituendo la definizione della  $\sigma_{bs}$  otteniamo:

$$C_{bs} = 10^{-8} \frac{\pi^5 |m^2 - 1|^2}{\lambda^4 |m^2 + 2|^2} \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD \quad (cm^2 m^{-3}) \quad (2.19)$$

in cui il termine sotto il segno d'integrale è la riflettività Z descritta nella (2.16); dalla (2.19) è possibile risalire alla riflettività Z se si conosce la sezione totale di scattering

$$Z = 10^{14} \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 C_{bs} \quad (mm^6 m^{-3}) \quad (2.20)$$

L'ipotesi di operare in regime di rayleigh è soddisfatta solitamente quando si osservano le precipitazioni per mezzo di un radar in banda S mentre se si usano frequenze più elevate o si osservano idrometeore di dimensioni maggiori allora non è improbabile che ci si trovi in regime di Mie; la riflettività viene dunque calcolata come [8]:

$$Z_{mie} = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 \int_0^{D_{max}} \sigma_{mie} N(D) dD \quad \left( \frac{mm^6}{m^3} \right) \quad (2.21)$$

La relazione più interessante che coinvolge la riflettività radar è quella che la lega alla potenza ricevuta infatti, se la costante del radar è nota si può scrivere:

$$Z = K1r^2 P_r \quad \left( \frac{mm^6}{m^3} \right) \quad (2.22)$$

Dove non si è tenuto conto delle attenuazioni aggiuntive include nel termine  $L_a$ .

## 2.3 Osservazione delle nubi di cenere

In base a quanto visto nel primo capitolo, non è difficile osservare una certa somiglianza tra quanto accade in atmosfera dopo un'eruzione vulcanica e quanto si può osservare durante una precipitazione atmosferica.

In effetti in entrambi gli scenari ci si trova in presenza di una *popolazione* di particelle, in movimento per azione della forza di gravità o e del vento ma che soprattutto, interagisce con le onde elettromagnetiche generando fenomeni di riflessione e diffusione.

Per questi motivi la comunità scientifica si è interessata nell'impiego di questi sistemi radar per osservare e monitorare le nubi di cenere vulcanica; ovviamente occorre fare delle distinzioni e considerazioni prima di estendere i concetti della sezione precedente alla cenere, cominciando dalla definizione della popolazione stessa.

### 2.3.1 PSD e popolazione di particelle

Nel caso delle precipitazioni, per quantificare la presenza di gocce di una certa dimensione per unità di volume si utilizza la Drop Size Distribution da cui poi si può risalire non solo alle grandezze radar quali la riflettività  $Z$  ma anche a informazioni proprie della precipitazione quali l'intensità della precipitazione e l'estensione dei fenomeni. quando si parla di cenere vulcanica, è più appropriato riferirsi ad una distribuzione di particelle piuttosto che di *gocce* e quindi si ricorre alla PSD o Particle Size Distribution. La PSD assolve gli stessi compiti della DSD e permette di risalire ad informazioni molto utili quali l'estensione della nube, la *popolazione* e la concentrazione di cenere.

In letteratura [14] [7] si fa spesso riferimento a due famiglie di funzioni per la rappresentazione delle varie tipologie di particelle vulcaniche e della loro distribuzione la cui dimostrazione matematica esula dal presente richiamo teorico:

- **Funzione Gamma scalata**
- **Funzione di Weibull**

### La funzione gamma scalata

Questa PSD, definita come :

$$N_G(D) = N_n \left( \frac{D}{D_n} \right)^\mu e^{-\Lambda \left( \frac{D}{D_n} \right)^\nu} \quad (mm^{-1}m^{-3}) \quad (2.23)$$

dove  $D_n$  diametro medio pesato sull'intera popolazione,  $D$  diametro della particella,  $\Lambda$  e  $\nu$  fattori di forma della funzione ed  $N_n = \frac{8D_n^{-4}}{\pi\rho_a} C_a$ .

### Funzione di Weibull

Questa funzione rappresenta la forma generale di una PSD di cui la Gamma scalata è un caso particolare:

$$N_w = N_{nW} \left( \frac{D}{D_n} \right)^\mu e^{-\Lambda_{nW} \left( \frac{D}{D_n} \right)^{\mu+1}} \quad (mm^{-1}m^{-3}) \quad (2.24)$$

Al fine di ottenere dei risultati qualitativi ottimali da poter impiegare nel monitoraggio e analisi delle nubi di cenere, le funzioni analitiche devono essere adattate e supportate, ove possibile, da rilievi in-situ che possano rifinire il profilo dimensionale utilizzato per i calcoli.

## 2.3.2 Valutazione della riflettività radar

La PSD gamma scalata è stata ampiamente utilizzata in letteratura [7] per la modellizzazione della riflettività dovuta ad una nube di cenere dal quale si sono inoltre ricavate alcune relazioni con i parametri microfisici della cenere.

Per il calcolo della riflettività, se le ipotesi di Rayleigh sono valide, il calcolo teorico può essere fatto per mezzo della (2.16); nel lavoro di Marzano [7] sono inoltre dimostrate alcune relazioni che legano la riflettività a parametri della cenere quali la concentrazione e il diametro medio:

$$Z_{ash} = \left( \frac{6}{\pi\rho_{ash}} \frac{m_6}{m_3} \right) \cong 50.13 \frac{D_n^3}{\rho_{ash}} C_a \quad \left( \frac{mm^6}{m^3} \right) \quad (2.25)$$

in cui compare la densità della cenere  $\rho_{ash}$  in  $[\frac{g}{cm^3}]$ , la concentrazione di massa  $C_a$  in  $[\frac{g}{m^3}]$ . Nella precedente si può osservare un'ulteriore rappresentazione che prevede l'uso dei momenti della funzione PSD definiti come :

$$m_n = \int_{D_1}^{D_2} D^n N_a(D) dD \quad (2.26)$$

Tabella 2.2: Classi di PSD (Mmarzano)

Classe di diametro in mm	Diametro medio pesato $D_n$ in mm	Range di riferimento $D_n$ in mm
Cenere fine	0.01	0.0064 - 0.064
Cenere grossolana	0.1	0.064 - 0.64
Lapilli	1.0	0.64 - 6.4
Classe di concentrazione in $(gm^{-3})$	Concentrazione $C_a$	Range di riferimento $C_a$ in $(gm^{-3})$
Leggera	0.1	0.01 - 0.5
Moderata	1	0.5 - 2.0
Intensa	5	2 - 6.0

In [14] sono riportate le misure di riflettività ottenute utilizzando i parametri di un radar in banda C, in presenza di varie classi di PSD diversificate per diametro medio pesato e concentrazione:

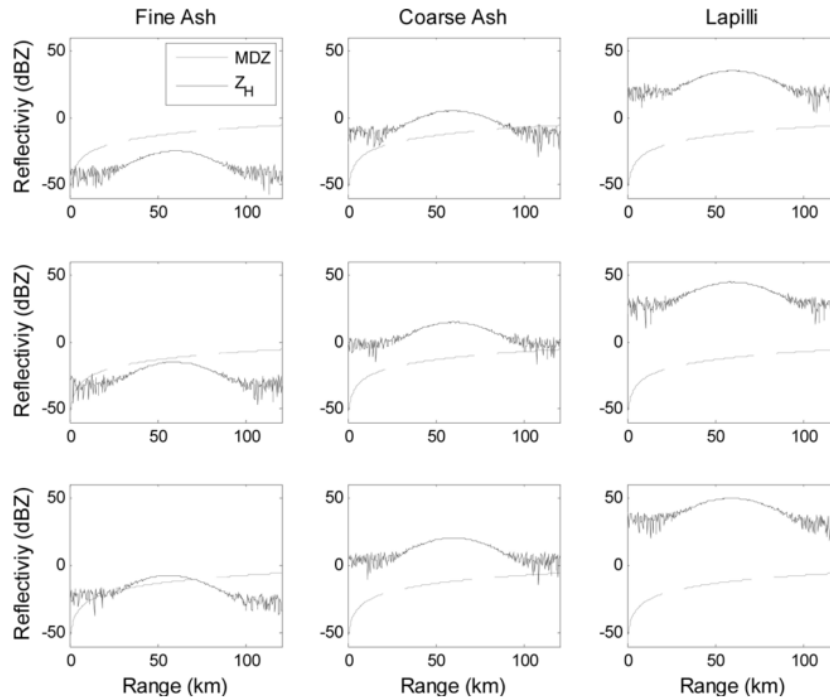


Figura 2.4: Misure riflettività radar banda C

Figura 2.4, misure di riflettività per scarsa (prima riga), moderata(seconda riga) e intensa concentrazione di particelle (terza riga) valutata in presenza di cenere: fine(sinistra), grossolana(centro) e lapilli(destra).

### 2.3.3 Stima della potenza ricevuta

La stima della potenza ricevuta in presenza di una nube di cenere è possibile risolvendo l'equazione del radar inserendo le informazioni sul sistema e sulle proprietà diffusive della cenere [14]:

$$P_r(r) = P_t |K_a^2| \frac{\pi^5 10^{-19}}{2^{10} 1.08 \ln 2} \frac{\tau \theta_3 \phi_3 G^2 L_f Z_{ash}(r)}{\lambda^2 r^2} \quad (mW) \quad (2.27)$$

dove  $L_f$  è l'attenuazione introdotta dalle operazioni di filtraggio a livello ricevitore,  $\theta_3, \phi_3$  sono le aperture del radar a 3dB.

Ogni sistema ha una soglia minima di potenza *rilevabile*, la cosiddetta MDS; imponendo la MDS come potenza ricevuta nell'equazione precedente è possibile invertire la relazione e trovare una minima *riflettività* rilevabile, una MDZ :

$$MDZ(r) = \frac{2^{10} 1.08 \ln 2}{\pi^5 10^{-19}} \frac{\lambda^2}{\tau \theta_3 \phi_3 G^2 |K_a| L_f P_t} r^2 MDS \quad (2.28)$$

### 2.3.4 Lo spettro Doppler

In presenza di bersagli in movimento, il segnale riflesso che raggiunge il ricevitore presenta una traslazione in frequenza che dipende dalla velocità dell'oggetto e dalla direzione dello stesso. Questo fenomeno, noto come Doppler shift avviene solo in presenza di una componente radiale della velocità relativa delle particelle come mostrato in figura 2.5 L'entità dello shift Doppler, come accennato, dipende dalla velocità con

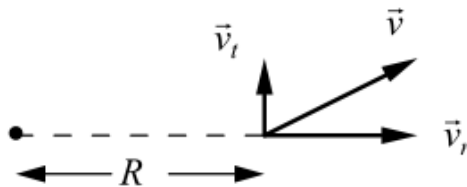


Figura 2.5: Componenti vettore velocità dei bersagli

segno del bersaglio e dalla lunghezza d'onda a secondo la relazione:

$$f_d = -\frac{2v_r}{\lambda} \quad (Hz) \quad (2.29)$$



da cui si ottengono valori positivi quando il bersaglio si avvicina alla sorgente e valori negativi quando il bersaglio si allontana.

Nel caso di una PSD di particelle, lo spettro Doppler ottenuto sarà definito dalla forma d'onda trasmessa nonché dalla funzione di direttività, ad esempio utilizzando una funzione di direttività gaussiana si otterrà uno spettro gaussiano traslato di una quantità determinata da  $v_r$ .

## 2.4 Dalle grandezze radar ai parametri microfisici

Dalla conoscenza della PSD e dalle informazioni inerenti alla forma, composizione e densità della cenere è possibile ricavare alcuni parametri di notevole interesse ai fini dell'analisi microfisica della nube stessa infatti, utilizzando i momenti di vario ordine della PSD calcolati nella (2.26) è possibile stimare [7]:

- **La massa di una singola particella**  $m_a$  in kg:

$$m_a(D) = \frac{\pi}{6} \rho_a(D) D^3 \quad (kg) \quad (2.30)$$

- **La popolazione totale per unità di volume**  $N_t$  inteso come il numero di particelle totali per  $m^3$  :

$$N_t \equiv \int_{D_{min}}^{D_{max}} N_a(D) dD = m_0 \quad (2.31)$$

- **La concentrazione di massa**  $C_a$  in  $g \cdot m^{-3}$ :

$$C_a \equiv \int_{D_{min}}^{D_{max}} m_a(D) N_a(D) dD = \frac{\pi}{6} \rho_{ash} m_3 \quad (2.32)$$

- **Il diametro medio pesato**  $D_n$  in mm :

$$D_n \equiv \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} D N_a(D) dD}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} N_a(D) dD} = \frac{m_1}{m_0} \quad (2.33)$$

Le grandezze microfisiche di cui sopra sono ottenibili anche invertendo le relazioni che coinvolgono la riflettività  $Z$  [7] come nel caso della concentrazione  $C_a$ :

$$C_a = \left(10^{-3} \frac{\pi \rho_a}{6} \frac{m_3}{m_6}\right) Z_{ash} \cong 3.21 \cdot 10^{-5} \frac{\rho_a}{D_n^3} Z_{ash} \quad (2.34)$$



# Capitolo 3

## Il simulatore radar

I radar meteorologici sono sistemi molto flessibili e versatili che richiedono una calibrazione molto fine al fine di fornire risultati soddisfacenti ed esaustivi. In particolare, le relazioni che coinvolgono le grandezze misurate dipendono da molteplici parametri e la variazione seppur minima di alcuni di questi può inficiare in modo significativo la funzionalità del radar.

In aggiunta, una configurazione operativa ottimale del sistema per il rilevamento di certe tipologie di bersagli può non essere adeguata per l'applicazione verso altre tipologie di obiettivi, portando di fatto alla riconfigurazione del sistema. Nelle prossime sezioni viene presentato e descritto un simulatore radar scritto in Matlab e realizzato al Politecnico di Milano atto al monitoraggio e profilazione della cenere vulcanica.

### 3.1 Obiettivi e struttura del simulatore

La cenere vulcanica differisce notevolmente in termini di struttura fisica e composizione dalle precipitazioni e, nonostante i principi che ne regolano l'interazione con le onde elettromagnetiche, sono gli stessi della pioggia e delle precipitazioni, la configurazione del radar deve essere mirata a massimizzare la qualità delle misure ottenute.

Per determinare la configurazione ideale del radar occorre prima di tutto essere certi che il simulatore, a parametri radar fissati, sia in grado di stimare correttamente la potenza retrodiffusa e le grandezze microfisiche della cenere. Il presente lavoro è incentrato propri su questo primo obiettivo mentre la calibrazione della configurazione del radar rientra negli sviluppi futuri del presente lavoro.

Uno degli obiettivi principali è quello di generare una serie temporale di segnali IQ comparabile con quella misurata da un radar Doppler dedicato all'osservazione di una nube vulcanica. Una volta ottenuti i segnali IQ ne viene stimata la potenza che, al netto di lievi rumorosità di calcolo, seguirà l'andamento della potenza ricavata dall'equazione del radar teorica.

Il passo finale sarà utilizzare la potenza così ricavata per stimare la velocità di traslazione delle particelle.

I parametri in ingresso al simulatore sono suddivisi in:

- Parametri del radar
- Informazioni sulla PSD
- Informazioni ambientali

Di seguito è mostrato uno schema a blocchi di alto livello del simulatore.

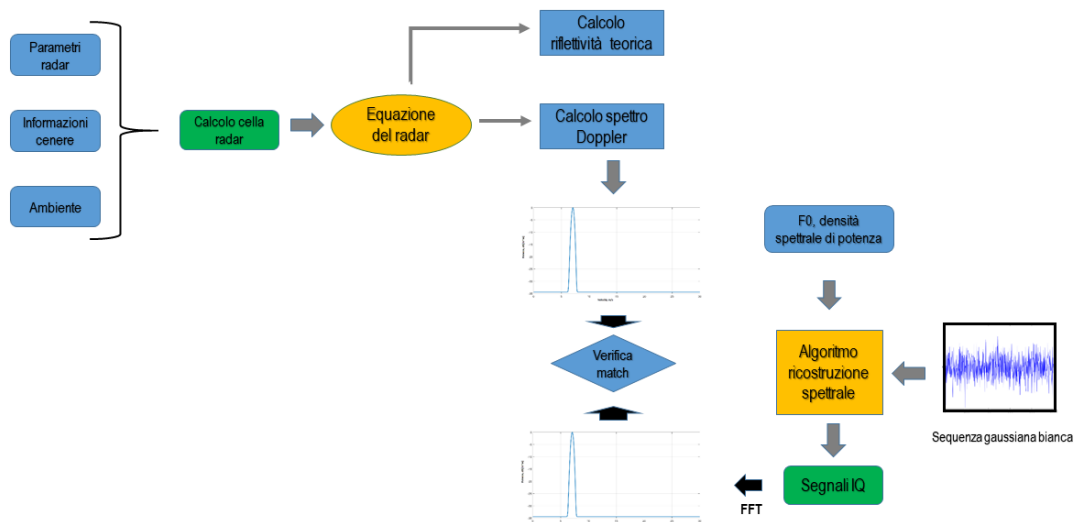


Figura 3.1: Schema a blocchi simulatore radar

## 3.2 Modello spettrale e ambientale

Il simulatore funziona su una cella radar che può a sua volta essere suddivisa in N sottocelle, dove per ciascuna delle quali si dovranno fornire la PSD che la popola e la velocità del vento.

La necessità di suddividere la cella in vari settori dipende dalla distanza della stessa dal radar infatti, se la cella è molto lontana, allora sarà anche molto estesa e quindi si può

ragionevolmente immaginare che al suo interno vi siano aree con una PSD differente. Supponendo che le particelle siano traslate da una componente preponderante di vento laterale parallelo al terreno, quello che si ottiene è uno spettro di forma circa gaussiana (se la funzione di direttività è gaussiana).

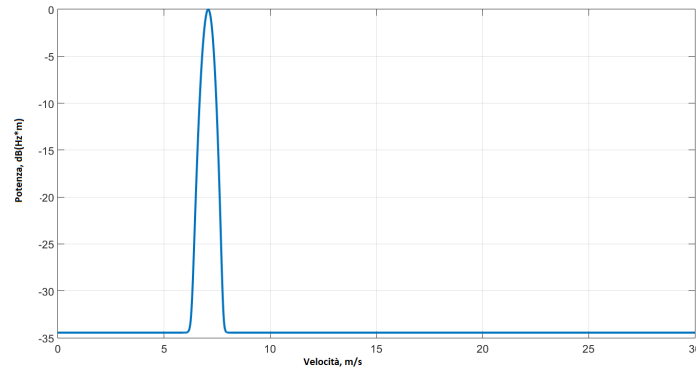


Figura 3.2: Linea spettrale dovuta alla singola cella

Le stesse ipotesi valgono quando la cella viene suddivisa in sottocelle infatti, se da ognuna di esse si ottiene una linea spettrale come quella sopra, allora accostando tutti i contributi si otterrà comunque uno spettro gaussiano ma leggermente più esteso; questo è dovuto alle differenti PSD e quindi alle differenti velocità di traslazione.

### 3.2.1 Parametri del radar

Al fine di risolvere l'equazione del radar e tutte le relazioni coinvolte nel calcolo delle grandezze necessarie, il simulatore richiede i seguenti parametri inerenti alla configurazione del radar:

1. **Frequenza di lavoro** in Hz
2. **Guadagno d'antenna** in dB
3. **Funzione di direttività** tridimensionale, su  $\theta$  e  $\phi$
4. **Funzione di peso in direzione radiale** in letteratura WRF, in direzione  $r$
5. **Potenza di picco trasmessa** in W
6. **Ampiezza angolare del fascio a -3dB** in gradi su  $\theta$  e  $\phi$
7. **Durata dell'impulso trasmesso** in  $\mu s$
8. **Frequenza di trasmissione impulsi** in Hz

La frequenza di trasmissione degli impulsi deve essere scelta con criterio, al fine di garantire la corretta valutazione di uno scenario lentamente variabile in un intervallo temporale definito come:

$$T_w = \text{lunghezza\_finestra} \cdot \text{PRI} \quad (3.1)$$

dove PRI è l'intervallo di ripetizione degli impulsi in secondi e lunghezza\_finestra rappresenta il numero di campioni mediati.

Inoltre, la PRF è legata alle condizioni di disambiguità per la distanza R in (m) e la velocità radiale  $V_r$  in  $m \cdot s^{-1}$ :

$$V_r < \frac{\lambda \text{PRF}}{4}; \quad R_{max} < \frac{c}{2\text{PRF}}; \quad R_{max} V_r = \frac{c\lambda}{8} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 Integrazione funzioni PSD

Le funzioni PSD al momento supportate nel codice sono quelle impiegate nel lavoro di Marzano [7] e citate nel capitolo 2:

Classe di diametro in mm	Diametro medio pesato $D_n$ in mm	Range di riferimento $D_n$ in mm
Polvere fine	0.01	0.0064 - 0.064
Cenere grossolana	0.1	0.064 - 0.64
Lapilli	1.0	0.64 - 6.4
Classe di concentrazione in ( $gm^{-3}$ )	Concentrazione $C_a$	Range di riferimento $C_a$ in ( $gm^{-3}$ )
Leggera	0.1	0.01 - 0.5
Moderata	1	0.5 - 2.0
Intensa	5	2 - 6.0

Tabella 3.1: Classi di PSD (Marzano)

La scelta della PSD da utilizzare nei calcoli avviene attraverso l'impostazione di due indici:

- **ind\_conc** da 1 a 3 per impostare rispettivamente, *leggera*, *moderata* e *intensa* concentrazione di cenere.
- **ind\_diam** da 1 a 3 per selezionare, *polvere fine*, *cenere grossolana* e *lapilli*

### 3.2.3 Parametri ambientali e cella radar

Nel modello ambientale utilizzato dal simulatore è necessario inserire informazioni sulla cenere, sul vento (componente orizzontale) e i parametri geometrici della cella radar da osservare. La definizione degli input è la seguente:

1. **Costante complessa**  $\epsilon_r$  della cenere nella forma  $\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r''$
2. **Velocità del vento**  $V_0$  in  $m s^{-1}$
3. **Distanza della cella radar** in km
4. **Posizione della cella radar**, elevazione in m e azimut in gradi

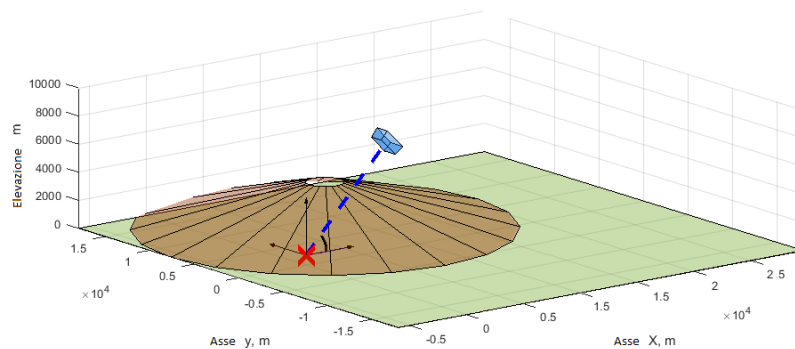


Figura 3.3: Modello cella radar

Il contributo più rilevante ai fini della determinazione dello spettro Doppler è determinato dalle particelle che si muovono a differenti velocità radiali:

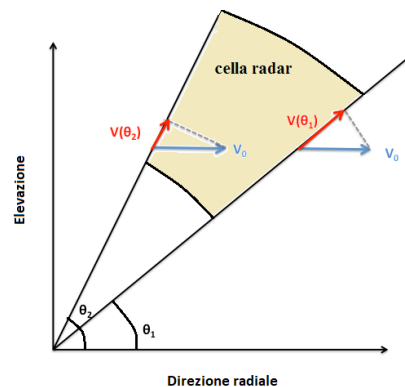


Figura 3.4: Velocità radiale particelle

Da quest'assunzione risulta evidente, figura 3.4, che l'unico fattore che influenza la velocità con cui il radar vede le particelle muoversi, è rappresentato dall'elevazione con cui il radar stesso le illumina.

### 3.3 Descrizione dell'algoritmo

Come presentato nelle sezioni precedenti, uno degli obiettivi primari del simulatore è quello di ricostruire lo spettro Doppler dovuto alle particelle traslate dal vento. A tal proposito l'algoritmo opera nel seguente modo:

- Calcolo della riflettività teorica dalla PSD
- Calcolo potenza ricevuta
- Valutazione potenza in funzione della velocità
- Ricostruzione segnali IQ
- Stima parametri microfisici della cenere
- Riepilogo grandezze calcolate

I risultati delle operazioni vengono poi riassunti in una schermata all'interno della console.

#### 3.3.1 Calcolo riflettività teorica

Il calcolo della riflettività radar viene assegnato ad una funzione che, in ingresso riceverà gli indici che caratterizzano la PSD e la densità della cenere  $\rho_{ash}$ .

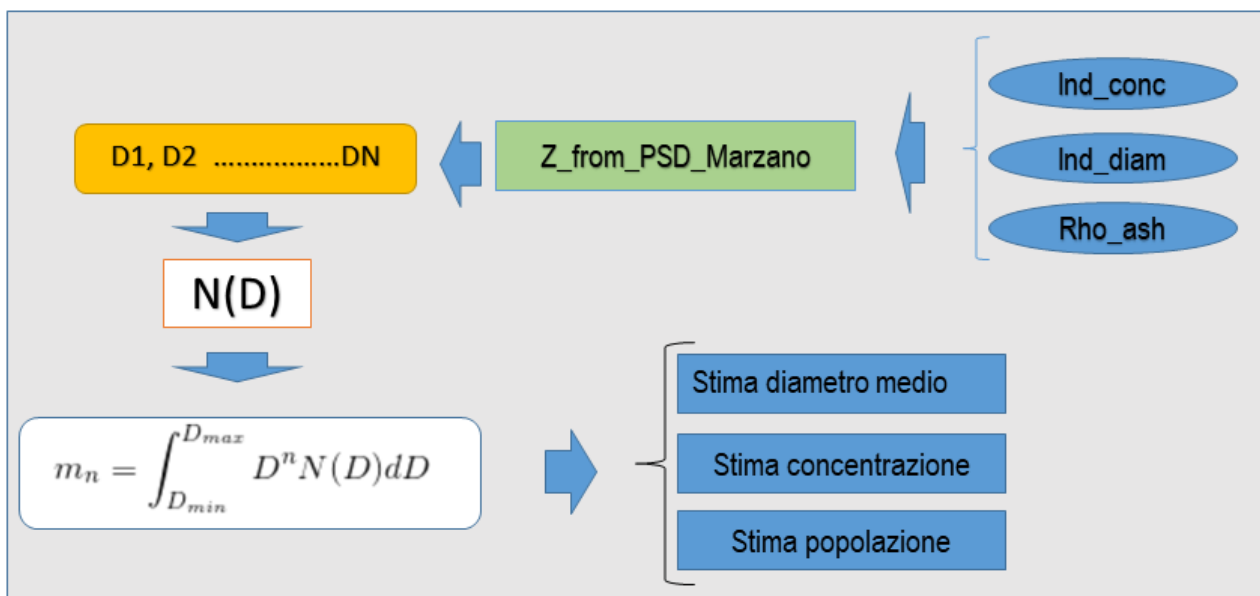


Figura 3.5: Schema a blocchi calcolo riflettività



Una volta riconosciuta la classe di appartenenza della cenere, il software imposta le soglie  $D_{min}$  e  $D_{max}$  e genera un vettore di  $N$  valori di diametro equispaziati. A questo punto viene costruita la PSD analitica di tipo Gamma [7] e vengono calcolati i momenti della PSD analitica fino al sesto ordine.

I momenti così generati vengono impiegati per la stima dei parametri microfisici della cenere, *diametro medio, concentrazione e popolazione*.

### 3.3.2 Equazione del radar

Per valutare la potenza ricevuta in watt il codice risolve l'equazione del radar presentata nel capitolo precedente e calcola la totale potenza ricevuta dal volume della cella radar. La cella risulta centrata nel punto di coordinate  $(r_c, \theta_c, \phi_c)$  ricavate dalle informazioni inerenti alla distanza e apertura del fascio.

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} G^2 \pi^2 |m^2 - 1|^2}{64 \lambda^2 |m^2 + 2|^2} \int_{D_1}^{D_2} D^6 N(D) dD \int_{r_1}^{r_2} \frac{|WRF(r)|^2}{r^2} dr \int_{\phi_1}^{\phi_2} h^2(\phi) d\phi \int_{\theta_1}^{\theta_2} g^2(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (3.3)$$

dove i tre termini a destra rappresentano l'integrale sulle tre dimensioni del volume della cella radar con  $dV = r^2 \cos \theta dr d\theta d\phi$ .

All'esterno dei segni d'integrale si trova la costante che raggruppa i parametri che dipendono dal radar, il primo integrale rappresenta la riflettività radar  $Z$  calcolata per mezzo di una funzione riportata in appendice.

### 3.3.3 Calcolo spettro Doppler

Questa parte dell'algoritmo è dedicata alla ricostruzione dello spettro Doppler dato dall'irradiamento di una nube di particelle traslate dal vento. Come già accennato la velocità delle stesse non dipenderà dal diametro e il radar vedrà le particelle muoversi con una velocità  $v$  che dipende dall'angolo di elevazione  $\theta$  secondo la relazione:

$$V(D) = V_0; \quad v = V_0 \cos \theta \quad (3.4)$$

Per risalire allo spettro occorre esplicitare la variazione della potenza ricevuta in funzione dell'elevazione  $\theta_c$ ; racchiudendo i termini di  $P_r$  che non dipendono da  $\theta$  in un unico termine  $B$  si ottiene:

$$\frac{dP_c}{d\theta_c} = B g^2(\theta_c) \cos \theta_c \quad (3.5)$$

e sapendo che lo spettro della cella è dato da:

$$S_{cella}(v_c) = \frac{dP_c}{dv_c} = \frac{dP_c}{d\theta_c} \frac{d\theta_c}{dv_c} \quad (3.6)$$

Utilizzando le relazioni precedenti si può esprimere  $v_c$  come:

$$v_c = V_0 \cos \theta_c \quad (3.7)$$

da cui:

$$\theta_c(v_c) = \arccos\left(\frac{v_c}{V_0}\right) \rightarrow \frac{d\theta_c}{dv_c} = -\frac{1}{\sqrt{V_0^2 - v_c^2}} \quad (3.8)$$

Infine, sostituendo i vari componenti si ottiene la forma finale dello spettro:

$$S_{cella}(\theta_c) = -Bg^2(\theta_c) \cos \theta_c \frac{1}{\sqrt{V_0^2(1 - \cos^2 \theta_c)}} \quad (3.9)$$

e finalmente:

$$S_{cella}(v_c) = -Bg^2\left(\arccos\left(\frac{v_c}{V_0}\right)\right) \frac{v_c}{V_0} \frac{1}{\sqrt{V_0^2 - v_c^2}} \quad (3.10)$$

Questo procedimento può essere iterato nel caso di cella vasta suddivisa in settori più ridotti, ottenendo per ciascuno una linea spettrale. L'accostamento di tutti i contributi forma lo spettro Doppler totale della cella radar osservata.

### 3.3.4 Ricostruzione segnali IQ

Una volta ottenuto lo spettro Doppler totale composto dalle N righe spettrali appartenenti a N sottocelle, l'algoritmo si occupa di eseguire il processo inverso. In particolare l'obiettivo è risalire ai segnali I e Q che andrebbero a generare ciascuna linea spettrale per poi sommarli in fase e quadratura.

In questa prima versione del codice, i segnali IQ vengono ricavati impostando dapprima la relazione:

$$S_c(f) = X(f)H(f) \quad (3.11)$$

In cui  $X(f)$  rappresenta la densità spettrale di potenza della sequenza casuale (costante) generata ed  $S(f)$  rappresenta lo spettro Doppler ricavato nei passi precedenti dell'algoritmo. Il calcolo della risposta  $H(f)$  permette di ottenere la risposta all'impulso  $h(t)$  tramite IFFT da cui:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (3.12)$$

I segnali IQ sono ricavabili anche dalle relazioni [15]:

$$I(T_s) = H \sum_i \left[ \frac{\sqrt{\sigma_{bi}} |WRF|^2}{r_i^2} f(\theta_i, \phi_i) \cos(\gamma_i) \right] \quad (3.13)$$

$$Q(T_s) = H \sum_i \left[ \frac{\sqrt{\sigma_{bi}} |WRF|^2}{r_i^2} f(\theta_i, \phi_i) \sin(\gamma_i) \right] \quad (3.14)$$

in cui compaiono i termini:

$$\gamma_i = \left( \frac{4\pi r_i}{\lambda} \right) + \left( \frac{4\pi v_i T_s}{\lambda} \right) - \psi_i - \beta_i \quad H = \sqrt{\frac{(P_t G^2 \lambda^2)}{(4\pi)^3}} \quad (3.15)$$

Nell'equazione precedente sono presenti la velocità  $v_i$  dell' $i$ -esimo scatteratore e i contributi di fase dovuti alla funzione WRF e di scattering  $\beta_i, \psi_i$ .

### Verifica potenza ricevuta

Dai segnali IQ ottenuti è possibile stimare la potenza ricevuta secondo la nota relazione [13]:

$$\widetilde{P}_r = \frac{1}{N_{samples}} \sum_i I_i^2(T_s) + Q_i^2(T_s) \quad (W) \quad (3.16)$$

### 3.3.5 Stima parametri cenere

Nell'ultima sequenza dell'algoritmo, vengono stimati i parametri microfisici della cenere utilizzando i momenti della funzione analitica PSD. L'andamento di questi parametri, con ovvie tolleranze teoriche deve rispettare i valori inseriti manualmente in fase di input come mostrato nel capitolo inerenti ai risultati delle simulazioni.



# Capitolo 4

## Risultati

La prima sezione del capitolo contiene le simulazioni inerenti al calcolo della potenza ricevuta e della riflettività  $Z$ ; in particolare è mostrato il confronto tra i valori ottenuti dalla soluzione dell'equazione del radar e quelli ricavati utilizzando la sequenza IQ simulata. In questa prima parte la velocità del vento è rimasta invariata e di conseguenza la velocità media ricavata dallo spettro Doppler rimane invariata.

Nella seconda parte delle simulazioni è riportata la stima della velocità media ricavata dallo spettro Doppler in presenza di differenti valori di velocità del vento; il confronto viene fatto con la stima di velocità media ottenuta da un codice di Pulse Pair Processing sviluppato nell'ambito di questo lavoro di tesi.

### 4.1 Configurazione radar

La configurazione del radar in banda X utilizzato è così composta:

- **Frequenza di lavoro:** 9.375 GHz
- **Potenza di picco trasmessa:** 50 kW
- **Durata impulso trasmesso:** 1.4  $\mu$ s
- **PRF:** 2000 Hz
- **Guadagno antenna:** 41.6 dB
- **Apertura del fascio (-3dB):** 1.3° (elevazione e azimuth)
- **MDS:** -112 dBm
- $\epsilon_r$  **cenere:** 6 - i0.15
- **Densità della cenere  $\rho$ :** 1 g/m<sup>3</sup>
- **Velocità del vento:** 10 m/s

### 4.2 Stima potenza ricevuta e riflettività $Z$

### 4.2.1 PSD: polvere fine, 16 campioni IQ

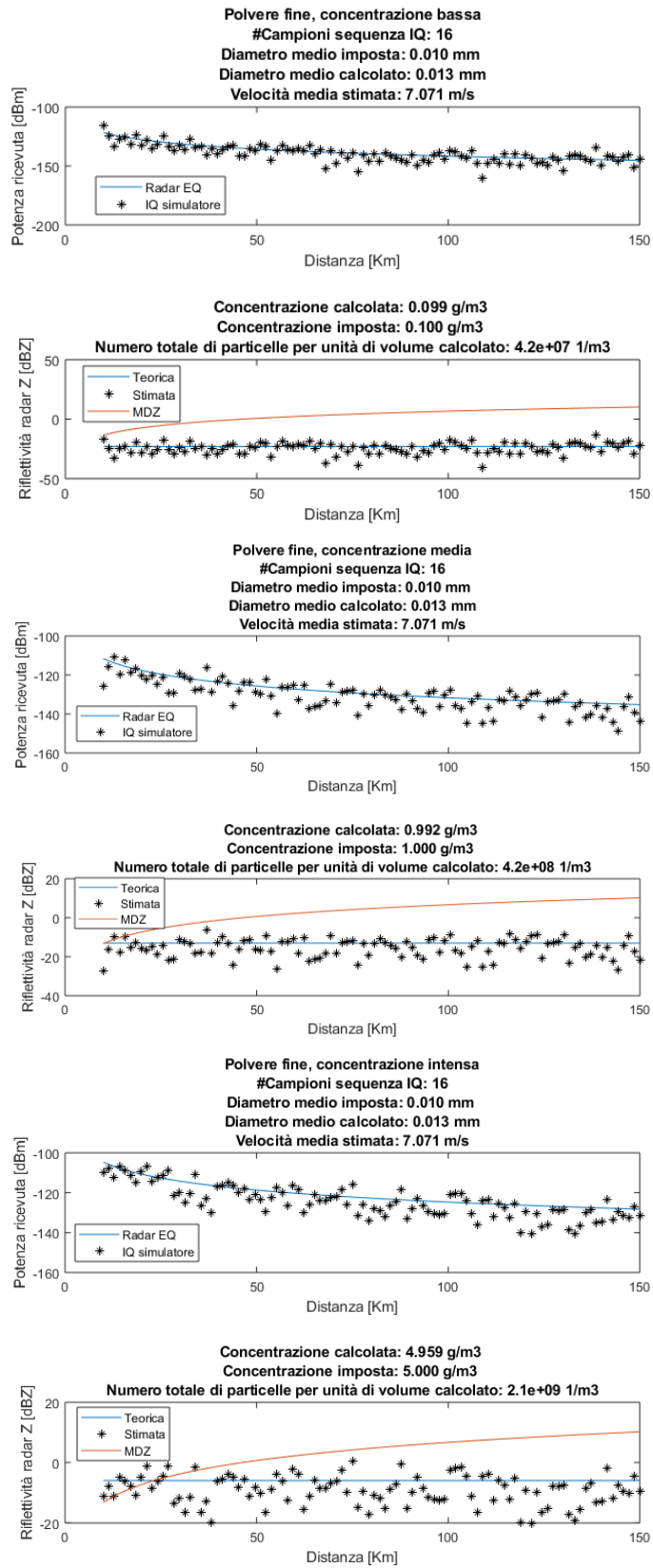


Figura 4.1: PSD: polvere fine, 16 campioni IQ

## 4.2.2 PSD: cenere grossolana, 16 campioni IQ

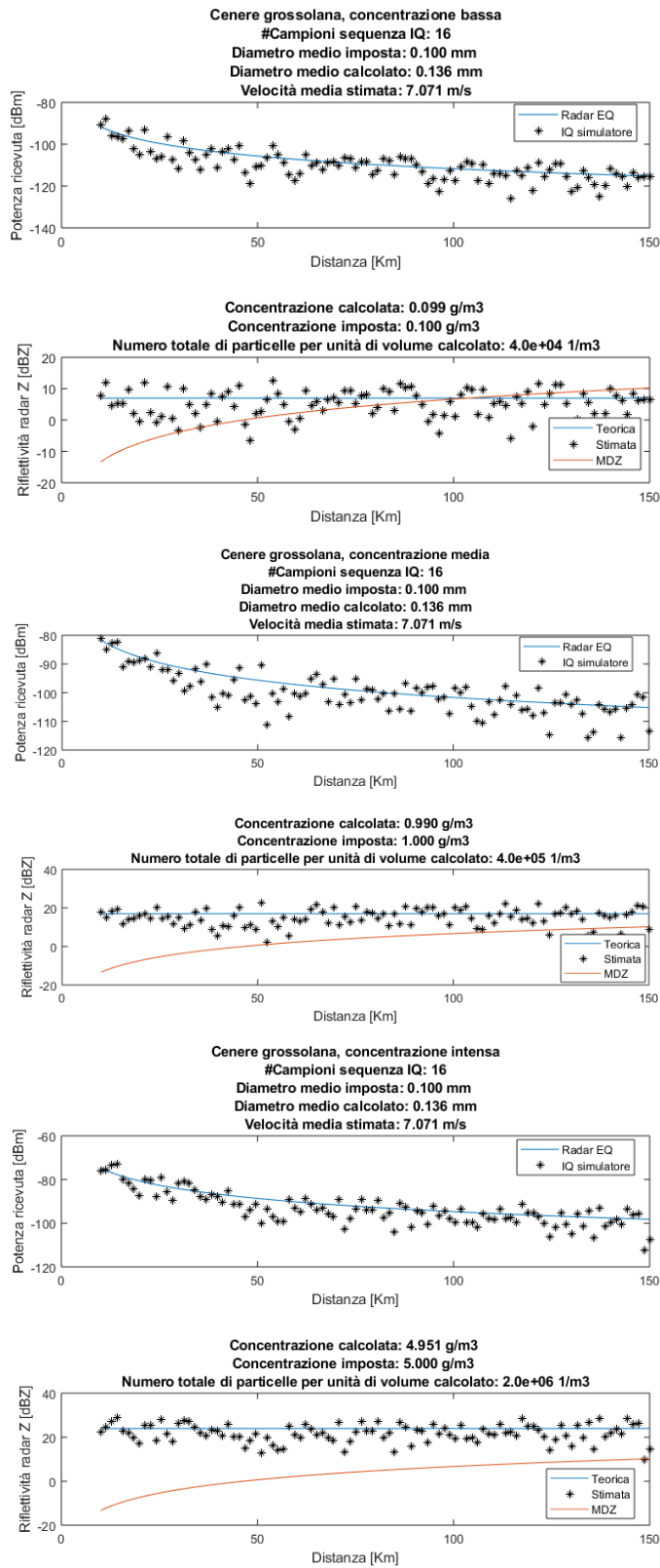


Figura 4.2: PSD: cenere grossolana, 16 campioni IQ

### 4.2.3 PSD: lapilli, 16 campioni IQ

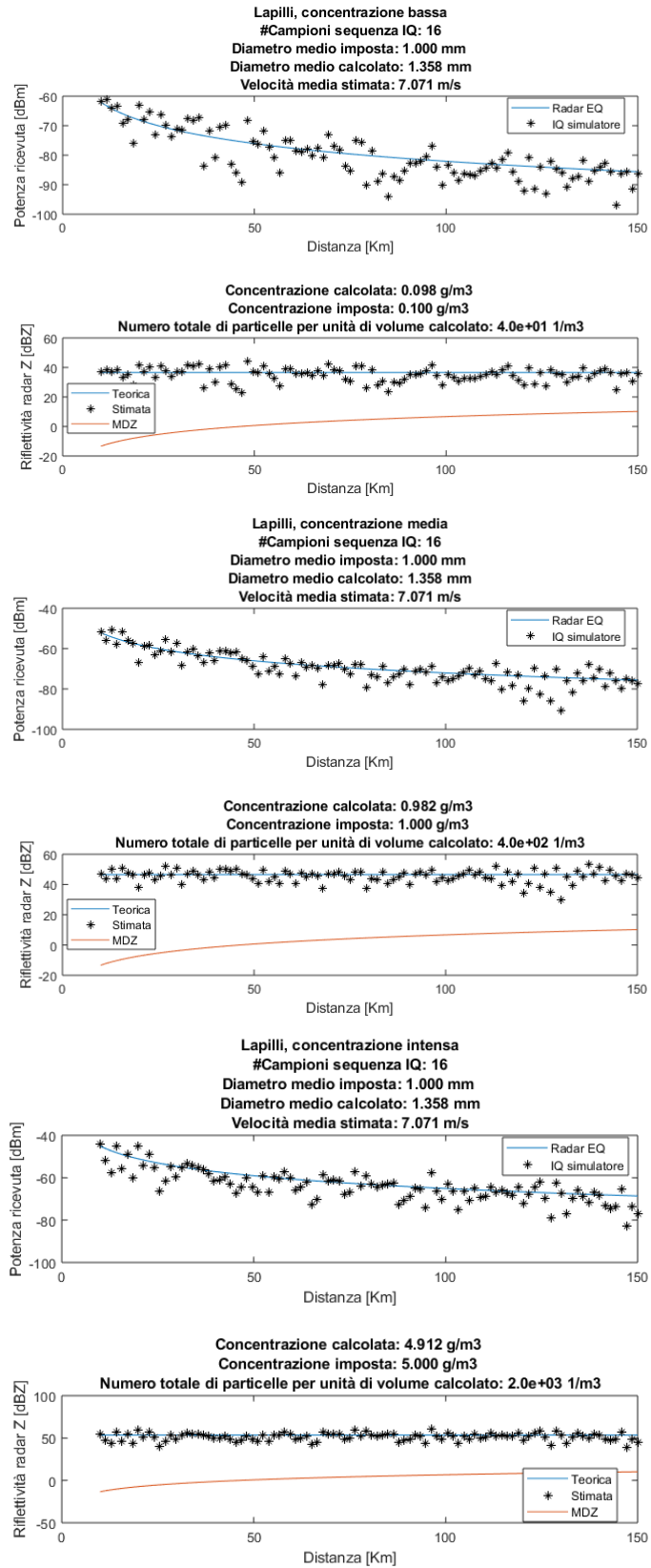


Figura 4.3: PSD: lapilli, 16 campioni IQ



## 4.2.4 PSD: polvere fine, 32 campioni IQ

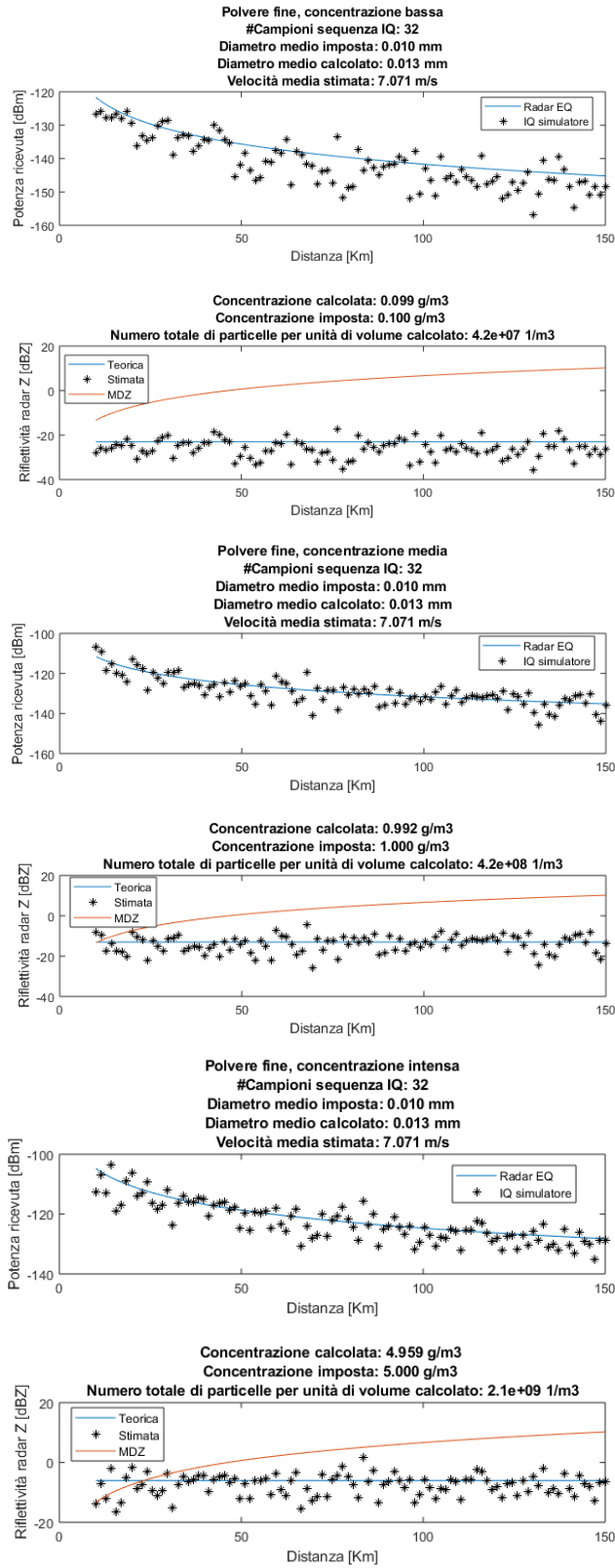


Figura 4.4: PSD: polvere fine, 32 campioni IQ

### 4.2.5 PSD: cenere grossolana, 32 campioni IQ

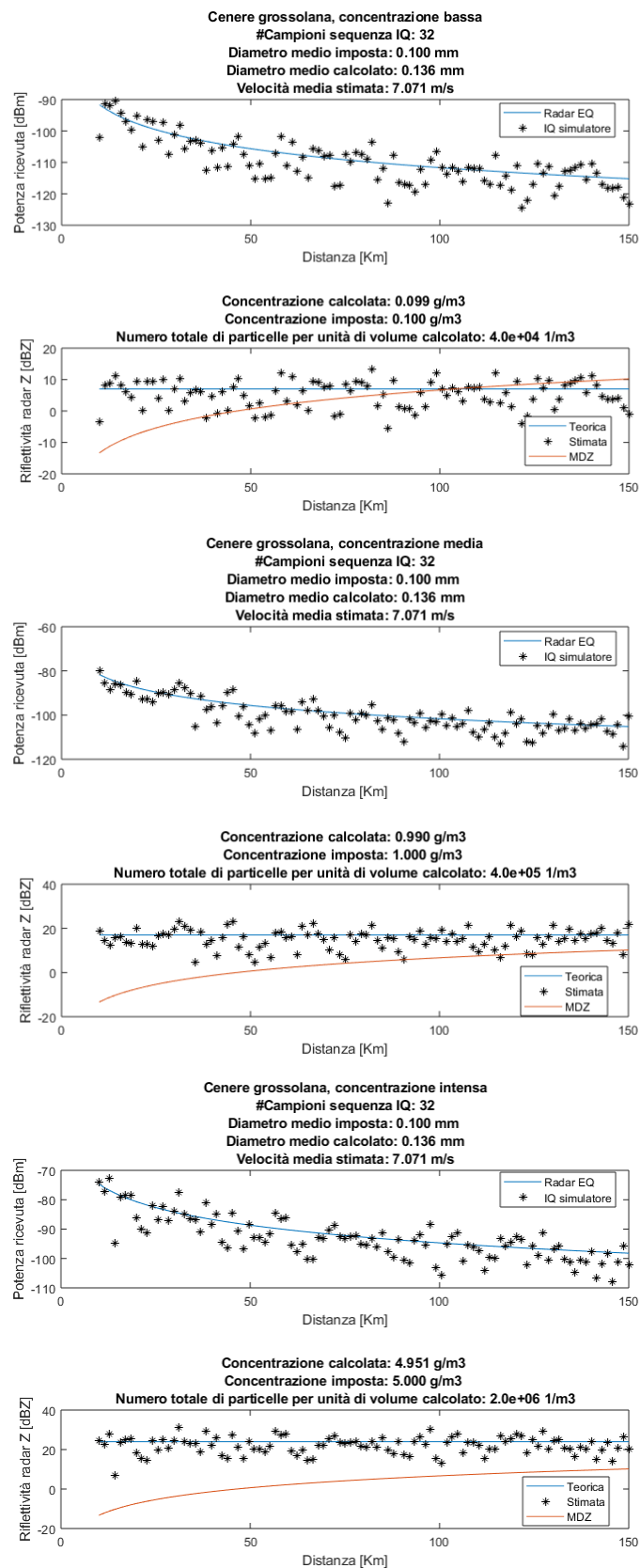


Figura 4.5: PSD: cenere grossolana, 32 campioni IQ

## 4.2.6 PSD: lapilli, 32 campioni IQ

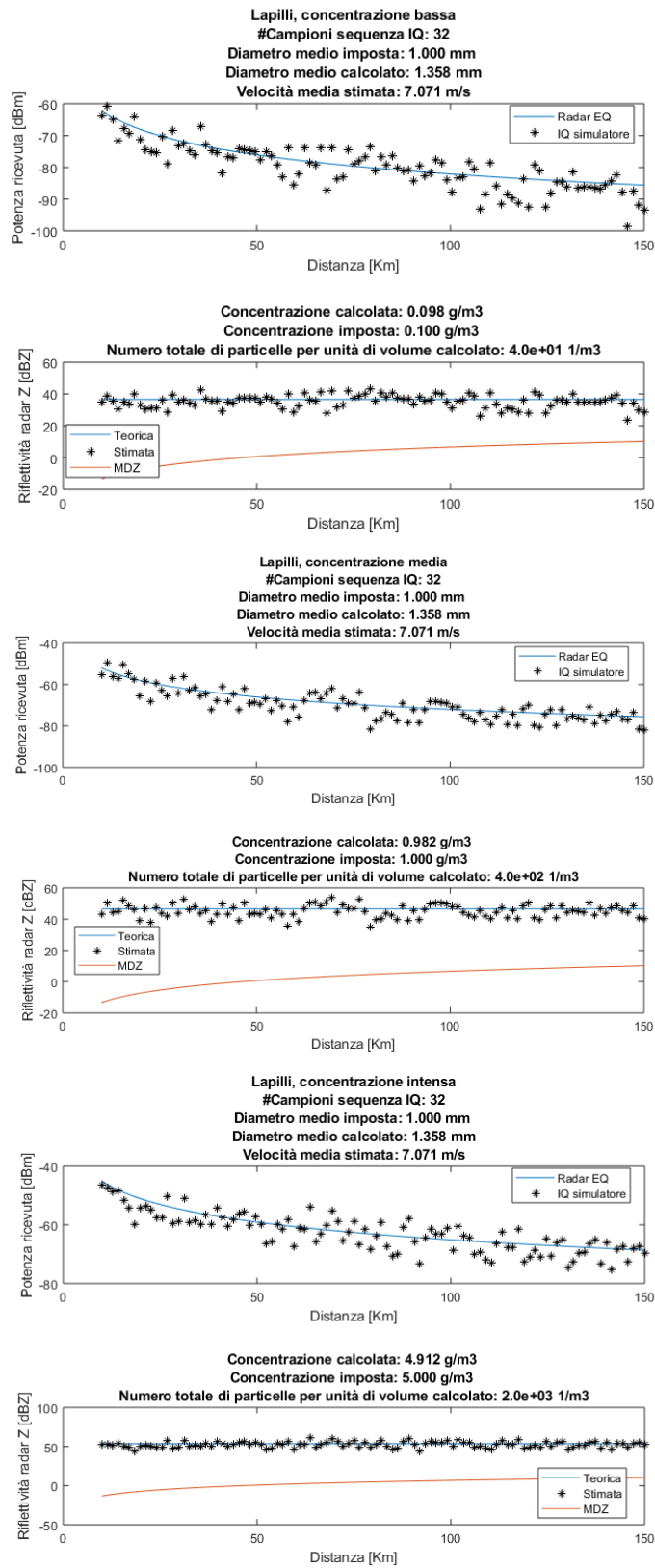


Figura 4.6: PSD: lapilli, 32 campioni IQ

### 4.2.7 PSD: polvere fine, 64 campioni IQ

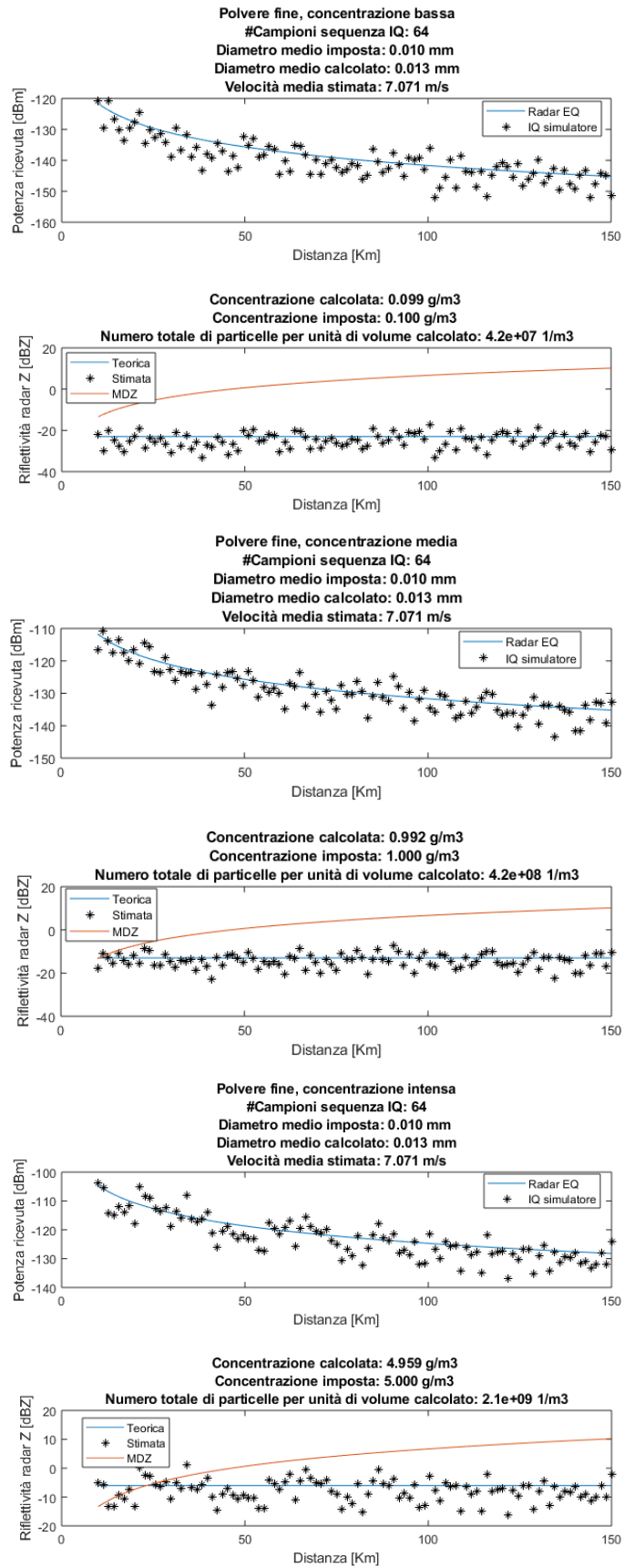


Figura 4.7: PSD: polvere fine, 64 campioni IQ

## 4.2.8 PSD: cenere grossolana, 64 campioni IQ

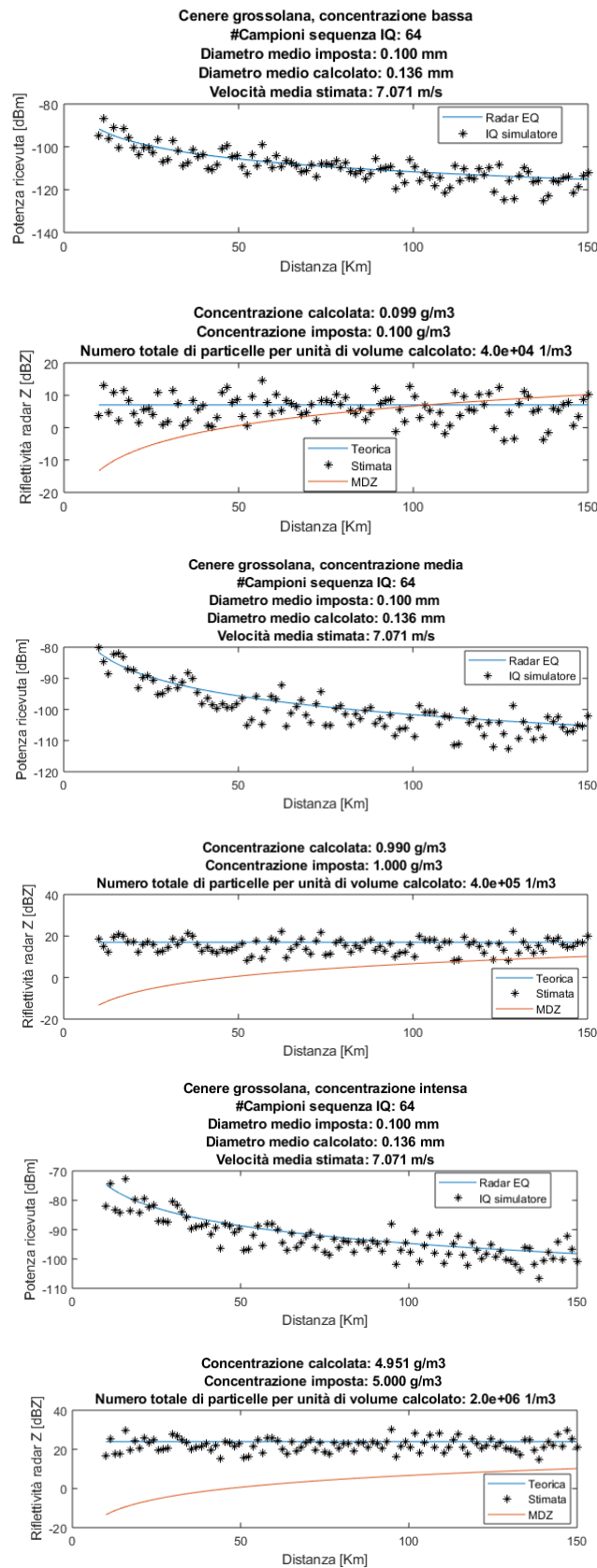


Figura 4.8: PSD: cenere grossolana, 64 campioni IQ

### 4.2.9 PSD: lapilli, 64 campioni IQ

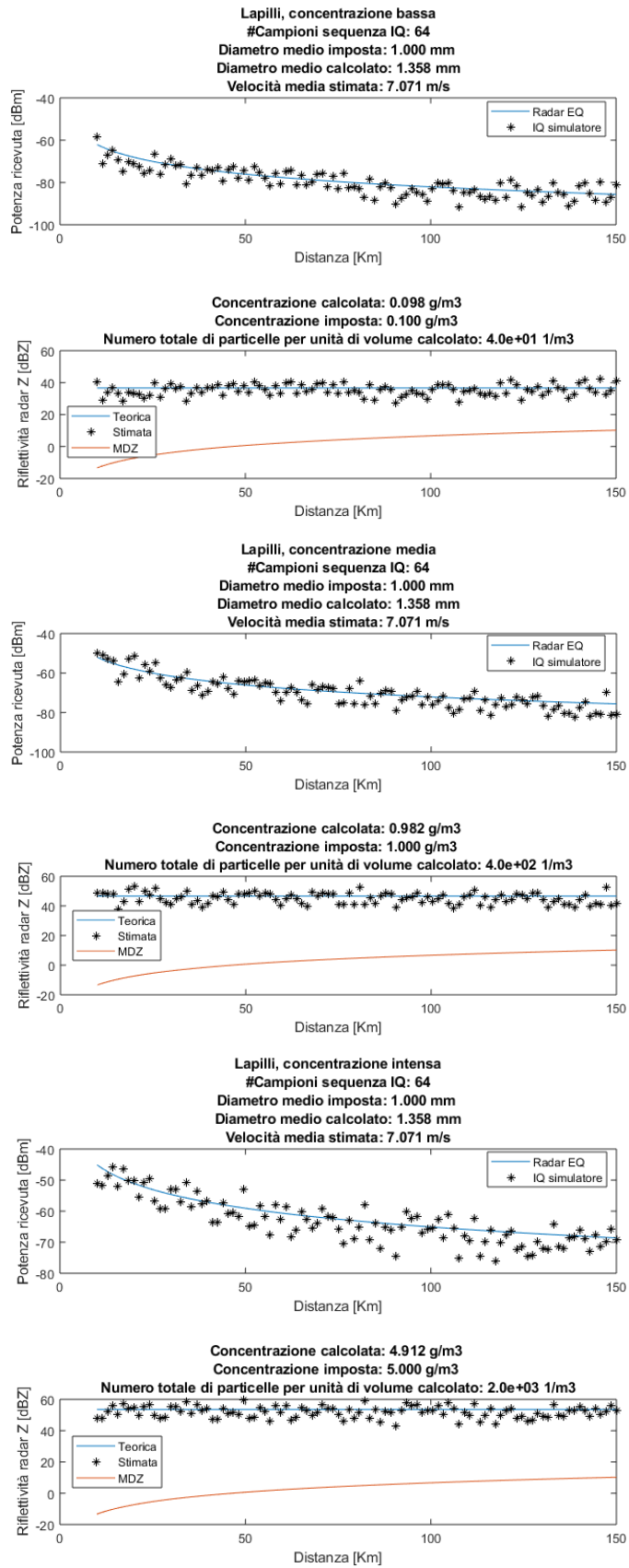


Figura 4.9: PSD: lapilli, 64 campioni IQ

## 4.2.10 PSD: polvere fine, 128 campioni IQ

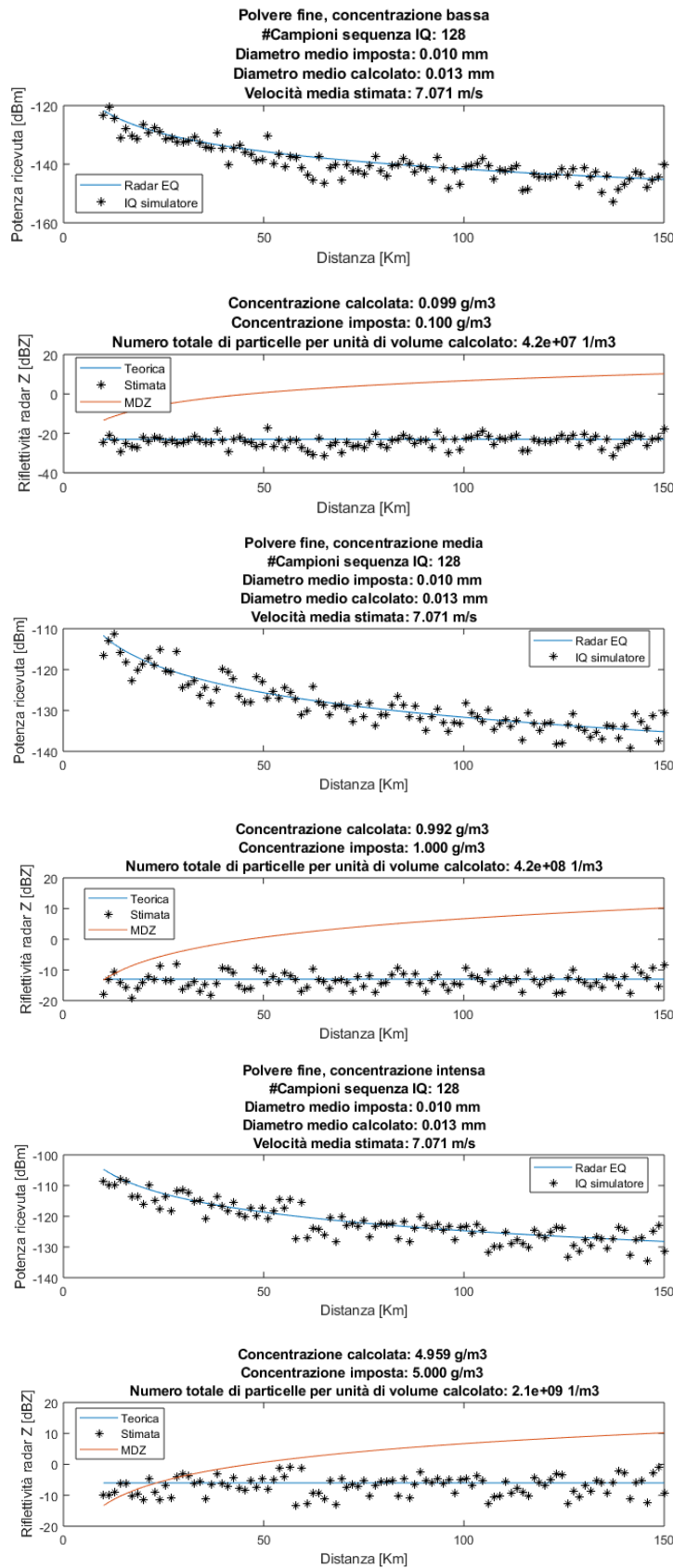


Figura 4.10: PSD: polvere fine, 128 campioni IQ

### 4.2.11 PSD: cenere grossolana, 128 campioni IQ

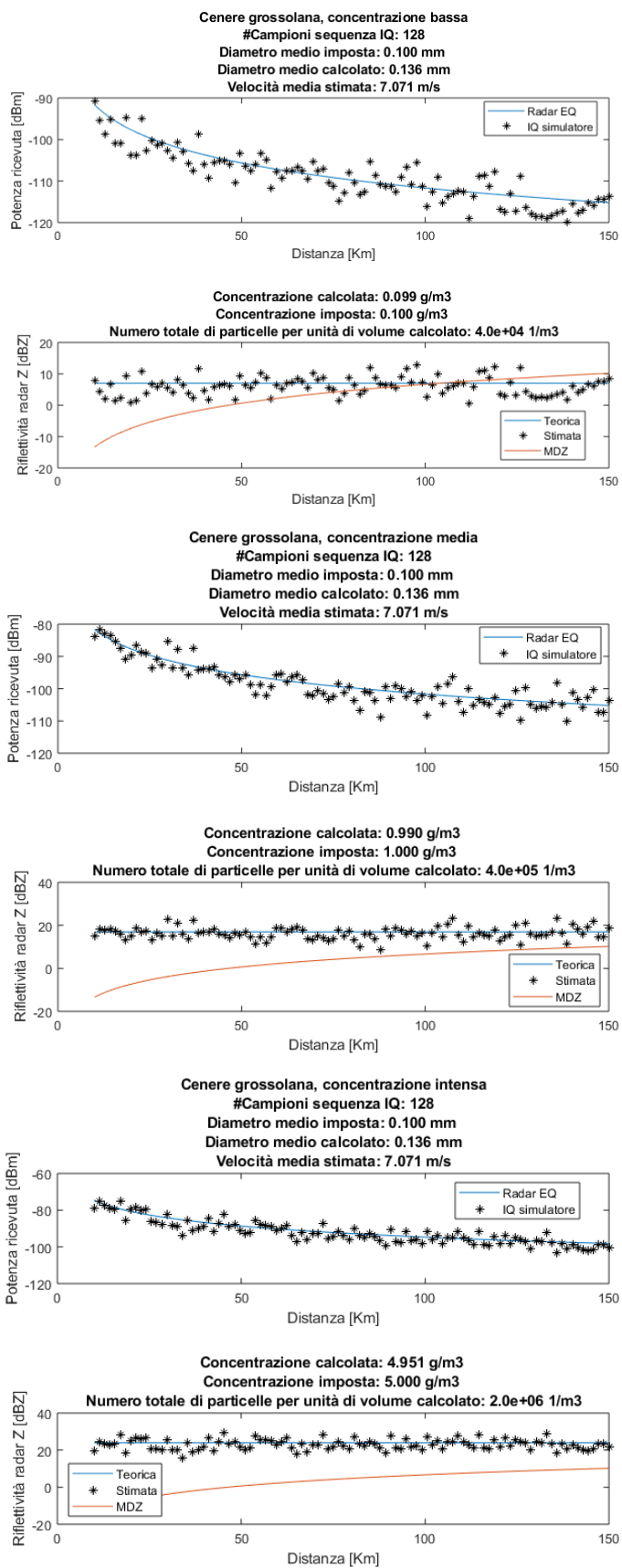


Figura 4.11: PSD: cenere grossolana, 128 campioni IQ



## 4.2.12 PSD: lapilli, 128 campioni IQ

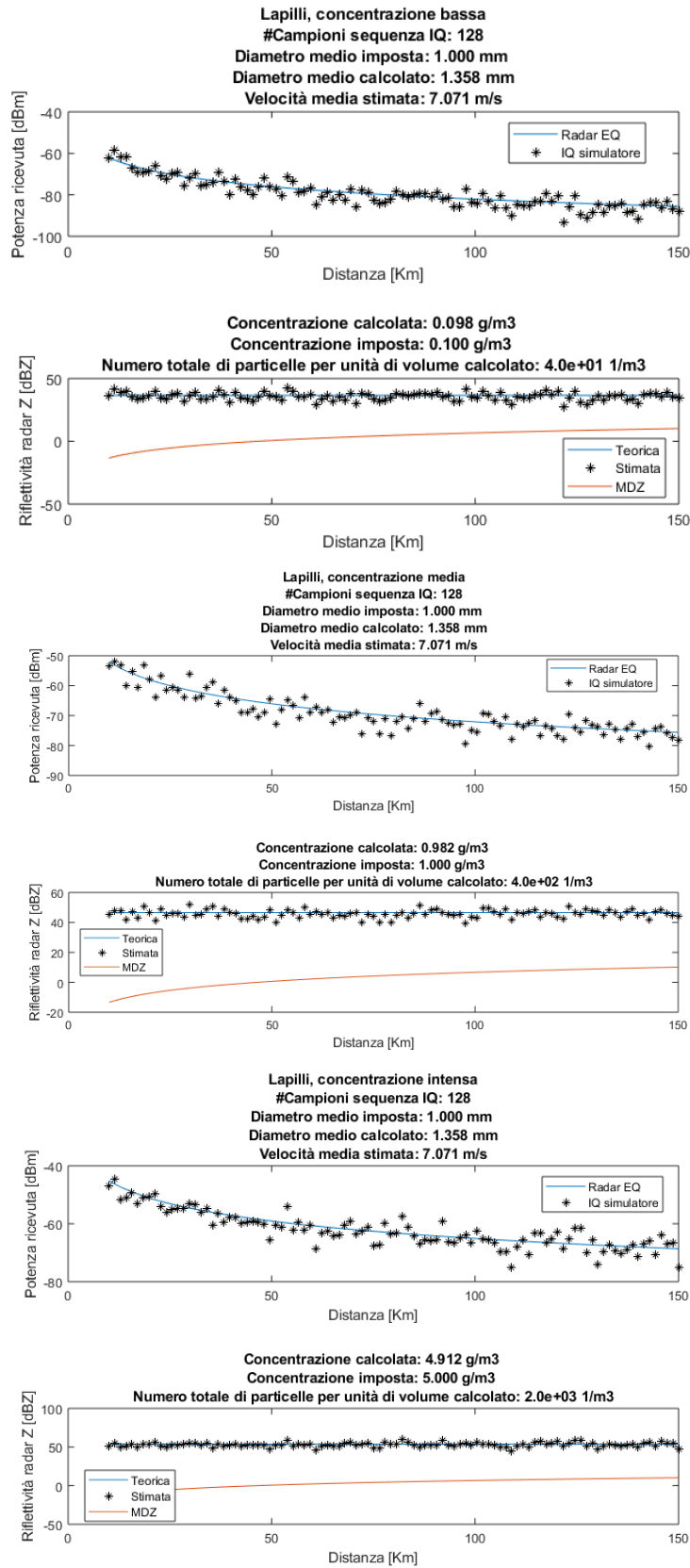


Figura 4.12: PSD: lapilli, 128 campioni IQ

### 4.3 Stima velocità media

Per valutare la stima della velocità media è stato generato un set di 100 valori casuali da assegnare alla velocità del vento; questi valori sono stati inseriti nel simulatore ad ogni iterazione e il risultato è stato confrontato con quello restituito dal codice PPP.

Per ogni valore della velocità del vento inserito il simulatore estrae lo spettro Doppler e, considerando in questa sezione la sola velocità media si ottiene:

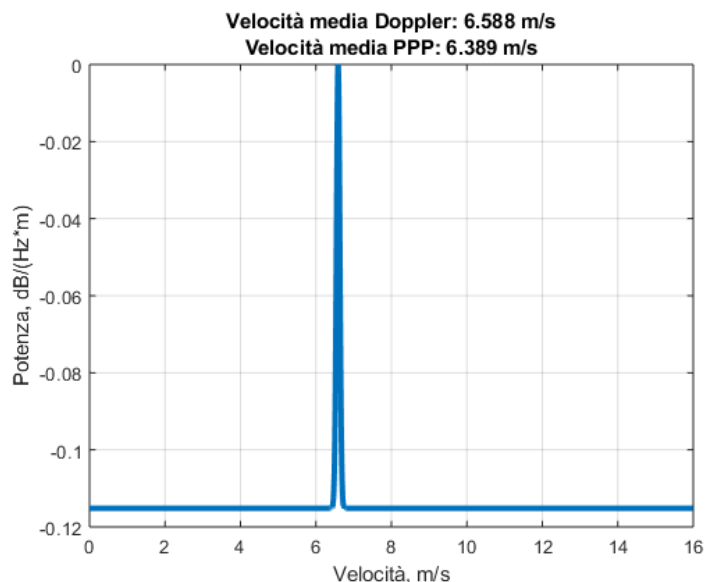


Figura 4.13: Spettro Doppler simulato

Infine, reiterando il calcolo per tutti i valori della velocità del vento generati e tralasciando i dettagli sull'andamento dello spettro Doppler si ottiene:

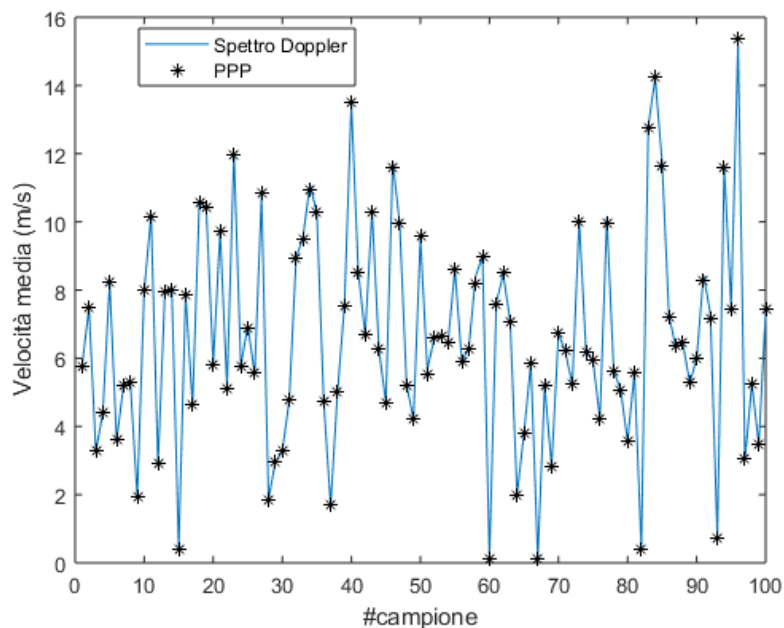


Figura 4.14: Confronto velocità media spettro Doppler e PPP

## 4.4 Considerazioni

La soglia MDZ, ricavata dalla sensibilità del sensore radar, mette in evidenza che determinate distribuzioni di particelle vulcaniche non sono rilevabili mentre altre raggiungono un livello di riflettività rilevabile solo fino ad una certa distanza della cella dal radar.

Questo risultato deriva ovviamente dalla relazione che lega la riflettività radar alla potenza ricevuta e permette rapidamente di verificare la massima distanza che è possibile coprire con la configurazione corrente.



# Capitolo 5

## Conclusioni e sviluppi futuri

Negli ultimi anni la cenere vulcanica ha acquisito un'importanza crescente dovuta alla criticità delle possibili conseguenze che può avere sui trasporti e sulla salute umana. L'utilizzo intensivo dello spazio aereo, ha reso necessario l'impiego di tecnologie e strumenti in grado di identificare e monitorare la dispersione delle particelle vulcaniche nell'atmosfera.

Le caratteristiche fisiche ed elettromagnetiche rilevate negli studi effettuati sulla particelle di cenere permettono di analizzarla e trattarla come un bersaglio radar a tutti gli effetti; queste caratteristiche hanno reso il radar meteorologico e la tecnologia basata sull'effetto Doppler, gli strumenti più idonei per questo scopo.

I sistemi radar per operare nel modo più corretto possibile e fornire risultati accurati necessitano di una calibrazione molto fine e di una manutenzione continua; il nostro contributo arriva proprio sul fronte della calibrazione e valutazione dei parametri radar. In questo lavoro infatti, è stato presentato un simulatore radar in grado di ricostruire il segnale ricevuto da un reale sistema radar di terra atto a monitorare una dispersione di particelle vulcaniche. L'utilizzo di questo strumento permette di valutare in tempi brevi i risultati ottenuti da una determinata configurazione operativa in base alle condizioni ambientali e alle caratteristiche della cenere osservata.

Questa valutazione permette di valutare i parametri del radar più idonei e quindi in grado di massimizzare il ritorno di potenza massimizzando l'accuratezza delle rilevazioni effettuate.

### 5.1 Ipotesi operative

Per il momento, la natura puramente teorica dell'algoritmo implementato tiene in considerazione alcune ipotesi sulla conformazione della cenere e sulle condizioni ambientali; queste ipotesi nei prossimi sviluppi potranno essere eliminate, utilizzando modelli più verosimili e ricavati da set di dati reali come spiegato nella sezione successiva.

## La forma delle particelle

Nel codice le particelle sono assunte di forma sferica, questa ipotesi risulta mediamente valida in presenza di particelle molto fini ma diventa deleteria in presenza di cenere molto grossolana; il codice inoltre per una data PSD genera dei valori di diametro che in maniera deterministica non violano il regime di Rayleigh.

## Il moto delle particelle

Al fine di stimare lo spettro Doppler derivante dalle particelle in movimento si è impiegato un modello in cui la velocità del vento rimane costante e l'unica componente influente ai fini della velocità osservata è quella di traslazione orizzontale. Inoltre, i valori della velocità utilizzati per ricreare lo spettro sono statici ed equispaziati.

## Distribuzione dei diametri

I diametri all'interno della cella radar sono distribuiti in modo uniforme ed equispaziato.

## 5.2 Sviluppi futuri

Al fine di migliorare ulteriormente la qualità dei risultati ottenuti, è possibile sviluppare ulteriormente alcuni moduli del presente algoritmo. In particolare si può migliorare l'algoritmo confrontando i dati con le misurazioni di un radar reale al fine di verificare la correttezza delle ipotesi spettrali fatte.

Un altro possibile miglioramento è rappresentato dall'integrazione di modelli più verosimili per la caratterizzazione del moto delle particelle, ad esempio integrando modelli per il moto turbolento, soprattutto quando si opera a brevi distanze dal cratere di eruzione. Un altro elemento fondamentale per il miglioramento dell'algoritmo potrebbe essere l'integrazione di funzioni PSD ricavate da siti reali per mezzo di rilievi effettuati sui materiali di deposito. Da una funzione PSD più verosimile ne deriva una distribuzione dei diametri meno uniforme, contrariamente a quanto assunto attualmente dall'algoritmo.

# Capitolo 6

## Codici Matlab

### 6.1 Simulatore \_cenere.m

```
1 % Il programma utilizza in ingresso i seguenti parametri:
2 %
3 %
4
5
6
7 % INPUT PARAMETERS
8 %% Parametri della cella radar
9
10 teta_1=45;      % elevazione radar, deg (compreso tra 0 e 90 ...
    gradi)
11 azimuth_1=0;  % azimut radar, deg (compreso tra 0 e 359.9 ...
    gradi)
12 h_misura=700; % quota cella radar, in metri
13 r0=10;        % range del centro della cella radar, in km
14
15 %% Parametri del radar
16
```

```
17 PW=5*10^-6;           % Durata impulso (Pulse Width), s
18 bandaRX_PW=1;        % Prodotto Banda RX e durata impulso, adim
19 teta_0=5;            % apertura fascio, elevazione, gradi
20 azimuth_0=teta_0;   % apertura fascio, azimuth, gradi
21
22 PRF=3750;            % Pulse Repetition Frequency, in Hz
23 freq=9.375*10^9;    % Frequenza di lavoro, in Hz
24
25 P_tx=150;           % Potenza di picco trasmessa, in W
26 gain_antenna_dB=42; % Guadagno d'antenna, in dB
27
28
29 %% Parametri cenere e atmosfera
30
31 % costante dielettrica della cenere, adimensionale
32 epsilon_cenere= 6 - 1i*0.15;
33 v_vento=10;         % velocit del vento, in m/s
34
35
36
37 %% PSD di tipo gamma
38
39 ind_diam=2;         % course ash
40 ind_conc=2;        % medium concentration
41 rho_ash=1;         % densit particelle in g/cm3
42
43
44 %% PROCESSING
45
46 str_Δ='\\Delta';
47 B_ricev=bandaRX_PW/PW; % Banda del ricevitore, in Hz
48 B_per_PW=0:0.25:5;
```



---

```

49 if B_per_PW(1)==0;
50     B_per_PW(1)=B_per_PW(1)+0.1;
51 end
52
53 % Calcolo il rapporto tra l'estensione radiale reale
54 % del volume di risoluzione (RV) e l'estensione radiale
55 % approssimata, quest'ultima calcolata con PW*c/2
56
57 a=pi/(2*sqrt(log(2)));
58 rapporto=(acosh(2+cosh(B_per_PW))) ./ (B_per_PW*a);
59
60
61 % Se fisso PW, di conseguenza trovo la banda del ricevitore a
62 % partire dai prodotti B_per_PW
63
64 c=3*10^8; % Velocit  luce, in m/S
65 estensione_radiale_approx=PW*c/2; % estensione radiale (in ...
    m) nel caso in cui PW*B=1
66
67 PW_vector=PW*ones(length(B_per_PW),1);
68 B_vector=B_per_PW/PW;
69
70
71 % WRF (Weighting Range Function), "funzione peso" lungo il range,
72 % centrata su ro (es. 10 km) e dipendente da B e PW:
73
74 incremento_max=1;
75 r_km=linspace(r0-incremento_max, r0+incremento_max,1000);
76 col=colormap('jet');
77 close(1)
78 fig_1=figure;

```

```

79 axes1 = axes('Parent',fig_1,'FontSize',16,'Position',[0.4 0.6 ...
    0.54 0.36]);
80
81
82 %% FIGURA 1: Calcolo della WRF in funzione del range e del ...
    prodotto Banda * Durata Impulso
83 % Nel secondo plot in figure    riportata l'estensione radiale
84 % della cella sempre in funzione del prodotto Banda * Durata ...
    Impulso
85
86 for ind_B_per_PW=1:length(B_per_PW)
87
88 PW_temp=PW_vector(ind_B_per_PW);
89 B_temp=B_vector(ind_B_per_PW);
90
91
92 WRF=1/2*(    erf( (2*a*B_temp/c) * ( (r0 - r_km)*10^3 + ...
    c*PW_temp/4) )
93 - erf( (2*a*B_temp/c) * ((r0 - r_km)*10^3 - c*PW_temp/4) ) );
94
95 h1(ind_B_per_PW)=plot(r_km,WRF,'Color',col(1 + ...
    (ind_B_per_PW-1)*ceil(length(col)/
96 (length(B_per_PW)+1)),:),'LineWidth',3);
97 s1{ind_B_per_PW} = sprintf('PW=%1.1f us, B=%1.1f MHz, PW*B=%1.1f
98 (%sr=%1.0f m) ',PW_temp*10^6,B_temp/10^6,
99 PW_temp*B_temp,str_Δ,estensione_radiale_approx*rapporto(ind_B_per_PW));
100 hold on
101 end
102
103 grid on
104 axis([min(r_km) max(r_km) 0 1])
105 xlabel(sprintf('r, km'))

```

```

106 ylabel(sprintf('W(r)'))
107 title(sprintf('WRF, PW=%1.1f us -> %sr=%1.1f ...
    m',PW*10^6,str_Δ,estensione_radiale_approx))
108 ind=1:length(B_per_PW);
109 legend1=legend(h1(ind), s1{ind}, 'Location', 'NorthWest');
110 hold off
111 set(legend1, 'Position', [0.02 0.21 0.3 0.72]);
112 set(gca, 'FontSize', 16, 'FontName', 'Helvetica')
113 set(findall(gcf, 'type', 'text'), 'FontSize', 20, 'FontName', ...
    'Helvetica')
114
115
116 axes2 = axes('Parent', fig_1, 'FontSize', 16, 'Position', [0.4 0.1 ...
    0.54 0.36]);
117 plot(B_per_PW, rapporto, 'k', 'LineWidth', 3)
118 grid on
119 xlabel(sprintf('B_{6dB} * PW'))
120 ylabel(sprintf('%sr / %sr_{approx}', str_Δ, str_Δ))
121 title(sprintf('Estensione radiale volume risoluzione radar'))
122 set(gca, 'FontSize', 16, 'FontName', 'Helvetica')
123 set(findall(gcf, 'type', 'text'), 'FontSize', 20, 'FontName', ...
    'Helvetica')
124
125
126
127 %% FIGURA 2: Estensione angolare della cella radar: calcolo del
128 % pattern di antenna in elevazione/azimut
129
130 % teta (elevazione)
131 incremento_max_teta=30;
132 if incremento_max_teta>teta_1 - 10;
133     incremento_max_teta=teta_1/2;

```

```

134 end
135 teta=linspace(teta_1-incremento_max_teta,teta_1+incremento_max_teta,500);
136 g_teta=exp(-2.7725*((teta - teta_1)*pi/180).^2) ./ ...
      (teta_0*pi/180)^2 );
137
138
139 % phi (azimuth)
140 incremento_max_phi=30;
141 phi=linspace(azimuth_1-incremento_max_phi,azimuth_1+
142     incremento_max_phi,500);
143 h_phi=exp(-2.7725*((phi - azimuth_1)*pi/180).^2) ./ ...
      (azimuth_0*pi/180)^2 );
144
145
146 figure
147 estensione_fascio_3dB=linspace(teta_1-teta_0/2,teta_1+teta_0/2,30);
148 plot(teta,g_teta,'k','LineWidth',3)
149 hold on
150 plot(estensione_fascio_3dB,
151     0.5*ones(1,length(estensione_fascio_3dB)),'m','LineWidth',5)
152
153 % Calcolo estensione angolare del fascio
154 [a_teta,b_teta]=find(g_teta>=1/16); % funzione di ...
      direttivit sopra -12 dB
155 limite_inf=teta(b_teta(1));
156 limite_sup=teta(b_teta(end));
157 estensione_angolare=linspace(limite_inf,limite_sup,30);
158 amp_estensione_angolare_deg=limite_sup-limite_inf; % in deg
159 plot(estensione_angolare,1/16*ones(1,length(estensione_angolare)),
160     'r','LineWidth',5)
161
162 grid on

```

```

163 str_teta='\theta';
164 xlabel(sprintf('%s, deg',str_teta))
165 ylabel(sprintf('g(%s)',str_teta))
166 title(sprintf('Elevation Pattern Antenna'))
167 legend(sprintf('g(%s), con %s_0 = %1.1f ...
    deg',str_teta ,str_teta ,teta_1),
168 sprintf('Fascio -3dB = %1.1f deg',teta_0),
169 sprintf('Estensione Angolare = %1.1f ...
    deg',amp_estensione_angolare_deg));
170 set(gca,'FontSize',20,'FontName','Helvetica')
171 set(findall(gcf,'type','text'),'FontSize',20,'FontName',...
    'Helvetica')

172
173
174
175 %% OUTPUT a video/1: riepilogo parametri radar e cella radar ...
    selezionati dall'utente

176
177 fprintf('\n\n\n*****PARAMETRI RADAR*****');
178 fprintf('\n\nDurata Impulso:    PW    = %1.1f us\n',PW*10^6)
179 fprintf('Banda Ricevitore:    B    = %1.1f MHz\n',B_ricev/10^6)
180 fprintf('
    PW*B = %1.1f\n\n',PW*B_ricev)

181
182
183 fprintf('Ampiezza tot. fascio -3dB su elevazione = %1.1f ...
    deg\n',teta_0)
184 fprintf('Ampiezza tot. fascio -3dB su azimut    = %1.1f ...
    deg\n\n',teta_0)

185
186 fprintf('Elevazione Antenna    = %1.1f deg\n',teta_1)
187 fprintf('Range centro cella    = %1.1f km\n\n\n',r0)

188

```

```

189
190 [af , bf] = (min(abs(B_per_PW-bandaRX_PW)));
191 amp_estensione_radiale_m=estensione_radiale_approx*rapporto(bf);
192 r_start=(r0*1000 - amp_estensione_radiale_m/2);           ...
      % in m
193 r_end= (r0*1000 + amp_estensione_radiale_m/2);           ...
      % in m
194
195 teta_start=(teta_1 - amp_estensione_angolare_deg/2);     ...
      % in deg
196 teta_end= (teta_1 + amp_estensione_angolare_deg/2);     ...
      % in deg
197
198 azimuth_start=(azimuth_1 - amp_estensione_angolare_deg/2); ...
      % in deg
199 azimuth_end= (azimuth_1 + amp_estensione_angolare_deg/2); ...
      % in deg
200
201
202 fprintf('Trovo che:\n');
203 fprintf('Estensione radiale      = %1.1f m (da %1.1f m a ...
      %1.1f m)\n',
204 amp_estensione_radiale_m , r_start , r_end)
205 fprintf('Estensione angolare      = %1.1f ...
      deg\n\n', amp_estensione_angolare_deg)
206 fprintf('Estensione angolare el. = da %1.1f deg a %1.1f ...
      deg\n', teta_start , teta_end)
207 fprintf('Estensione angolare az. = da %1.1f deg a %1.1f ...
      deg\n', azimuth_start , azimuth_end)
208
209 V_cella=4/4*pi*(r_end^3 - ...
      r_start^3)*(amp_estensione_angolare_deg/360)^2;   % in m3

```

```

210 fprintf('Volume cella radar      = %1.3f km^3\n',V_cella*10^-9)
211
212
213
214 %% FIGURA 3: cella vulcanica in 3D con "modellino" Etna
215
216 r_all=linspace(r_start,r_end,2);      % range vector cella
217
218 % azimuth vector cella (centro l'azimuth in zero)
219 phi_rad_all=pi/180*(linspace(azimuth_1-
220     amp_estensione_angolare_deg/2,azimuth_1+ ...
221     amp_estensione_angolare_deg/2,2));
222 % elevazione vector cella
223 teta_rad_all=pi/180*(linspace(teta_1-amp_estensione_angolare_deg/2,
224     teta_1+amp_estensione_angolare_deg/2,2));
225
226 transparency_factor=0.4;
227
228 % elevazione costante
229 phi_rad=phi_rad_all;
230 r=r_all;
231
232 teta_rad=teta_rad_all(1);
233 [R,TH,PHI] = meshgrid(r,teta_rad,phi_rad);
234 [X,Y,Z] = sph2cart(PHI,TH,R);
235 colormap('cool')
236 C(:,:,1)=[1,5];      % Z UTILE
237 C(:,:,2)=zeros(1,length(r));
238 figure
239 s=surf(squeeze(X),squeeze(Y),squeeze(Z)+h_misura,squeeze(C));
240 alpha(s,transparency_factor);
241 xlabel(sprintf('Hor. Range X, m'))
242 ylabel(sprintf('Hor. Range y, m'))

```

```

241     xlabel(sprintf('Height Z, m'))
242     view(0,90)
243     axis equal
244     hold on
245     plot3(0,0,h_misura,'rx','MarkerSize',20,'LineWidth',5)
246     grid on
247
248     % Rendo la visualizzazione pi omogenea
249
250     max_x=max(X(:));
251     min_x=min(X(:));
252     max_y=max(Y(:));
253     min_y=min(Y(:));
254
255     if      (azimuth_1>315 && azimuth_1<360 || azimuth_1≥0 && ...
256             azimuth_1<45)      % X      positiva , X>Y
257         lim_x_max=max(X(:))*5;
258         lim_x_min=-(max(X(:))*0.75);
259         lim_y_max=max(X(:))*0.75;
260         lim_y_min=-lim_y_max;
261
262     elseif  (azimuth_1≥45 && azimuth_1≤135)      % Y      ...
263             positiva , Y>X
264         lim_y_max=max(Y(:))*5;
265         lim_y_min=-(max(Y(:))*1.75);
266         lim_x_max=max(Y(:))*1.75;
267         lim_x_min=-lim_x_max;
268
269     elseif  (azimuth_1>135 && azimuth_1<225)      % X      ...
270             negativa , X>-Y
271         lim_x_min=(min(X(:))*5);
272         lim_x_max=(-min(X(:))*1.75);

```



```

270         lim_y_max=-lim_x_min*1.75;
271         lim_y_min=-lim_y_max;
272
273     elseif (azimuth_1>=225 && azimuth_1<=315) % Y ...
           negativa , Y>-X
274         lim_y_min=(min(Y(:))*5);
275         lim_y_max=(-min(Y(:))*1.75);
276         lim_x_max=-lim_y_min*1.75;
277         lim_x_min=-lim_x_max;
278
279     end
280
281     plot3(lim_x_max,0,0,'b','LineWidth',1)
282     plot3(lim_x_min,0,0,'b','LineWidth',1)
283     plot3(0,lim_y_max,0,'b','LineWidth',1)
284     plot3(0,lim_y_min,0,'b','LineWidth',1)
285
286
287     % Plotto la cella radar
288     teta_rad=teta_rad_all(2);
289     [R,TH,PHI] = meshgrid(r,teta_rad,phi_rad);
290     [X,Y,Z] = sph2cart(PHI,TH,R);
291     s=surf(squeeze(X),squeeze(Y),squeeze(Z)+h_misura,squeeze(C));
292     alpha(s,transparency_factor)
293
294     % azimut costante
295     teta_rad=teta_rad_all;
296     r=r_all;
297     phi_rad=phi_rad_all(1);
298     [R,TH,PHI] = meshgrid(r,teta_rad,phi_rad);
299     [X,Y,Z] = sph2cart(PHI,TH,R);
300     s=surf(squeeze(X),squeeze(Y),squeeze(Z)+h_misura,squeeze(C));

```

```

301     alpha(s,transparency_factor)
302
303     phi_rad=phi_rad_all(2);
304     [R,TH,PHI] = meshgrid(r,teta_rad,phi_rad);
305     [X,Y,Z] = sph2cart(PHI,TH,R);
306     s=surf(squeeze(X),squeeze(Y),squeeze(Z)+h_misura,squeeze(C));
307     alpha(s,transparency_factor)
308
309
310     % range costante
311     teta_rad=teta_rad_all;
312     phi_rad=phi_rad_all;
313
314     r=r_all(1);
315     [R,TH,PHI] = meshgrid(r,teta_rad,phi_rad);
316     [X,Y,Z] = sph2cart(PHI,TH,R);
317     s=surf(squeeze(X),squeeze(Y),squeeze(Z)+h_misura,squeeze(C));
318     alpha(s,transparency_factor)
319
320     r=r_all(1);
321     [R,TH,PHI] = meshgrid(r,teta_rad,phi_rad);
322     [X,Y,Z] = sph2cart(PHI,TH,R);
323     s=surf(squeeze(X),squeeze(Y),squeeze(Z)+h_misura,squeeze(C));
324     alpha(s,transparency_factor)
325
326     % equazione retta passante dal radar (origine) e il ...
327         centro della cella con coordinate P=(r0,teta_1,azimuth_1)
327     r_retta=linspace(0,r0,10)*1000;
328     x_retta=r_retta*cos(teta_1*pi/180)*cos(azimuth_1*pi/180);
329     y_retta=r_retta*cos(teta_1*pi/180)*sin(azimuth_1*pi/180);
330     z_retta=r_retta*sin(teta_1*pi/180)+h_misura;
331     plot3(x_retta,y_retta,z_retta,'-b','LineWidth',3)

```

```

332
333
334 % Proiezione della retta sul pino di terra (xy-plane)
335 r_on_earth=linspace(0,r0*cos(teta_1*pi/180),10)*1000*0.5;
336 x_on_earth=r_on_earth*cos(azimuth_1*pi/180);
337 y_on_earth=r_on_earth*sin(azimuth_1*pi/180);
338 plot3(x_on_earth,y_on_earth,
339       h_misura*ones(length(x_on_earth),1),'-b','LineWidth',1)
340
341 % Disegno i tre assi cartesiani x (carrello->azimuth 0 ...
      deg), y (azimuth 90 deg) e z (la verticale)
342 if abs(lim_x_min)<abs(lim_y_min)
343     len=abs(lim_x_min)*0.7;
344 else len=abs(lim_y_min)*0.7;
345 end
346
347 % Disegno gli angoli di elevazione e azimuth
348 ang_3D(1, azimuth_1, [0 0 0], ...
      r0*1000/4*cos(teta_1*pi/180), [0 ...
      teta_1],h_misura,'k-'); % elevazione
349 ang_3D(2, 0, [0 0 0], ...
      r0*1000/4*cos(azimuth_1*pi/180), [0 ...
      azimuth_1],h_misura,'k-'); % azimuth
350
351 % Coloro il piano di terra (xy-plane)
352 XL = get(gca, 'XLim');
353 YL = get(gca, 'YLim');
354 q=patch([XL(1), XL(2), XL(2), XL(1)], [YL(1), YL(1), ...
      YL(2), YL(2)], [0 0 0 0], 'FaceColor', [119 172 48]/255);
355 alpha(q,transparency_factor)
356
357 % Stampo il vulcano

```

```

358     radius_etna=13500;      % base etna, in metri
359     h_etna=3300;           % altezza max etna, in metri
360     distance_from_origin=7500;
361
362     [x_etna,y_etna,z_etna]=cylinder([radius_etna ...
        radius_etna/10]);
363     s_etna=surf(x_etna+distance_from_origin , ...
        y_etna+distance_from_origin , z_etna*h_etna);
364     set(s_etna, 'FaceColor',[153 50 0]/255);
365     alpha(s_etna,transparency_factor)
366
367     XL = get(gca, 'XLim');
368     YL = get(gca, 'YLim');
369     ZL = get(gca, 'ZLim');
370     axis([XL(1) XL(2)  YL(1) YL(2)  0 10000])
371
372
373
374
375
376 %-----
377 %----- SIMULAZIONE RIFLETTIVITA' + SPETTRO DOPPLER ...
        -----
378 %-----
379
380
381 % Z_calcolata    la riflettivit  espressa in mm6/m3 (vedi ...
        funzione Z_from_PSD_Marzano per funzionamento)
382 [Z_calcolata , numero_particelle_per_unita_volume] = ...
        Z_from_PSD_Marzano(ind_diam ,ind_conc ,rho_ash);
383
384

```

```

385
386
387 %% Calcolo spettro
388
389 lambda=3*10^8/freq;    % in m
390 V_max=PRF*lambda/4;   % in m/s
391 gain_antenna=10^(gain_antenna_dB/10);           % ...
      adimensionale
392 K_ash=(abs((epsilon_cenere-1)/(epsilon_cenere+2)))^2; % ...
      adimensionale
393
394
395 % Costante A (in W/m2)
396 A=((P_tx*gain_antenna^2*pi^2)*K_ash)/(64*lambda^2); % in ...
      W/m2
397
398
399 % Trovo il peso dato dall'integrazione della funzione di ...
      direttivit al quadrato lungo l'azimuth ...
      (azimuth_start,azimuth_end)
400 sum_h_phi=0;
401 passo_phi=(phi(2)-phi(1))*pi/180; % in rad
402 phi_start_sample= find(phi>azimuth_start);
403 phi_start_sample=phi_start_sample(1);
404 phi_end_sample= find(phi<=azimuth_end);
405 phi_end_sample=phi_end_sample(end);
406
407 for ind_phi=phi_start_sample:phi_end_sample
408     sum_h_phi= sum_h_phi + (h_phi(ind_phi)^2)*passo_phi; ...
          % adimensionale
409 end
410

```

```

411
412 % Trovo il peso dato dall'integrazione della WRF (Weighting ...
      Range Function)
413
414 WRF_radar=1/2*( erf( (2*a*B_ricev/c) * ( (r0 - r_km)*10^3 + ...
      c*PW/4) ) - erf( (2*a*B_ricev/c) * ((r0 - r_km)*10^3 - ...
      c*PW/4) ));
415 sum_wrf_radar=0;
416 r_start=(r0*1000 - amp_estensione_radiale_m/2);
417 r_end= (r0*1000 + amp_estensione_radiale_m/2);
418 r_metri=r_km*1000;
419 passo_range=r_metri(2)-r_metri(1);
420
421 range_start_sample= find(r_metri>=r_start);
422 range_start_sample=range_start_sample(1);
423 range_end_sample= find(r_metri<=r_end);
424 range_end_sample=range_end_sample(end);
425
426 for ind_r=range_start_sample:range_end_sample
427     sum_wrf_radar= sum_wrf_radar + ...
      (WRF_radar(ind_r)^2)/(r_metri(ind_r)^2)*passo_range; ...
      % in 1/m
428 end
429
430
431
432
433 B=10^-18*A*Z_calcolata*sum_h_phi*sum_wrf_radar; % costante ...
      di scala, in W (dipende da PSD, WRF, funzione direttivit ...
      sull'azimuth, Ptx, G antenna, frequenza, mezzo ...)
434
435

```

---

```

436 % Trovo il peso dato dall'integrazione della funzione di ...
      direttivit al quadrato lungo la direttivit ...
      (teta_start,teta_end)
437 sum_g_teta=0;
438 passo_teta=(teta(2)-teta(1))*pi/180; % in rad
439 teta_start_sample= find(teta>=teta_start);
440 teta_start_sample=teta_start_sample(1);
441 teta_end_sample= find(teta<=teta_end);
442 teta_end_sample=teta_end_sample(end);
443
444 for ind_teta=teta_start_sample:teta_end_sample
445     sum_g_teta= sum_g_teta + ...
          (g_teta(ind_teta)^2)*cos(teta(ind_teta)*pi/180)*passo_teta; ...
          % adimensionale
446 end
447
448
449 P_totale_rx=B*sum_g_teta;
450 fprintf('\nLa potenza totale ricevuta %1.2f ...
          dBm\n',10*log10(P_totale_rx*10^3))
451
452
453 v_total=linspace(0,V_max,10000);
454 [aa, bb]=find(v_total<v_vento);
455
456 v=v_total(1:length(bb));
457
458
459 teta_v=real(acos(v/v_vento)*180/pi);
460
461
462

```

```

463 g_teta=exp(-2.7725*((teta - teta_1)*pi/180).^2) ./ ...
      (teta_0*pi/180)^2 );
464
465 S_v= abs (B * ((exp(-2.7725*((teta_v - teta_1)*pi/180).^2) ...
      ./ (teta_0*pi/180)^2 )).^2 .* (v/v_vento) .* ...
      (-1./ (sqrt(v_vento^2 - v.^2 ))));
466 S_v_total=[S_v, zeros(1,length(v_total) - length(v))];
467 costante=10^-15;
468 S_v_total_all=S_v_total + costante*ones(1,length(S_v_total));
469
470
471
472 %% FIGURA 4: Densit  spettrale di potenza sintetica (senza ...
      rumore)
473
474 figure
475 plot(v_total,10*log10(S_v_total_all) - ...
      max(10*log10(S_v_total_all),'LineWidth',3));
476 grid on
477 xlabel(sprintf('Velocity , m/s'))
478 ylabel(sprintf('Power , dB/(Hz*m)'))
479 title(sprintf('Doppler Spectrum (without noise)'))
480 set(gca,'FontSize',16,'FontName','Helvetica')
481 set(findall(gcf,'type','text'),'FontSize',20,'FontName', ...
      'Helvetica')
482
483 P_tot=0;
484 passo_v=v_total(2)-v_total(1);
485
486 for ind=1:length(S_v_total)
487
488     P_tot = P_tot + S_v_total(ind)*passo_v; % in W

```



```
489
490 end
491
492 fprintf('Integrando lo spettro , la potenza totale rx      %1.2f ...
         dBm\n\n\n',10*log10(P_tot*10^3))
493
494
495
496 %% NEXT STEP: determinare la sequenza di segnali IQ che ...
         produce quello spettro in Fig. 4
497
498
499 N_samples=2^14;          % Campioni del segnale x
500 P_x=1;                  % Potenza del segnale x      1 W
501
502 % Genero un segnale gaussiano , bianco e complesso
503 x=sqrt(P_x/2)*randn(N_samples,1) + ...
         1i*sqrt(P_x/2)*randn(N_samples,1);
504
505 % La Densit  spettrale di potenza      dunque uniforme e vale:
506 No=P_x/PRF;           % in W/Hz
507
508
509 %% FIGURA 5: Risposta in frequeunza del filtro necessario
510
511 % La densit  spettrale di potenza che deve avere lo spettro ...
         in uscita      S_v_total
512
513 f_total=2/lambda*v_total;
514 S_f_total=lambda/2*S_v_total;    % in W/Hz
515
```

```

516 % Rendo la densit  spettrale di potenza che voglio ottenere ...
      tra frequenza
517 % che vanno da (-PRF/2,+PRF/2)
518
519 f_total_new=f_total;
520 f_total_new(1)=[]; f_total_new(end)=[];
521 for ind=1:length(f_total_new)
522     f_total_new_2(ind)=- f_total_new(length(f_total_new) +1 ...
      - ind);
523 end
524 f_total_new=f_total_new_2;
525
526 S_f_total_new=[zeros(1,length(f_total_new)),S_f_total];
527 f_total_new=[f_total_new,f_total];
528 f_total_new_orig=f_total_new;
529
530
531 % La risposta in frequenza del filtro necessario :
532 H_f=sqrt(S_f_total_new/No); % adimensionale
533
534 % Se voglio usare la ifft su una sequenza lunga come una ...
      potenza del 2...
535 ind_potenza_due=0;
536 while length(f_total_new) > 2^ind_potenza_due
537     ind_potenza_due=ind_potenza_due+1;
538 end
539 ind_potenza_due=ind_potenza_due-1;
540 ff_potenza_due=linspace(f_total_new(1),f_total_new(end) ,
541     2^ind_potenza_due);
542 H_f_potenza_due = interp1(f_total_new,H_f,ff_potenza_due);
543 H_f=H_f_potenza_due;
544 f_total_new=ff_potenza_due;

```

```
545
546 figure
547 plot(f_total_new,H_f,'g','LineWidth',2)
548 xlabel('f')
549 ylabel('|H(f)|')
550 grid on
551 title(sprintf('Risposta in frequenza del filtro'))
552
553
554
555 % Facendo l'antitrasformata della risposta in frequenza si ...
      ottiene
556 % la risposta all'impulso del filtro che colora la sequenza ...
      bianca
557 h_t=ifft(H_f);
558 % Convolviendo la sequenza bianca x e la risposta
559 % all'impulso trovo i segnali IQ in y
560 y=conv(x,h_t);
561
562
563
564 % Trovo le densit  spettrali di potenza
565
566 windows_length=1024;
567 w=hamming(windows_length);
568
569
570
571 %% FIGURA 6:
572
573 [pxx, fxx] = pwelch(x,w,windows_length/2,windows_length,PRF);
574 %fxx = fxx - PRF/2;
```

```
575
576 [pyy, fyy] = pwelch(y,w, windows_length/2, windows_length, PRF);
577 %fyy = fyy - PRF/2;
578
579 % 1) PSD sintetica da ottenere
580 figure
581 subplot(3,1,1)
582 plot(f_total_new_orig, S_f_total_new, 'c', 'LineWidth', 2);
583 title(sprintf('Densit Spettrale sintetica'))
584 grid on
585
586 % 2) PSD della sequenza in ingresso (PSD bianca)
587 subplot(3,1,2)
588 plot(fxx, pxx, 'b', 'LineWidth', 2);
589 title(sprintf('Densit Spettrale sequenza in ingresso ...
    (gaussiana, bianca, complessa)'))
590 grid on
591
592 % 3) PSD della sequenza in uscita (PSD gaussiana)
593 subplot(3,1,3)
594 plot(fyy, pyy, 'r', 'LineWidth', 2);
595 title(sprintf('Densit Spettrale sequenza in uscita ...
    (gaussiana, colorata, complessa)'))
596 grid on
597
598
599
600
601 % Calcolo le potenze in ingresso e uscita al filtro H(f) e ...
    stampa a monitor
602 P_tot_in=0;
603 passo_f_in=fxx(2)-fxx(1);
```

```
604 for ind=1:length(fxx)
605     P_tot_in = P_tot_in + pxx(ind)*passo_f_in; % in W
606 end
607
608 P_tot_out=0;
609 passo_f_out=fyy(2)-fyy(1);
610 for ind=1:length(fyy)
611     P_tot_out = P_tot_out + pyy(ind)*passo_f_out; % in W
612 end
613
614 fprintf('La potenza dei segnali IQ generati    %1.2f ...
        dBm\n\n\n',10*log10(P_tot_out*10^3))
```

## 6.2 Z\_from\_PSD\_Marzano.m

```
1 function [ Z_calcolata , numero_particelle_per_unita_volume ] = ...
    Z_from_PSD_Marzano( ind_diam , ind_conc , rho_ash )
2
3
4 % Funzione a cui come INPUT devo fornire tre numeri che ...
    identificano una PSD, rispettivamente:
5 %             - la classe di concentrazione (da 1 a 3)
6 %             - la classe di diametro (da 1 a 3)
7 %             - la densit  delle particelle (in g/cm3)
8 % In uscita viene fornito il numero di particelle presenti ...
    per unit  di volume e la riflettivit  radar associata ...
    alla PSD selezionata
9
10
11
12
13
14 % CLASSI DI DIAMETRO DELLE PARTICELLE VULCANICHE (mm)
15 if      ind_diam==1;      diam_name='fine ash';      ...
    Dn=0.01;    D_min=0.0064;  D_max=0.064;    % in mm
16 elseif  ind_diam==2;      diam_name='course ash';    ...
    Dn=0.1;    D_min=0.064;   D_max=0.64;    % in mm
17 elseif  ind_diam==3;      diam_name='lapilli';      ...
    Dn=1;      D_min=0.64;    D_max=6.4;    % in mm
18 end
19 % CLASSI DI CONCENTRAZIONE DI CENERE VULCANICA (g/m3)
20 if      ind_conc==1;      conc_name='light conc.';  ...
    C_ash_medio=0.1;    % in g/m3
21 elseif  ind_conc==2;      conc_name='moderate conc.';  ...
    C_ash_medio=1;    % in g/m3
```

```

22 elseif ind_conc==3;      conc_name='intense conc.';      ...
    C_ash_medio=5;        % in g/m3
23 end
24
25 % Parametri della PSD di tipo Gamma
26 Ca=C_ash_medio;        % scelgo un valore costante di ...
    concentrazione di massa in g/m3
27 mu=1;
28 nu=1;
29 Gamma_n=2;
30 rho_ash=rho_ash*10^6;   % in g/m3
31
32 N_n=8*Dn^(-4)*Ca/(pi*rho_ash); % in 1/mm^4
33
34
35 D_minimo=D_min;        % in mm
36 D_massimo=6;          % in mm
37 D=linspace(D_minimo,D_massimo,10000); % in mm
38 D_passo=D(2) - D(1);   % in mm
39
40 N_a=10^9*N_n*((D/Dn).^mu).*exp(-Gamma_n*((D/Dn).^nu)); % ...
    PSD in 1/(m^3*mm)
41
42 % taglio tutti i diametri meno probabili, ovvero quelli in ...
    cui la PSD scende sotto un soglia
43
44 soglia_taglio=10^-5;
45 [a,b]=find(N_a<soglia_taglio);
46 if isempty(b)==0;
47     N_a=N_a(1:b(1));
48     D=D(1:b(1));
49 end

```

```

50
51 % plot della PSD per una data concentrazione di massa uniforme
52 % figure
53 % plot(D,log10(N_a),'b','Linewidth',4)
54 % grid on
55 % title(sprintf('Particle Size Distribution (mass ash ...
      concentration Ca=%1.1f g/m^3, Dn=%1.1f mm)',Ca,Dn));
56 % xlabel(sprintf('D, mm'));
57 % ylabel(sprintf('PSD, 1/(mm*m^3)'));
58 % set(gca,'FontSize',25,'FontName','Helvetica')
59 % set(findall(gcf,'type','text'),'FontSize',22,'FontName',...
      'Helvetica')
60
61 if ind_diam==3
62     [a,b]=find(D>2);
63     total_particles=sum(N_a);
64     total_particles_greater_than_2mm=sum(N_a(b(1):end));
65     percentage_over_2mm=
66     100*total_particles_greater_than_2mm/total_particles;
67 end
68
69 % Calcolo momenti della funzione PSD analitica
70 m0=0;
71 m1=0;
72 m2=0;
73 m3=0;
74 m6=0;
75
76 for ind_D=1:length(D)
77
78     m0=m0+10^-9*D(ind_D)^0*N_a(ind_D)*D_passo;    % 1/mm3
79

```



---

```

80     m1=m1+10-9*D(ind_D)1*N_a(ind_D)*D_passo;    % 1/mm2
81
82     m2=m2+10-9*D(ind_D)2*N_a(ind_D)*D_passo;    % 1/mm
83
84     m3=m3+10-9*D(ind_D)3*N_a(ind_D)*D_passo;    % adimensionale
85
86     m6=m6+ D(ind_D)6*N_a(ind_D)*D_passo;        % mm6/m3
87
88 end
89
90 Ca_calcolata=rho_ash*pi/6*m3;
91 Dn_calcolato=m1/m0;
92 numero_particelle_per_unita_volume=109*m0;
93 Z_calcolata=m6;    % Riflettivit  in mm6/m3
94
95
96 % fprintf('Concentrazione imposta: %1.3f g/m3 \n',Ca)
97 % fprintf('Concentrazione calcolata: %1.3f g/m3      ...
    \n\n\n',Ca_calcolata)
98
99 % fprintf('Diametro medio imposta: %1.3f mm \n',Dn)
100 % fprintf('Diametro medio calcolato: %1.3f mm      ...
    \n\n\n',Dn_calcolato)
101
102 % fprintf('Numero totale di particelle per unit  di volume ...
    calcolato: %1.1e 1/m3      ...
    \n',numero_particelle_per_unita_volume)
103 % fprintf('Riflettivit  (Rayliegh scattering): %1.2f dBZ ...
    \n',10*log10(Z_calcolata))
104 % fprintf('Riflettivit  (dipendenza da conc.): %1.2f dBZ ...
    \n',10*log10(6/(pi*rho_ash)*m6/m3*Ca))
105 end

```

## 6.3 Ang\_3D

```
1 function h = ...
    ang_3D(type, constant_angle_deg, centre, radius, span, h_misura, style)
2
3 % ANG_3D
4 % Plots an angle arc with specified position and radius.
5
6 % type=1 : se vuoi stampare l'elevazione
7 % type=2 : se vuoi stampare l'azimut
8 % constant_angle_deg: se type=1, quest'angolo indica ...
    l'azimuth costante
9 % se type=2, quest'angolo indica l'elevazione costante, nota ...
    che si usa quasi sempre zero!
10
11 % Example:
12 %           ang_3D(1, 90, [3 2 0], 5, [0 45], 'k-')
13 % Plots an arc elevation angle, for azimuth equal to 90 deg, ...
    with centre (3,2, 0) and radius (5) that represents
14 % The angle specified from 0 to 45 deg, and with the ...
    preferred style 'k-'.
15
16 if     type==1; % stampa l'elevazione
17
18     theta = linspace(span(1)*pi/180, span(2)*pi/180, 500);
19     rho = ones(1, 500) * radius;
20     az = ones(1, 500) * constant_angle_deg * pi / 180;
21
22 elseif type==2; % stampa l'azimuth
23
24     theta = ones(1, 500) * constant_angle_deg * pi / 180;
25     rho = ones(1, 500) * radius;
```

```
26         az = linspace(span(1)*pi/180,span(2)*pi/180,500);
27
28     end
29
30
31     [x,y,z] = sph2cart(az,theta,rho);
32     x = x + centre(1);
33     y = y + centre(2);
34     z = z + centre(3) + h_misura;
35     h = plot3(x,y,z,style,'LineWidth',2);
36
37 end
```

## 6.4 Pulse Pair Processor

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Pulse Pair Processor, velocit  media                                     %
3 % y  la sequenza di segnali IQ ricavata con il simulatore %
4 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5
6 N = 10;          % Lunghezza frame in cui spezzare
7 V_stimata = 0;
8 R = zeros(1,N); % Vettore autocorrelazione
9 i = 1;
10 jj = 1;
11 C = 0;
12 while( i < length(y) - N + 1 )
13     j = i + N -1;
14     V = y( i:j );
15     C = 0;
16     for t=1:length(V)
17         C = real(V(t));
18         D = imag(V(t));
19         V(t) = D + 1i*C;
20     end
21     i = ( j + 1 );
22     % Processing
23     V_con = conj(V);
24     for k=1:( length(V) - 1)
25         R(k) = -V_con(k) * V(k+1);
26     end
27     R_Ts = sum(R)/N;
28     V_stimata(jj) = -(lambda * PRF / (4*pi)) * angle(R_Ts);
29     jj = jj + 1;
30 end

```

```
31 V = y( (j + 1):end );
32 C = 0;
33     for t=1:length(V)
34         C = real(V(t));
35         D = imag(V(t));
36         V(t) = D + 1i*C;
37     end
38 % Processing ultimo segmento della sequenza
39 V_con = conj(V);
40     for k=1:( length(V) - 1)
41         R(k) = V_con(k) * V(k+1);
42     end
43 R_Ts = sum(R)/N;
44 V_stimata(jj) = -(lambda * PRF / (4*pi)) * angle(R_Ts);
45
46 mean(V_stimata)
```



# Ringraziamenti

Ed eccomi qua, verso la fine del mio lungo percorso tra le mura del Politecnico a ringraziare tutti coloro che consapevolmente e non, mi hanno dato il supporto e la carica con cui son arrivato fin qua. Non basterebbe un libro intero per citare e ringraziare tutti come vorrei ma cercherò di non tralasciare nessuno, pur restando in questo poco spazio a mia disposizione.

Voglio ringraziare la TLC family che racchiude tutti quei meravigliosi colleghi con cui ho festeggiato la fine delle sessioni d'esame e mi sono strappato i capelli su quelle prove che di essere superate non ne volevano sapere. . . grazie quindi a Daniele chiamato "Begaman", Andrea detto "Il mona", Giuseppe del clan dei calabresi, Angelo, Enzo, Mattia, Christian, Dorian, Nicola e a tutti coloro che con me hanno gioito di pane e salame nelle aule del Politecnico. Per ognuno di noi dopo l'università la vita cambia rotta e anche se non ci si rivedrà più tanto spesso, quello che è stato resterà sempre nel cuore.

Con grande onore e la mano sul cuore, cito il gruppo dei "rednecks", Miso "la lama dei balcani", Alessandro detto "popcorn" con al suo fianco Miriam, dottoressa dall'infinito spirito di mamma premurosa, Lampu "il saggio", Andrea detto "lollino" e Fabiano "memoria d'acciaio"; qui la fratellanza ha preso il sopravvento su tutto e tutti, ogni limite è stato superato. . . nello studio, nella baldoria e nelle serate ignoranti. . . Sono felice di avervi ritrovati qui a Bergamo quando mi sono trasferito e soprattutto vi dico grazie per il supporto che mi avete dato appena arrivato qui, in terra sconosciuta.

Nel corso della Magistrale ho conosciuto Francesco Barbara che ringrazio infinitamente per l'amicizia straordinaria che mi ha dimostrato e con cui ho combinato i peggiori disastri della mia carriera a cui si è aggiunto negli ultimi periodi il buon Obed, scoppiettante e dannatamente fuori di testa personalità proveniente dal Perù. . . non dimenticherò mai la tua risata unica che destava il silenzio di ogni professore nel proprio ufficio fino ad arrivare all'edificio 21.

Un sentito ringraziamento va al mio relatore, il professore D'Amico che con tanta pazienza, disponibilità e professionalità mi ha seguito e portato verso la fine di questo lavoro di tesi; non posso non citare il mio caro amico e collega Luca Cerea, con cui ho studiato tanto per gli esami e che dopo un po' è diventato mio punto di riferimento nell'avvio e proseguimento delle attività di studio.

Concludo i ringraziamenti alle persone conosciute all'interno del Politecnico ringraziando e abbracciando Luisa Ciesco, una persona straordinaria che con il suo silenzioso passo

e la sua forte personalità mantiene l'ordine e regola la vita al dipartimento; ricordo i miei primi periodi di lavoro in aula tesisti, quando la osservavo e quasi mi intimoriva per la sua severità e precisione per poi scoprire una bontà d'animo e un cuore che si incontrano poche volte nella vita.

Nel corso della mia carriera universitaria ho svolto tanti lavoretti che mi hanno permesso di "arrotondare" e provare quella meravigliosa sensazione data dal senso di indipendenza, tra tutti voglio ricordare i due ristoranti dove ho militato più a lungo e i cui titolari mi hanno sempre trattato con grande affetto e profondo rispetto; ringrazio dunque Dario e Christian, l'accoppiata di cuochi più esplosiva che si possa trovare, ringrazio Elena e Amedeo per la fiducia accordatami nel mio lavoro e per le opportunità che mi hanno concesso nel corso degli anni, ringrazio di cuore tutti i colleghi di sala e in particolare Giovanna alias "mamma Gio" che mi ha sempre dato grandi consigli e suggerimenti per affrontare le mie "stupidaggini" da giovanotto ribelle e inesperto, Daniela che con la sua grande passione per i dolci e il suo buon cuore mi regalato un sorriso anche nei turni e momenti più pesanti.

Passando al secondo ristorante mai dimenticherò Piero e Tiziana con cui ho iniziato a lavorare fin dal loro primo giorno di attività nella ristorazione, eravamo impacciati e inesperti ma col tempo siamo diventati forti e i clienti ce l'hanno sempre riconosciuto; mi commuovo se ripenso alle nostre merende di fine turno alle 2 di notte dove, tra un panino con il cotechino e un piatto di risotto abbiamo parlato di come gira il mondo e mi avete raccontato le vostre straordinarie avventure in giro per l'Europa.

Mai lascerà il mio cuore il ricordo dello straziante viaggio di ritorno, la sera del mio ultimo turno in sala quando in mio onore abbiamo stappato e brindato con la promessa che non ci saremmo persi e avremmo mantenuto i contatti.

Ho lasciato in ultimo ma non per importanza, i ringraziamenti per quelle persone che mi sono state sempre vicine nella gioia e nella tristezza, che hanno avuto pazienza e hanno saputo aspettarmi, che hanno saputo ascoltarmi e darmi conforto anche quando la mia dedizione al dovere stava per schiacciarmi.

Non ringrazierò mai abbastanza i miei amici più stretti, Manuel "il doc", Nazmi detto "dacia" che ha da poco avuto una meravigliosa figlia, Michael mio eterno consigliere e spalla intramontabile quando si è trattato di aggirare i carabinieri in scooter, Emanuele "il tenente" che anche lui come altri ha condiviso con me serate veramente grezze, Nicholas "l'immenso" gigante dal cuore tenero che con il suo instancabile spirito da brontolone esprime il suo punto di vista su tutto e tutti, Lorenzo "lo zio" che conosco dai tempi dell'asilo e che per me è come un fratello, Paolo che mi ha sempre messo a disposizione la sua casa quando restavo a Milano per studiare o per sbocciare e mi ha veramente trattato come un fratello; non posso non citare Bruno con cui ho condiviso i bagni invernali, la vacanza grezzissima in Croazia e le infinite sessioni di studio in architettura sommersi da birrette scrause e cibo molto salutista.

Ora viene il momento di ringraziare la mia famiglia, che mi ha permesso di arrivare fin qui, mi ha motivato e ha retto il peso di questa avventura quando le mie gambe stavano per piegarsi così da tornare in piedi più forte di prima. Spero un giorno di potervi ricambiare per tutti i sacrifici fatti in questi anni; questo è per voi in primis e ve lo dedico con tutto me stesso.

Il momento di concludere è arrivato, ho ringraziato coloro che hanno contribuito ma



non mi sono scusato. . . non mi sono scusato per tutti i "no ragazzi non ci sono stasera, devo studiare", per tutte le volte in cui ho risposto male a chi non se lo meritava per via dello stress e del carico che a volte non ho saputo gestire; se siete rimasti al mio fianco nonostante tutto allora so per certo di non aver sbagliato quando vi ho fatti entrare nella mia vita. Adesso, continuerò a lavorare duramente per arrivare laddove le mie aspirazioni e sogni mi proiettano nel futuro ma per certo ritornerò a dare attenzione a tutto quel mondo di persone che mi ha permesso di diventare quello che sono, con i miei pregi e soprattutto difetti.

Per concludere, voglio ricordare il buon Fabio, venuto a mancare tragicamente verso la fine del suo percorso accademico; ci sei mancato, ti ricordiamo sempre come l'uomo degli infiniti consigli dati a chiunque ne avesse bisogno anche senza conoscerlo. . . abbiamo corso per te, abbiamo gelosamente custodito il tuo posto in dipartimento finchè ci è stato possibile. . . ma il vuoto è ancora lì, incolmabile e doloroso. . . grazie Fabio riposa in pace.

Libero



# Bibliografia

- [1] G. Spata M. D'Agostino S. Scollo, M. Prestifilippo and M. Coltelli. Monitoring and forecasting etna volcanic plumes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, September 2009.
  
- [2] T.col. Attilio di Diodato. La cenere vulcanica: impatto sulla navigazione aerea. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, pages 30–46, 2018.
  
- [3] Mario Montopoli Frank S. Marzano, Errico Picciotti and Gianfranco Vulpiani. Inside volcanic clouds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, October 2013.
  
- [4] S. Scollo M. Coltelli, L. Miraglia. Characterization of shape and terminal velocity of tephra particles erupted during the 2002 eruption of etna volcano, italy. *Bulletin of Volcanolgy*, December 2007.
  
- [5] T.V Chelaru C.E Costantinescu S. Danaila D.G. Dimitriu V. Dragan E. Halic D.D Isvoranu C. Berbente, A. Bogoi. Volcanic ash safety in air traffic management - a white paper. *European Safety Programme for ATM*, June 2011.

- [6] R. J. Adams, W. F. Perger, W. I. Rose, and A. Kostinski. Measurements of the complex dielectric constant of volcanic ash from 4 to 19 ghz. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B4):8175–8185, 1996.
- [7] William I. Rose Frank Silvio Marzano, Gianfranco Vulpiani. Microphysical characterization of microwave radar reflectivity due to volcanic ash clouds. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 44(2), February 2006.
- [8] Kohei Arai. Comparison between rayleigh and mie scattering assumptions for z-r relation and rainfall rate estimation with trmm/pr data.
- [9] Introduction to radar systems. <https://www.ll.mit.edu/outreach/introduction-radar-systems>, 06 2002.
- [10] Radar fundamentals. <http://www.nps.navy.mil/faculty/jenn>.
- [11] H.C. van de HULST. Light scattering by small particles. *Dover*, 10, 01 1981.
- [12] Michele D’Amico. Radarmeteorologia.
- [13] C Capsoni and Michele D’Amico. A physically based radar simulator. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL*, 15:593–598, 04 1998.
- [14] Frank Marzano, Stefano Barbieri, Gianfranco Vulpiani, and William I Rose. Volcanic ash cloud retrieval by ground-based microwave weather

radar. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44:3235 – 3246, 12 2006.

- [15] C Capsoni, Michele D’Amico, and Roberto Nebuloni. A multiparameter polarimetric radar simulator. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology - J ATMOS OCEAN TECHNOL*, 18:1799–1809, 11 2001.