



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

**Analisi della propagazione radio in camere
riverberanti in presenza di masse d'acqua**

**Analysis of radio propagation in
reverberation chambers in presence of
water masses**

Candidato:
Adele D'Agnano

Relatore:
Prof. Valter Mariani Primiani

Correlatore:
Prof. Franco Moglie

Anno Accademico 2023/2024

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA
Via Brecce Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

*Ai miei genitori
Teodoro e Mary.*

Ringraziamenti

Prima di entrare nel merito della trattazione, desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato in questo percorso. Il loro contributo è stato fondamentale per il raggiungimento di questo traguardo.

Ringrazio il mio relatore Prof. Valter Mariani Primiani per avermi proposto un argomento di grande attualità.

Grazie anche al mio correlatore Prof. Franco Moglie per la sua disponibilità, la sua guida e il suo sostegno durante l'attività di ricerca.

Infine, vorrei ringraziare la mia famiglia. Grazie ai miei genitori per il sostegno costante e il sacrificio che hanno fatto per farmi arrivare fin qui. Grazie per essere sempre stati al mio fianco, incoraggiandomi e supportandomi durante i momenti di difficoltà e successo di questo percorso.

Grazie ai miei nonni per avermi dato l'amore e il supporto durante questa esperienza così importante.

Vorrei ringraziare, inoltre, una persona molto importante il mio fidanzato Simone per avermi sostenuto con amore e comprensione trovando sempre una parola di conforto durante i momenti di difficoltà.

Ancona, Luglio, 2024

Adele D'Agnano

Sommario

La propagazione radiomobile è un'area di ricerca cruciale nell'ambito delle comunicazioni wireless, con applicazioni che spaziano dall'Internet delle cose (IoT) alle reti cellulari. Tuttavia l'effetto dell'acqua sull'andamento dei segnali radio è stato spesso trascurato, nonostante l'acqua sia un elemento onnipresente nell'ambiente naturale e artificiale.

Questa tesi si propone di esplorare l'impatto dell'acqua sulla radiopropagazione e di analizzare come questo fenomeno influenzi le prestazioni delle comunicazioni. Questo argomento è stato approfondito a causa dell'alluvione che ha interessato l'Emilia Romagna nel mese di maggio 2023, con l'obiettivo di comprendere il motivo per il quale molti segnali radio siano stati attenuati.

La tesi è stata strutturata nel seguente modo: nel primo capitolo è stato affrontato il tema delle onde radio e delle loro applicazioni nel corso degli anni; nel secondo capitolo è stato esaminato il fenomeno della radiopropagazione; il terzo capitolo mostra le misurazioni eseguite nella camera riverberante del laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII); infine nell'ultimo vengono elaborati e analizzati i risultati ottenuti.

Indice

1	Lo spettro elettromagnetico e le onde radio	1
1.1	Le onde radio	2
1.2	L'evoluzione e la storia della tecnologia delle onde radio	4
1.2.1	Maxwell e le onde elettromagnetiche	4
1.2.2	Le equazioni di Maxwell	4
1.2.3	Hertz e le prove sperimentali per le onde radio	6
1.2.4	Marconi: innovazioni e rivoluzioni nelle telecomunicazioni	6
1.2.5	Dalle onde radio di Marconi alle comunicazioni di guerra	8
1.2.6	L'evoluzione delle onde radio nel dopoguerra	10
1.2.7	Le onde radio oggi: evoluzioni e applicazioni dagli anni '90 a oggi	10
2	La radiopropagazione e l'impatto delle alluvioni	12
2.1	La radiopropagazione	12
2.2	Alluvione Emilia Romagna	14
3	Analisi della radiopropagazione in camera riverberante	16
3.1	Camera Riverberante	16
3.2	Strumenti di misura	17
3.3	Set-up di misura	19
3.3.1	Prime misure	19
3.3.2	Misure con double ridge	21
3.3.3	Misure con acqua	21
3.3.4	Misure con acqua e sale	21
4	Elaborazione e analisi dei risultati	25
4.1	Elaborazione prime misure	25
4.2	Elaborazione misure con double ridge	28
4.3	Elaborazione misure con acqua	29

Indice

4.4	Elaborazione misure con acqua e sale	31
	Conclusioni	37
	Bibliography	39

Elenco delle figure

1.1	Spettro elettromagnetico	1
1.2	Bande di frequenza spettro radio	2
1.3	Laboratorio in cui Hertz rilevò la radiazione elettromagnetica	6
1.4	Coherer di Branly	7
1.5	Telegrafo senza fili	7
1.6	Stazione radiofonica	8
1.7	Radiogoniometro	9
1.8	Sottomarino Seconda Guerra Mondiale	10
2.1	Propagazione ionosferica	13
2.2	Alluvione Emilia Romagna 2023	15
3.1	Stirrer	17
3.2	Double ridge	18
3.3	Logperiodica	18
3.4	Sistema di controllo stirrer	19
3.5	Analizzatore di rete	19
3.6	Mastello	19
3.7	Mastelli e LS-24	20
3.8	Preparazione di una soluzione salina	22
3.9	Codice Python	24
4.1	Q-factor Double ridge e Loperiodiche	25
4.2	Q-factor - antenne	26
4.3	Confronto ACS double ridge e logperiodiche	27
4.4	Q-factor	28
4.5	Q-factor double ridge	29
4.6	Q-factor con 20 L e 30 L	30
4.7	ACS con 20 L e 30 L	30

Elenco delle figure

4.8	ACS 40 L e 50 L	31
4.9	ACS con acqua e sale	32
4.10	Costante dielettrica relativa funzione di N e T	33
4.11	Costante dielettrica relativa funzione di f e T	33
4.12	Spessore di penetrazione in funzione di N e T	34
4.13	Spessore di penetrazione in funzione di f e T	35
4.14	Conducibilità in funzione di N e T	36
4.15	Conducibilità in funzione di f e T	36

Elenco delle tabelle

4.1	Tabella riassuntiva	37
-----	-------------------------------	----

Capitolo 1

Lo spettro elettromagnetico e le onde radio

Lo spettro elettromagnetico è l'insieme di tutte le possibili frequenze della radiazione elettromagnetica.[1]

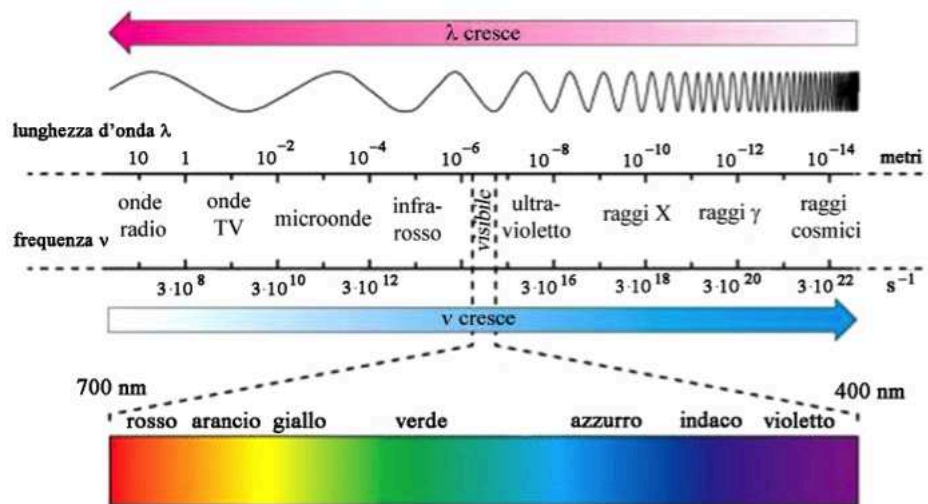


Figura 1.1: Spettro elettromagnetico

È possibile definire la radiazione elettromagnetica come la propagazione nello spazio dell'energia sotto forma di onde elettromagnetiche.

Le onde elettromagnetiche (EM) hanno in comune le seguenti proprietà:

- un'onda EM è formata da un'intensità di campo elettrico e magnetico che oscillano alla stessa frequenza f ;
- la velocità di un'onda EM che si propaga nel vuoto è una costante universale data dalla velocità della luce c ;

- nel vuoto, la lunghezza d'onda λ di un'onda EM è legata alla frequenza di oscillazione f dalla

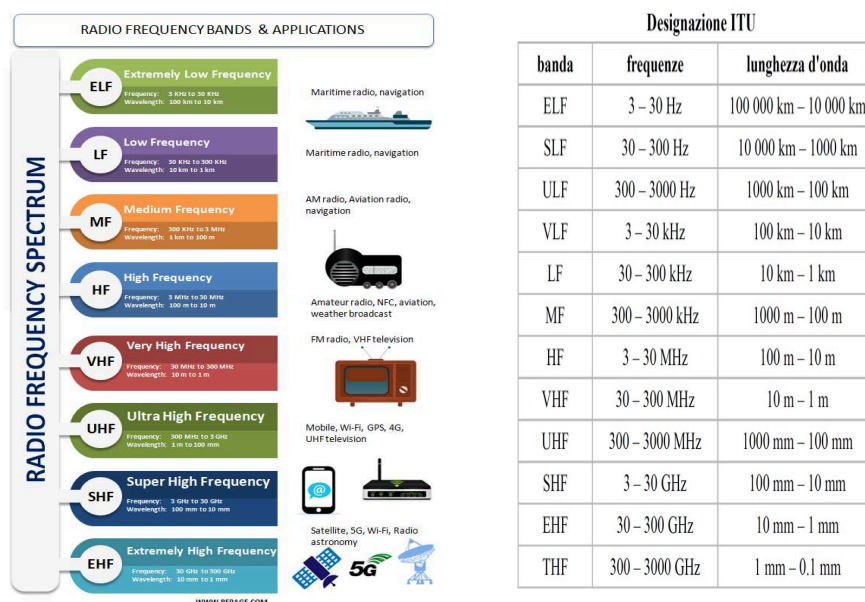
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

Nonostante le onde EM abbiano in comune le seguenti proprietà, ciascuna di esse è caratterizzata da una propria lunghezza d'onda λ e da una propria frequenza f che permettono la suddivisione dello spettro in bande.[2] L'intervallo delle frequenze dell'intero spettro EM viene, infatti, suddiviso in ampie zone: raggi gamma, raggi X, luce ultravioletta, luce visibile, luce infrarossa, microonde e onde radio che approfondiremo nel dettaglio in seguito.

1.1 Le onde radio

Le onde radio o radioonde sono radiazioni elettromagnetiche appartenenti allo spettro EM caratterizzate da una frequenza inferiore ai 300 GHz.

Le applicazioni delle onde radio sono differenti in relazione alla loro frequenza (vedi figura 1.2a).



(a) Bande dello spettro radio e applicazioni principali

(b) Classificazione in bande di frequenza dello spettro radio

Figura 1.2: Bande di frequenza spettro radio

Lo spettro radio è suddiviso in diverse bande e ognuna di esse è identificata da

una sigla basata su una nomenclatura stabilita dall'International Telecommunication Union come descritto dalla figura 1.2b.

La banda delle onde:

- **ELF** (Extremely Low Frequency), caratterizzata da una frequenza compresa tra 3 Hz e 30 Hz, è usata principalmente per rilevare oggetti sepolti;
- **VLF** (Very Low Frequency), identificata da frequenze tra 3 kHz e 30 kHz, è impiegata per le comunicazioni sottomarine e per la radiolocalizzazione tramite il sistema di navigazione Omega;
- **LF** (Low Frequency), con frequenze tra 30 kHz e 300 kHz, viene utilizzata da alcuni radiofari e stazioni di informazione metereologica in ausilio alla navigazione aerea;
- **MF** (Medium Frequency), da 300 kHz a 3 MHz, comprende la banda di radiodiffusione AM;
- **HF** (High Frequency), caratterizzata da frequenze tra 3 MHz e 30 MHz ed essendo fortemente influenzata dalla riflessione da parte della ionosfera e poco influenzata dall'assorbimento nella ionosfera medesima, permette la comunicazione e la radiodiffusione su lunghe distanze;
- **VHF** (Very High Frequency), da 30 MHz a 300 MHz, viene usata principalmente per la televisione e la radiodiffusione FM ma anche per il controllo del traffico aereo;
- **UHF** (Ultra High Frequency), identificata da frequenze tra 300 MHz e 3 GHz, è impiegata dai radar, ma anche dalle trasmissioni televisive e comunicazioni mobili;
- **SHF** (Super High Frequency), da 3 GHz a 30 GHz, è utilizzata per sistemi di comunicazione punto-punto, radar terrestri e navali e per alcuni sistemi di navigazione aerea;
- **EHF** (Extremely High Frequency), caratterizzata da frequenze comprese tra 30 GHz e 300 GHz, invece, è meno utilizzata a causa di tecnologie meno sviluppate e dell'assorbimento eccessivo da parte dell'atmosfera su alcuni intervalli di frequenza.[2]

Ma come si è arrivati alla scoperta delle onde radio e quali furono le prime applicazioni pratiche di questa rivoluzionaria scoperta?

1.2 L'evoluzione e la storia della tecnologia delle onde radio

Quando il concetto di onde elettromagnetiche fu proposto per la prima volta nel 1864 fu accolto con grande scetticismo, in quanto i fondamenti teorici erano complessi. Di conseguenza l'idea svanì per molto tempo. Passarono diversi decenni prima che un gruppo di appassionati di elettricità e magnetismo riuscì a dare una solida base teorica.

1.2.1 Maxwell e le onde elettromagnetiche

Il responsabile della moderna teoria dell'elettromagnetismo fu James Clerk Maxwell il quale unificò i lavori sull'elettricità e il magnetismo di Michael Faraday, André-Marie Ampère e di molti altri in una serie di 20 equazioni differenziali scalari.

Nel 1864 Maxwell presentò un articolo "Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" nel quale affermò che un disturbo elettromagnetico si propagava nello spazio alla velocità della luce. Inoltre, descrisse come il campo elettrico e magnetico fossero collegati attraverso un'onda elettromagnetica in movimento. Quando propose la sua teoria, il pubblico rimase perplesso in quanto egli descrisse come varie variabili interagissero tra di loro e, in più, usò il concetto di vettore, di non facile comprensione in quel periodo, per rappresentare le intensità dei campi elettrici e magnetici e le densità di flusso. Per di più, Maxwell impiegò una variabile introdotta da lui stesso, oggi nota come potenziale vettore magnetico, grazie alla quale riuscì a calcolare i campi elettrici e magnetici. Nel complesso, introdusse 20 equazioni, che coinvolgevano 20 variabili, nelle quali propose anche il suo concetto innovativo di corrente di spostamento. Il lavoro di Maxwell fu accolto con scetticismo anche dai suoi colleghi e, a causa della sua complessità, nessuno mostrò interesse.

Successivamente, nel 1873, Maxwell pubblicò il suo libro "Treatise on Electricity and Magnetism" nel quale espose ulteriormente molte delle sue idee.

1.2.2 Le equazioni di Maxwell

A riformulare le 20 equazioni di Maxwell fu Oliver Heaviside. Un giorno ritrovò una copia del libro pubblicato da Maxwell nel 1873 e, nonostante gran parte del-

la matematica utilizzata fosse al di sopra delle sue capacità, divenne determinato a padroneggiarla. Analizzando il complicato calcolo vettoriale, trovò il modo di riformulare le 20 equazioni nelle quattro che usiamo oggi:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = J + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.5)$$

dove:

- \mathbf{D} è l'induzione elettrica;
- \mathbf{B} è l'induzione magnetica;
- \mathbf{E} è il campo elettrico;
- \mathbf{H} è il campo magnetico;
- J è la densità di corrente elettrica;
- ρ è la densità di carica elettrica.

La 1.2, oggi chiamata *legge di Gauss elettrica* o *legge del flusso elettrico*, dimostra che il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa dipende dalla carica racchiusa al suo interno.

La *legge di Gauss magnetica* 1.3 afferma che il flusso di un campo magnetico attraverso una superficie chiusa è sempre nullo.

La 1.4 è la *legge di Faraday* la quale descrive l'induzione di un campo elettrico da parte di un campo magnetico variabile nel tempo e, quindi, stabilisce che quando si introduce un campo magnetico dentro un circuito elettrico, questo introduce una corrente elettrica nel circuito.

Infine, la *legge di Ampère-Maxwell* 1.5 afferma che un campo magnetico si può generare tramite semplici correnti elettriche oppure da campi elettrici variabili (la cosiddetta corrente di spostamento).

Grazie a queste formule si dimostrò che le variazioni temporali dei campi elettrici e magnetici possono propagarsi nello spazio come onde elettromagnetiche. [3]

1.2.3 Hertz e le prove sperimentali per le onde radio

Affascinato dalla teoria di Maxwell, fu il fisico tedesco Heinrich Hertz a dimostrare l'esistenza delle onde elettromagnetiche attraverso una serie di esperimenti presso l'Università di Karlsruhe. Nel corso dell'impostazione di un esperimento, notò che mentre scaricava un condensatore attraverso un circuito, un circuito identico a una certa distanza sviluppava degli archi. Riconobbe, quindi, una condizione di risonanza e delle sospette onde elettromagnetiche. Di conseguenza, iniziò a usare tali circuiti per rilevare le onde radio e riuscì a dimostrare le proprietà delle onde elettromagnetiche. Nonostante questa incredibile scoperta, l'interesse di Hertz per le onde radio era puramente scientifico.[4]

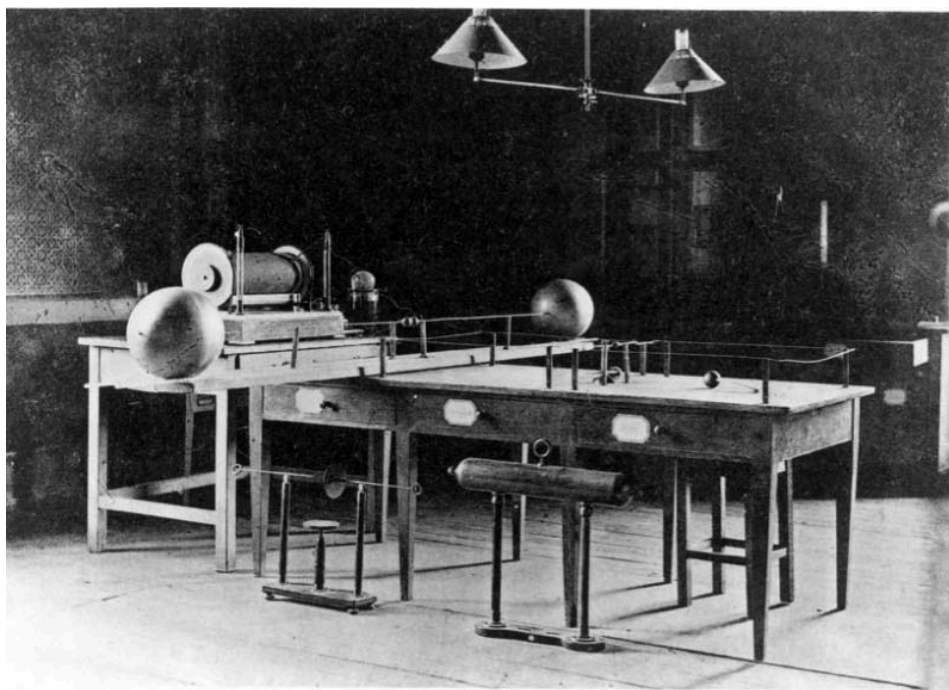


Figura 1.3: Laboratorio in cui Hertz rilevò la radiazione elettromagnetica

1.2.4 Marconi: innovazioni e rivoluzioni nelle telecomunicazioni

Il primo ricevitore di segnali radio funzionante al mondo, il *coherer*, fu inventato da Branly in Francia. Mentre studiava le caratteristiche di alcuni metalli esposti alle onde elettromagnetiche, scoprì i radioconduttori "tube à limaille" che permettevano di rilevare la presenza di onde elettromagnetiche. Anche se non molto affidabile, lo sviluppo del coherer fu molto importante per lo sviluppo della tecnologia delle onde radio e permise a Marconi la sperimentazione della telegrafia senza fili.



Figura 1.4: Coherer di Branly

Guglielmo Marconi è stato un pioniere delle telecomunicazioni senza fili e uno dei personaggi chiave nello sviluppo della radio. Nel 1894, il giovane inventore Marconi iniziò a condurre i primi esperimenti sulla trasmissione delle onde radio. Tra i primi viene ricordato quello grazie al quale riuscì a far suonare un campanello premendo un pulsante telegrafico situato a pochi metri di distanza. Costruì quindi il telegrafo senza fili.



Figura 1.5: Telegrafo senza fili

Nell'estate 1895 Marconi riuscì a trasmettere un segnale alla distanza di un miglio. Tale esperimento fu considerato l'atto di nascita della radio e delle radiocomunicazioni. Successivamente si trasferì in Inghilterra dove organizzò numerose dimostrazioni di "telegrafia senza fili" a breve e media distanza tramite onde radio. Nel 1889 riuscì a trasmettere con successo segnali radio attraverso la Manica. Convinto che le onde radio potessero attraversare l'oceano Atlantico seguendo la curvatura terrestre, nel dicembre del 1901 riuscì a mandare un messaggio dall'isola di Terranova, in Canada, a un ricevitore installato in Gran Bretagna. Fu la prima trasmissione transoceanica. L'esperimento favorì la diffusione della radio, che fu installata anche su alcune navi. Le potenzialità dello strumento inventato da Marconi emersero in occasione del naufragio del Titanic nel 1912. Dopo l'impatto con l'iceberg, la nave, essendo dotata di radio, riuscì a inviare un messaggio di soccorso alle altre imbarcazioni consentendo di salvare 700 naufraghi. [5][6]

1.2.5 Dalle onde radio di Marconi alle comunicazioni di guerra

Le innovazioni di Marconi nel campo delle onde radio non solo rivoluzionarono le comunicazioni civili, ma si rivelarono fondamentali durante la Prima e la Seconda Guerra Mondiale.

Durante la Prima Guerra Mondiale le onde radio rappresentarono un importante strumento di comunicazione per le forze militari. Grazie a questa tecnologia emergente, le truppe furono in grado di trasmettere informazioni istantanee, migliorando l'efficienza e la coordinazione delle operazioni. I segnali radio furono utilizzati per inviare messaggi critici, tra cui le posizioni nemiche, strategie tattiche e ordini di comando. Tra le applicazioni troviamo:

- **stazioni radio mobili:** nonostante la radio fosse già utilizzata da qualche anno nei paesi europei, nel 1914 sia la Francia, sia l'Inghilterra ma anche l'Italia disponevano di un numero limitato di stazioni radiofoniche da campo. Di conseguenza, in questo periodo, l'Europa vide una forte accelerazione nello sviluppo della radio, dovuta specialmente per la necessità del suo impiego in guerra;



Figura 1.6: Stazione radiofonica

- **radiogoniometro:** nel periodo 1910-1915, Guglielmo Marconi, insieme a Bellini e Tosi, sviluppò il radiogoniometro. Questo strumento consentiva di determinare la direzione da cui proveniva un segnale radio, risultando utile per la localizzazione delle stazioni nemiche o per la navigazione aerea e marittima;



Figura 1.7: Radiogoniometro

- **Trasmettitori a scintilla:** Marconi utilizzò trasmettitori a scintilla per esperimenti a Mirafiori a Torino, installandoli su biplani nel 1915. Inoltre, gli aerei da caccia britannici, come lo Sopwith Camel, erano dotati di trasmettitori ad onde persistenti per la comunicazione durante le missioni aeree.

Durante la Seconda Guerra Mondiale ci furono ulteriori progressi nella tecnologia delle onde radio. Il jamming e l'intercettazione portarono allo sviluppo della crittografia e alle prime forme di guerra elettronica. Inoltre furono progettati i primi aerei radiocomandati senza pilota. Le onde radio furono utilizzate anche per la comunicazione tramite sottomarini durante entrambe le guerre. In particolare durante la Prima Guerra Mondiale i sottomarini utilizzavano onde radio a frequenze più basse per comunicare con la terraferma. Queste onde, essendo più lunghe, avevano una maggiore capacità di penetrazione attraverso l'acqua. Nel corso della Seconda Guerra Mondiale, l'uso delle onde radio nei sottomarini si evolse ulteriormente. Le onde VLF (Very Low Frequency) furono impiegate per comunicare con i sottomarini vicini alla superficie. Per i sottomarini situati a profondità maggiori furono utilizzate le ELF (Extremely Low Frequency) le quali potevano raggiungere un sommergibile senza bisogno di particolari sistemi per la ricezione dei messaggi.



Figura 1.8: Sottomarino Seconda Guerra Mondiale

1.2.6 L'evoluzione delle onde radio nel dopoguerra

Dopo le guerre, le tecnologie radio sviluppate per scopi militari furono adattate per usi civili. Le onde radio divennero fondamentali per le comunicazioni quotidiane.

Negli anni successivi alla Seconda Guerra Mondiale, la televisione iniziò a diffondersi rapidamente. Le onde radio furono utilizzate per trasmettere segnali televisivi, permettendo alla popolazione di accedere a un nuovo tipo di intrattenimento visivo. Questa evoluzione trasformò radicalmente il panorama mediatico e la società.

Inoltre, le onde radio divennero essenziali per le comunicazioni marittime e aeree, migliorando significativamente la sicurezza e l'efficienza dei trasporti.

L'uso delle onde radio si estese anche nello spazio. I satelliti per le comunicazioni, lanciati a partire dagli anni '60, utilizzavano le onde radio per trasmettere segnali su lunghe distanze, superando le limitazioni della trasmissione terrestre. Questo aprì nuove possibilità per le comunicazioni internazionali e la trasmissione di dati.

Un altro campo in cui trovarono impiego le onde radio fu quello scientifico e medico. La risonanza magnetica, sviluppata negli anni '70, utilizza le onde radio per produrre immagini dettagliate del corpo umano, rivoluzionando la diagnostica medica.

Gli sviluppi tecnologici post-bellici gettarono le basi anche per la nascita della telefonia mobile. Negli anni '70, furono sviluppati i primi sistemi di comunicazione cellulare che utilizzavano le onde radio per permettere le comunicazioni senza fili, rivoluzionando il modo in cui le persone interagivano e lavoravano.

1.2.7 Le onde radio oggi: evoluzioni e applicazioni dagli anni '90 a oggi

La successiva grande ondata di innovazione arrivò negli anni '90 e 2000 con lo sviluppo della messaggistica SMS, del Wi-Fi e dei primi smartphone. Verso la fine

degli anni '90 venne lanciato il Gnat, un drone di sorveglianza radiocomandato con videocamera montata a lungo raggio. Venne quindi rilasciata la prima versione del Wi-Fi e divenne disponibile il servizio di telefonia satellitare. Successivamente, nel 2001 Northrup Grumman rilasciò l'UAV Predator, un aggiornamento armato del drone Gnat. Nel 2005, nasce su scala commerciale la rete 3G consentendo Internet wireless a larga banda e streaming video tramite smartphone.

Dopo la rete 3G e prima della 4G venne il tempo, nel 2008, della rete 3G LTE, cioè Long Term Evolution, un termine con il quale si indica l'evoluzione di uno standard di comunicazione per migliorarne le prestazioni.

La base tecnica delle reti 4G venne sviluppata in Giappone già a fine 2005, ma le prime reti mobili commerciali arrivarono in Europa solo nel 2009. Nel giro di pochi anni, con lo sviluppo impetuoso dell'industria dei contenuti in streaming, del gaming online e con la nascita dell'Internet of Things, inizia ad emergere il vero limite della rete 4G che non è la capacità di trasmissione, ma la latenza, cioè il tempo che intercorre tra la richiesta di un dato e il suo effettivo arrivo allo smartphone dell'utente. Attualmente, invece, la rete utilizzata è il 5G ma presenta già un concorrente che è il Wi-Fi 6 che aspira a diventare lo standard per le trasmissioni a larga banda ma a breve raggio. Il grande vantaggio del 5G è la flessibilità: grazie alla tecnologia "adaptive beam switching", infatti, gli smartphone 5G possono saltare da una frequenza all'altra per ottimizzare la potenza del segnale o la capacità di trasmissione dei dati, in base alle necessità del momento. Questo permette anche agli operatori di rete di gestire meglio molto più carico per molti più utenti. [6][7]

Dopo aver visto come le onde radio sono state utilizzate nel corso degli anni, nel capitolo successivo parleremo della radiopropagazione.

Capitolo 2

La radiopropagazione e l’impatto delle alluvioni

In questo capitolo e nei prossimi esamineremo come avviene la propagazione delle onde radio e come la presenza di acqua dovuta ad eventi climatici estremi, come l’alluvione, possano avere un impatto significativo su di essa.

2.1 La radiopropagazione

Nel contesto delle telecomunicazioni esistono due principali tipologie di propagazione: la propagazione guidata, che si verifica quando le onde elettromagnetiche si muovono attraverso un mezzo fisico che le guida lungo un percorso definito, e la propagazione libera, che si verifica quando le onde si muovono attraverso lo spazio senza essere confinate da alcun mezzo fisico, come cavi o guide d’onda.

La radiopropagazione, che è la diffusione del segnale elettromagnetico attraverso le onde radio, studia, quindi, la propagazione libera dei segnali elettromagnetici nello spazio libero o in mezzi come l’atmosfera o lo spazio vuoto e può suddividersi in radiopropagazione in un canale radio tra punti fissi e radiopropagazione in un canale radiomobile tra terminali mobili e le stazioni radiobase. Esistono diversi tipi di radiopropagazione:

- **propagazione per linea diretta:** meccanismo attraverso il quale le onde elettromagnetiche, in particolare, le onde radio si propagano in linea retta tra due punti. È il tipo di radiopropagazione più diffuso e ideale in una radiocomunicazione, specie in collegamenti di ponti radio terrestri e satellitari (line of sight);

- **propagazione per onda di terra:** utilizza l'effetto guida della superficie terrestre all'interfaccia con l'atmosfera. Questo fenomeno permette alle onde elettromagnetiche di percorrere lunghe distanze grazie alla conducibilità del suolo terrestre, che è leggermente caricato negativamente, e alla superficie dell'acqua, che è debolmente polarizzata a causa dei legami a idrogeno e alla presenza di sali disciolti. Questo tipo di propagazione è utilizzato nelle applicazioni di radiodiffusione sia terrestri che marittime;
- **propagazione ionosferica :** è un tipo di propagazione che sfrutta la riflessione elettromagnetica da parte dello strato atmosferico ionizzato conduttore qual è la ionosfera permettendone la propagazione oltre la semplice portata ottica tra trasmettitore e ricevitore ovvero oltre i limiti imposti dalla curvatura terrestre. Attualmente è scarsamente utilizzata;

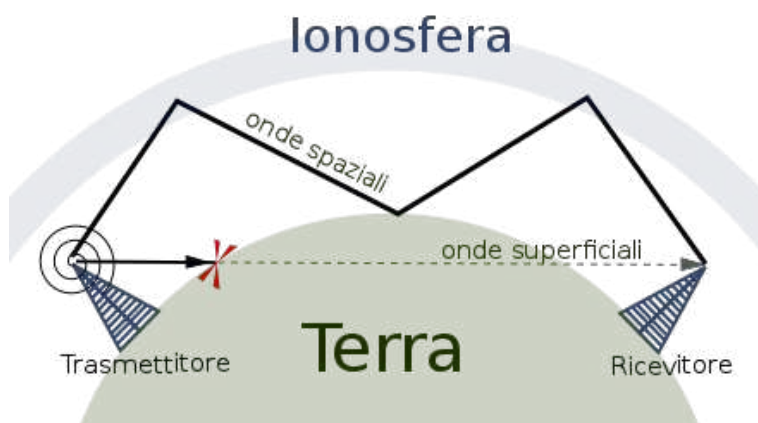


Figura 2.1: Propagazione ionosferica

- **propagazione per effetto condotto:** fenomeno che sfrutta la formazione di "condotti atmosferici" per l'onda elettromagnetica grazie all'inversione dell'indice di rifrazione dell'aria in particolari condizioni atmosferiche. Si manifesta in maniera aleatoria nel tempo, quindi non affidabile;
- **troposcatter:** il cui nome deriva da troposfera, cioè la parte più bassa e densa dell'atmosfera, la quale è in grado di produrre una certa diffusione o scattering dell'onda elettromagnetica a radiofrequenza così che una piccola parte dell'energia dell'onda irradiata, anche se inviata in una direzione diversa da quella della linea di vista tra trasmettitore e ricevitore, può essere captata da quest'ultimo;

- **propagazione satellitare:** tipo di radiopropagazione che coinvolge le comunicazioni satellitari tra stazioni al suolo e satelliti per telecomunicazioni in orbita intorno alla Terra attraversando tutto o parte del mezzo atmosferico. A causa della distanza tra satellite e stazione al suolo e la presenza dell'atmosfera tipicamente l'attenuazione complessiva del segnale è elevata;
- **propagazione spaziale:** fenomeno che coinvolge le comunicazioni tra sonde spaziali e satelliti in orbita per la ricezione dei dati attraversando il mezzo interstellare. Questa tipologia di propagazione è caratterizzata da una bassissima attenuazione specifica a causa della quasi totale assenza di materia, ma trattandosi di percorsi lunghi l'attenuazione è comunque elevata;
- **multipropagazione:** fenomeno in cui l'onda elettromagnetica può seguire più percorsi dal trasmettitore al ricevitore sfruttando, oltre alla linea diretta, la riflessione da parte del terreno o degli edifici specialmente in un collegamento radiomobile. Il multipath, infatti, è particolarmente sentito nelle trasmissioni radiomobili come le reti cellulari dove il mutare della posizione del terminale mobile rispetto alla stazione radiobase determina continue variazioni degli effetti di riflessione e diffrazione e quindi un multipath variabile in maniera aleatoria, cui si può ovviare con circuiti di controllo automatico del guadagno.[8]

2.2 Alluvione Emilia Romagna

Dopo aver analizzato le varie tipologie di radiopropagazione, è fondamentale considerare che queste non avvengono in condizioni statiche. La propagazione, infatti, è fortemente influenzata dalle condizioni ambientali e meteorologiche, le quali possono alterare significativamente la qualità e l'efficacia delle comunicazioni radio. Le condizioni meteorologiche possono avere un impatto marcato sulla propagazione delle onde radio. La pioggia, ad esempio, può causare assorbimento e attenuazione dei segnali, fenomeno noto come rain fade, particolarmente rilevante alle frequenze più alte. Tuttavia, il tipo di pioggia influisce diversamente sulla radiopropagazione: piogge fini causano meno attenuazione di piogge intense con presenza di temporali. La nebbia e l'umidità possono aumentare l'assorbimento e la dispersione delle onde radio.

Durante le alluvioni, invece, il cambiamento delle condizioni del terreno, che diven-

ta bagnato e fangoso, altera la propagazione delle onde radio riducendo l'efficacia del segnale. Un esempio concreto di come le condizioni metereologiche, e quindi la l'accumulo di acqua e fango, possano influenzare la radiopropagazione è l'alluvione che ha colpito l'Emilia Romagna a maggio 2023.



Figura 2.2: Alluvione Emilia Romagna 2023

Durante questo evento metereologico estremo, le intense precipitazioni hanno causato inondazioni diffuse danneggiando le infrastrutture di telecomunicazioni. L'attenuazione del segnale, causata dalle dall'accumulo di acqua, ha ridotto l'efficacia della propagazione delle onde radio, creando difficoltà anche nelle comunicazioni di emergenza e di soccorso.

Capitolo 3

Analisi della radiopropagazione in camera riverberante

L'obiettivo di questa tesi è analizzare l'effetto dell'acqua sul tempo di decadimento dei cammini multipli e quindi dimostrare che l'acqua assorbe parte della potenza associata al multipath causando una riduzione del livello medio di potenza misurato dai terminali mobili.

Le misure sono state eseguite nella camera riverberante del laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica (EMC) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università Politecnica delle Marche in modo da avere un banco di misura controllato in cui si potesse notare solo l'effetto dovuto alla presenza di acqua sulla radiopropagazione.

3.1 Camera Riverberante

La camera riverberante è una cavità multimodale realizzata in materiale altamente conduttivo. A causa della minima quantità di energia assorbita dalle pareti, all'interno di essa è possibile ottenere campi di elevata intensità iniettando segnali di moderata potenza. Una camera riverberante è un risuonatore cavo con un fattore di merito (Q factor) estremamente elevato. Generalmente le camere riverberanti hanno una geometria rettangolare.

La caratteristica principale delle camere riverberanti è quella di avere il campo elettromagnetico staticamente isotropo, uniforme e omogeneo su quasi tutto il volume interno ad esclusione delle zone vicino alle pareti, alle antenne e al mescolatore modale (stirrer). Per garantire questa uniformità di campo, all'interno della camera riverberante è installato uno stirrer meccanico, cioè una costruzione costituita da

sagome metalliche riflettenti orientate con diverse angolazioni e che, ruotando sul proprio asse, garantiscono un continuo cambiamento delle condizioni al contorno.



Figura 3.1: Stirrer

Lo stirrer è azionato da un motore esterno il quale può operare ruotando in modo continuo a una velocità costante durante la misura oppure fermandosi in un insieme di angoli uniformemente distanziati dell'asse di rotazione su tutto l'angolo giro e procedendo alla misura su tutta la banda di frequenza a motore fermo. Nel primo caso si parla di stirrer mode, mentre nel secondo di tuned mode.[9][10]

3.2 Strumenti di misura

Le misure sono state eseguite all'interno della camera riverberante e gli strumenti necessari sono stati i seguenti:

- **antenne double ridge:** sono dei tipi di antenne comunemente utilizzate per test di compatibilità elettromagnetica. L'antenna double ridge utilizza una guida d'onda a doppia cresta per la parte di alimentazione, consentendo un'ampia larghezza di banda. Essa copre una vasta gamma di frequenze e offre alto guadagno e bassa riflessione;



Figura 3.2: Double ridge

- **antenne logperiodiche:** sono antenne direzionali la cui lunghezza degli elementi (dipoli) varia secondo il logaritmo della frequenza. Sono caratterizzate da una notevole banda passante e vista la gamma di frequenza copribile da una singola unità, il guadagno rispetto al dipolo mezz'onda è in genere compreso tra 0 e 10 dB;[11]



Figura 3.3: Logperiodica

- **PC e analizzatore di rete:** una parte fondamentale della strumentazione. Grazie al pc presente nel laboratorio abbiamo pilotato il motore dello stirrer ed, essendo collegato all'analizzatore di rete, ha permesso il controllo delle misure;



Figura 3.4: Sistema di controllo stirrer

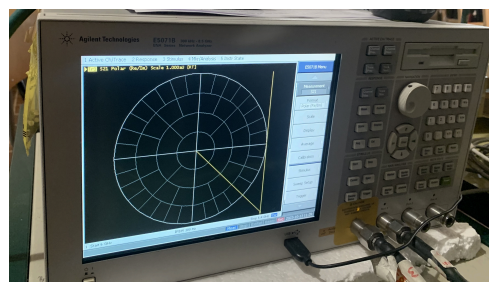


Figura 3.5: Analizzatore di rete

- **mastello:** recipiente che in un primo momento abbiamo utilizzato a vuoto e successivamente è stato riempito prima con acqua e in seguito è stato aggiunto il sale. Inizialmente abbiamo utilizzato due contenitori, mentre dopo solo il mastello più basso.



Figura 3.6: Mastello

3.3 Set-up di misura

Prima di procedere è stato necessario effettuare la calibrazione della camera riverberante, quindi abbiamo eseguito la prima misura della camera vuota con la stazione radiobase.

3.3.1 Prime misure

Successivamente abbiamo iniziato le misure utilizzando 72 posizioni nella banda di frequenza da 800 MHz a 8.4 GHz.

Analizzando i primi risultati, però, abbiamo notato un valore di ACS (Absorption Cross Section), che è il rapporto tra la potenza dissipata e la densità di potenza scalare incidente, più alto di quello che ci aspettavamo. Questo derivava da un cambiamento del valore del fattore di merito. Quindi avendo un fattore di merito dipendente dalla stazione radio base, abbiamo deciso di mettere nella camera dei pannelli assorbenti (LS-24) in modo da abbassare il valore del fattore di merito stesso.



Figura 3.7: Mastelli e LS-24

Per capire l'origine di tale problema abbiamo quindi eseguito ulteriori misure per valutare il fattore di merito della camera con:

- le logperiodiche senza le double ridge dentro;
- le logperiodiche con le double ridge dentro;
- le double ridge senza le logperiodiche dentro;
- le double ridge con le logperiodiche dentro;
- le double ridge senza le logperiodiche dentro e la porta aperta.

Grazie a queste misure abbiamo capito che il problema dipendeva dalla logperiodica. Di conseguenza, abbiamo sostituito le logperiodiche con le double ridge.

3.3.2 Misure con double ridge

Abbiamo, quindi, effettuato le seguenti misurazioni:

- camera vuota (misura con double ridge) per il riferimento;
- camera con mastello per misurare l'ACS e come riferimento per le misure successive;
- camera con mastello e pannello LS-24.

3.3.3 Misure con acqua

Dopo di ciò abbiamo inserito nel mastello più basso dell'acqua per valutare come la presenza di quest'ultima potesse influenzare il valore dell'ACS. Le misurazioni effettuate sono state le seguenti:

- mastello con 20 L;
- mastello con 30 L;
- mastello con 40 L;
- mastello con 50 L.

3.3.4 Misure con acqua e sale

Infine, per simulare il caso dell'alluvione in cui vi era acqua e fango, abbiamo deciso di aggiungere del sale.



Figura 3.8: Preparazione di una soluzione salina

Nel corso della nostra ricerca, abbiamo utilizzato un codice Python 3.9 grazie al quale, conoscendo la concentrazione della soluzione salina, ci ha permesso di trovare i valori della costante dielettrica, conducibilità e spessore di penetrazione al variare di temperatura, frequenza e normalità. Questi parametri sono stati fondamentali per capire l'interazione delle onde radio con l'acqua.

La costante dielettrica

La costante dielettrica è una grandezza fisica che misura la propensione di un materiale a contrastare l'intensità di un campo elettrico presente al suo interno. In altre parole, indica quanto un mezzo si oppone alla forza elettrica.

Nel vuoto, la costante dielettrica è una vera e propria costante fisica, indicata come ε_0 , con il valore approssimato di $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$. [12]

Quando consideriamo un mezzo materiale, come l'acqua, la costante dielettrica viene indicata con ε_m e dipende dalla sua struttura molecolare e dalle interazioni intermolecolari. L'acqua ha un'elevata costante dielettrica dovuta alla sua struttura di dipolo molecolare. Le cariche positive degli atomi di idrogeno sono disposte dalla stessa parte rispetto alla carica negativa dell'ossigeno, creando un momento elettrico dipolare. Questo contribuisce all'alta costante dielettrica dell'acqua. [13]

La normalità

In chimica, la normalità è una delle misure della concentrazione del soluto in una soluzione e più precisamente indica il numero di equivalenti di un soluto disciolti in un litro di soluzione. Si calcola con la formula:

$$N = \frac{n_{eq}}{V} \quad (3.1)$$

dove n_{eq} indica il numero di equivalenti e V è il volume della soluzione [14]. Attualmente la normalità è un'unità di misura obsoleta. Essa è legata alla molarità, ma nel caso del cloruro di sodio i valori coincidono.

La conducibilità

La conducibilità dell'acqua è un parametro grazie a cui è possibile definire la capacità dell'acqua di condurre la corrente elettrica. Per stabilire il grado di conducibilità, si valuta il contenuto di sali disciolti nell'acqua, che essendo ioni carichi (positivi e negativi) permettono il passaggio di corrente nel liquido stesso. Dunque, la conducibilità è direttamente proporzionale al contenuto di ioni disciolti. L'unità di misura della conducibilità elettrica dell'acqua è espressa in microsiemens per centimetro ad una data temperatura (generalmente 20° C, ovvero $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C), e per determinarla, a basse frequenze, si utilizza un apposito strumento chiamato conducimetro, mentre, ad alte frequenze, è necessario fare delle misure riflettometriche sulla soluzione utilizzando un analizzatore di reti. Quando il livello di sali diminuisce, si abbassa anche la conducibilità. [15]

Spessore di penetrazione

Lo spessore di penetrazione dell'acqua è una grandezza che indica quanto profondamente un'onda elettromagnetica può penetrare all'interno di un materiale, come l'acqua. Questo parametro è importante per comprendere come l'energia elettromagnetica interagisce con il mezzo e per valutare la sua attenuazione.

Nel contesto delle onde elettromagnetiche, lo spessore di penetrazione rappresenta la distanza a cui l'ampiezza dell'onda si riduce a circa il 37% del suo valore iniziale. In altre parole, indica quanto l'energia dell'onda viene assorbita o attenuata mentre attraversa il materiale. Per l'acqua, lo spessore di penetrazione dipende dalla fre-

quenza dell'onda elettromagnetica, dalla conducibilità e dalla temperatura.

Programma Python

```

import numpy as np
import scipy.constants as scp
print("pi =",scp.pi)
print("eps0 =",scp.epsilon_0)
import math
#import cmath
T = 24 #Temperatura in gradi centigradi
N = 0.001 #Normalità della soluzione salina
F = 1e9 #Frequenza in Hz

pi = 3.141592653589793
eps0 = 8.8541878128e-12

def kappa(T,N,F):
    eps0 = scp.epsilon_0
    pi = scp.pi
    if T>=0 and T<=40:
        if N>=0 and N<=3:
            A =1.000-.2551*N+5.151E-2*N**2-6.889E-3*N**3
            B = 1.463E-3*N*T+1.000-.04896*N-.02967*N**2+5.644E-3*N**3
            E0 = 87.74-4.0008E-1*T+9.398E-4*T**2+1.410E-6*T**3
            Tau = (1.1109E-10-3.824E-12*T+6.938E-14*T**2-5.096E-16*T**3)/(2*pi)
            E0tn = E0*A
            Tautn = Tau*B
            Delta = 25-T
            Si25 = N*(10.394-2.3776*N+.68258*N**2-.13538*N**3+1.0086E-2*N**4)
            Si = Si25*(1.000-1.962E-2*Delta+8.08E-5*Delta**2-Delta*N*(3.020E-5+3.922E-5*Delta+N*(1.721E-5-6.584E-6*Delta)))
            D = 1 -2*pi*Tautn*F*1j
            enne = E0tn-Einf + 0*1j
            erre = enne/D+Einf
            Ri2 = Si / (2*pi*F*eps0)
            Epslon_c = erre + Ri2*1j
        else :
            print('La Normalità deve essere compresa tra 0 e 3')
    else :
        print('La Temperatura deve essere compresa tra 0 e 40')
    return Epslon_c

epsc = kappa(T,N,F)
print('Temperatura = ',T, ' gradi centigradi')
print('Normalità = ',N, ' Q/l')
print('Frequenza = ',F*1e-9, ' GHz')
print('Re(Epsc_c) = ',epsc.real)
print('Im(Epsc_c) = ',epsc.imag)

```

Figura 3.9: Codice Python

Capitolo 4

Elaborazione e analisi dei risultati

Nel capitolo precedente abbiamo elencato e spiegato le misurazioni effettuate in camera riverberante.

In questo capitolo, procederemo con l'elaborazione e l'analisi dei risultati ottenuti.

4.1 Elaborazione prime misure

Dalla discussione delle misurazioni di cui abbiamo parlato nel paragrafo 3.3.1, abbiamo sviluppato i seguenti grafici basati sui risultati ottenuti.

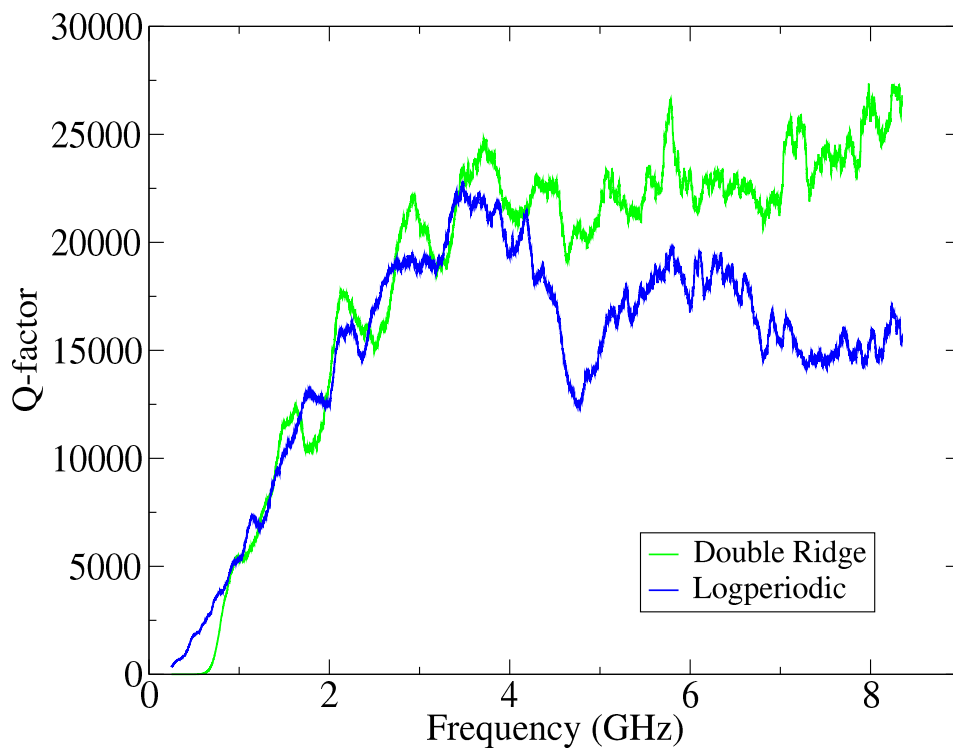


Figura 4.1: Q-factor Double ridge e Loperiodiche

Il grafico 4.1 mostra l'andamento del Q-factor in funzione della frequenza quando all'interno della camera vi sono le antenne double ridge e logperiodiche. Il fattore di merito (Q-factor), come abbiamo già detto, rappresenta il rapporto tra l'energia accumulata nella camera riverberante e l'energia persa in ogni ciclo di riflessione delle pareti della camera.

Analizzando i risultati, però, si nota che in prossimità della frequenza 4.7 GHz il Q-factor si abbassa e in particolare si può affermare che le antenne logperiodiche hanno una tendenza alla risonanza maggiore rispetto alle double ridge. Data la presenza di questo comportamanto anomalo, si è deciso di proseguire con ulteriori misure utili a comprendere la sorgente dell'errore.

Dalle misurazioni successive abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

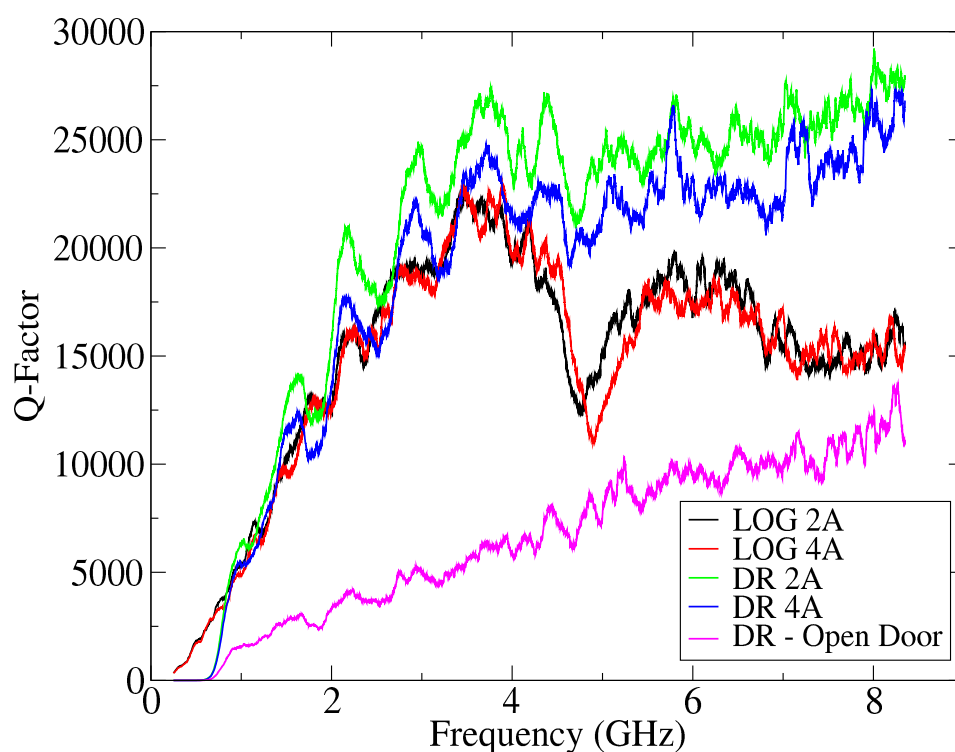


Figura 4.2: Q-factor - antenne

Dal grafico 4.2 emergono i risultati ottenuti dopo aver eseguito le seguenti misurazioni:

- le logperiodiche senza le double ridge dentro (LOG 2A);
- le logperiodiche con le double ridge dentro (LOG 4A);
- le double ridge senza le logperiodiche dentro (DR 2A);

- le double ridge con le logperiodiche dentro (DR 4A);
- le double ridge senza le logperiodiche dentro e la porta aperta (DR - Open Door).

Dal grafico 4.2 emerge l'andamento del Q-factor, il quale, possiamo notare, che presenta delle anomalie in presenza delle logperiodiche.

Per avere un'ulteriore conferma abbiamo analizzato l'andamento dell'ACS in funzione della frequenza ottenendo il seguente risultato:

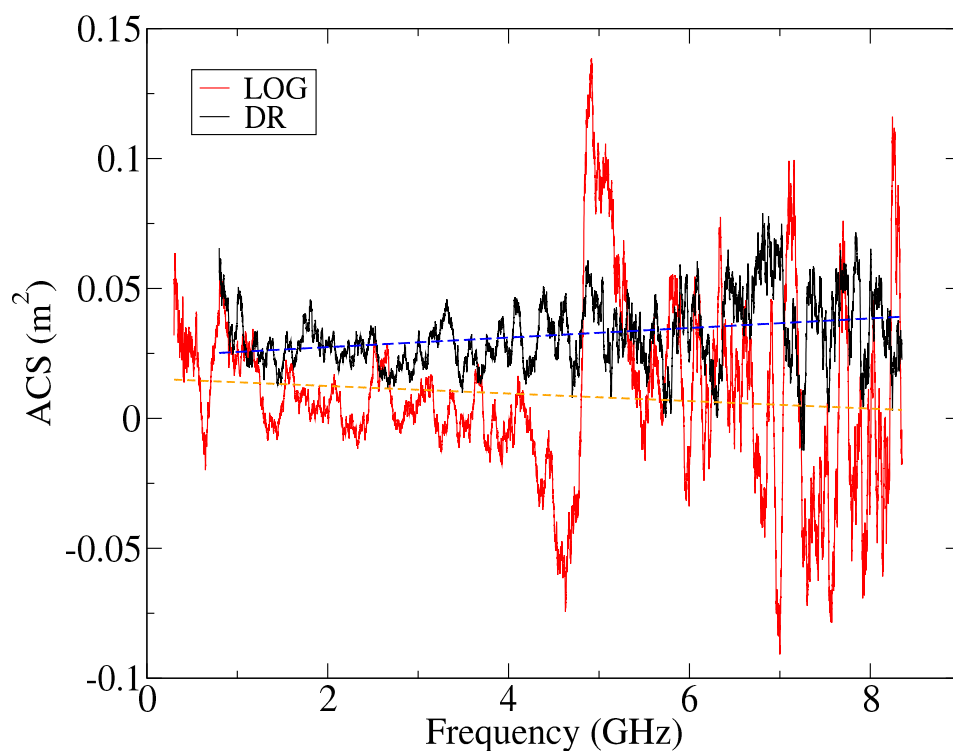


Figura 4.3: Confronto ACS double ridge e logperiodiche

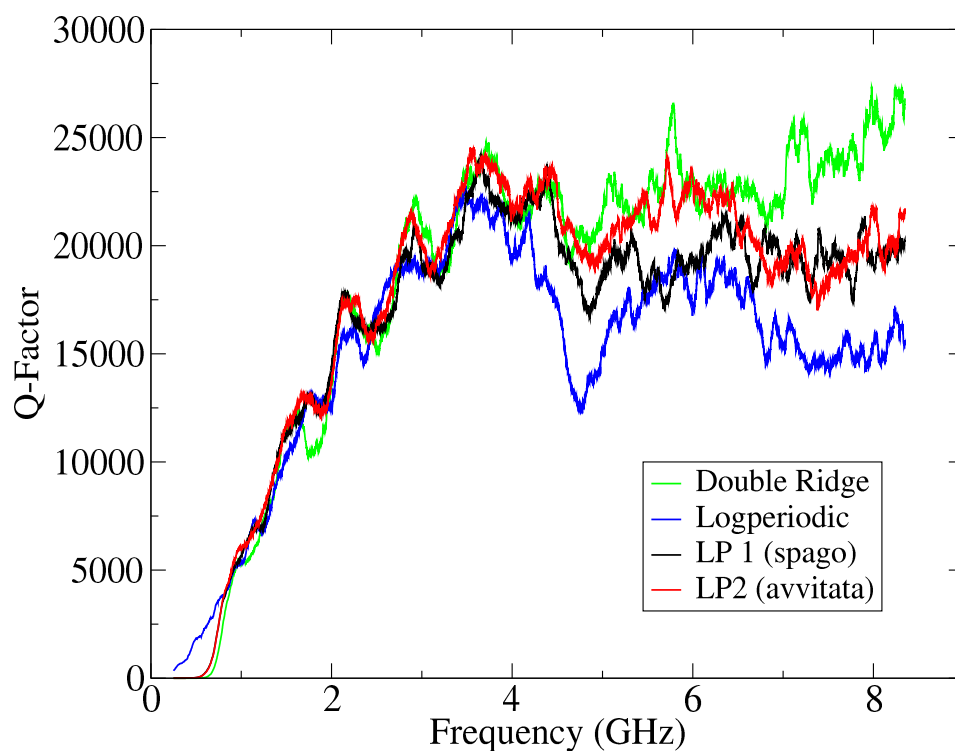


Figura 4.4: Q-factor

Dai risultati ottenuti nei grafici 4.3 e 4.4, in cui abbiamo analizzato sia l'andamento dell'ACS sia il Q-factor, abbiamo notato che l'anomalia era causata dalla logperiodica. Di conseguenza è stato necessario sostituire le logperiodiche con le double ridge avendo il vantaggio che arrivano a frequenze più alte, ma perdendo le frequenze inferiori a 800 MHz.

4.2 Elaborazione misure con double ridge

Prima di procedere con l'utilizzo delle sole double ridge abbiamo effettuato un'ultima verifica ottenendo il seguente risultato:

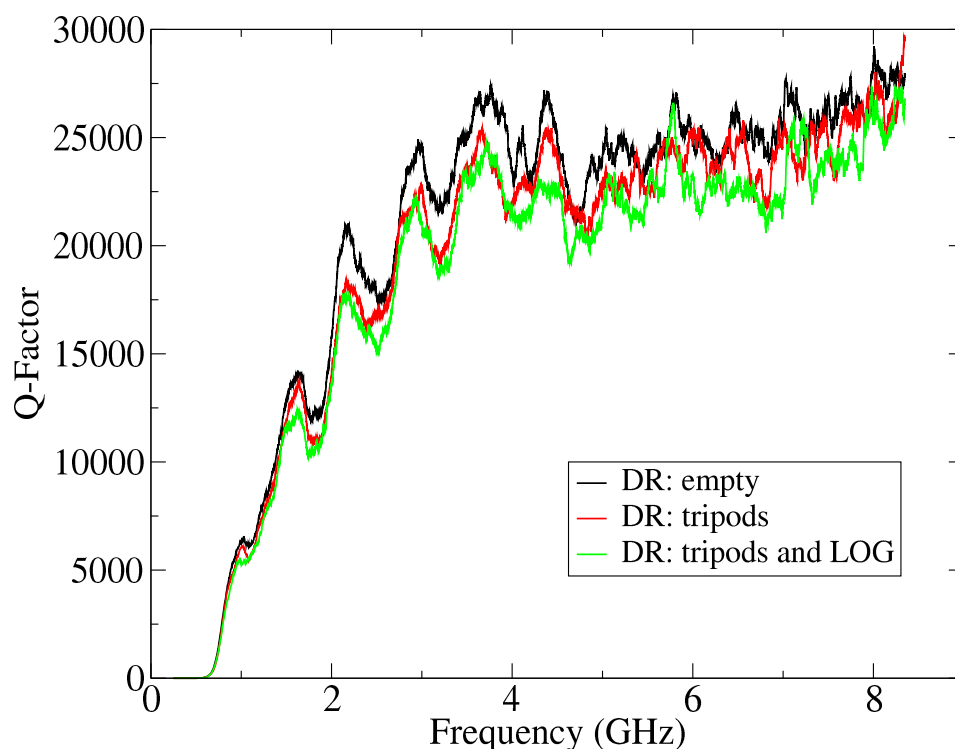


Figura 4.5: Q-factor double ridge

Il grafico 4.5 ci ha permesso di analizzare il Q-factor in presenza delle double ridge in diverse situazioni:

- con la camera vuota e senza treppiedi, in quanto volevamo verificare se la presenza di quest'ultimo potesse influenzare la risonanza;
- con treppiedi;
- insieme alle logperiodiche senza averle collegate.

Dalle seguenti misurazioni abbiamo notato che nonostante ci fossero delle piccole variazioni che ci aspettavamo, a causa dell'aggiunta di uno strumento che aumentava le perdite, i risultati erano sovrapponibili e di conseguenza abbiamo continuato procedendo solo con l'utilizzo delle double ridge.

4.3 Elaborazione misure con acqua

Dopo aver deciso di utilizzare le antenne double ridge abbiamo eseguito le misurazioni con il mastello e l'acqua all'interno di esso.

Inizialmente abbiamo inserito 20 L di acqua e in seguito ne abbiamo aggiunti altri 10 L ottenendo una soluzione complessiva di 30 L. Analizzando gli andamenti del Q-factor e dell'ACS, i grafici ottenuti sono stati i seguenti:

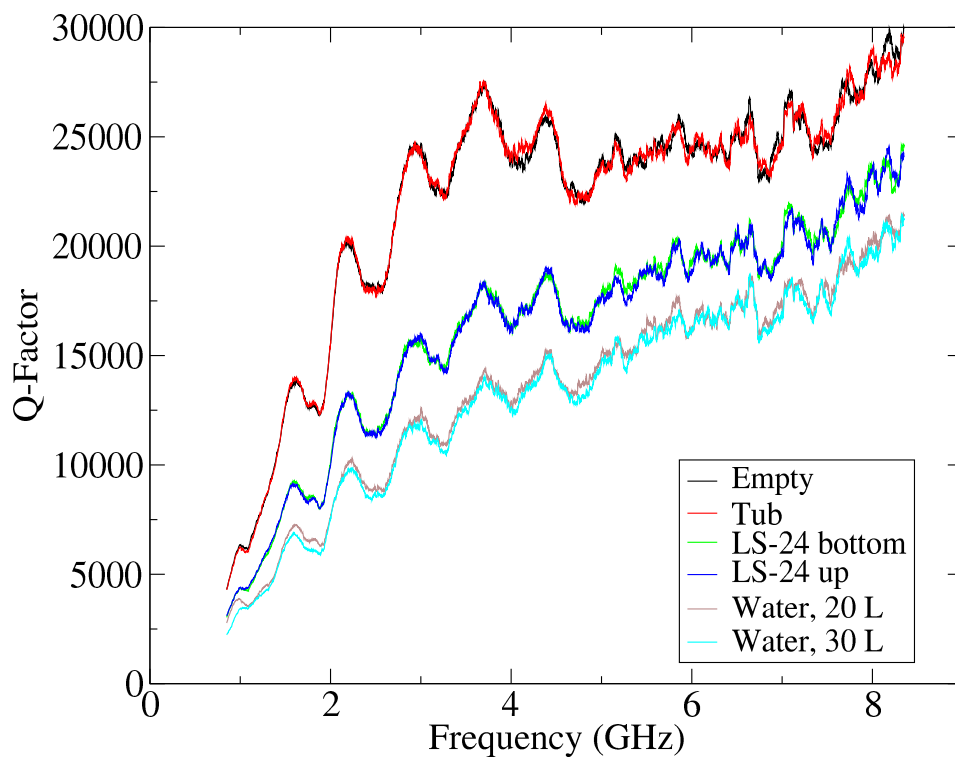


Figura 4.6: Q-factor con 20 L e 30 L

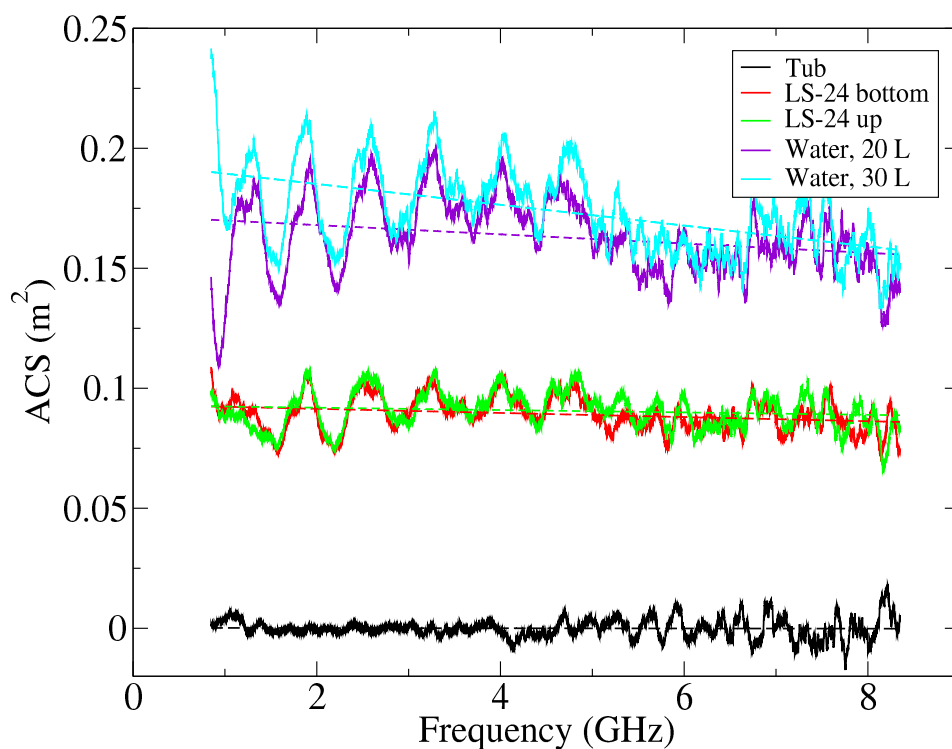


Figura 4.7: ACS con 20 L e 30 L

Si nota chiaramente nel grafico 4.6 come il fattore di merito in presenza dell'acqua sia più basso rispetto a quello che si ha quando la camera è vuota, quando si ha la

sola presenza del mastello e quando si ha LS-24 (utilizzato per effettuare dei confronti con le misure precedenti).

A differenza dell'andamento del Q-factor, l'ACS, come si nota nel grafico 4.7, aumenta notevolmente in presenza dell'acqua. Inoltre dal grafico si evince che l'ACS in presenza della soluzione da 30 L è maggiore rispetto a quello che si ha con 20 L di acqua solo per frequenze inferiori a 5 GHz, infatti per frequenze superiori i valori ottenuti, nonostante siano leggermente più alti, si possono considerare quasi sovrapponibili in quanto a frequenze alte lo spessore di penetrazione diminuisce.

A seguire abbiamo analizzato i valori dell'ACS con una soluzione da 40 L e da 50 L notando un ulteriore aumento come si vede nella figura 4.8.

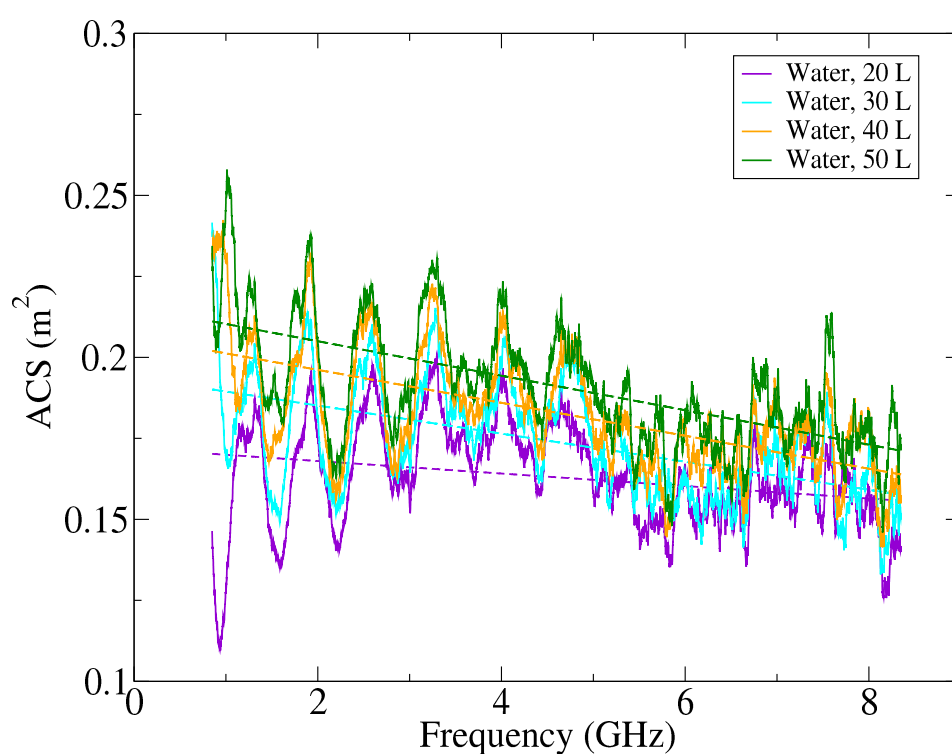


Figura 4.8: ACS 40 L e 50 L

4.4 Elaborazione misure con acqua e sale

Dopo le misurazioni eseguite in presenza di acqua, abbiamo proseguito con quelle effettuate utilizzando una soluzione salina ottenendo i seguenti risultati:

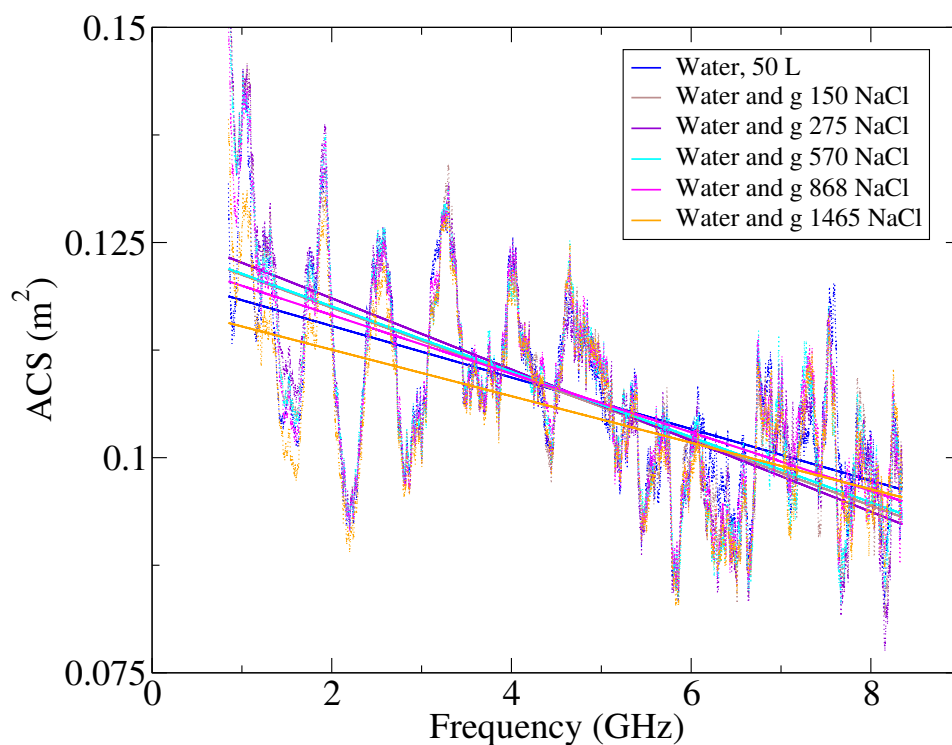


Figura 4.9: ACS con acqua e sale

Dal 4.9 si nota che, a bassa frequenza, l'ACS in assenza di sale è più basso perché l'acqua è meno conduttiva, poi aggiungendo il sale aumenta fino ad arrivare a un massimo in quanto aumentano le perdite. Continuando ad aggiungere sale, però, l'ACS inizia a diminuire in quanto abbiamo più campo riflesso e meno assorbito.

Grazie al codice Python abbiamo, di seguito, calcolato la costante dielettrica relativa, lo spessore di penetrazione e la conducibilità dell'acqua sia al variare di normalità e temperatura mantenendo costante la frequenza ad un valore pari a 1.8 GHz sia al variare di frequenza e temperatura considerando la normalità pari a 0.057 Q/L.

Per quanto riguarda la costante dielettrica relativa abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

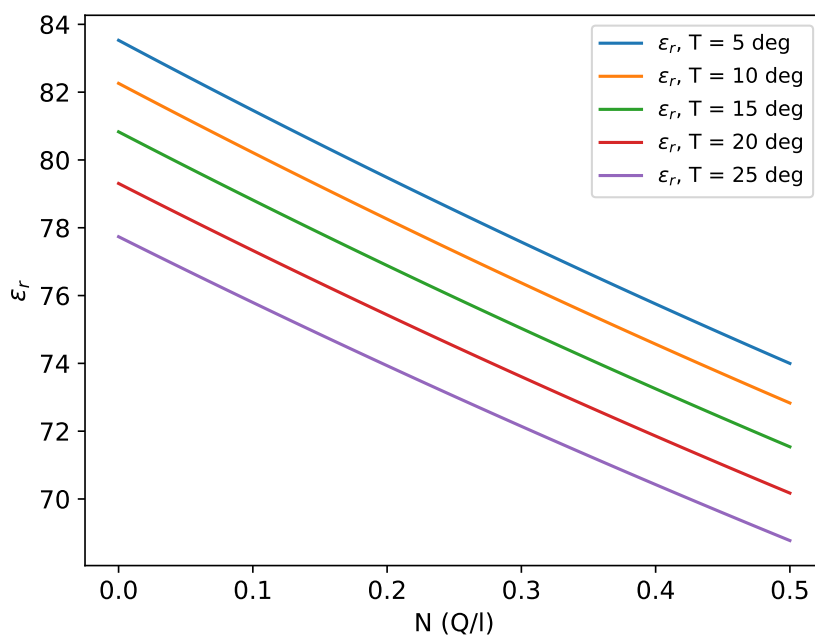


Figura 4.10: Costante dielettrica relativa funzione di N e T

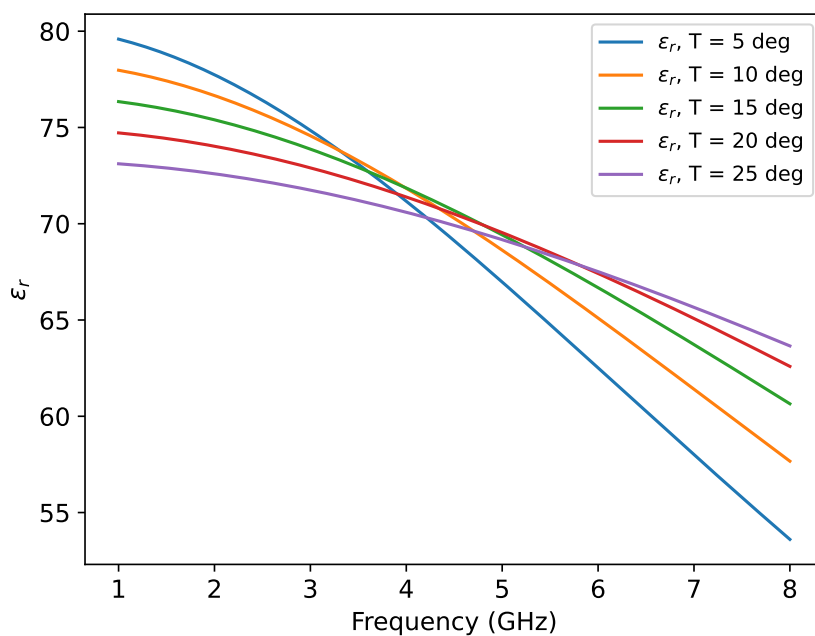


Figura 4.11: Costante dielettrica relativa funzione di f e T

Secondo quanto mostrato nella figura 4.10 si evince che, all'aumentare della temperatura e della normalità, la costante dielettrica relativa diminuisce e ha un andamento lineare decrescente.

Il grafico 4.11, invece, mostra l'andamento della costante dielettrica relativa al variare di frequenza e temperatura e ci permette di osservare che all'aumentare della prima ε_r diminuisce.

Osservando l'andamento dello spessore di penetrazione in funzione di temperatura e normalità si ottiene:

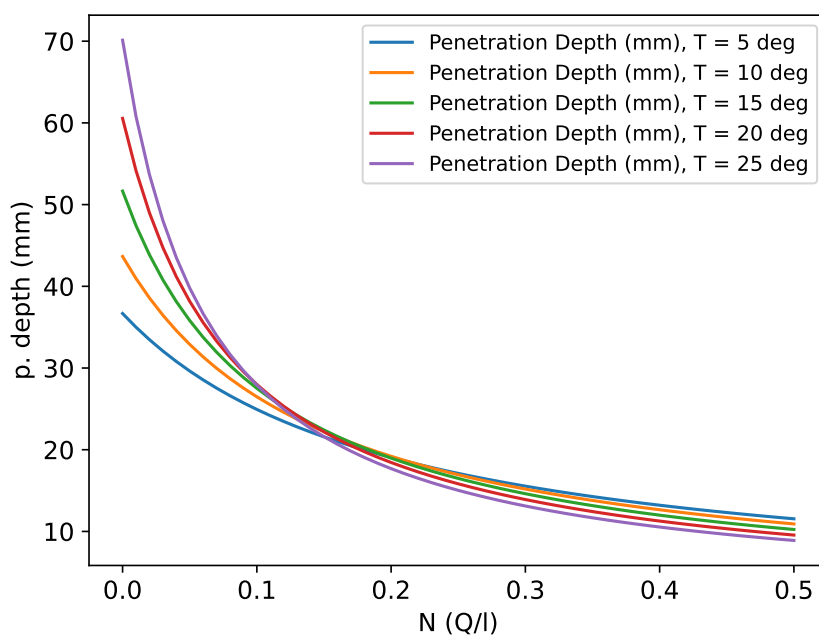


Figura 4.12: Spessore di penetrazione in funzione di N e T

Esaminando i risultati presenti nella figura 4.12 si nota che lo spessore di penetrazione aumenta all'aumentare della temperatura raddoppiando quasi il suo valore quando la temperatura passa da 5°C a 25°C, mentre diminuisce con l'aumentare della normalità stabilizzandosi poi ad un determinato valore.

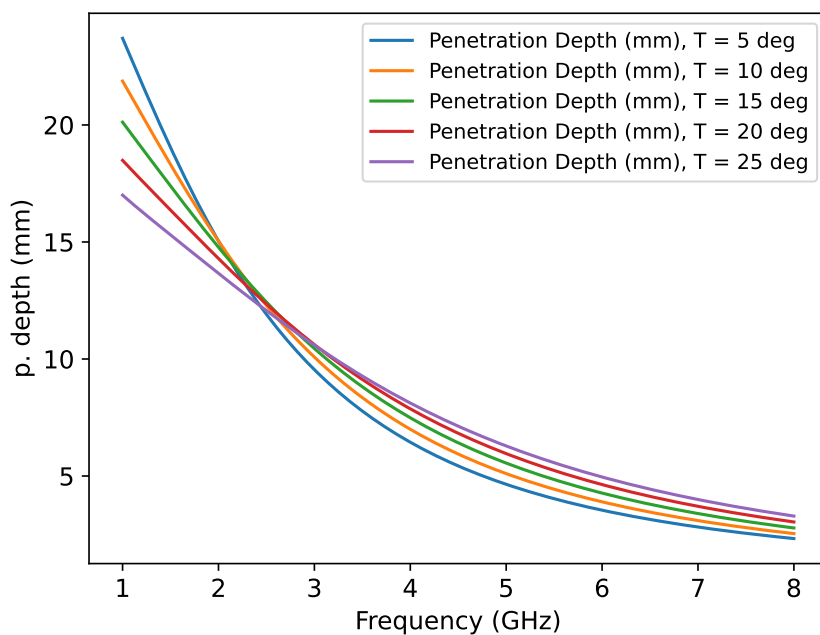


Figura 4.13: Spessore di penetrazione in funzione di f e T

La figura 4.13, invece, riporta l'andamento dello spessore di penetrazione in funzione di frequenza e temperatura. Come illustrato nel grafico 4.13 si può notare che lo spessore di penetrazione, all'aumentare della frequenza, diminuisce per poi stabilizzarsi.

L'andamento della conducibilità al variare di normalità e frequenza è stato, infine, riportato nei seguenti grafici:

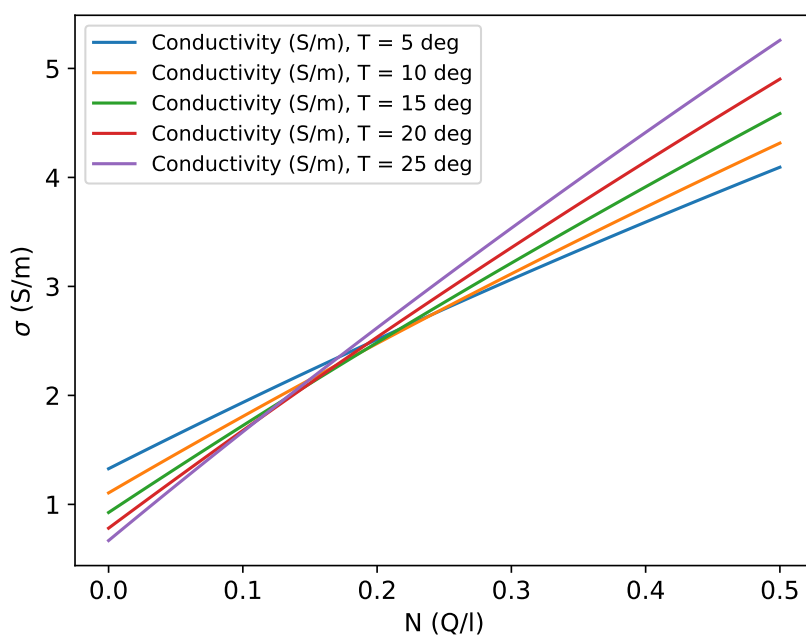


Figura 4.14: Conducibilità in funzione di N e T

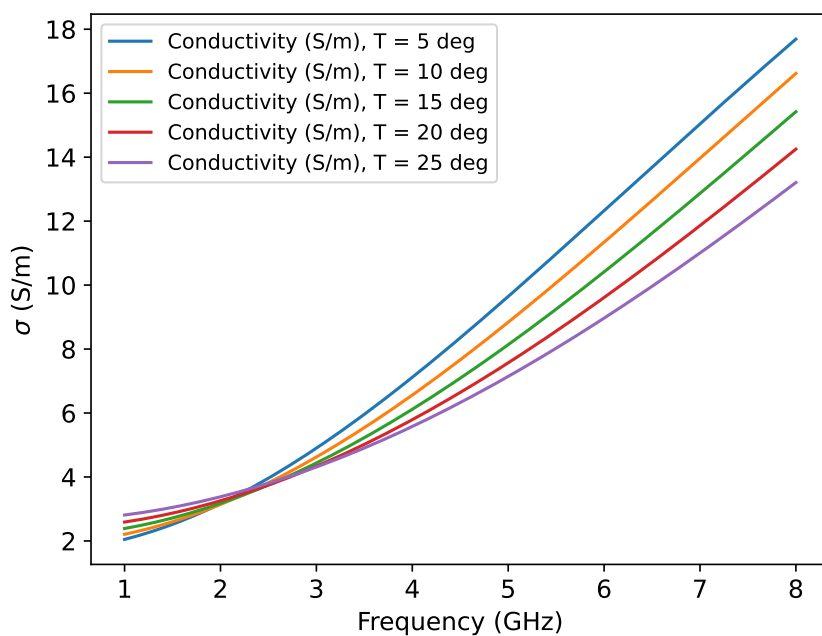


Figura 4.15: Conducibilità in funzione di f e T

Esaminando i risultati riportanti nei grafici 4.14 e 4.15 si nota che la conducibilità aumenta notevolmente sia con l'aumentare della normalità sia con l'aumentare della frequenza.

Ricapitolando:

	N	f
Costante dielettrica relativa	Diminuisce all'aumentare della normalità	Diminuisce all'aumentare della frequenza
Spessore di penetrazione	Diminuisce per poi stabilizzarsi all'aumentare di N	Diminuisce per poi stabilizzarsi all'aumentare di f
Conducibilità	Aumenta all'aumentare di N	Aumenta all'aumentare di f

Tabella 4.1: Tabella riassuntiva

Conclusioni

Nella presente tesi abbiamo studiato l'influenza dell'acqua sulla radiopropagazione, prendendo spunto dall'alluvione che ha colpito l'Emilia Romagna nel mese di maggio 2023.

Attraverso l'uso della camera riverberante, abbiamo simulato le condizioni alluvionali al fine di condurre misurazioni accurate e controllate. Questo approccio ci ha permesso di osservare che la presenza di acqua sul terreno ha un impatto significativo sulla propagazione delle onde radio. In particolare, è emerso che l'acqua e le impurità disciolte in essa, che noi abbiamo simulato con il sale, possono causare un aumento delle perdite del segnale infatti abbiamo notato una variazione del valore dell'ACS.

Questi risultati sono di particolare rilevanza per le applicazioni di comunicazione e per la progettazione di sistemi di emergenza, poichè sottolineano l'importanza di considerare le variabili ambientali nei progetti di comunicazione radio, specialmente in contesti vulnerabili ad eventi climatici estremi.

Bibliografia

- [1] Wikipedia, Spettro elettromagnetico — wikipedia, l'enciclopedia libera (2024).
URL http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Spettro_elettromagnetico&oldid=139290065
- [2] Ulaby, Ravaioli, Fondamenti di campi elettromagnetici, Pearson, 2021.
- [3] StudySmarter, Equazioni di Maxwell: enunciazione e problemi | StudySmarter — studysmarter.it, <https://www.studysmarter.it/spiegazioni/fisica/elettromagnetismo/equazioni-di-maxwell/> (2020).
- [4] NutsandVolt, The Discovery of Radio Waves — nutsvolts.com, <https://www.nutsvolts.com/magazine/article/the-discovery-of-radio-waves> (2019).
- [5] E. Fonzo, Guglielmo Marconi, l'inventore che ha scoperto la radio: la biografia — geopop.it, <https://www.geopop.it/guglielmo-marconi-linventore-che-ha-scoperto-la-radio-la-biografia/> (2024).
- [6] B. Technologies, The Evolution & History of Radio Wave Technology [Infographic] — blog.bliley.com, <https://blog.bliley.com/evolution-of-radio-wave-technology> (2017).
- [7] Fastweb, La storia della rete mobile — fastweb.it, <https://www.fastweb.it/fastweb-plus/digital-magazine/storia-rete-cellulare/#:~:text=La%20rete%20di%20terza%20generazione,a%20partire%20dalla%20rete%20G.> (2023).
- [8] Wikipedia, Radiopropagazione — wikipedia, l'enciclopedia libera (2022).
URL <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiopropagazione&oldid=129932943>

Bibliografia

- [9] Wikipedia, Camera riverberante elettromagnetica — wikipedia, l'enciclopedia libera (2023).
URL http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Camera_riverberante_elettromagnetica&oldid=133606187
- [10] T. Monti, G. Gradoni, F. Moglie, Disinfestazione di Beni Culturali: applicatori, 2016, pp. 217 – 237.
- [11] Wikipedia, Antenna logperiodica — wikipedia, l'enciclopedia libera (2022).
URL http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Antenna_logperiodica&oldid=129034203
- [12] G. Carichino, Costante dielettrica nel vuoto e in un mezzo: spiegazione, formule e valori — youmath.it, <https://www.youmath.it/domande-a-risposte/view/4896-costante-dielettrica-nel-vuoto.html> (2014).
- [13] R. di chimica online, Costante dielettrica acqua — chimica-online.it, <https://www.chimica-online.it/download/costante-dielettrica-acqua.htm> (2016).
- [14] Wikipedia, Normalità (chimica) — wikipedia, l'enciclopedia libera (2023).
URL [http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Normalit%C3%A0_\(chimica\)&oldid=136988956](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Normalit%C3%A0_(chimica)&oldid=136988956)
- [15] A. Sant'Anna, La Conducibilità dell'acqua, spiegazione e valori — santanna.it, <https://www.santanna.it/il-bicchiere-mezzo-pieno/la-conducibilita-dellacqua/> (2023).