

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA

Scuola di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELLA
PROPAGAZIONE IN-VEHICLE A FREQUENZE
SUB-THZ ED FR3

Elaborato in
Campi elettromagnetici

Tesi di Laurea di:
GIOVANNI SPIGOLON

Relatore:
Prof. Ing.
ENRICO MARIA VITUCCI

Correlatore:
Ing.
ELENA BERNARDI

SESSIONE III
ANNO ACCADEMICO 2023–2024

KEYWORDS

Misure veicolari sub thz

Misure veicolari FR3

Penetration loss

Power angle delay profile

Power delay profile

Indice

Introduzione	ix
1 Introduzione teorica e metodologia di misura	1
1.1 Introduzione alle misure veicolari a frequenze Sub-THz e FR3	1
1.2 Setup delle misure e strumentazione utilizzata	2
1.2.1 Utilizzo del VNA	2
1.2.2 Strumentazione misure veicolari a sub-THz	3
1.2.3 Strumentazione misure veicolari ad FR3	4
1.3 Parametro S_{21} e la misura dell'attenuazione	5
1.4 Analisi del canale tramite Power Delay Profile (PDP) e Delay Spread	6
1.5 Power Angle Delay Profile (PADP)	7
2 Elaborazione del segnale per la caratterizzazione del canale: dall'S_{21} al Power Delay Profile	9
2.1 Dal parametro S_{21} alla Channel Frequency Response (CFR) .	9
2.2 Finestratura di Hanning	10
2.3 Zero Padding	11
2.4 FFT Shift e risoluzione temporale	12
2.5 Trasformata inversa di Fourier (IFFT)	12
2.6 Normalizzazione della CIR	13
2.7 Interpretazione della CIR e conversione in distanza	14
2.8 Ottenimento del Power Delay Profile (PDP)	14

3	Descrizione set-up ed analisi misure veicolari	17
3.1	Analisi Delay Spread (DS) e Power Delay Profile (PDP) misure veicolari Outdoor-To-Indoor a sub-THz	19
3.1.1	Set-up con ricevitore nel bagagliaio	19
3.1.2	Set-up con ricevitore sul cruscotto	21
3.1.3	Set-up con ricevitore sul sedile anteriore	24
3.2	Analisi Delay Spread (DS) e Power Delay Profile (PDP) misure veicolari Indoor-To-Indoor a subTHz e FR3.	26
3.2.1	Antenna ricevente(RX) e trasmittente(TX) posta sul pavimento della vettura	26
3.2.2	Antenna ricevente(RX) e trasmittente(TX) posta sul sedile della vettura	31
4	Analisi della selettività in frequenza	35
4.1	Time Gating: definizione e utilità	35
4.2	Selettività in frequenza e analisi del Power Delay Profile (PDP)	36
4.3	Interferenza costruttiva e distruttiva: effetti sulla selettività in frequenza	37
4.4	Analisi su casi reali	37
4.5	Finalità dell'analisi della selettività	41
5	Misure di attenuazione - Penetration Loss	43
5.1	Introduzione alla misura del Penetration Loss	43
5.2	Analisi dell'attenuazione a sub-THz	44
5.3	Considerazioni sul Footprint nelle misure a sub-THz	49
5.4	Analisi dell'attenuazione a FR3	50
5.5	Considerazioni sul Footprint nelle misure ad FR3	52
5.5.1	Geometria caso OLoS da portiera Tesla Model Y	53
5.5.2	Geometria caso OLoS da portiera Seat Leon	54
6	Analisi del Power Angle Delay Profile (PADP): Set-Up e osservazione dei dati	57
	Conclusione	65

INDICE	vii
Bibliografia	68
Elenco delle figure	71
Ringraziamenti	73

Introduzione

L'avvento delle tecnologie di comunicazione avanzate ha spinto la ricerca verso l'esplorazione di nuove bande di frequenza, con l'obiettivo di soddisfare le crescenti richieste di velocità, capacità e affidabilità dei dati. In questo scenario, le frequenze sub-THz e FR3 emergono come aree particolarmente promettenti per le future reti di comunicazione di sesta generazione (6G) [1]. Le frequenze sub-THz, in particolare, sono oggetto di crescente interesse grazie alla loro capacità di offrire larghezze di banda estremamente elevate e migliorare le prestazioni dei sistemi di comunicazione. Questo crescente interesse ha spinto numerosi studi e ricerche volte a caratterizzare il comportamento di queste frequenze in diversi scenari, come evidenziato da vari articoli scientifici. [2] [3] [4]. Tuttavia, la loro elevata frequenza comporta sfide significative, come una maggiore attenuazione del segnale e una minore capacità di penetrazione attraverso gli ostacoli. Questa tesi si propone di analizzare e caratterizzare il comportamento del segnale elettromagnetico a frequenze sub-THz e FR3 su veicoli, con un focus specifico sulla Tesla Model Y e sulla Seat Leon, utilizzando un set-up simile a quello adottato in diversi documenti scientifici per la caratterizzazione del canale [5] [6]. La caratterizzazione del segnale a queste frequenze è cruciale per lo sviluppo delle tecnologie avanzate, come il 6G, che promette di rivoluzionare le comunicazioni future con velocità e capacità senza precedenti. La tesi è strutturata in diversi capitoli per fornire una comprensione approfondita dell'argomento. Nei primi capitoli, verrà fornita una definizione dettagliata dei concetti e delle tecniche fondamentali necessarie per comprendere le misure e le analisi svolte. Questo include la descrizione delle bande di frequenza sub-THz e FR3, nonché delle principali caratteristiche del canale di comunicazione in

contesti veicolari. Successivamente, sarà illustrato il processo di elaborazione del segnale, spiegando le metodologie utilizzate per ottenere e analizzare i dati. Saranno dettagliati i metodi di processing del segnale per calcolare l'attenuazione e il delay spread, ovvero un parametro sintetico che esprime la dispersione temporale del canale radio, calcolato sulla base dei ritardi temporali dei vari cammini di multipath. Tali parametri risultano fondamentali per la valutazione delle prestazioni del sistema di comunicazione. Il capitolo seguente sarà dedicato alla descrizione dei vari scenari di misurazione, mostrando come sono state effettuate le misure in differenti configurazioni di antenne, sia all'interno che all'esterno dei veicoli. Questo capitolo fornirà una panoramica pratica di come i dati sono stati raccolti e quali condizioni sono state testate. Infine, la tesi presenterà i risultati delle misurazioni, con un focus sui valori di attenuazione ottenuti per le diverse componenti della vettura. Questo capitolo offrirà un'analisi dettagliata dei risultati, evidenziando le implicazioni per la progettazione di sistemi di comunicazione avanzati e per le future reti 6G. In sintesi, questa tesi contribuirà significativamente alla comprensione delle caratteristiche del canale di comunicazione in ambienti veicolari e fornirà dati utili per lo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate. L'importanza di questo studio risiede nella necessità di acquisire dati empirici per supportare l'evoluzione delle tecnologie di comunicazione e affrontare le sfide poste dalle frequenze elevate.

Capitolo 1

Introduzione teorica e metodologia di misura

1.1 Introduzione alle misure veicolari a frequenze Sub-THz e FR3

Le comunicazioni wireless stanno rapidamente evolvendo verso frequenze sempre più elevate, come la banda sub-THz e in particolare la banda D tra 110 e 170 GHz e la banda FR3 da 7.125 GHz a 24.25 GHz, per soddisfare le crescenti esigenze di larghezza di banda e di capacità di rete. L'utilizzo di queste frequenze offre notevoli vantaggi in termini di capacità di trasmissione dati, ma presenta anche sfide significative legate alla propagazione del segnale, che diventa più sensibile agli ostacoli e alle riflessioni. Le misure veicolari condotte in questo studio sono volte a caratterizzare il canale radio in questi ambienti, concentrandosi in particolare su due veicoli: una Tesla Model Y e una Seat Leon attraverso due tipologie di misura: 1) In-vehicle (dentro l'automobile) 2) Outdoor-to-indoor, per investigare la penetrazione del segnale radio dall'esterno all'interno del veicolo.

L'idea fondamentale alla base di queste misure è che, per comprendere appieno le prestazioni di un sistema di comunicazione wireless a frequenze così elevate, è essenziale studiare come il segnale si comporta in presenza di un veicolo, che agisce come un complesso ostacolo riflettente e assorbente. La

carrozzeria del veicolo, le finestre, e altri materiali possono influenzare significativamente la propagazione del segnale, causando attenuazioni, riflessioni e diffusione che devono essere accuratamente misurate e modellate.

1.2 Setup delle misure e strumentazione utilizzata

Il setup sperimentale utilizzato per queste misure prevede l'impiego di due antenne, una in trasmissione e una in ricezione, posizionate in varie configurazioni attorno e all'interno del veicolo. La scelta delle antenne dipende dalla banda di frequenza su cui si effettuano le misurazioni, che possono essere a frequenze sub-THz o nella banda FR3, rendendo necessario l'uso di due tipi diversi di antenne.

1.2.1 Utilizzo del VNA

Il cuore del sistema di misura in entrambe le configurazioni è il Vector Network Analyzer (VNA), in particolare il modello Keysight PNA-X Network Analyzer N5242B la cui interfaccia è mostrata nella Fig. 1.1. Questo strumento è in grado di operare su una vasta gamma di frequenze, da 10 MHz fino a 26.5 GHz, con possibilità di estensione a frequenze più alte tramite l'uso di moltiplicatori di frequenza, o frequency extenders, ed è stato utilizzato per caratterizzare il comportamento del segnale attraverso il veicolo. Un Vector Network Analyzer (VNA) è uno strumento utilizzato per analizzare come un segnale elettromagnetico si comporta quando passa attraverso un dispositivo o una rete. Essenzialmente, il VNA invia un segnale a una delle porte del dispositivo sotto test e misura quanto del segnale viene trasmesso attraverso il dispositivo e quanto viene riflesso indietro. Queste misure sono note come parametri S e permettono di capire come il dispositivo modifica il segnale in termini di potenza e fase.

Il VNA è composto da un generatore di segnali che produce onde a frequenze precise e da ricevitori che catturano i segnali trasmessi e riflessi per analizzarli. Per garantire l'accuratezza delle misure, il VNA utilizza tecniche

di calibrazione che correggono eventuali errori introdotti dal sistema stesso. Una volta raccolti i dati, il VNA li elabora e li presenta sotto forma di grafici o tabelle, permettendo di valutare le prestazioni del dispositivo in esame, come ad esempio un'antenna.

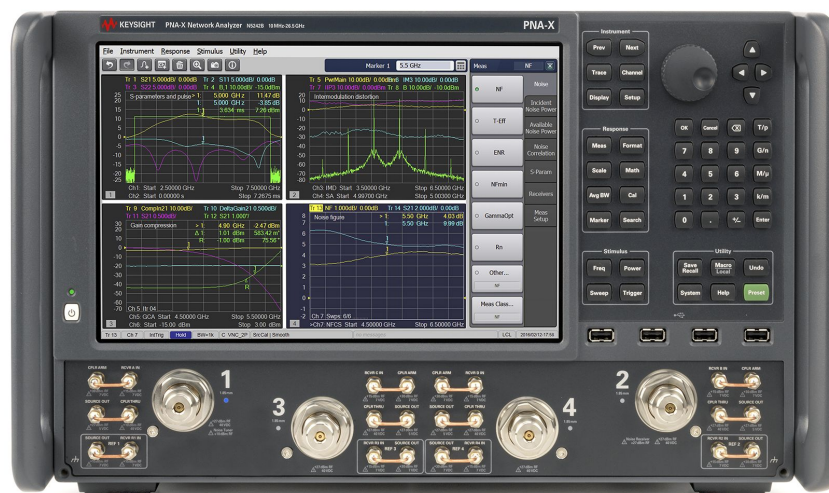


Figura 1.1: Interfaccia del VNA

1.2.2 Strumentazione misure veicolari a sub-THz

Per le misure nella banda sub-THz, che copre frequenze comprese tra 110 e 170 GHz, sono state utilizzate antenne del tipo conical horn WR6.5 prodotte da VDI (Virginia Diodes Inc.). Queste antenne sono note per la loro capacità di operare efficacemente a frequenze molto elevate, offrendo un guadagno elevato e una direttività significativa. Il guadagno di queste antenne può variare tra i 21 e i 25 dB, a seconda delle specifiche di fabbricazione e delle condizioni operative. La loro apertura a forma conica è progettata speci-

camente per ottimizzare le prestazioni a queste frequenze, permettendo di concentrare l'energia del segnale in un fascio stretto. Questa caratteristica riduce la dispersione del segnale e massimizza l'efficienza della trasmissione e della ricezione, rendendole ideali per ambienti in cui è necessario ridurre al minimo l'influenza di segnali esterni e concentrarsi sull'analisi del canale radio attraverso il veicolo. Per operare efficacemente nella banda sub-THz, è stato necessario l'uso di un extender specifico. In questo contesto, l'extender VDI WR6.5 è stato utilizzato per estendere la gamma di frequenze operative del sistema fino alla banda di interesse. Gli extender sono dispositivi critici in questo tipo di misure, poiché i VNA standard, pur essendo strumenti potenti e versatili, sono spesso limitati a frequenze massime inferiori rispetto a quelle richieste per le misurazioni sub-THz. L'extender risolve questo problema, permettendo al VNA di generare e misurare segnali a frequenze molto più elevate, come quelle utilizzate in questo studio. A scopo riassuntivo vengono riportati tutti i parametri e la strumentazione usata per le misure veicolari a sub-THz in Tab. 1.1.

Parameter	Value
VNA	Keysight PNA-X Network Analyzer N5242B
Extenders	VNA'S VDI Extenders WR6.5
Calibration Kit	VDI Type A/ Type B TRL Cal. Kit WR6.5
Antenna type	VDI conical horn WR6.5
Antenna Gain (dBi)	21-25 dBi
Antenna Diameter	10.8 mm
Start – Stop Frequencies	110 - 170 GHz
Bandwidth	60 GHz
Sample Points	1601
Time Domain Resolution	0.0167 ns
Transmitted Power	10 dBm

Tabella 1.1: Parametri strumentazione usata per le misure veicolari a sub-THz.

1.2.3 Strumentazione misure veicolari ad FR3

Per le misure nella banda FR3 è stata utilizzata un'antenna diversa, la horn A.R.R.A MX820. Questa antenna è progettata per operare in modo ottimale in un range di frequenze che va da 8 a 12 GHz, con un guadagno tipico

di circa 15-18 dBi. Sebbene lavori a frequenze inferiori rispetto alla banda sub-THz, l'antenna horn A.R.R.A MX820 è comunque adatta per le misure nella banda FR3 grazie alla sua capacità di offrire un buon compromesso tra larghezza di banda e direttività. Queste caratteristiche consentono di effettuare misurazioni accurate senza la necessità di extender, poiché le frequenze coperte dal VNA rientrano ampiamente nella gamma operativa dell'antenna. A scopo riassuntivo viene proposto il seguente grafico che riporta i parametri della strumentazione ad FR3.

Parameter	Value
VNA	Keysight PNA-X Network Analyzer N5242B
Calibration Kit	Keysight 80533D 3.5 mm
Antenna type	Horn A.R.R.A MX820
Antenna Gain (dBi)	20 dBi
Start – Stop Frequencies	8 - 12 GHz
Bandwidth B	4 GHz
Sample Points	915
Time Domain Resolution	0.25 ns
Transmitted Power	2 dBm

Tabella 1.2: Parametri strumentazione usata per le misure veicolari a FR3.

1.3 Parametro S21 e la misura dell'attenuazione

Tra i parametri S, detti parametri di scattering misurati dal VNA, il parametro S21 è di particolare importanza. S21 è definito come il rapporto tra l'intensità del segnale che esce dalla porta 2 del sistema e il segnale che entra nella porta 1. In altre parole, rappresenta la frazione di potenza trasmessa da una porta all'altra ed è generalmente espresso come numero complesso dove vi è presente la componente di ampiezza e di fase. Facendo, infatti, il valore assoluto al quadrato di questo segnale si può ricavare il rapporto tra potenza ricevuta e potenza trasmessa in dB. Questo parametro è essenziale per comprendere come il segnale si propaga attraverso il veicolo e per quantificare le perdite dovute all'attenuazione.

L'attenuazione misurata tramite S21 ci permette di valutare quanto segnale viene perso quando attraversa il veicolo. Ad esempio, un valore di S21 pari a -3 dB indica che la metà della potenza del segnale è stata persa durante la trasmissione. In un ambiente veicolare, le cause di questa attenuazione possono essere molteplici: riflessioni dalle superfici metalliche, assorbimento da parte dei materiali non conduttivi e dispersione del segnale. Misurare S21 in diversi scenari di configurazione delle antenne e posizionamento del veicolo permette di costruire un quadro dettagliato di come il segnale si comporta in condizioni reali.

Queste misure sono state effettuate in vari ambienti, ponendo le antenne sia all'interno che all'esterno della vettura per simulare diverse condizioni operative. Le configurazioni delle antenne sono state variate sistematicamente per studiare l'effetto di diverse posizioni relative e angolazioni rispetto al veicolo, con l'obiettivo di caratterizzare a fondo il comportamento del canale radio in queste condizioni.

1.4 Analisi del canale tramite Power Delay Profile (PDP) e Delay Spread

Per una comprensione più dettagliata del comportamento del segnale nel tempo, è stato utilizzato il Power Delay Profile (PDP). Il PDP è una rappresentazione grafica che mostra come la potenza del segnale ricevuto varia nel tempo rispetto al segnale diretto. Questa analisi è particolarmente utile in ambienti complessi come quelli veicolari, dove il segnale può seguire molteplici cammini prima di raggiungere l'antenna ricevente. Questi cammini multipli sono spesso il risultato di riflessioni, diffrazioni e scattering dovuti alla presenza del veicolo e degli oggetti circostanti.

Il PDP permette di identificare questi cammini multipli e di quantificare la potenza del segnale associata a ciascun cammino. Visualizzando il PDP, possiamo determinare quali cammini contribuiscono maggiormente alla ricezione del segnale e quali invece introducono ritardi significativi, potenzialmente degradando la qualità della comunicazione.

Un altro parametro cruciale derivato dal PDP è il **Delay Spread**. Il Delay Spread è una misura della dispersione temporale del segnale ed è definito come la differenza tra il tempo di arrivo del primo e dell'ultimo segnale significativo. Questo parametro fornisce informazioni importanti sulla larghezza temporale del segnale ricevuto e sulla sua capacità di essere decodificato correttamente. In pratica, un elevato Delay Spread può indicare che il segnale è fortemente disperso nel tempo, il che può portare a una degradazione della qualità della comunicazione.

1.5 Power Angle Delay Profile (PADP)

In un set-up specifico, per studiare la variazione angolare del segnale ricevuto in funzione della posizione dell'antenna ricevente, è stata utilizzato un rotatore meccanico in grado di far ruotare l'antenna in ricezione di 360° con step angolari di 5° . Questa metodologia di misura ha permesso di ottenere dati per costruire un **Power Angle Delay Profile (PADP)**, ovvero una rappresentazione tridimensionale o bidimensionale che combina l'informazione del ritardo temporale e della direzione o angolo di arrivo di un determinato cammino con la sua intensità, o potenza. Il PADP, infatti, mostra come la potenza del segnale varia non solo nel tempo, ma anche in funzione dell'angolo di arrivo al ricevitore.

Il PADP è particolarmente utile per studiare i canali radio in ambienti veicolari complessi, dove il segnale può essere ricevuto da molte direzioni diverse a causa delle riflessioni sulle superfici del veicolo. Questa analisi permette di comprendere meglio come il segnale si propaga intorno al veicolo e quali direzioni contribuiscono maggiormente alla ricezione del segnale. Questo è fondamentale per lo sviluppo di tecnologie di antenna e di configurazioni di rete che possano ottimizzare la ricezione del segnale in ambienti dinamici come quello veicolare.

Capitolo 2

Elaborazione del segnale per la caratterizzazione del canale: dall'S21 al Power Delay Profile

Nell'ambito della caratterizzazione del canale di comunicazione, è comune analizzare il parametro S_{21} ottenuto tramite un analizzatore di rete vettoriale (VNA) per ricavare la Channel Frequency Response (CFR). Successivamente, si procede a ottenere la Channel Impulse Response (CIR) ed il Power Delay Profile (PDP). Questo processo è essenziale per comprendere le caratteristiche del canale e ottimizzare le prestazioni dei sistemi di comunicazione. Di seguito viene descritto in dettaglio il flusso di elaborazione del segnale, con spiegazioni sui passaggi e le tecniche utilizzate.

2.1 Dal parametro S_{21} alla Channel Frequency Response (CFR)

Il parametro S_{21} rappresenta la risposta in frequenza del canale, ossia come il canale modifica l'ampiezza e la fase di un segnale che viaggia tra due porte (ad esempio, dal trasmettitore al ricevitore). Questo parametro viene ottenuto misurando la quantità di segnale trasmesso che attraversa il canale e raggiunge il ricevitore. Matematicamente, $S_{21}(f)$ è un numero complesso e

può essere espresso come:

$$[S_{21}(f) = |S_{21}(f)| e^{j\theta(f)}] \quad (2.1)$$

dove $|S_{21}(f)|$ indica l'ampiezza del segnale e $\theta(f)$ rappresenta lo sfasamento introdotto dal canale. La Channel frequencies Response (CFR), che rappresenta la potenza del segnale trasmesso attraverso il canale in funzione della frequenza è, quindi, essenziale per analizzare le proprietà del canale e per i successivi passaggi di elaborazione del segnale. La CFR è un segnale complesso rappresentato come segue:

$$H(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)} \quad (2.2)$$

dove $H(f)$ è l'ampiezza e $\theta(f)$ la fase. Per ottenere l'ampiezza della la Channel Frequency Response (CFR), indicata da $|H(f)|$, si utilizza la relazione:

$$|H(f)| = |S_{21}(f)|^2 \quad (2.3)$$

2.2 Finestratura di Hanning

La finestratura di Hanning viene applicata alla CFR prima di procedere con ulteriori elaborazioni. Questo passaggio è cruciale per migliorare la qualità della risposta impulsiva che sarà ottenuta successivamente. La finestratura serve a ridurre gli effetti indesiderati associati ai bordi della finestra di osservazione. In particolare, la finestratura di Hanning aiuta ad abbassare i lobi laterali che si possono generare ai bordi della finestra, riducendo la discontinuità tra l'inizio e la fine della sequenza di dati. Questo processo, noto come raccordo del segnale, consente di ottenere una transizione più fluida e continua ai bordi della finestra, migliorando la rappresentazione complessiva del segnale.

La funzione di finestra di Hanning è definita come:

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right) \quad (2.4)$$

dove N è il numero totale di campioni e n varia da 0 a $N-1$. L'applicazione di questa finestra modula i dati della CFR, riducendo l'impatto dei lobi secondari e migliorando la capacità di distinguere tra i diversi percorsi multipath nel dominio del tempo.

2.3 Zero Padding

Dopo aver applicato la finestra di Hanning, si procede con l'aggiunta di zero padding alla CFR. Lo zero padding consiste nell'aggiungere zeri all'inizio e alla fine della sequenza di campioni della CFR, aumentando così il numero totale di campioni. Questo procedimento non altera l'informazione contenuta nel segnale, ma migliora la risoluzione della trasformata inversa di Fourier che verrà applicata successivamente.

I principali vantaggi dello zero padding sono:

- **Miglioramento della risoluzione temporale:** Aumentando il numero di campioni, si ottiene una risoluzione più alta nella rappresentazione della risposta impulsiva nel dominio del tempo. Questo permette di distinguere meglio tra percorsi multipath con ritardi molto ravvicinati.
- **Riduzione degli effetti di troncamento:** Aggiungendo zeri, la sequenza di dati diventa più adatta all'elaborazione con la trasformata di Fourier, riducendo gli effetti indesiderati legati al troncamento del segnale e migliorando la qualità complessiva della risposta temporale ottenuta.

Il numero totale di campioni dopo lo zero padding diventa:

$$N_{\text{totale}} = N_{\text{sample}} + 2 \times n_{\text{zeri}}$$

dove N_{sample} è il numero di campioni originali (1601 nel presente caso). Questo incremento del numero di campioni migliora la risoluzione della CIR ottenuta e consente una rappresentazione più precisa dei ritardi temporali nel canale.

2.4 FFT Shift e risoluzione temporale

La funzione `fftshift` di MATLAB viene applicata alla CFR zero-padded per riordinare i risultati da mandare in ingresso alla trasformata di Fourier inversa. Questo passaggio è importante per interpretare correttamente i dati, soprattutto quando si analizzano segnali che includono componenti sia positive che negative di frequenza. La `fftshift`, in particolare, viene usata per realizzare l'equivalente passa basso del segnale analizzato, in modo tale che quando poi si passa nel dominio del tempo il segnale preso in ingresso dalla trasformata inversa di Fourier sia costruito in maniera corretta.

Per le misure veicolari, oggetto di questo elaborato, la banda risultante per la CFR sarà di 60 GHz nella banda D (110 GHz - 170 GHz) e di 4 GHz nella banda X (8 GHz - 12 GHz). La risoluzione temporale Δt è data da:

$$\Delta t = \frac{1}{\text{BW}} \quad (2.5)$$

dove BW è la larghezza di banda, cioè 60 GHz o 4 GHz a seconda del caso. La risoluzione temporale indica il minimo intervallo di tempo che può essere distinto nella CIR, influenzando la capacità di risolvere diversi percorsi multipath nel canale.

2.5 Trasformata inversa di Fourier (IFFT)

Un passaggio fondamentale nel processo di elaborazione è l'applicazione della Trasformata Inversa di Fourier (IFFT) alla CFR finestrata e zero-padded. La IFFT è utilizzata per convertire i dati dal dominio delle frequenze al dominio del tempo, permettendo così di ottenere la Channel Impulse Response (CIR).

Matematicamente, la IFFT è definita come:

$$h(t) = \frac{1}{N_{\text{totale}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{totale}}-1} H(f_k) e^{j2\pi f_k t} \quad (2.6)$$

dove $H(f_k)$ rappresenta i campioni della CFR a diverse frequenze f_k .

L'applicazione della IFFT è essenziale poiché consente di determinare come il segnale si disperde nel tempo dopo aver attraversato il canale. La CIR risultante fornisce una rappresentazione temporale diretta di tutti i percorsi multipath e dei rispettivi ritardi. Questo è particolarmente utile in scenari wireless, dove il segnale trasmesso può arrivare al ricevitore attraverso percorsi multipli con diversi ritardi.

2.6 Normalizzazione della CIR

Dopo aver ottenuto la CIR tramite la IFFT, è necessario applicare un fattore di normalizzazione per compensare l'effetto dell'aggiunta di campioni tramite lo zero padding. Questo fattore di normalizzazione è dato da:

$$h(t) = h(t) \times \frac{N_{\text{totale}}}{N_{\text{sample}}}$$

Questa operazione garantisce che l'energia totale del segnale, dopo l'espansione in zero padding, sia coerente con quella del segnale originale. In altre parole, il fattore di normalizzazione corregge l'ampiezza della CIR per riflettere accuratamente l'informazione energetica del segnale iniziale.

2.7 Interpretazione della CIR e conversione in distanza

La CIR ottenuta può essere interpretata sia in funzione del tempo che della distanza. L'intervallo temporale T su cui la CIR si estende è dato da:

$$T = \frac{1}{\Delta f} \quad (2.7)$$

dove $\Delta f = \frac{BW}{N_{\text{sample}}}$ è la risoluzione in frequenza. Moltiplicando T per la velocità della luce $c = 3 \times 10^8$ m/s, si ottiene la distanza massima che il segnale può aver percorso, permettendo così di rappresentare la CIR in termini di distanza. Questo consente di visualizzare la CIR in modo più concreto, associando i ritardi temporali a distanze fisiche.

2.8 Ottenimento del Power Delay Profile (PDP)

L'ultimo passo nell'elaborazione consiste nell'ottenere il *Power Delay Profile* (PDP), che rappresenta la distribuzione dell'energia del segnale in funzione del ritardo temporale. Il PDP è calcolato come il modulo quadro della CIR:

$$\text{PDP}(t) = |h(t)|^2 \quad (2.8)$$

Per ottenere il *Power Delay Profile* normalizzato, utile per confrontare diversi canali indipendentemente dalla potenza assoluta del segnale, si divide il modulo quadro della CIR per l'integrale della potenza del segnale ricevuto nel dominio del tempo:

$$p(t) = \frac{|h(t)|^2}{\int |h(t)|^2 dt} \quad (2.9)$$

dove:

- $p(t)$ rappresenta il *Power Delay Profile* normalizzato,

- $|h(t)|^2$ è il modulo quadro della risposta impulsiva del canale al tempo t ;
- $\int |h(t)|^2 dt$ è l'integrale della potenza del segnale ricevuto nel dominio del tempo, usato per la normalizzazione.

Il PDP fornisce una misura della potenza del segnale ricevuto in funzione del ritardo e può essere rappresentato sia in scala lineare che logaritmica. La rappresentazione logaritmica si ottiene applicando:

$$\text{PDP}_{\text{dBW}}(t) = 20 \log_{10} (|h(t)|^2) \quad (2.10)$$

Questa conversione in dBW è utile per visualizzare e confrontare le potenze relative in modo più intuitivo, specialmente in scenari con ampia variazione di potenza.

Capitolo 3

Descrizione set-up ed analisi misure veicolari

In questa sezione vengono presentati i vari set-up sperimentali analizzati per le misure veicolari. Per ogni set-up vengono svolte misure considerando differenti configurazioni, descritte in seguito. Ogni configurazione viene descritta attraverso uno schema visivo che illustra l'assetto di posizionamento, all'interno ed all'esterno del veicolo, del trasmettitore (Tx) e del ricevitore (Rx). I risultati presentati in questo capitolo riguardano, in particolare, l'analisi del Delay Spread (DS) e l'analisi del Power Delay Profile (PDP), per differenti set-up e differenti configurazioni. Per valutare il DS è stata utilizzata la seguente formula:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\langle \tau^2 \rangle - \langle \tau \rangle^2}$$

dove:

- σ_{τ} è il delay spread,
- $\langle \tau^2 \rangle$ è il valore medio del quadrato del ritardo,
- $\langle \tau \rangle$ è il valore medio del ritardo.

Nell'analisi del delay spread, è stata implementata una soglia di rumore al di sotto della quale i segnali sono stati esclusi dal calcolo. Questo processo

è fondamentale perché il rumore di fondo può distorcere significativamente i risultati del delay spread. Infatti, segnali con intensità ridotta, dominati dal rumore, possono compromettere la precisione della misura se non vengono filtrati adeguatamente. Applicare una soglia consente di escludere questi segnali meno significativi, garantendo che solo le componenti del segnale chiaramente identificabili vengano considerate, migliorando così l'affidabilità e la precisione della valutazione del delay spread.

Per quanto riguarda invece il calcolo della Power Delay Profile (PDP), è stato utilizzato il processing descritto nel capitolo 2.8.

Per ciascun set-up, sono fornite le seguenti informazioni:

- **Schema del Set-Up:** Un diagramma che mostra la disposizione dei componenti e la configurazione sperimentale, evidenziando l'allineamento del Tx e del Rx.
 - **Tabella della distanza e del valore del picco:** Una tabella che riassume la distanza del picco massimo di potenza e il suo valore, ottenuto nel grafico del Power Delay Profile (PDP), fornendo una panoramica delle performance di ciascun set-up.
 - **Tabella dell'ampiezza di delay (Delay Spread):** Un riepilogo dei valori di ampiezza di delay spread calcolati per ogni configurazione, che descrive la dispersione temporale dei segnali ricevuti.
 - **Grafico PDP:** Un grafico tridimensionale che illustra il Power Delay Profile (PDP) per ciascun set-up, mostrando come varia la risposta del sistema in funzione del tempo di ritardo e del numero di sotto-bande. Il grafico del PDP per le misure a frequenze sub-THz è suddiviso in 4 sotto-bande, mentre per le misure a frequenze FR3 è suddiviso in 3 sotto-bande, come mostrato nella tabella seguente:
-

Frequenza	Numero di sotto-bande	Range di frequenza (GHz)
sub-THz	Sotto-banda 1	110 - 125
	Sotto-banda 2	125 - 140
	Sotto-banda 3	140 - 155
	Sotto-banda 4	155 - 170
FR3	Sotto-banda 1	8 - 9.3
	Sotto-banda 2	9.3 - 10.6
	Sotto-banda 3	10.6 - 12

Tabella 3.1: Suddivisione delle sotto-bande per le misure a frequenze sub-THz e FR3.

3.1 Analisi Delay Spread (DS) e Power Delay Profile (PDP) misure veicolari Outdoor-To-Indoor a sub-THz

3.1.1 Set-up con ricevitore nel bagagliaio

Una tipologia di misura Outdoor-To-Indoor riguarda il Tx posizionato di fronte al cofano del veicolo, mentre il Rx è posizionato all'interno del cofano. Infatti, il cofano dell'auto Tesla model Y è dotato di uno scompartimento anteriore dove è stato possibile inserire il ricevitore Rx. In questo set-up, mostrato in Fig.3.1, l'altezza del Tx è di circa 0.9m, mentre la distanza tra Tx e Rx è di circa 1m. Le due configurazioni prese in considerazione per questo set-up sono le seguenti:

- Tx è allineato con il Rx ed il cofano è aperto (*Configurazione 1A*);
- Tx è allineato con il Rx ed il cofano è chiuso (*Configurazione 2A*);.

Com'è possibile osservare in Tab 3.2 la distanza media del picco è compatibile con la distanza effettiva tra trasmettitore e ricevitore, con valori del picco medio inferiore nel caso di cofano chiuso, come ci si aspetterebbe. Inoltre nel Tab 3.3 si osserva un incremento del valore di delay spread nello scenario con cofano chiuso. Di fatto quest'ultimo agisce come una superficie riflettente che introduce ulteriori riflessioni e rifrazioni del segnale. Quando

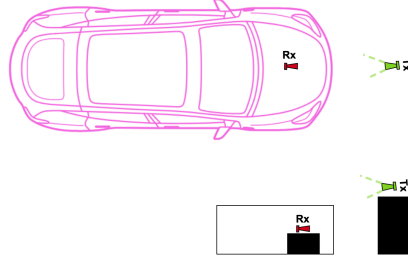


Figura 3.1: Rappresentazione schematica del set-up oggetto delle configurazioni 1A e 2A, in cui il Tx si trova di fronte al veicolo e il Rx all'interno dello scompartimento presente nel cofano.

Set-up	Distanza Media Picco [m]	Valore Medio Picco [dB]
Fig. 3.1 Config. 1A	1.11 m	-50.7902
Fig. 3.1 Config. 2A	1.12 m	-63.7629

Tabella 3.2: Valori della distanza media del picco e valori del picco per le configurazioni mostrate in Fig. 3.1.

Delay Spread (DS) [ns] set-up Fig.3.1		
N° sub-Band	Config. 1A	Config. 2A
1	0.24166	1.0829
2	0.47138	1.2983
3	0.59049	1.1429
4	0.51161	0.70693
5	0.36653	0.99902
6	0.44962	1.4346
7	0.18146	1.8817
8	0.35568	1.1821
9	0.78809	2.4441
10	0.16450	4.5637

Tabella 3.3: Tabella con i valori di delay spread per diverse configurazioni del set-up in Fig.3.1 a 110-170 GHz: configurazione 1A con cofano aperto con soglia di rumore -83 dB, configurazione 2A cofano chiuso con soglia di rumore -93 dB.

il cofano è chiuso, il segnale può rimbalzare più volte tra le varie superfici interne del veicolo, come il cofano stesso e altre parti metalliche, creando percorsi multipli con differenti ritardi temporali.

3.1.2 Set-up con ricevitore sul cruscotto

Una tipologia di misura outdoor-To-Indoor prevede che l'antenna trasmittente (Tx) sia posizionata all'esterno del veicolo, davanti al cofano, mentre l'antenna ricevente (Rx) si trovi all'interno, nel cruscotto. In questa configurazione, entrambe le antenne sono a un'altezza di 1,11 metri, e la distanza tra Tx e Rx è di circa 1,5 metri. In un secondo scenario, l'antenna trasmittente (Tx) è posizionata lateralmente rispetto al veicolo, mentre l'antenna ricevente (Rx) rimane all'interno, nel cruscotto. Qui, le antenne hanno un'altezza di 1,08 metri ciascuna, con una distanza tra Tx e Rx di circa 2,2 metri. L'obiettivo è di confrontare le misure di propagazione del segnale in due diverse posizioni dell'antenna esterna: una davanti al cofano e una sul lato del veicolo. Le configurazioni considerate per questo scenario sono:

- Tx all'esterno, davanti all'auto e allineato con Rx. Rx sul cruscotto (*configurazione 1B*);
- Tx all'esterno, davanti all'auto. Rx sul cruscotto e ruotato di circa 90° (verso lo specchietto) sul lato destro (*configurazione 2B*);
- Tx all'esterno, situato lateralmente all'auto e allineato con Rx. Rx e Tx allineati con la porta chiusa (*configurazione 3B*);

Nel Tab. 3.4 le distanze del picco massimo sono compatibili con le misure reali tra le antenne, così come il valor medio del picco risulta giustamente inferiore nello scenario 2B, poichè le antenne non si guardano, mentre si osserva una maggiore attenuazione nello scenario 3B rispetto a 1B per la presenza della portiera. Si osservano invece nel Tab 3.5 i valori di delay spread nelle tre configurazioni.

In particolare lo scenario 2B presenta un ritardo maggiore nella trasmissione del segnale legata all'orientamento delle antenne che non sono in linea

di vista, a differenza degli altri due scenari nei quali i valori di delay spread sono ridotti. Il grafico seguente viene inserito per mostrare il *Power Delay Profile* nelle configurazioni 1B e 2B, che evidenzia un valore di picco di potenza inferiore nel caso di antenna ricevente orientata in quadratura con l'antenna trasmittente rispetto al caso in cui le antenna si guardano.

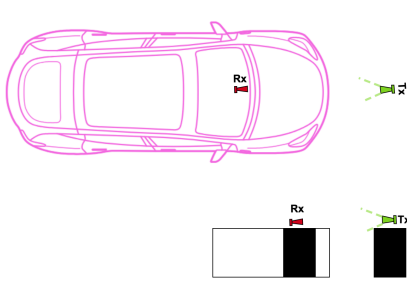


Figura 3.2: Schematico della configurazione 1B con Tx di fronte al veicolo e Rx all'interno del cruscotto.

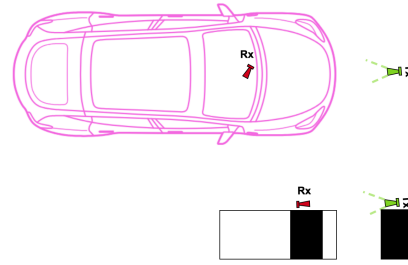


Figura 3.3: Schematico della configurazione 2B con Tx di fronte al veicolo e Rx all'interno del cruscotto ruotato verso lo specchietto.

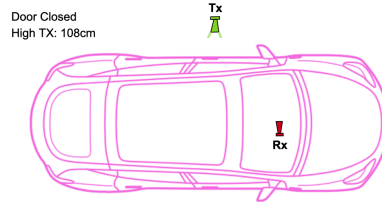


Figura 3.4: Schematico della configurazione 3B con Tx esterno laterale al veicolo e Rx all'interno del cruscotto.

set-up	Distanza Media Picco [m]	Valore Medio Picco [dB]
Fig. 3.2 Config. 1B	1,58 m	-42,0145
Fig. 3.3 Config. 2B	1,7 m	-89,2171
Fig. 3.4 Config. 3B	2,2 m	-71,70 dB

Tabella 3.4: Valori della distanza media del picco e valori del picco per le configurazioni mostrate in Fig. 3.2-3.3 -3.4.

N° Sub-Band	Delay spread (DS) [ns]		
	Config. 1B	Config. 2B	Config. 3B
1	0,4327	7,3310	3,1532
2	0,34918	6,9677	2,1253
3	0,34392	5,934	2,58
4	0,26587	6,7978	1,2590
5	0,27716	6,4578	0,91434
6	0,27487	5,1563	4,433
7	0,24574	6,4715	1,4577
8	0,28735	8,0610	2,6041
9	0,26186	7,3594	4,2743
10	0,29272	6,1933	5,3814

Tabella 3.5: Tabella con i valori di delay spread per le diverse configurazioni mostrate in Fig. 3.2 - 3.3 - 3.4 a 110-170 GHz: configurazione 1B con soglia -81 dB, configurazione 2B con soglia di rumore -95 dB, configurazione 3B con soglia di rumore -95 dB.

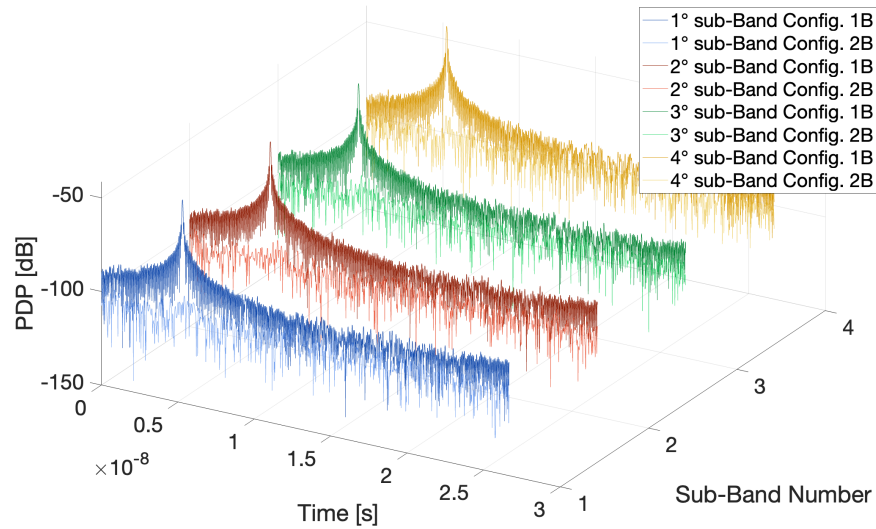


Figura 3.5: Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 1B e 2B.

3.1.3 Set-up con ricevitore sul sedile anteriore

Un'altra tipologia di misura outdoor-to-indoor prevede il posizionamento del trasmettitore (Tx) a lato del veicolo, mentre il ricevitore (Rx) è collocato sul sedile del conducente all'interno dell'auto. In questo set-up, l'altezza delle antenne è di 1,22 metri, allineata con il livello del finestrino, e la distanza tra il Tx e l'Rx è di circa 1,7 metri. Le due configurazioni considerate per questo scenario sono:

- Tx esterno, situato al lato della macchina ed allineato con il Rx con finestrino aperto. (*configurazione 1C*);
- Tx esterno, situato al lato della macchina e Tx ruotato sul lato posteriore della macchina e finestrino chiuso (*configurazione 2C*).

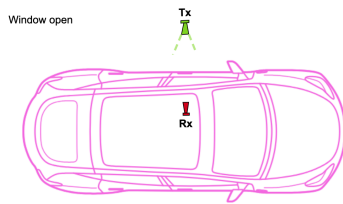


Figura 3.6: Rappresentazione configurazione 1C con Tx esterno laterale al veicolo orientato verso Rx posto sul sedile del conducente.

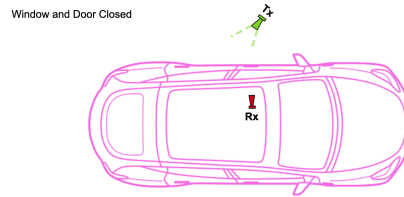


Figura 3.7: Rappresentazione configurazione 2C con Tx esterno laterale al veicolo ruotato verso sedili posteriori e Rx posto sul sedile del conducente.

Come si osserva nel Tab 3.6, le distanze del picco sono coerenti con le distanze reali tra le antenne, mentre si osserva una maggiore attenuazione dello scenario 2C rispetto a 1C che dimostra la forte direttività dell'antenna a frequenza subTHz.

Nella Tab.3.7 il valore del delay spread nella configurazione 2C risulta ampiamente maggiore rispetto alla configurazione 1C a causa del diverso orientamento tra le antenne che genera la comparsa di cammini secondari all'interno del veicolo che aumentano di conseguenza il ritardo nel segnale ricevuto.

Set-Up	Distanza Media Picco [<i>m</i>]	Valore Medio Picco [<i>dB</i>]
Fig. 3.6 config 1C	1,74 m	-37,1 <i>dB</i>
Fig. 3.7 config 2C	1,77 m	-71,5 <i>dB</i>

Tabella 3.6: Valori della distanza media del picco e valori del picco per le configurazioni mostrate in Fig.3.6 - 3.7.

Delay spread (DS) [<i>ns</i>]		
N° Sub-Bands	set-up 1C	set-up 2C
1	0,82237	2.3673
2	0,89018	1.2114
3	0,93564	1.2336
4	0,87895	0.95763
5	0,89491	2.8833
6	1,0897	3.1410
7	1,1923	4.2737
8	1,0578	4.5489
9	1,0470	4.0257
10	1,2330	6.4692

Tabella 3.7: Tabella con i valori di delay spread per le diverse configurazioni mostrate in Fig. 3.6-3.7 a 110-170 *GHz*: config. 1C con soglia di rumore -73 *dB*, config. 2C con soglia di rumore -94 *dB*.

3.2 Analisi Delay Spread (DS) e Power Delay Profile (PDP) misure veicolari Indoor-To-Indoor a subTHz e FR3.

3.2.1 Antenna ricevente(RX) e trasmittente(TX) posta sul pavimento della vettura

In questa sezione, l'obiettivo è confrontare i risultati delle misure effettuate a frequenze sub-terahertz (sub-THz) con quelle nella banda FR3, analizzando tre diversi scenari di posizionamento delle antenne all'interno del veicolo. Il primo scenario prevede che entrambe le antenne, trasmittente (Tx) e ricevente (Rx), siano posizionate sul pavimento del veicolo a una distanza di 0,6 metri l'una dall'altra, con il sedile interposto tra di esse. In entrambi i casi, le antenne sono allineate direttamente l'una di fronte all'altra. Un secondo scenario prevede la stessa disposizione delle antenne sul pavimento del veicolo a 0,6 metri di distanza, ma con l'antenna ricevente ruotata di 90° verso il lato passeggero rispetto all'antenna trasmittente. Infine, la terza configurazione introduce un'ulteriore variazione: l'antenna trasmittente è posizionata sul sedile posteriore, mentre l'antenna ricevente è collocata sul pavimento del lato guidatore, mantenendo un orientamento face-to-face. Queste configurazioni consentono di analizzare come l'interazione tra le antenne e l'ambiente veicolare varia con la loro diversa disposizione e le differenti bande di frequenza. Le configurazioni esaminate, sono quindi le seguenti:

- Rx e Tx Face-To-Face, con Tx ed Rx posizionate sul pavimento della vettura, come mostrato in Fig.3.8. Questa configurazione di set-up è stata effettuata sia a frequenze sub-THz, denominata configurazione 1D, sia a frequenze FR3, denominata configurazione 3D;
 - Rx e Tx posizionate sul pavimento della vettura con Rx ruotato di 90, come mostrato in Fig. 3.9. Questa configurazione di set-up è stata effettuata sia a frequenze sub-THz denominata configurazione 2D, sia a frequenze FR3, denominata configurazione 4D.
-

3.2 Analisi Delay Spread (DS) e Power Delay Profile (PDP) misure veicolari Indoor-To-Indoor a subTHz e FR3.

27

- Rx sul pavimento dell'auto allineato con il Tx sul sedile alla frequenza sub-THz, denominato configurazione 5D e rappresentata in Fig.3.10.

Front to Front

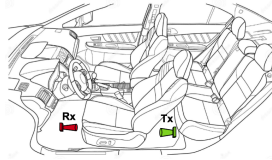


Figura 3.8: Rappresentazione configurazione 1D/3D con Rx-Tx sul pavimento del veicolo, con le bocche delle antenne allineate.

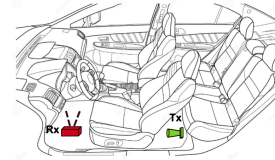


Figura 3.9: Rappresentazione configurazione 2D/4D con Rx-Tx sul pavimento, ma la bocca del Rx è ruotata di 90° verso il lato del passeggero.

Front to Front

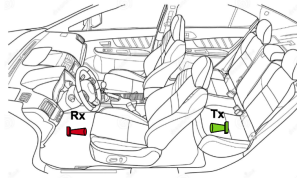


Figura 3.10: Rappresentazione configurazione 5D con Rx sul pavimento e Tx su sedile e le bocche delle antenne sono allineate tra loro.

Come evidenziato nella Tabella 3.8, le attenuazioni misurate nei diversi scenari sono sempre maggiori nel caso delle frequenze sub-THz rispetto a quelle in banda FR3. Questo comportamento era atteso, poiché a frequenze più elevate i segnali tendono a subire una maggiore perdita di potenza a causa degli effetti di attenuazione e dell'assorbimento dei materiali. Inoltre, nelle configurazioni in cui l'antenna ricevente (Rx) è ruotata di 90 gradi rispetto all'antenna trasmittente (Tx), si osserva un aumento significativo dell'attenuazione rispetto alla condizione in cui le due antenne sono orientate l'una verso l'altra (face-to-face). Analizzando le Tabelle 3.9 e 3.10, relative al delay spread, emerge che quest'ultimo aumenta significativamente quando l'antenna ricevente è ruotata di 90 gradi. Ciò avviene perché, in questa configurazione, la potenza del segnale ricevuto proviene prevalentemente da

percorsi di riflessione secondaria all'interno del veicolo, aumentando il tempo di arrivo delle diverse componenti del segnale. Al contrario, nello scenario in cui l'antenna trasmittente è posizionata sul sedile e l'antenna ricevente è collocata sul pavimento, il delay spread assume un valore intermedio tra la configurazione in cui le antenne sono allineate e quella in cui sono ruotate. Questo comportamento è coerente con il fatto che, sebbene le antenne siano orientate una verso l'altra, la presenza del sedile rappresenta comunque un ostacolo che influisce sulla propagazione del segnale. A seguire viene mostrata una rappresentazione grafica del *Power Delay Profile* nel caso di misure sub-THz ed FR3 al fine di visualizzare la differenza nella propagazione dei cammini, in particolare si evidenzia come a sub-Thz l'attenuazione nello scenario con antenna Rx ruotata di 90° sia maggiore rispetto ad FR3.

3.2 Analisi Delay Spread (DS) e Power Delay Profile (PDP) misure veicolari Indoor-To-Indoor a subTHz e FR3.

29

Set-Up	Distanza Media Picco [<i>m</i>]	Valore Medio Picco [<i>dB</i>]
Fig. 3.8 sub-THz	0.43m	-34.94
Fig. 3.8 FR3	1.5m	-23.6
Fig. 3.9 sub-THz	0.88m	-75.4986
Fig. 3.9 FR3	3m	-52.6
Fig. 3.10 sub-THz	1.75m	-70.3927

Tabella 3.8: Valori della distanza media del picco e valori del picco per le configurazioni mostrate in Fig. 3.8 - 3.9 - 3.10 a frequenze sub-THz e FR3.

Delay spread (DS) [<i>ns</i>]			
N°Sub-Band	Fig. 3.8	Fig. 3.9	Fig. 3.10
1	0.847	4.7834	1,7572
2	0.843	2.4241	1,4715
3	0.421	1.9468	1,0895
4	1.01	1.7298	1,2966
5	1.22	1.8125	1,2790
6	0.66	2.9699	0,75401
7	1.07	4.5857	1,2442
8	1.25	2.5857	1,3593
9	0.75	3.0456	1,4303
10	0.63	6.6989	2,8597

Tabella 3.9: Tabella con valori di Delay Spread per diverse configurazioni a 110-170 *GHz*: configurazione 1D con soglia di rumore -65 *dB*, configurazione 2D con soglia di rumore -94 *dB*. configurazione 5D con soglia di rumore -92*dB*.

Delay spread (DS) [<i>ns</i>]		
N° Sotto-banda	Fig. 3.8	Fig. 3.9
1	1.6344	8.3482
2	1.3141	6.5627
3	1.5348	6.4808

Tabella 3.10: Tabella con valori di Delay spread alle frequenze FR3: configurazione 3D, configurazione 4D a frequenza sub-THz.

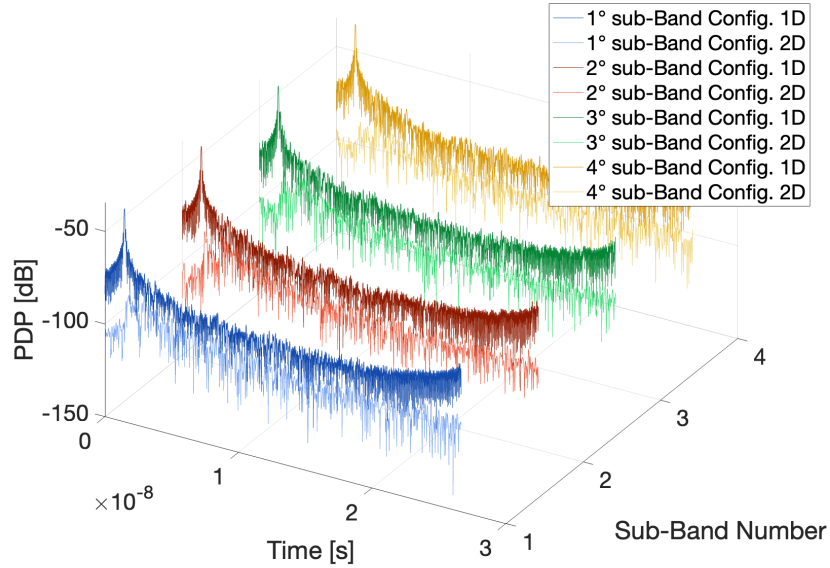


Figura 3.11: Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 1D e 2D.

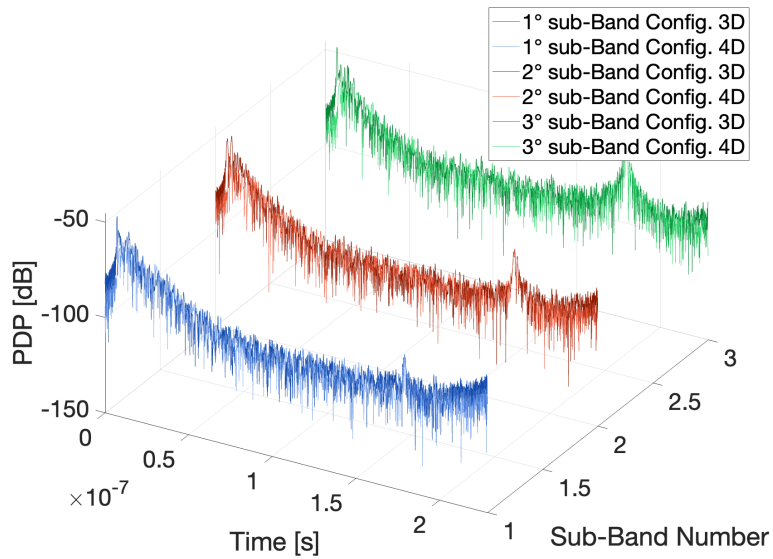


Figura 3.12: Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 3D e 4D.

3.2.2 Antenna ricevente(RX) e trasmittente(TX) posta sul sedile della vettura

L'obiettivo dei risultati descritti in questa sezione è confrontare le misure effettuate a frequenze sub-terahertz (sub-THz) con quelle eseguite nella banda FR3. Un'altra tipologia di misura veicolare Indoor-To-Indoor effettuata, prevede il posizionamento dell'antenna ricevente (Rx) sul sedile anteriore e dell'antenna trasmittente (Tx) sul sedile posteriore del veicolo. In una delle configurazioni, le due antenne sono orientate l'una verso l'altra (face-to-face), mentre nell'altra configurazione sono disposte con orientamento opposto (back-to-front). Le due configurazioni considerate per questo scenario sono:

- Rx e Tx Face-To-Face, con Tx ed Rx posizionate sul sedile anteriore e posteriore rispettivamente, come mostrato in Fig.3.13. Questa configurazione di set-up è stata effettuata sia a frequenze subTHz, denominata configurazione 1E, sia a frequenze FR3, denominata configurazione 3E;
- Rx e Tx Back-To-Front, con Tx ed Rx posizionate sul sedile anteriore e posteriore rispettivamente, come mostrato in Fig.3.14. Anche questa configurazione di set-up è stata effettuata sia a frequenze sub-THz, denominata configurazione 2E, sia a frequenze FR3, denominata configurazione 4E.

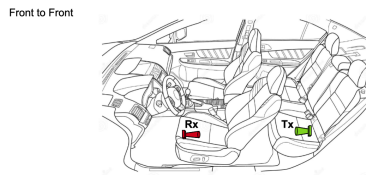


Figura 3.13: Rappresentazione configurazione 1E/3E con Rx-Tx sui sedili del veicolo, con le bocche delle antenne allineate.

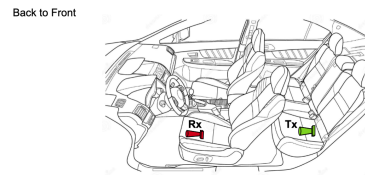


Figura 3.14: Rappresentazione configurazione 2E/4E con Rx-Tx sui sedili del veicolo, in configurazione Back-to-Front.

Set-Up	Distanza Media Picco [<i>m</i>]	Valore Medio Picco [<i>dB</i>]
Fig.3.13 sub-THz	0.6 m	-45.73 <i>dB</i>
Fig.3.14 FR3	2 m	-81.16 <i>dB</i>
Fig.3.13 sub-THz	1.4 m	-19.5 <i>dB</i>
Fig.3.14 FR3	2 m	-47.4 <i>dB</i>

Tabella 3.11: Valori della distanza media del picco e valori del picco per le due configurazioni a sub-THz ed FR3, mostrate in Fig.3.13-3.14.

Delay spread (DS) [<i>ns</i>]		
N° Sub-Band	Config. 1E	Config. 2E
1	0.19451	4.0502
2	0.16342	3.5574
3	0.15796	1.3564
4	0.17241	1.4310
5	0.14126	0.96829
6	0.2079	3.2655
7	0.20377	6.0351
8	0.11026	3.5048
9	0.12342	3.4960
10	0.10686	5.0940

Tabella 3.12: Tabella con valori di Delay Spread relativi alla banda di frequenza 110-170 *GHz* divisa in 10 sotto-bande: configurazione 1E con soglia di rumore -73 *dB*, configurazione 2E con soglia di rumore -95 *dB*.

Delay spread (DS) [<i>ns</i>]		
N° Sub-Band	Config. 3E	Config. 4E
1	1.1666	5.8463
2	1.1429	4.7635
3	1.1720	4.5944

Tabella 3.13: Tabella con valori di Delay Spread relativi alla banda di frequenza FR3, 8-12 *GHz* suddivisa in 3 sotto-bande: configurazione 3E, configurazione 4E.

L'analisi che viene eseguita all'interno di questa sezione risulta particolarmente interessante, poichè confronta i medesimi scenari sia a frequenze FR3 che sub-THz, permettendo di apprezzarne le differenze. Di fatto nella Tab. 3.11 si osserva come il valor medio del picco risulta nettamente inferiore a sub-THz rispetto ad FR3 a parità di scenario, questo si verifica poichè le onde a frequenze sub-THz hanno una lunghezza d'onda molto più corta rispetto a quelle FR3. Di conseguenza, sono meno capaci di penetrare materiali e superfici e tendono ad essere più facilmente bloccate o rifratte, portando a una maggiore perdita di segnale. Come invece è possibile osservare in Tab. 3.12 e nella Tab. 3.13 si verifica un incremento nel ritardo del segnale ricevuto nelle configurazioni 2E e 4E poichè le antenna TX e RX sono in configurazione *Back to Front*. Però è interessante notare come mediamente i ritardi a sub-THz siano inferiori ai ritardi ad FR3. Questo potrebbe essere causato dal fatto che a frequenze FR3, le onde elettromagnetiche tendono a perdere meno energia lungo i percorsi multipli rispetto alle frequenze sub-THz permettendo ai segnali che seguono percorsi più lunghi e indiretti di mantenere una potenza sufficiente per essere rilevati dal ricevitore, contribuendo al delay spread.

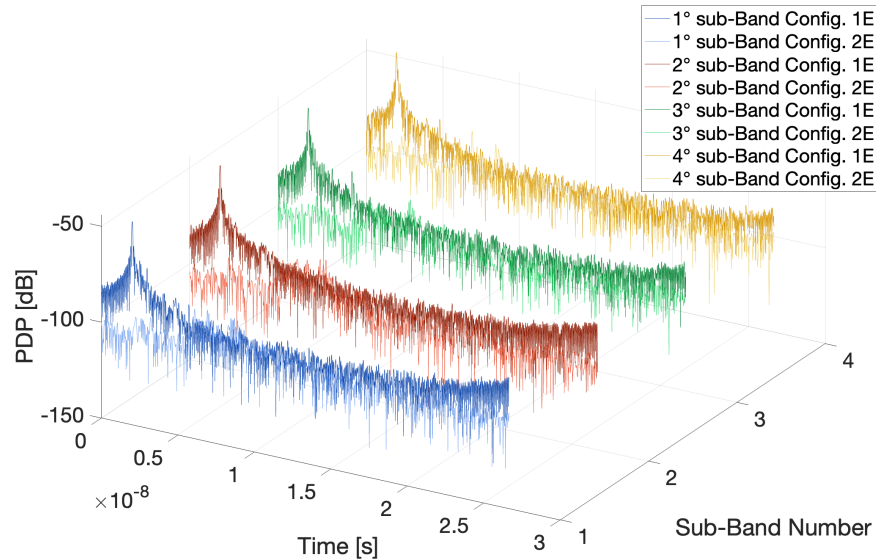


Figura 3.15: Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 1E e 2E.

Capitolo 4

Analisi della selettività in frequenza

Nello studio delle misure di attenuazione, è fondamentale considerare la selettività del canale per comprendere come la potenza del segnale viene distribuita nel dominio della frequenza e del tempo. Questo permette di identificare i percorsi multipli del segnale e le relative variazioni di intensità. Per comprendere la selettività in frequenza è utile introdurre il concetto di *time gating*, una tecnica chiave per l'analisi dei segnali che permette di isolare specifiche porzioni temporali del segnale nel dominio del tempo, facilitando la loro osservazione nel dominio della frequenza.

4.1 Time Gating: definizione e utilità

Il *time gating* consiste nel selezionare una finestra temporale definita di un segnale ricevuto, eliminando le porzioni meno rilevanti o indesiderate. Ciò consente di analizzare l'effetto di singoli contributi del segnale, come percorsi diretti o riflessi, nel dominio della frequenza. Un segnale può essere rappresentato sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze attraverso la trasformata di Fourier. Nel dominio del tempo, un segnale complesso include molteplici componenti, ognuna con un ritardo e attenuazione specifici derivanti dai percorsi di propagazione. Il *time gating* isola queste componen-

ti, facilitando l'esclusione di riflessioni multiple o interferenze e permettendo una valutazione accurata del comportamento in frequenza del sistema. Nelle misure veicolari effettuate, il time gating è stato utilizzato considerando attentamente la geometria del set-up per identificare con precisione la finestra temporale e spaziale di interesse. Questa strategia consente di isolare i segnali rilevanti dalle riflessioni secondarie, ottimizzando l'analisi della propagazione. A seconda dell'obiettivo specifico dell'analisi, il time gating può essere reso più o meno selettivo, modificando la durata della finestra temporale e, di conseguenza, la dimensione della finestra spaziale. Questo permette di adattare la misura alla necessità di concentrarsi su percorsi diretti o di includere anche contributi riflessi e diffusi.

4.2 Selettività in frequenza e analisi del Power Delay Profile (PDP)

La selettività in frequenza descrive la sensibilità del sistema a variazioni della frequenza del segnale ricevuto. Per comprenderla, bisogna esaminare il comportamento del segnale in entrambi i domini, temporale e delle frequenze. Il Power Delay Profile (PDP) rappresenta la potenza del segnale ricevuto in funzione del ritardo temporale, associando ogni picco a un particolare percorso di propagazione. In uno spazio privo di ostacoli, il PDP mostrerebbe un unico picco, corrispondente al percorso diretto tra trasmettitore e ricevitore. Tuttavia, in un ambiente reale come quello delle misure, il segnale subisce riflessioni multiple su superfici vicine (portiere, cofano, finestrino, bagagliaio), creando percorsi multipli con tempi di arrivo diversi che possono interferire tra loro, modificando significativamente la risposta in frequenza.

4.3 Interferenza costruttiva e distruttiva: effetti sulla selettività in frequenza

L'interferenza costruttiva si verifica quando le onde dei percorsi multipli arrivano in fase al ricevitore, aumentando l'ampiezza complessiva del segnale; mentre l'interferenza distruttiva si ha quando le onde sono fuori fase, causando una riduzione dell'ampiezza o annullamento del segnale. Tali effetti causano variazioni significative nella risposta in frequenza del sistema, evidenziando "drop" positivi o negativi. La selettività in frequenza misura quanto queste interferenze influenzano le componenti di frequenza del segnale: un sistema è altamente selettivo se i percorsi multipli producono variazioni significative (drop) nella risposta in frequenza, mentre lo è meno se il segnale rimane lineare e privo di riflessioni.

4.4 Analisi su casi reali

Per analizzare concretamente l'effetto della selettività in frequenza, vengono presentati una serie di grafici che evidenziano le differenze tra l'applicazione del *time gating* e l'assenza di esso nella Channel Frequency Response (CFR) quando la linea di vista tra ricevitore e trasmettitore è ostruita da differenti parti del veicolo, come: portiera, cofano, finestrino e bagagliaio. Queste analisi sono state fatte sia nella banda a FR3 che sub-THz a singola banda. Per quanto riguarda l'analisi della selettività effettuata sulle misure ad FR3, si evince che la presenza di *drop* di ampiezza nella risposta in frequenza è particolarmente marcato nel caso della portiera e del bagagliaio, dove i cammini multipli generano variazioni significative nel segnale ricevuto. Questa analisi è utile per comprendere come il *time gating* possa mitigare tali effetti, riducendo le interferenze causate dai percorsi multipli di propagazione.

Come mostrato in Fig.4.1, la CFR nella banda FR3 per le diverse configurazioni mostra chiaramente le differenze tra le misure con e senza *time gating*. La curva tratteggiata, che rappresenta il segnale senza *time gating*, presenta diversi *drop*, particolarmente evidenti nel caso della portiera e nel bagagliaio.

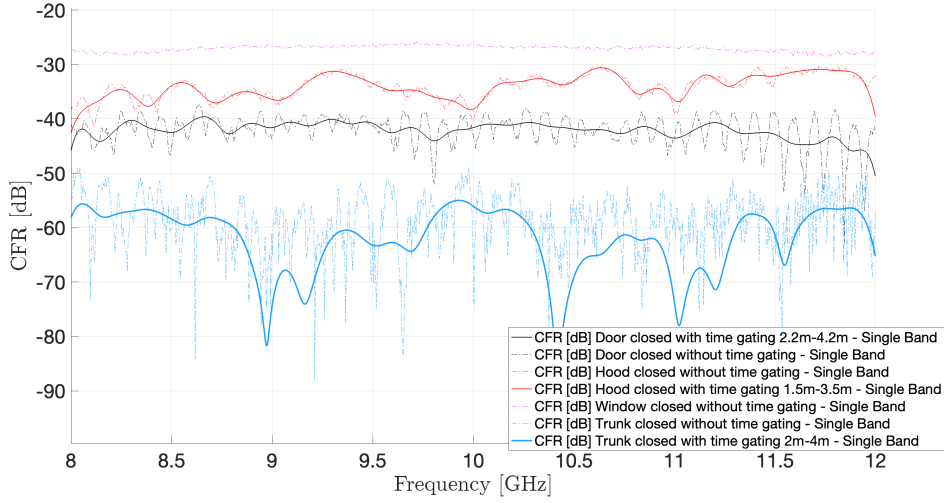


Figura 4.1: Channel Frequency Response (CFR), con time gating o meno, in tutta la banda FR3, per i casi dove la linea di vista è ostruita dalla portiera, dal cofano, dal finestrino e dal bagagliaio del veicolo Tesla Model Y.

Si osserva invece l'assenza di *drop* nella CFR del finestrino, di cui appunto non è stata eseguita il time gating, poichè non necessario. Questi *drop* sono causati da interferenze tra il cammino principale e i cammini secondari. La curva continua, che rappresenta il segnale su cui è stato applicato il *time gating*, mostra invece un profilo più regolare, con una significativa riduzione dei *drop*. Ciò indica che il *time gating* è efficace nell'eliminare le interferenze causate dai cammini multipli, conservando principalmente il contributo del cammino diretto.

Per comprendere l'origine dei *drop* osservati nella CFR della portiera, si considera il Power Delay Profile (PDP) relativo alla configurazione con portiera chiusa, come mostrato in Fig. 4.2.

Il PDP della Fig. 4.2 mostra il picco principale, corrispondente al cammino diretto tra trasmettitore e ricevitore, e un picco secondario che rappresenta un cammino riflesso causato dalla presenza del finestrino. Questo secondo picco arriva con un leggero ritardo rispetto al cammino diretto e contribuisce all'interferenza distruttiva osservata nella CFR, generando i *drop* descritti precedentemente.

L'applicazione del *Time Gating* tra 2.2 m e 4.2 m permette di conser-

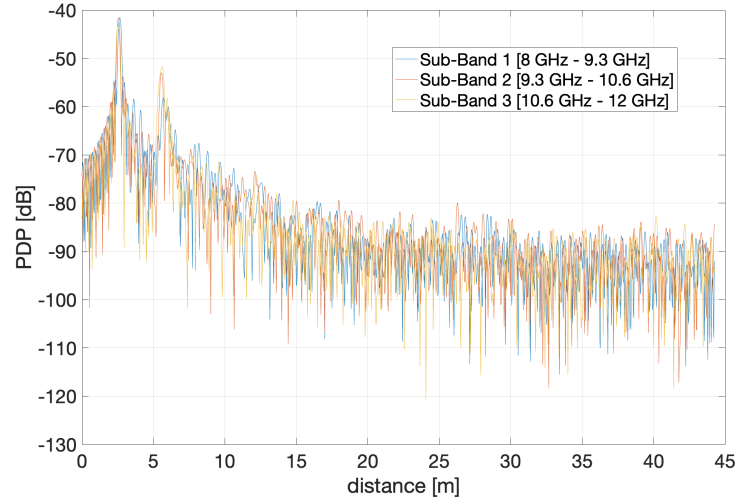


Figura 4.2: Power Delay Profile (PDP) per tre differenti sotto-bande, per la configurazione in cui la linea di vista tra Tx ed Rx è ostruita dalla portiera completamente chiusa del veicolo Tesla Model Y.

vare solo il picco principale nel PDP, eliminando il contributo del cammino riflesso. Come risultato, nel dominio delle frequenze, si osserva una riduzione significativa dei *drop*, confermando che il *time gating* minimizza l'interferenza dei cammini multipli, migliorando così la selettività in frequenza.

Proseguendo con l'analisi della selettività, si considera ora la CFR a sub-THz per le configurazioni mostrate in Fig.4.3, che prevedono l'antenna ricevente posta a due quote diverse all'interno del cofano. Anche in questo caso, viene confrontato il segnale con e senza *time gating* per evidenziare l'effetto delle riflessioni multiple sul comportamento in frequenza.

La Fig.4.4 mostra la CFR per la configurazione del cofano alla banda Sub-THz. La curva tratteggiata rappresenta il segnale senza *time gating*, che presenta numerosi *drop* dovuti alle riflessioni multiple. La curva continua, che rappresenta il segnale con *time gating* applicato, evidenzia una riduzione significativa dei *drop*, confermando che l'eliminazione dei contributi temporali dei cammini riflessi riduce l'interferenza e migliora la selettività in frequenza. Viene inserito inoltre all'interno della Figura 4.4 la CFR del finestrino chiuso, che come nel caso ad FR3 non presenta *drop*, e di conseguenza viene riportata solo in assenza di *time gating*.

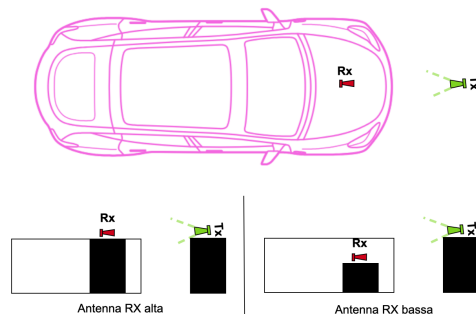


Figura 4.3: Rappresentazione schematica del set-up che prevede antenna ricevente RX all'interno del cofano, a due altezze diverse, e antenna trasmittente TX di fronte al cofano.

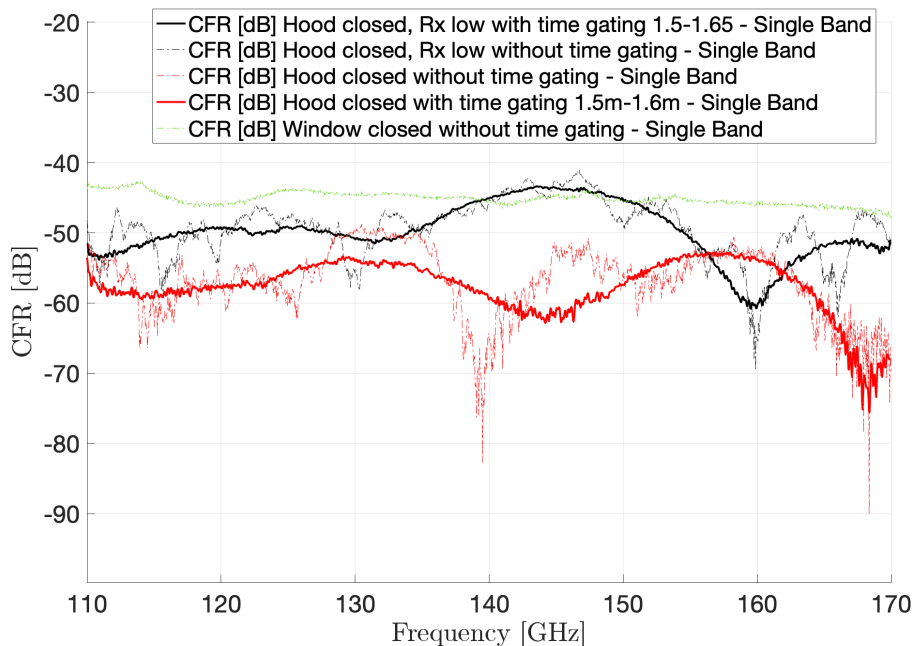


Figura 4.4: Channel Frequency Response (CFR), con time gating o meno, per tutta la banda a sub-THz, per i casi dove la linea di vista è ostruita dal cofano nelle due configurazioni presenti in Fig.4.3.

4.5 Finalità dell'analisi della selettività

L'analisi dei grafici dimostra come l'applicazione del time gating sia un metodo efficace per migliorare la selettività in frequenza di un sistema. Filtrando i contributi dei percorsi multipli e mantenendo solo il cammino diretto, il time gating riduce le interferenze e le variazioni indesiderate nel dominio delle frequenze. Questa analisi della selettività del canale è essenziale per comprendere meglio le misure di attenuazione che si ottengono. Sebbene il calcolo dell'attenuazione si concentri principalmente sul picco principale nel Power Delay Profile (PDP), al fine di studiare l'attenuazione lungo il cammino diretto è importante essere consapevoli che, in realtà esistono riflessioni e rifrazioni attraverso i vari componenti del veicolo che generano cammini secondari. Questi percorsi, se non adeguatamente filtrati, possono causare interferenze e distorsioni nei risultati. Pertanto, l'utilizzo del time gating permette di isolare il cammino principale, ottenendo una misurazione più precisa e affidabile dell'attenuazione del segnale nel percorso desiderato.

Capitolo 5

Misure di attenuazione - Penetration Loss

5.1 Introduzione alla misura del Penetration Loss

Il parametro di *Penetration Loss* misura l'attenuazione del segnale elettromagnetico attraverso materiali. Sono presenti, infatti, alcuni studi scientifici che misurano l'attenuazione relativa ai diversi materiali da costruzione per diverse frequenze [7] [8]. In questo capitolo verranno mostrati i risultati relativi allo studio dell'attenuazione in uno scenario veicolare, scenario di interesse di questo elaborato, dove i valori di *penetration loss* si riferiscono ai diversi componenti di un veicolo (portiera, finestrino, bagagliaio, cofano). Queste misurazioni sono fondamentali per comprendere come le diverse parti influenzano la propagazione del segnale, aspetto essenziale per ottimizzare le comunicazioni wireless sia interne al veicolo che tra veicoli.

Per ottenere una valutazione accurata del *Penetration Loss*, si utilizza il seguente metodo:

- Si acquisisce il *Power Delay Profile* del segnale sia in configurazione *free space/line of sight* (LoS), ovvero in uno scenario in assenza di

ostruzioni, che in configurazione *obstruction line of sight* (OLoS) in cui la linea di vista tra Tx ed Rx è ostruita da una parte della vettura.

- Viene filtrato, dal PDP, il picco massimo della potenza in entrambe le configurazioni, sia nel caso LoS che OLoS.
- Si calcola la differenza tra il picco massimo di potenza del caso LoS e del caso OLoS, che rappresenta il *Penetration Loss*.

Per eseguire questo metodo, il segnale viene suddiviso in 3 sottobande nel caso di FR3 e in 10 sottobande nel caso di frequenze sub-THz. Per ciascuna sottobanda, si calcola l'attenuazione confrontando il picco del segnale in condizioni di spazio libero con il picco in presenza di ostruzioni nel Power Delay Profile (PDP). Unendo i valori di attenuazione ottenuti per ogni sottobanda, si costruisce un grafico che mostra come l'attenuazione varia al variare della frequenza, permettendo di caratterizzare meglio il comportamento del segnale nelle diverse bande.

5.2 Analisi dell'attenuazione a sub-THz

In questa sezione vengono presentati i grafici che mostrano l'andamento dell'attenuazione del segnale a frequenze sub-THz attraverso i vari componenti del veicolo, come portiera, finestrino, bagagliaio, cofano e sedile. Tali grafici offriranno una visione dettagliata di come l'attenuazione varia in base alla frequenza e alla specifica parte del veicolo in esame.

In aggiunta ai grafici, verrà inclusa una tabella che riporta i valori medi dell'attenuazione e le rispettive deviazioni standard, sia per le condizioni di *line-of-sight* (OLoS) che per le condizioni di *partially line-of-sight* (partially OLoS). Questa tabella fornirà un riassunto quantitativo delle misurazioni effettuate, facilitando la comparazione tra le diverse configurazioni e componenti del veicolo.

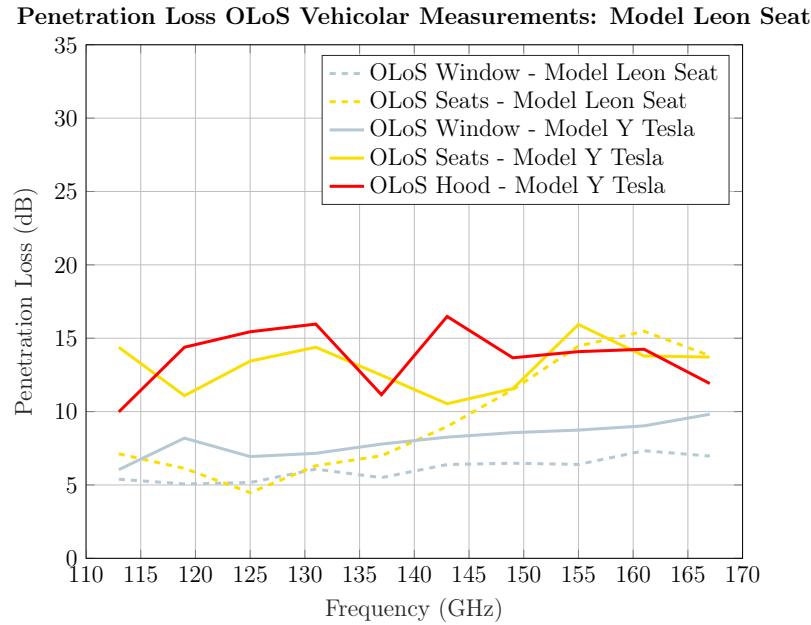


Figura 5.1: Grafico analisi Penetration Loss in scenario veicolare a 110-170 GHz per finestrino, cofano e sedile per i differenti veicoli: Model Y Tesla e Leon Seat.

Analizzando la Fig. 5.1, è possibile osservare la variazione del *Penetration Loss* in funzione della frequenza per diversi componenti delle vetture esaminate: il finestrino e il sedile di entrambe le auto, e il cofano per la Tesla Model Y. Si può notare come le curve dello stesso colore rappresentino le due diverse vetture. Infatti, le curve dello stesso colore mostrano un andamento simile, poiché rappresentano l'attenuazione della stessa componente della vettura. In particolare, per quanto riguarda il finestrino di entrambe le auto, è evidente come l'attenuazione aumenti all'aumentare della frequenza, esattamente come ci si aspetterebbe. Nella Fig. 5.2, invece, si può osservare l'andamento dell'attenuazione nell'ambiente sotto il sedile quando le due antenne sono posizionate sul pavimento, e l'attenuazione del sedile quando le due antenne sono poste sui sedili. In entrambi i casi, si nota un aumento dell'attenuazione con l'aumentare della frequenza. Nella tabella 5.1 sono riportati i valori medi di *Penetration Loss* e la deviazione standard, evidenziando come, per la portiera e il cofano, il valore sia superiore a 50 dB, un livello molto alto di attenuazione. Tali valori non sono stati rappresentati nella Fig. 5.1 poiché,

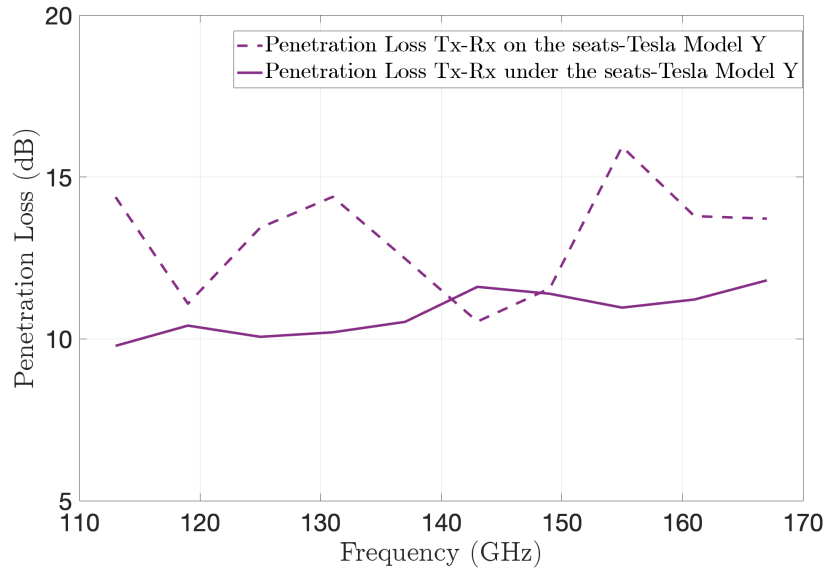


Figura 5.2: Grafico analisi Penetration Loss in scenario veicolare a 110-170 GHz per misure sotto il sedile per la Tesla Model Y.

a causa dell'elevata attenuazione, si sarebbe visto solo rumore. È importante sottolineare che il valore medio riportato in tabella è coerente con quanto illustrato nel grafico. Infine, la Fig. 5.3 mostra l'andamento del *Penetration Loss* per la portiera e il bagagliaio di entrambe le auto, e per il cofano della Tesla, nella condizione di chiusura parziale. In questo caso, si osserva chiaramente come i valori di attenuazione siano sensibilmente più bassi rispetto al caso precedente, come ci si aspetterebbe. Questo fenomeno è ben visibile anche guardando i valori medi mostrati nella Tab. 5.2.

	Tesla Model Y		Seat Model Leon	
	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]
<i>Door Closed</i>	≥ 50 dB	-	≥ 50	-
<i>Window Closed</i>	8 dB	1.11 dB	6 dB	0.77 dB
<i>Trunk Closed</i>	≥ 50 dB	-	≥ 50 dB	-
<i>Hood Closed</i>	14 dB	2.12 dB	-	-
<i>Seats</i>	13 dB	1.69 dB	9 dB	3.97 dB
<i>Env. under seats</i>	11 dB	0.7 dB	-	-

Tabella 5.1: Valori di Penetration Loss medio e rispettiva deviazione standard espressi in dB, per differenti modelli d'auto e differenti parti del veicolo nel range di frequenze 110-170 GHz.

	Tesla Model Y		Seat Model Leon	
	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]
<i>Door Ajar</i>	44 dB	2.29 dB	32 dB	2.05 dB
<i>Trunk Ajar</i>	21 dB	1.19 dB	28 dB	4.3 dB
<i>Hood Ajar</i>	11 dB	2.05 dB	-	-

Tabella 5.2: Valori di Penetration Loss medio e rispettiva deviazione standard espressi in dB, per differenti modelli d'auto e differenti parti del veicolo nel range di frequenze 110-170 GHz.

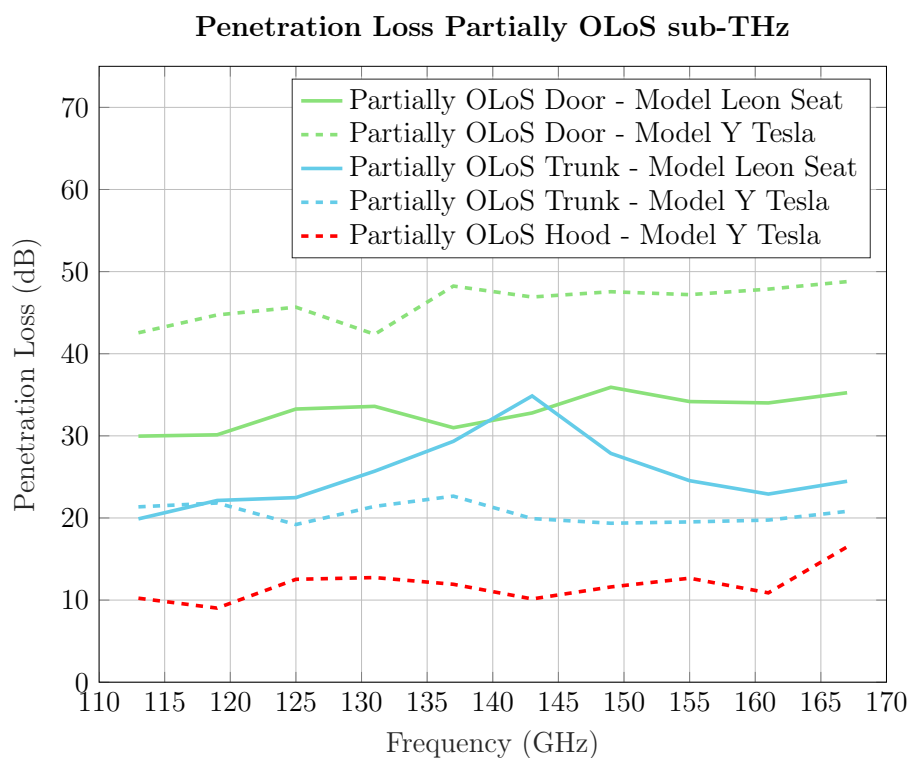


Figura 5.3: Grafico di analisi del Penetration Loss in scenario veicolare al variare della frequenza nella banda 110-170 *GHz* per portiera, bagagliaio e cofano parzialmente chiusi, per due differenti modelli di veicolo: Model Y Tesla e Leon Seat.

5.3 Considerazioni sul Footprint nelle misure a sub-THz

Nelle misure di attenuazione a frequenze sub-THz, un aspetto fondamentale da considerare è il *footprint* dell'antenna, ovvero l'area effettiva su cui si concentra gran parte della potenza irradiata dall'antenna trasmittente sull'oggetto, o "device under test". Il *footprint* è determinato dalla direttività dell'antenna e dalla distanza tra il trasmettitore e l'ostacolo, e rappresenta l'impronta del fascio del segnale sull'elemento del veicolo analizzato.

Per calcolare il raggio del *footprint*, r , si utilizza la seguente relazione:

$$r = \sqrt{\frac{d \cdot \Omega}{\pi}} \quad (5.1)$$

dove d è la distanza tra il trasmettitore e l'ostacolo, mentre Ω è l'angolo solido associato alla direttività dell'antenna, definito come:

$$\Omega = \frac{4\pi}{D} \quad (5.2)$$

con D che rappresenta la direttività dell'antenna. La direttività è un parametro che indica quanto strettamente è focalizzato il fascio dell'antenna; maggiore è la direttività, più ristretto è il fascio.

Nel caso delle misure a frequenze sub-THz, la direttività dell'antenna è molto elevata a causa delle lunghezze d'onda estremamente ridotte. Questo comporta un fascio estremamente focalizzato e un *footprint* molto piccolo. Di conseguenza, la potenza del segnale trasmesso si concentra interamente all'interno della componente specifica del veicolo (ad esempio, una portiera o un finestrino), senza estendersi al di fuori di essa.

Un *footprint* più piccolo implica che l'attenuazione misurata sia attribuibile quasi esclusivamente all'elemento del veicolo in esame, senza interferenze significative da rifrazioni, riflessioni o diffrazioni da altri oggetti circostanti. Questo rende le misurazioni a sub-THz particolarmente precise, poiché si evitano contributi indesiderati al segnale ricevuto che potrebbero alterare il calcolo del *Penetration Loss*.

5.4 Analisi dell'attenuazione a FR3

In questa sezione, vengono presentati i grafici che illustrano l'andamento dell'attenuazione del segnale a frequenze FR3 attraverso i principali componenti del veicolo, come portiera, finestrino, bagagliaio e cofano. I grafici mostrano come l'attenuazione vari in funzione della frequenza. In particolare, i grafici rappresentano l'attenuazione calcolata come differenza dei picchi di potenza del segnale ricevuto nelle diverse sottobande, tra le condizioni di *free space* e OLoS. Sovrapposta a questa curva di attenuazione, si visualizza anche la differenza tra la *Channel Frequency Response* (CFR) nelle due configurazioni (*free space* e OLoS).

È possibile osservare che l'andamento del valore di attenuazione segue il medesimo trend della differenza di CFR, il che è coerente con la teoria, poiché la variazione di CFR riflette direttamente l'influenza del componente sul segnale. Tuttavia, il tratto della differenza di CFR presenta un andamento più ondulatorio. Questo comportamento è dovuto alle riflessioni multiple e alle interferenze che possono verificarsi nel segnale, le quali variano in modo più complesso rispetto al semplice picco di attenuazione.

A seguito dei grafici, è inclusa una tabella che riporta i valori medi dell'attenuazione e le rispettive deviazioni standard per ogni componente della vettura. Questa tabella offre una panoramica quantitativa delle misurazioni, facilitando il confronto tra le diverse configurazioni e le componenti del veicolo.

Scendendo ulteriormente nel dettaglio in Fig. 5.4 sono presentate le misure di *Penetration Loss* per il finestrino, la portiera e il bagagliaio di entrambe le vetture, oltre al cofano per la Tesla Model Y. Anche in questo caso, per le frequenze nella banda FR3, si osserva come l'attenuazione aumenti con l'incremento della frequenza. È interessante notare che, per quanto riguarda il finestrino e la portiera, la Tesla Model Y presenta valori di attenuazione inferiori rispetto alla Seat Leon, mentre, al contrario, per il bagagliaio l'attenuazione della Tesla è superiore a quella della Seat Leon. La tabella 5.3 riporta i valori medi e la deviazione standard del *Penetration Loss* nel-

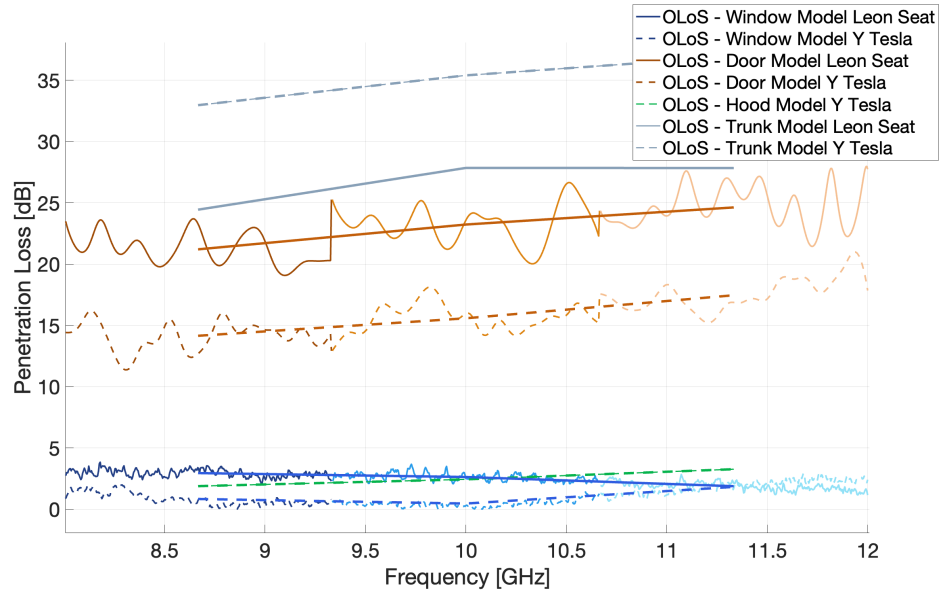


Figura 5.4: Grafico di analisi del Penetration Loss in scenario veicolare al variare della frequenza nella banda 8-12 GHz con portiera, bagagliaio e cofano chiusi, per i differenti veicoli: Model Y Tesla e Leon Seat.

la banda FR3. Da questa tabella emerge che l'attenuazione in generale è significativamente più bassa rispetto a quella osservata alle frequenze sub-THz. Questa differenza è coerente con le aspettative teoriche, in quanto alle frequenze più alte si assiste a una maggiore sensibilità agli ostacoli e alle superfici irregolari, causando un'attenuazione più elevata. Inoltre, nella tabella 5.4 sono riportati i valori medi e la deviazione standard del *Penetration Loss* per la portiera e il bagagliaio in condizioni di chiusura parziale. Come ci si aspetta, il valore medio di attenuazione in questi casi è inferiore rispetto allo scenario completamente chiuso e notevolmente più basso rispetto allo stesso scenario nella banda sub-THz.

	Tesla Model Y		Seat Model Leon	
	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]
<i>Door Closed</i>	15.7 dB	1.7 dB	23 dB	1.7 dB
<i>Window Closed</i>	1.04 dB	0.7 dB	2.5 dB	0.55 dB
<i>Trunk Closed</i>	35.09 dB	2 dB	26.7 dB	1.96 dB
<i>Hood Closed</i>	2.53 dB	0.69 dB	-	-

Tabella 5.3: Valori di Penetration Loss medio e deviazione standard, per differenti modelli d'auto e differenti parti del veicolo, considerando un'ostruzione dell'oggetto totale, nel range di frequenze 8-12 *GHz*.

	Tesla Model Y		Seat Model Leon	
	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]	<i>Mean PL</i> [dB]	σ [dB]
<i>Door Ajar</i>	9.8 dB	2.2 dB	5.8 dB	0.07 dB
<i>Trunk Ajar</i>	8.11 dB	0.38 dB	10.01 dB	0.93 dB

Tabella 5.4: Valori di Penetration Loss medio e deviazione standard, per differenti modelli d'auto e differenti parti del veicolo, considerando un'ostruzione dell'oggetto parziale, nel range di frequenze 8-12 *GHz*.

5.5 Considerazioni sul Footprint nelle misure ad FR3

Per le misure di attenuazione nella banda FR3, si è utilizzato lo stesso metodo di calcolo del *footprint* dell'antenna impiegato per le misure a sub-THz. Tuttavia, in questo caso, la direttività dell'antenna è notevolmente inferiore, il che comporta un *footprint* con un raggio molto più ampio. Questo allargamento del raggio genera una condizione meno favorevole per l'analisi poiché la potenza del segnale trasmesso può disperdersi su una superficie più grande, coinvolgendo potenzialmente più elementi della vettura oltre a quello specifico che si desidera studiare.

A causa della minore direttività, il *footprint* dell'antenna a frequenze FR3 si estende oltre i confini del singolo componente del veicolo come il bagagliaio

o il cofano. Questo fenomeno risulta particolarmente rilevante nel caso della portiera dove il segnale può coprire anche altre parti come il finestrino, introducendo complessità aggiuntive nell'analisi.

Per comprendere meglio l'andamento del segnale in relazione alla geometria del veicolo, sono state registrate le distanze dei picchi del segnale in condizioni di spazio libero (free space) e in condizioni di ostruzione (OLoS) per ciascuna delle tre sottobande della banda FR3. In particolare, l'analisi sul finestrino ha mostrato distanze simili tra le due configurazioni, mentre differenze significative si sono osservate nel caso della portiera, di cui si analizza la geometria sia per la Tesla Model Y che la Seat Leon.

5.5.1 Geometria caso OLoS da portiera Tesla Model Y

Le distanze dei picchi di potenza registrate per le tre sottobande ad FR3, sia in condizioni di *free space* che con la portiera chiusa, sono riportate nella Tabella 5.5.

Tabella 5.5: Distanze dei Picchi Registrati per la Tesla

Sottobanda	Distanza Free Space (m)	Distanza OLoS (m)
Prima Sottobanda	2.62	2.65
Seconda Sottobanda	2.53	2.56
Terza Sottobanda	2.50	2.53

In questo caso, si osserva una differenza di distanza tra il picco in condizioni di spazio libero e con la portiera chiusa di circa 3 cm. Questa differenza è attribuibile al percorso aggiuntivo che il segnale compie passando attraverso il finestrino del veicolo, come illustrato nel seguente grafico che mostra lo schema del set-up e il percorso del segnale diretto e rifratto.

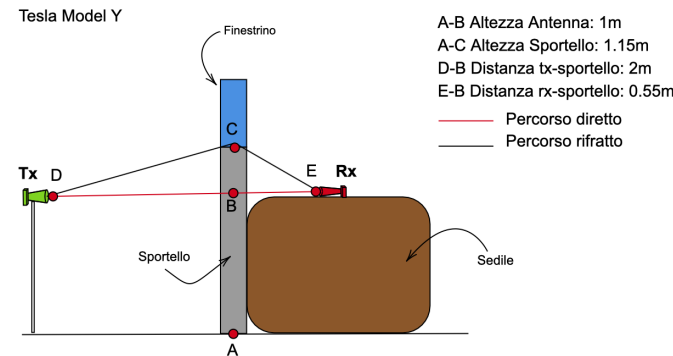


Figura 5.5: Percorso del segnale attraverso il finestrino.

5.5.2 Geometria caso OLoS da portiera Seat Leon

La stessa analisi è stata condotta sulla Seat Leon. Le distanze registrate sono riportate nella Tabella 5.6.

Tabella 5.6: Distanze dei Picchi Registrati per la Seat Leon

Sottobanda	Distanza Free Space (m)	Distanza OLoS (m)
Prima Sottobanda	2.74	2.77
Seconda Sottobanda	2.62	2.65
Terza Sottobanda	2.59	2.62

Anche in questo caso, si nota una differenza simile di circa 3 cm tra le distanze misurate in condizioni di spazio libero e con la portiera chiusa. Questo risultato è giustificato dal percorso aggiuntivo del segnale che attraversa il finestrino, come mostrato in un secondo grafico che illustra il percorso del segnale per la Seat Leon.

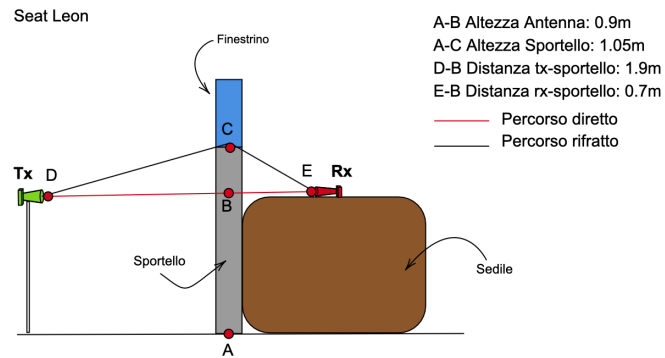


Figura 5.6: Percorso del segnale attraverso il finestrino.

In generale, nelle misure effettuate a frequenze FR3, il segnale trasmesso attraverso il finestrino ricade interamente sul componente studiato, mentre per il caso della portiera, bagagliaio e cofano, il segnale si estende anche ad altre parti del veicolo. Questa dispersione rende più complessa l'analisi poiché il segnale ricevuto può essere influenzato da più componenti contemporaneamente.

Capitolo 6

Analisi del Power Angle Delay Profile (PADP): Set-Up e osservazione dei dati

Nel presente capitolo viene descritto un set-up sperimentale speciale progettato per studiare la propagazione del segnale e le caratteristiche di ricezione di un'antenna in diverse configurazioni. In questo set-up, l'antenna ricevente viene posizionata all'interno del bagagliaio di un veicolo, collegata a un rotatore capace di ruotare l'antenna di 360° con step di 5° . Questo approccio consente di acquisire dati di ricezione del segnale da tutte le direzioni attorno al veicolo, simulando diverse condizioni di ricezione in scenari reali.

Sono stati definiti quattro scenari distinti per posizionare l'antenna trasmittente, al fine di valutare l'impatto delle varie posizioni sull'intensità e il ritardo del segnale ricevuto:

- **Scenario 1:** Antenna trasmittente posizionata esternamente, davanti al bagagliaio come mostrato in Fig. 6.1.
- **Scenario 2:** Antenna trasmittente posizionata all'interno, nel cruscotto come mostrato in Fig. 6.2.
- **Scenario 3:** Antenna trasmittente posizionata esternamente, davanti al cofano come mostrato in Fig. 6.3.

- **Scenario 4:** Antenna trasmittente posizionata lateralmente alla vettura come mostrato in Fig. 6.4.

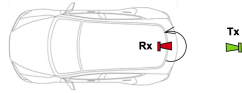


Figura 6.1: Set-up misure per valutare il PADP con trasmettitore esterno al bagagliaio.

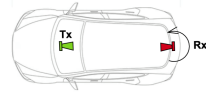


Figura 6.2: Set-up misure per valutare il PADP con trasmettitore nel cruscotto.



Figura 6.3: Set-up misure per valutare il PADP con trasmettitore esterno di fronte al cofano.

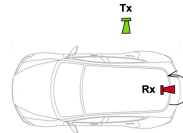


Figura 6.4: Set-up misure per valutare PADP con trasmettitore esterno laterale.

Per ogni configurazione, viene creato un grafico chiamato *Power Angle Delay Profile* (PADP). Questo grafico rappresenta l'intensità del segnale ricevuto (in termini di potenza) in funzione dell'angolo di rotazione dell'antenna ricevente, combinato con il ritardo temporale del segnale stesso. In altre parole, il grafico permette di osservare da quali direzioni proviene il segnale con maggiore intensità e a quale ritardo temporale, fornendo una panoramica dettagliata della propagazione del segnale in relazione alla geometria del veicolo e alla posizione dell'antenna trasmittente.

Per comprendere il grafico viene riportato il significato degli assi cartesiani:

- *Asse delle ascisse (x)*: rappresenta il ritardo temporale del segnale, ossia il tempo impiegato dal segnale per viaggiare dalla posizione dell'antenna trasmittente fino all'antenna ricevente.
- *Asse delle ordinate (y)*: rappresenta l'angolo di rotazione dell'antenna ricevente (0° - 360°), indicando la direzione da cui il segnale viene ricevuto.
- *Intensità del segnale (colori o livelli)*: viene rappresentata attraverso una scala cromatica dove i colori più intensi indicano una maggiore potenza del segnale ricevuto.

Osservando il PADP, è possibile determinare le direzioni principali di ricezione del segnale, identificare eventuali riflessioni o ostruzioni causate dal veicolo, e comprendere meglio come la posizione dell'antenna trasmittente influenzi la qualità e l'efficacia della ricezione.

Si analizza ora il *Power Angle Delay Profile* del primo scenario, dove l'antenna trasmittente è esterna alla vettura e di fronte al bagagliaio. La Fig. 6.5 mostra che l'intensità del segnale ricevuto è massima quando l'antenna ricevente è allineata con l'antenna trasmittente, a 0° e 360° . Ruotando l'antenna ricevente in senso antiorario, la potenza diminuisce gradualmente fino a un minimo attorno ai 130° , probabilmente a causa di ostruzioni o attenuazioni dovute alla geometria del veicolo. Successivamente, l'intensità aumenta nuovamente quando le antenne sono *Back-To-Front* a 180° , suggerendo un contributo delle riflessioni del segnale sulla superficie del veicolo. Questo comportamento evidenzia come la posizione relativa delle antenne e le riflessioni influenzino significativamente la distribuzione dell'energia del segnale ricevuto.

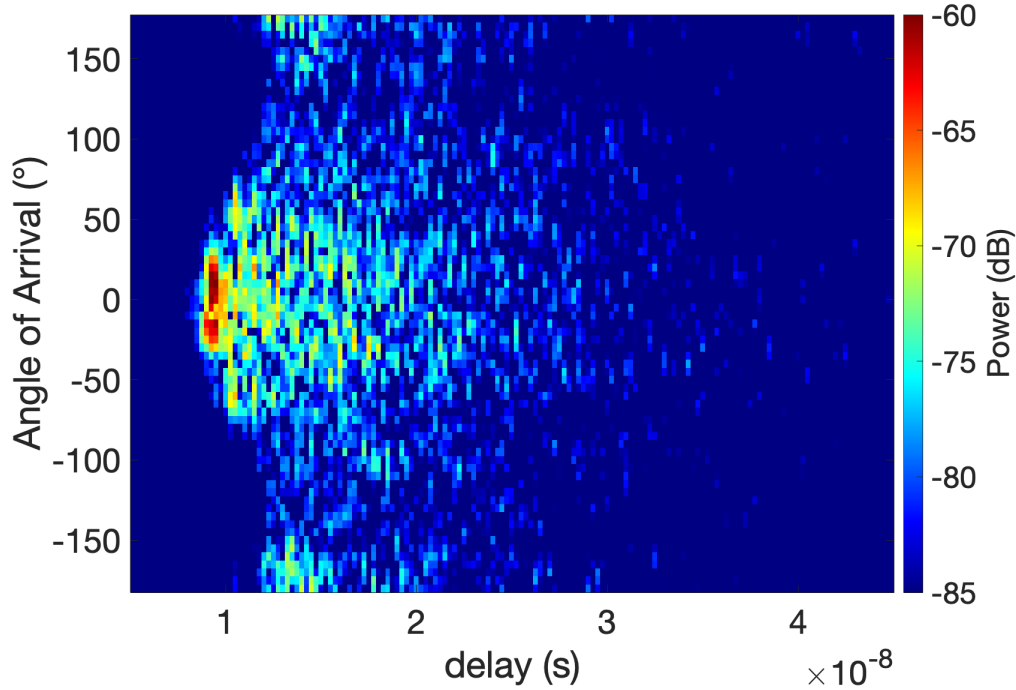


Figura 6.5: Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX esterno al bagagliaio, mostrato in Fig. 6.1.

Si prosegue l'analisi con il secondo scenario, in cui l'antenna trasmittente è posta nel cruscotto. Come si evince dalla Fig. 6.6 inizialmente le due antenne sono orientate per massimizzare la visibilità reciproca e di fatto si osserva il valore massimo di potenza ricevuta. Ruotando l'antenna ricevente in senso antiorario, progressivamente si osserva una diminuzione della potenza ricevuta fino a raggiungere un minimo a circa 100° ovvero nella condizione in cui antenna ricevente e trasmittente sono in quadratura. La potenza ricevuta aumenta leggermente quando l'antenna ricevente raggiunge 180° e si trova in configurazione *Back-To-Front* a causa delle riflessioni e dei cammini secondari del segnale. Per fornire una visione più chiara della distribuzione dell'intensità del segnale in funzione dell'angolo e del ritardo, viene inoltre presentato nella Fig. 6.7 un grafico 3D del PADP, che permette di visualizzare meglio le variazioni e i picchi di potenza.

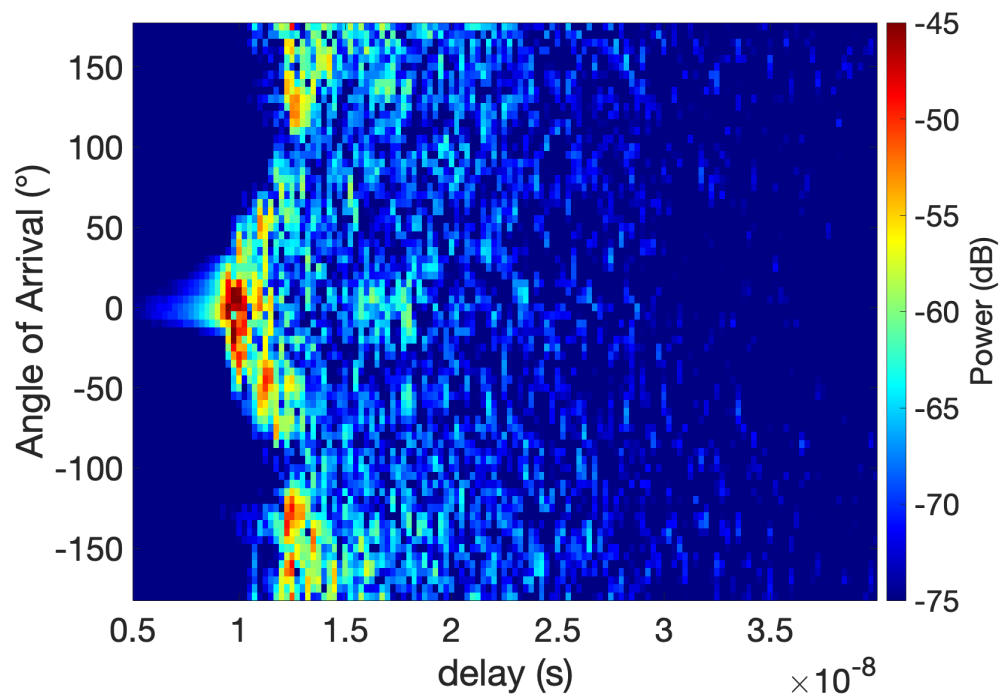


Figura 6.6: Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX nel cruscotto, mostrato in Fig. 6.2.

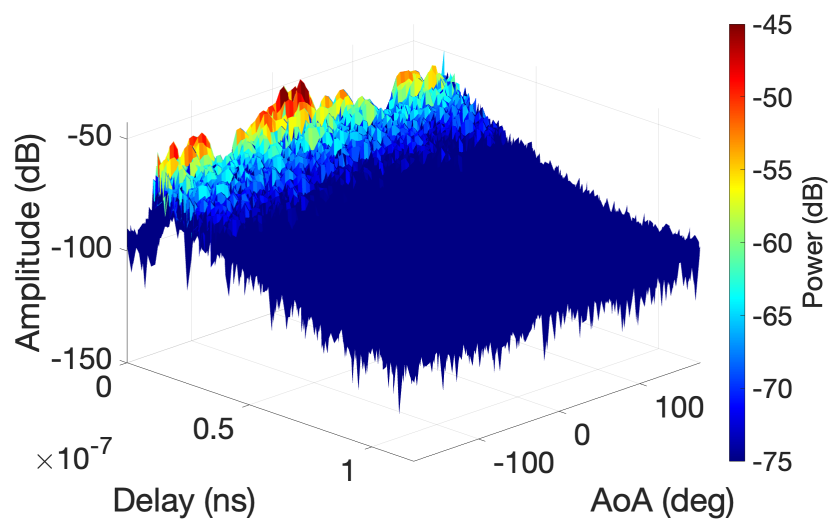


Figura 6.7: Grafico Power angle delay profile in 3D del set-up con RX nel bagagliaio e TX nel cruscotto, mostrato in Fig. 6.2.

Il terzo scenario prevede l'antenna trasmittente esterna davanti al cofano. Il grafico in Fig. 6.8 mostra che l'intensità del segnale ricevuto è massima quando le antenne si trovano *front to front*, a 0° e 360° . Ruotando l'antenna ricevente in senso antiorario, l'intensità diminuisce fino a un minimo attorno ai 100° , quando l'antenna ricevente è perpendicolare rispetto alla direzione del trasmettitore. Successivamente, l'intensità del segnale aumenta nuovamente, mantenendo una potenza significativa a 180° (*back to front*), probabilmente a causa di riflessioni dovute alla geometria del veicolo, simili a quelle osservate nel caso precedente. Il terzo e il secondo scenario appaiono simili, poiché simile è l'orientamento delle antenne. E' però interessante osservare come la potenza ricevuta nel terzo scenario sia sensibilmente inferiore al secondo, a causa della posizione esterna alla vettura dell'antenna trasmittente, al contrario del secondo scenario in cui essa era posta nel cruscotto.

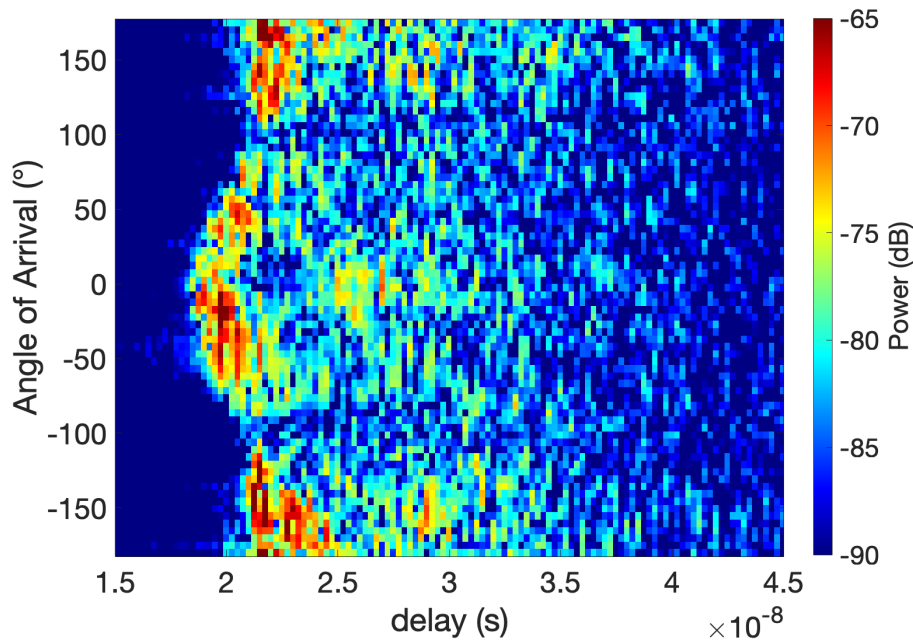


Figura 6.8: Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX esterno davanti al cofano, mostrato in Fig. 6.3.

Infine il quarto scenario prevede l'antenna trasmittente esterna sul fianco

del veicolo. Nel grafico PADP in Fig. 6.9 si osserva che l'intensità del segnale ricevuto è inizialmente minima, poiché le due antenne sono in quadratura. Tuttavia, ruotando l'antenna ricevente in senso antiorario, si registra un picco di potenza attorno ai 100° , momento in cui le antenne si trovano nella condizione di massima visibilità reciproca (*front to front*). Anche in questo scenario, sebbene in misura minore rispetto ai casi precedenti, si rileva una certa potenza ricevuta nella configurazione a 180° (*back to front*), attribuibile alle riflessioni del segnale dovute alla geometria del veicolo.

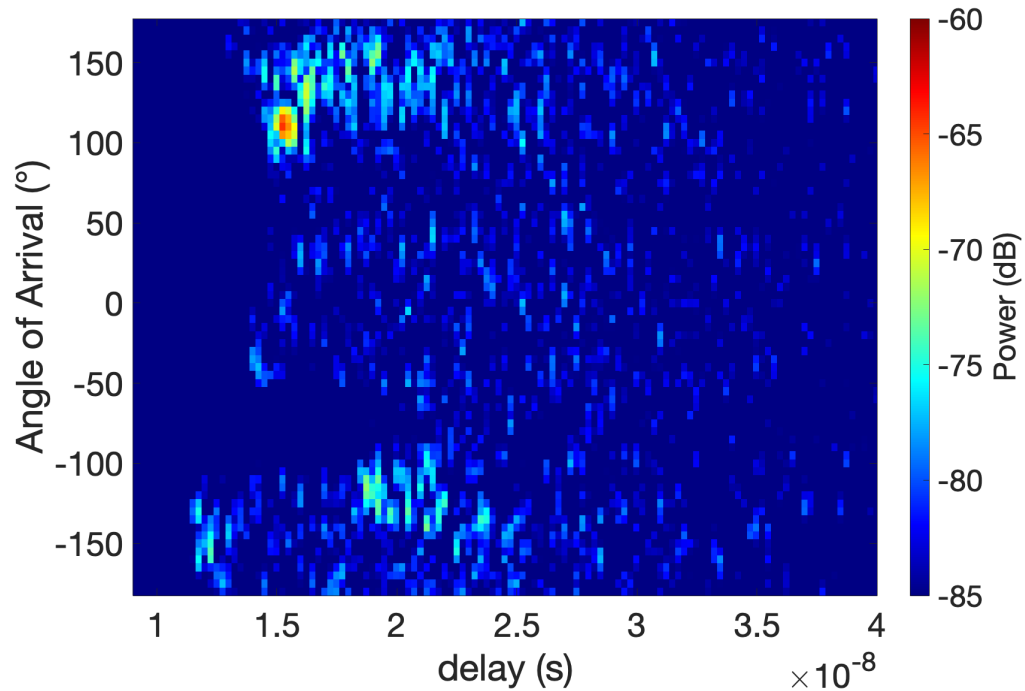


Figura 6.9: Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX esterno laterale, mostrato in Fig. 6.4.

Conclusione

Attraverso il percorso di studio svolto, è stato caratterizzato il canale radio a frequenze sub-THz e FR3, studiando diversi scenari di propagazione del segnale su due modelli di veicoli: la Tesla Model Y e la Seat Leon. Gli esperimenti si sono concentrati sulla misurazione del ritardo (delay spread), sulla selettività del canale e sull'attenuazione del segnale in diverse configurazioni, per fornire una comprensione più precisa del comportamento dei segnali alle frequenze considerate. I risultati ottenuti dal delay spread mostrano come i diversi scenari influenzino il tempo che i segnali impiegano per raggiungere il ricevitore, spesso dopo aver subito molteplici riflessioni. Un delay spread maggiore indica un segnale che arriva al ricevitore attraverso percorsi multipli, aumentando la complessità della ricezione. Questo aspetto è cruciale, poiché determina la capacità del sistema di discriminare tra le diverse copie del segnale e influisce direttamente sulle prestazioni complessive del sistema di comunicazione. Per quanto riguarda la selettività del canale, l'analisi ha rivelato che, alle frequenze FR3, il footprint del segnale è ampio, con molte riflessioni che influenzano la propagazione del segnale. Contrariamente, alle frequenze sub-THz, il footprint del segnale risulta molto più localizzato, implicando che il segnale viene attenuato più rapidamente dai materiali del veicolo. Questo fenomeno conferma che le frequenze più alte tendono ad essere più sensibili agli ostacoli, ma anche a creare percorsi di propagazione più definiti, dove solo una frazione del segnale riesce a passare. Lo studio dell'attenuazione ha evidenziato differenze significative tra le due bande di frequenza. In particolare, è stato riscontrato che l'attenuazione a frequenze sub-THz è significativamente maggiore rispetto a quella a frequenze FR3, un risultato che riflette la natura del comportamento di propagazione alle

frequenze più alte. L'importanza di questo risultato risiede nella capacità di fornire misure empiriche concrete che mostrano quanto il segnale venga attenuato dai materiali del veicolo, fornendo dati reali che possono guidare future implementazioni e ottimizzazioni nei sistemi di comunicazione ad alte frequenze. Infine, l'analisi dei grafici della Power Angle Delay Profile (PADP) ha confermato che la potenza del segnale è massima quando le antenne sono orientate l'una verso l'altra. Al contrario, i valori minimi sono stati registrati con le antenne in configurazione ortogonale (quadratura), a causa della minore quantità di riflessioni favorevoli. Tuttavia, sono state osservate anche configurazioni in cui il segnale è parzialmente trasmesso in configurazioni "back to front", grazie alle riflessioni. Questi risultati sono coerenti con quanto atteso e validano l'approccio sperimentale adottato. In sintesi, questa tesi ha fornito una caratterizzazione dettagliata del canale radio alle frequenze sub-THz e FR3, evidenziando come i diversi scenari di misurazione influenzino il delay spread, la selettività e l'attenuazione del segnale. Le misure effettuate hanno permesso di ottenere dati reali e concreti, contribuendo alla comprensione del comportamento dei segnali ad alte frequenze e offrendo indicazioni preziose per future ricerche e sviluppi nel campo della comunicazione wireless.

Bibliografia

- [1] Y. Chen, Y. Li, C. Han, Z. Yu, and G. Wang, “Channel measurement and ray-tracing-statistical hybrid modeling for low-terahertz indoor communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 12, pp. 8163–8176, 2021.
- [2] Y. Lyu, A. W. Mbugua, K. Olesen, P. Kyösti, and W. Fan, “Design and validation of the phase-compensated long-range sub-thz vna-based channel sounder,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2461–2465, 2021.
- [3] N. A. Abbasi, J. Gomez-Ponce, D. Burghal, R. Kondaveti, S. Abu-Surra, G. Xu, C. Zhang, and A. F. Molisch, “Double-directional channel measurements for urban thz communications on a linear route,” in *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2021, pp. 1–6.
- [4] K. Guan, B. Peng, D. He, J. M. Eckhardt, S. Rey, B. Ai, Z. Zhong, and T. Kürner, “Channel characterization for intra-wagon communication at 60 and 300 ghz bands,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 6, pp. 5193–5207, 2019.
- [5] B. D. Beelde, D. Plets, E. Tanghe, and W. Joseph, “Directional sub-thz antenna-channel modelling for indoor scenarios,” in *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2021.

- [6] ———, “Indoor radio channel modeling at d-band frequencies,” in *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2022.
 - [7] W. Fan, Z. Yuan, Y. Lyu, J. Zhang, G. Pedersen, J. Borrill, and F. Zhang, “Near-field channel characterization for mid-band elaa systems: Sounding, parameter estimation, and modeling,” 2024.
 - [8] K. Du, O. Ozdemir, F. Erden, and I. Guvenc, “Sub-terahertz and mm-wave penetration loss measurements for indoor environments,” in *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2021, pp. 1–6.
-

Elenco delle figure

1.1	Interfaccia del VNA	3
3.1	Rappresentazione schematica del set-up oggetto delle configurazioni 1A e 2A, in cui il Tx si trova di fronte al veicolo e il Rx all'interno dello scompartimento presente nel cofano. . . .	20
3.2	Schematico della configurazione 1B con Tx di fronte al veicolo e Rx all'interno del cruscotto.	22
3.3	Schematico della configurazione 2B con Tx di fronte al veicolo e Rx all'interno del cruscotto ruotato verso lo specchietto. . .	22
3.4	Schematico della configurazione 3B con Tx esterno laterale al veicolo e Rx all'interno del cruscotto.	22
3.5	Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 1B e 2B.	23
3.6	Rappresentazione configurazione 1C con Tx esterno laterale al veicolo orientato verso Rx posto sul sedile del conducente. . .	24
3.7	Rappresentazione configurazione 2C con Tx esterno laterale al veicolo ruotato verso sedili posteriori e Rx posto sul sedile del conducente.	24
3.8	Rappresentazione configurazione 1D/3D con Rx-Tx sul pavimento del veicolo, con le bocche delle antenne allineate. . . .	27
3.9	Rappresentazione configurazione 2D/4D con Rx-Tx sul pavimento, ma la bocca del Rx è ruotata di 90° verso il lato del passeggero.	27
3.10	Rappresentazione configurazione 5D con Rx sul pavimento e Tx su sedile e le bocche delle antenne sono allineate tra loro. .	27

3.11	Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 1D e 2D.	30
3.12	Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 3D e 4D.	30
3.13	Rappresentazione configurazione 1E/3E con Rx-Tx sui sedili del veicolo, con le bocche delle antenne allineate.	31
3.14	Rappresentazione configurazione 2E/4E con Rx-Tx sui sedili del veicolo, in configurazione Back-to-Front.	31
3.15	Grafico con le curve di power delay profile, in funzione del tempo e della sotto-banda, per le due configurazioni: 1E e 2E.	33
4.1	Channel Frequency Response (CFR), con time gating o meno, in tutta la banda FR3, per i casi dove la linea di vista è ostruita dalla portiera, dal cofano, dal finestrino e dal bagagliaio del veicolo Tesla Model Y.	38
4.2	Power Delay Profile (PDP) per tre differenti sotto-bande, per la configurazione in cui la linea di vista tra Tx ed Rx è ostruita dalla portiera completamente chiusa del veicolo Tesla Model Y.	39
4.3	Rappresentazione schematica del set-up che prevede antenna ricevente RX all'interno del cofano, a due altezze diverse, e antenna trasmittente TX di fronte al cofano.	40
4.4	Channel Frequency Response (CFR), con time gating o meno, per tutta la banda a sub-THz, per i casi dove la linea di vista è ostruita dal cofano nelle due configurazioni presenti in Fig.4.3.	40
5.1	Grafico analisi Penetration Loss in scenario veicolare a 110-170 GHz per finestrino, cofano e sedile per i differenti veicoli: Model Y Tesla e Leon Seat.	45
5.2	Grafico analisi Penetration Loss in scenario veicolare a 110-170 GHz per misure sotto il sedile per la Tesla Model Y.	46
5.3	Grafico di analisi del Penetration Loss in scenario veicolare al variare della frequenza nella banda 110-170 GHz per portiera, bagagliaio e cofano parzialmente chiusi, per due differenti modelli di veicolo: Model Y Tesla e Leon Seat.	48

5.4	Grafico di analisi del Penetration Loss in scenario veicolare al variare della frequenza nella banda 8-12 GHz con portiera, bagagliaio e cofano chiusi, per i differenti veicoli: Model Y Tesla e Leon Seat.	51
5.5	Percorso del segnale attraverso il finestrino.	54
5.6	Percorso del segnale attraverso il finestrino.	55
6.1	Set-up misure per valutare il PADP con trasmettitore esterno al bagagliaio.	58
6.2	Set-up misure per valutare il PADP con trasmettitore nel cruscotto.	58
6.3	Set-up misure per valutare il PADP con trasmettitore esterno di fronte al cofano.	58
6.4	Set-up misure per valutare PADP con trasmettitore esterno laterale.	58
6.5	Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX esterno al bagagliaio, mostrato in Fig. 6.1.	60
6.6	Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX nel cruscotto, mostrato in Fig. 6.2.	61
6.7	Grafico Power angle delay profile in 3D del set-up con RX nel bagagliaio e TX nel cruscotto, mostrato in Fig. 6.2.	61
6.8	Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX esterno davanti al cofano, mostrato in Fig. 6.3.	62
6.9	Grafico Power angle delay profile del set-up con RX nel bagagliaio e TX esterno laterale, mostrato in Fig. 6.4.	63

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto esprimere la mia profonda gratitudine al Professor Enrico Maria Vitucci per avermi dato l'opportunità di lavorare a un suo progetto di ricerca. Grazie alla sua disponibilità, ho potuto imparare e approfondire nuovi argomenti, e il suo supporto è stato fondamentale durante tutto il percorso.

Un sincero ringraziamento va alla Dottoressa Elena Bernardi, la mia correlatrice, che mi ha accompagnato con costanza lungo tutto il lavoro di tesi, offrendo sempre un prezioso aiuto e rimanendo al mio fianco di fronte a qualsiasi mio dubbio.

Alla mia famiglia devo un grande ringraziamento, perché è soprattutto grazie a loro se sono riuscito ad affrontare questo percorso universitario con serenità. Mi hanno sostenuto in ogni mia scelta, senza farmi mancare nulla. Ho sempre apprezzato il fatto che, in ogni decisione, ho potuto contare su una famiglia che, pur non evitando di farmi notare le criticità e le difficoltà, mi ha sempre supportato con sincerità e attenzione. Questo sostegno, caratterizzato da onestà e presenza costante, mi ha accompagnato nelle scelte più importanti. Intraprendere gli studi universitari a 24 anni è stata una decisione particolarmente difficile, carica di incertezze e paure per il futuro, ma la loro vicinanza nei momenti più difficili è stata determinante per affrontare ogni passo di questo percorso.

Un ringraziamento che voglio fare è sicuramente verso i miei amici di Cesena, perché è soprattutto grazie a loro se sono riuscito ad arrivare alla fine

di questo percorso. Saranno sorpresi di leggere un mio discorso in cui non mi sto lamentando, ma non preoccupatevi, avrò sicuramente modo di rifarmi! I primi tempi all'università non sono stati semplici: mi sentivo spaesato, fuori posto, anche a causa della mia età, che mi faceva sentire distante dagli altri ragazzi. Eppure, grazie alla loro costante presenza e alla loro capacità di farmi sorridere nei momenti più difficili, sono riuscito a superare quelle prime difficoltà e a vivere l'università con uno spirito più leggero e positivo. Con loro mi sono sempre sentito capito e valorizzato per quello che sono, senza mai dover fingere. Le amicizie che ho stretto in questi anni sono state la cosa più preziosa che mi sia successa, e il loro supporto è stato inestimabile, più di quanto le parole possano esprimere. Grazie a loro, ho vissuto momenti divertenti e indimenticabili che porterò sempre con me.

Un grazie speciale va anche ai miei amici di Rimini, che mi accompagnano da sempre. Sono loro che mi hanno visto crescere e cambiare, e che hanno sostenuto sin dall'inizio e con entusiasmo questa nuova avventura. Anche se non sono una persona che si fa sentire spesso, voglio che sappiano quanto le loro amicizie siano un elemento fondamentale della persona che sono diventato. Sono felice di averli nella mia vita e profondamente grato per la loro presenza e il loro supporto nel corso degli anni. Il legame che abbiamo costruito, attraversando diverse fasi della vita, è qualcosa di veramente speciale e unico.

Per ultimo, ho voluto riservare questo ringraziamento a Claudia, che è la persona che più di tutti mi è stata vicina e che conosce tutte le difficoltà e le paure che ho affrontato. Hai ascoltato ogni mio sfogo e hai saputo supportarmi con pazienza anche quando mi perdo in mille pensieri ripetitivi. Ti ringrazio sinceramente per avermi sempre consigliato ciò che ritenevi fosse meglio per me. Gli ultimi anni sono stati molto complicati, come non avremmo mai immaginato, e voglio dirti qualcosa che forse non ho mai espresso, ma su cui credo fermamente: di fronte a tutte le difficoltà e paure ho sempre visto in te una forza straordinaria nel non arrenderti e nel rialzarti. Questa forza mi ha profondamente colpito, diventando motivo di grande orgoglio e stima per la persona che sei. È grazie alla tua determinazione che ho trovato

il coraggio di fare le mie scelte, e la forza che hai dimostrato e che continui a dimostrare mi spinge, nonostante i miei limiti, a cercare la mia.

Un grazie di cuore a tutti coloro che hanno condiviso con me questo percorso. Spero di aver potuto aggiungere qualcosa di speciale alla vostra esperienza, così come voi avete arricchito la mia. Grazie a tutti!.

