La Comunicazione - Note, Recensioni e Notizie n. 70
Anno 2025

Studio sperimentale e numerico della perdita di penetrazione veicolare in scenari V2X

Experimental and numerical study of vehicle penetration loss in V2X scenarios

Marina Lotti[♦] , Andrea Garzia[♦], Claudia Carciofi[♦], Simona Valbonesi[♦]

♦ Fondazione Ugo Bordoni – Roma - Italy

Sommario

Una valutazione corretta e rigorosa delle perdite del segnale radio all'interno delle auto, in inglese *Car Penetration Loss* (CPL), e dei mezzi di trasporto in generale, è un fattore rilevante nell'ambito degli studi riguardanti la propagazione radio e la copertura delle reti 5G e 6G, in particolare per quanto riguarda gli scenari di comunicazioni mobili avanzate nel settore automotive, incluse le applicazioni *vehicle-to-vehicle* (V2V) e soprattutto *vehicle-to-everything* (V2X).

Questo articolo presenta i risultati di una nuova campagna sperimentale multifrequenza nelle bande 4G e 5G nel range 700 – 3800 MHz finalizzata allo studio del comportamento del segnale radio all'interno di una vettura ed alla valutazione delle perdite di penetrazione dovute all'auto. Tale campagna sperimentale integra analoghe misurazioni eseguite in prossimità di un diverso sito radiomobile caratterizzato da un diverso ambiente di propagazione e da diverse configurazioni di misura.

Lo studio esamina come il comportamento del segnale misurato all'interno dell'auto sia influenzato da una serie di variabili rilevanti come, l'orientamento della vettura rispetto alla direzione di provenienza del segnale radio, la posizione del dispositivo ricevente che si trova a bordo e le caratteristiche dei vetri dell'auto. Inoltre, viene presentata una valutazione simulativa del segnale radio effettuata con tecniche di ray-tracing 3D finalizzata allo studio ed alla caratterizzazione delle perturbazioni del campo elettromagnetico causate da un veicolo.

Abstract

A proper and rigorous assessment of Car Penetration Loss (CPL) is a crucial factor for propagation and coverage prediction of 5G and 6G networks, especially for automotive mobile advanced communications scenarios, V2V and V2X included. This paper presents a novel multi-frequency measurement campaign of in-car penetration loss in the frequency range 700–3800 MHz, which complements previous experimental measurements performed in a different environment and for different scenarios. The study examines how signal behaviour is influenced by a set of relevant variables, including frequency, vehicle orientation relative to the signal, the on-board device's position, and characteristics of the car glazing. Additionally, a preliminary analysis using 3D ray-tracing techniques is proposed to investigate the electromagnetic field perturbations caused by a vehicle.

Keyword

Automotive, CPL, measurements, Penetration Loss, ray-tracing, simulations, V2X, 5G, 6G

1 - Introduzione

La comprensione delle modalità di propagazione del segnale radio all'interno dei veicoli è diventata rilevante dal momento che le auto ospitano un numero sempre crescente di dispositivi connessi, che vanno dai sistemi di infotainment, agli smartphone, fino ad arrivare alle unità avanzate di assistenza alla guida autonoma. Inoltre, la caratterizzazione del canale radio all'interno ed in prossimità dei veicoli è fondamentale per la sicurezza e l'affidabilità delle comunicazioni V2X e per ottimizzare l'integrazione del 5G-NR nel settore automotive.

Questo articolo affronta la necessità di identificare tramite diverse tipologie di campagne sperimentali una metodologia affidabile per il calcolo delle perdite di penetrazione in-car , un parametro chiave per garantire la copertura e la potenza di segnale richiesta dai dispositivi connessi e dai sistemi di guida autonoma.

Studi scientifici condotti in ambito CEPT [1], ITU [2] e 3GPP [3] hanno dimostrato che le perdite di penetrazione all'interno della carrozzeria delle auto dipendono da molteplici parametri

(materiali, geometrie, direzioni del segnale). Tuttavia, manca ancora una metodologia generale e scalabile per il calcolo delle perdite di penetrazione in-car, e la letteratura disponibile è limitata; tutto ciò rende urgente l'indagine scientifica su questa tematica.

L'articolo presenta i risultati di uno studio scientifico che combina misurazioni e simulazioni finalizzate a stabilire un approccio coerente alla definizione di valori di CPL da applicare in diversi scenari attuali e futuri.

La nuova campagna di misurazione CPL (che integra e completa altri test sul campo effettuati in precedenza) è stata condotta nell'intervallo di frequenza 700–3800 MHz utilizzando un analizzatore di spettro, per raccogliere dati in diverse posizioni all'interno dell'abitacolo e con diversi orientamenti dell'auto rispetto alla Stazione Base (BS).

I risultati sperimentali sono stati confrontati con i valori di riferimento specificati nel documento 3GPP ETSI TR38.901 [3] per identificare eventuali deviazioni tra il modello standardizzato ed i contesti operativi reali.

Sono state eseguite anche simulazioni con tecniche di 3D ray-tracing nell'intervallo 700 MHz–3800 MHz, e nelle bande 6 GHz e 26 GHz. Tali simulazioni sono state effettuate al fine di identificare i meccanismi di propagazione all'interno dell'abitacolo (multi-cammino, riflessioni, diffrazioni, schermature), di fornire un metodo di calcolo simulativo rigoroso della CPL da confrontare con le misure e di caratterizzare la propagazione nelle immediate vicinanze del veicolo ("Near-Car"), elemento ritenuto fondamentale per le comunicazioni V2V e V2X.

Come già anticipato, in letteratura è disponibile un numero limitato di lavori specifici: alcuni esempi si possono trovare in [5], dove la CPL è stata misurata nell'intervallo di frequenza 600 MHz–2400 MHz con valori medi ottenuti che variano da 3.2 dB a 23.8 dB. Un altro studio [6] focalizzato sulle frequenze fino a 6 GHz ed effettuato impiegando una berlina di ultima generazione, ha fornito come risultati un valore medio di CPL di 3 dB in caso di vetri senza rivestimento, 6.6 dB in caso di finestrini con pellicola e 20.7 dB in caso di finestrini ricoperti con pellicola metallica in alluminio. Infine, uno studio condotto da OFCOM/LSTelcom relativo al range frequenziale 800-2600 MHz e che ha coinvolto diversi modelli di auto [7], ha ottenuto

risultati comparabili a quelli ottenuti con le indagini che costituiscono il focus di questo articolo. Preliminarmente all'analisi oggetto del lavoro qui presentato erano stati effettuati, da parte della Fondazione Ugo Bordoni, studi sia di tipo compilativo, sia basati su campagna di misura e simulazioni numeriche [4], [8], [9], che hanno messo in evidenza l'elevata complessità degli scenari in-car ed in-train. Le misurazioni effettuate per lo scenario in-car nella banda 700 – 3700 MHz hanno evidenziato valori medi della CPL compresi tra 2 e 6 dB con massimo attorno ai 13 dB [2], [3], in linea con quanto pubblicato in letteratura.

2 – Descrizione della nuova campagna di misure e risultati ottenuti

La catena strumentale utilizzata per la campagna di misura è costituita da un analizzatore di spettro portatile (Narda SRM-3006) [10] in grado di misurare selettivamente il campo elettrico sia all'interno sia all'esterno del veicolo.

Come sorgente di segnale radio è stata scelta una stazione base operativa sul territorio del Comune di Bologna a Casteldebole, in un contesto di periferia urbana.

Le misurazioni sono state eseguite in modalità Channel Power inizialmente in assenza di veicolo, al fine di ottenere una base di riferimento, poi considerando tre diversi orientamenti del veicolo rispetto alla stazione base (frontale, retro e laterale), come mostrato in Figura 1.

***Figura 1** – Orientamenti del veicolo rispetto alla stazione base*

All'interno della vettura sono state considerate cinque diverse posizioni (Figura 2):

- Sedile anteriore sinistro e destro (S1, S2)
- Sedile posteriore sinistro e destro (S3, S4)
- Pianale del veicolo (solo per S1, limitato alla configurazione frontale)
- Bagagliaio (R)

Per ciascuna frequenza e ciascun canale sono stati acquisiti più di 1000 spettri (istantanee temporali dell'evoluzione dello spettro); la CPL è stata stimata calcolando la differenza tra il campo elettrico misurato all'esterno del veicolo e quello misurato al suo interno.

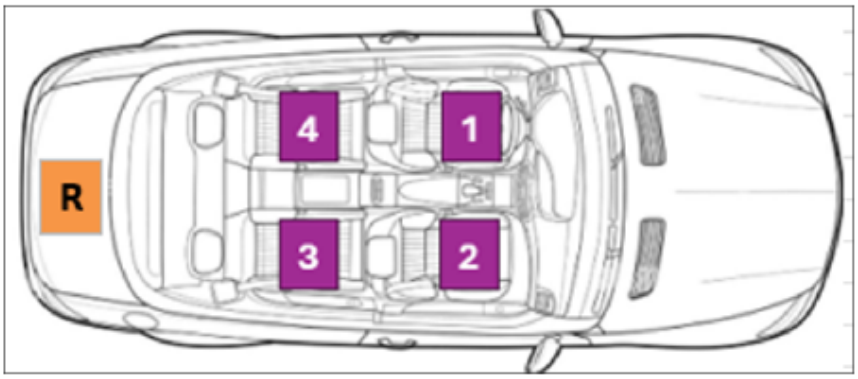


***Figura 2** – Posizioni interne all'auto selezionate per la misura*

La CPL, infatti, è definita come rapporto tra due valori:

$$CPL(f) = 20log_{10}\left(\frac{|E_{out}(f)|}{|E_{in}(f)|}\right) \qquad (1)$$

dove $E_{out}(f)$ ed $E_{in}(f)$ sono il campo elettrico misurato per la frequenza f all'esterno ed all'interno dell'auto rispettivamente. Questo calcolo viene eseguito per ciascun canale che presenta un segnale non trascurabile all'interno della larghezza di banda considerata. Attraverso una analisi sui singoli canali di frequenza è possibile caratterizzare le perdite di penetrazione su tutta la banda oggetto di studio.

2.1 - Analisi dei risultati: indagine sulla frequenza

Per questo studio il veicolo è stato trattato come una entità unica, aggregando i risultati (Tabella 1) senza distinguere tra le singole posizioni dei passeggeri (Sedili 1 – 4, Figura 2). La

tabella presenta i valori medi misurati (con la relativa deviazione standard) ed i valori massimi. I dati delle misure ottenuti con l'analizzatore di spettro sono stati combinati indipendentemente dai tre orientamenti del veicolo rispetto alla Stazione Base (BS). Sono stati esclusi dall'analisi posizioni non standard come l'interno del bagagliaio e la zona sotto i sedili. In alcuni scenari, i valori di CPL calcolati sono risultati negativi, probabilmente a causa della natura riflettente della carrozzeria metallica dell'auto.

Tabella 1. Valori massimi e medi della CPL al variare della frequenza

Frequenza (MHz)	CPL_{medio} +/- dev std (dB)	CPL_{max} (dB)
700	3.22 ± 2.8	9.1
800	2.88 ± 1.8	5.72
900	1.81 ± 3.6	8.61
1800	4.97 ± 2.6	13.9
2100	4.82 ± 3.4	11.49
2600	2.64 ± 3.4	9.6
3700	4.98 ± 5	16.6

Le riflessioni multiple e lo scattering all'interno della struttura del veicolo possono infatti causare una sovrapposizione costruttiva del segnale, creando un guadagno apparente anziché l'attesa attenuazione [5].

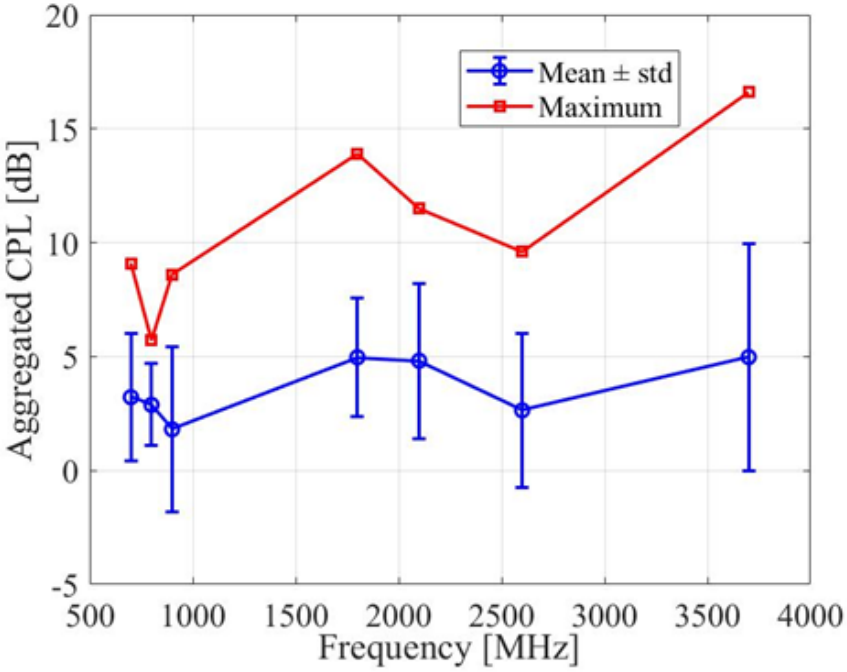


***Figura 3** – Analisi in frequenza della CPL*

In Figura 3 sono riportati i valori medi (con relative deviazioni standard) e massimi della CPL in funzione della frequenza; il dato è relativo alle posizioni standard interne all'abitacolo (sedili S1-S4). L'analisi visiva degli andamenti conferma che non è possibile definire una chiara relazione (lineare o esponenziale) tra CPL e frequenza; questa conclusione è supportata da analisi statistiche basate sul parametro R^2 per il modello lineare e pseudo R^2 per il modello non lineare. Il parametro R^2 confronta la varianza del modello applicato con la varianza dei dati ed è un numero compreso tra 0 e 1. Più il valore è vicino a 1, migliore sarà l'aderenza dei dati al modello selezionato; nel caso specifico, il valore di R^2 più alto riscontrato è pari a 0.37 a confermare l'assenza di relazioni a legare la CPL media alla frequenza nell'intervallo oggetto di indagine. L'andamento del valore massimo della CPL mostra una tendenza crescente all'aumentare della frequenza.

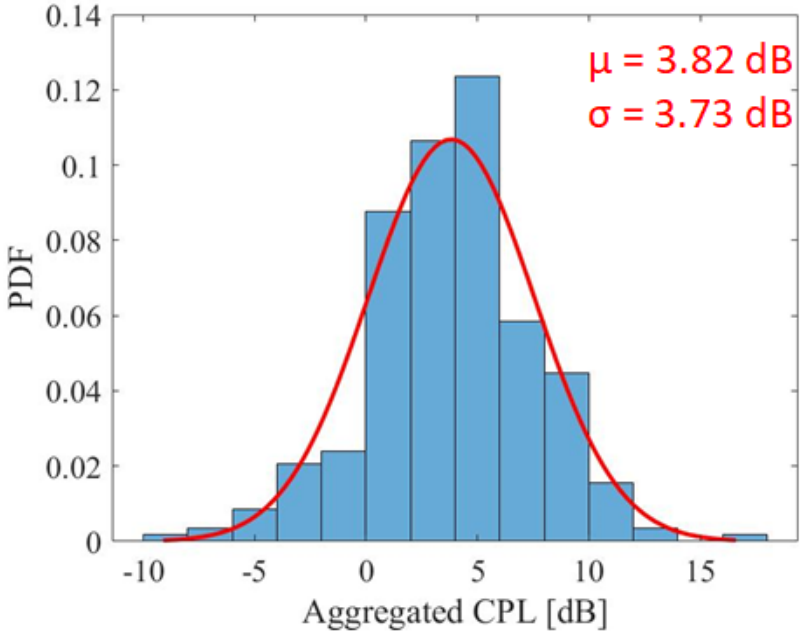


***Figura 4** – Distribuzione della CPL totale*

Successivamente, è stato condotto uno studio statistico sulla distribuzione dei dati di misura considerando le posizioni S1-S4 ed aggregando i valori ottenuti per tutte le frequenze. Da questa analisi, i cui risultati sono riportati in Figura 4, emerge che la CPL segue una distribuzione Gaussiana per la quale sono stati calcolati la media (μ), la deviazione standard (σ) ed i rispettivi intervalli di confidenza al 95%. La densità di probabilità per una distribuzione gaussiana è data da:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad (2)$$

Sulla base dei valori di CPL ottenuti tramite misurazioni all'interno dell'abitacolo, i parametri ottenuti sono μ = 3.82 dB con un intervallo di confidenza del 95% di [3.39 - 4.25] dB e σ = 3.73 dB con un intervallo di confidenza del 95% di [3.45 - 4.06] dB. L'elevata deviazione standard conferma la già segnalata variabilità dei dati misurati.

2.2 – Variazioni della CPL in funzione dell'orientamento della vettura

L'obiettivo di questo studio consiste nel verificare l'effetto dell'orientamento dell'auto sui valori della CPL. L'analisi è stata condotta considerando l'auto come entità unica (senza distinguere le posizioni al suo interno) e aggregando tutti i dati di frequenza; questo è stato possibile dal momento che non è emersa alcuna relazione specifica tra frequenza e CPL nella banda oggetto di indagine.

Tabella 2. CPL media e massima per diversi orientamenti

Posizione	Angolo ϑ	CPL_{media} (dB)	CPL_{max}(dB)
Frontale	**0°**	**3.02 ± 4.0**	**16.6**
Retro	180°	3.80 ± 2.6	11.4
Laterale	90°	4.60 ± 3.7	13.9

Come evidente da Tabella 2, la CPL media più bassa (3.02 dB) si ottiene nella posizione frontale, suggerendo che il segnale radio penetra agevolmente attraverso il parabrezza e le riflessioni generate dal cofano creano uno scenario multi-cammino con fenomeni di somma costruttiva che tendono ad abbassare i valori di CPL. Questo complesso fenomeno verrà trattato in dettaglio nella Sezione 4.

2.3 – Variabilità della CPL per diverse posizioni all'interno della vettura

La tabella 3 mostra i valori medi e massimi di CPL calcolati per diverse posizioni all'interno del veicolo, includendo il bagagliaio e il pavimento dell'auto (come indicato nelle specifiche di Figura 2).

Tabella 3. CPL media e massima per differenti posizioni all'interno dell'abitacolo

Posizione	Frontale	Laterale	Retro
S1 - Media	2.16 ± 4.8	5.4 ±2.9	4.02 ±2.9
S1 - Max	12 ± 4.8	11.1 ± 2.9	8.99 ± 2.9
S2 – Media	2.33 ±4.3	4.72 ±3.2	4.46 ± 2.7
S2 – Max	10.2 ± 4.3	11.3 ±3.2	11.4 ±2.7
S3– Media	3.49 ± 3.5	3.29 ± 4.9	3.27 ± 2.1
S3 – Max	11.7 ± 3.5	13.9 ± 4.9	7.3 ±2.1
S4 – Media	4.12 ± 4.9	5.22 ± 3.7	3.48 ± 2.7
S4 – Max	16.6 ± 4.9	11.5 ± 3.7	8.6 ± 2.7
Bagagliaio – Media	6.71 ± 4.5	0.26 ± 4.7	3.8 ± 4.6
Bagagliaio - Max	15.7 ± 4.5	7.9 ± 4.7	13.1 ± 4.6
Pavimento – Media	3.39 ± 4.8	-	-
Pavimento – Max	13.8 ± 4.8	-	-

Dal momento che le analisi riportate nella Sezione 2.1 hanno evidenziato la non variabilità della CPL rispetto alla frequenza, l'analisi statistica è stata eseguita aggregando tutte le frequenze e focalizzandosi solo sull'orientamento dell'auto rispetto alla BS e sulla posizione del ricevitore al suo interno.

Dalla analisi dei dati di Tabella 3 sono emerse le seguenti considerazioni:

- **Sedili posteriori:** posizionare lo User Equipment (UE) sui sedili posteriori aumenta la CPL media di 1.32 - 1.97 dB. L'effetto è massimo quando l'auto si trova in una posizione frontale rispetto alla stazione base trasmittente. I valori massimi di CPL subiscono un aumento maggiore, variabile da 2.9 a 6.4 dB.
- **Bagagliaio**: la posizione dello UE nel bagagliaio causa un incremento della CPL media che varia da 0.26 dB (per orientamento laterale) a 6.71 dB (per orientamento frontale).
- **Pavimento dell'Auto**: La misurazione singola effettuata sul pavimento dell'auto in prossimità del sedile anteriore sinistro (auto frontale) non ha mostrato variazioni significative di CPL rispetto al posizionamento dello UE sui sedili. Tuttavia, la limitatezza dei dati impedisce di trarre conclusioni generali senza ulteriori analisi.

2.4 - Effetto della composizione dei vetri sulla CPL

Il veicolo utilizzato per la campagna di misure presenta due tipologie di vetratura: i finestrini anteriori (posizione S1 ed S2) sono realizzati in vetro ordinario mentre quelli posteriori (posizioni S3 ed S4) sono in vetro oscurato contenente una minima percentuale di materiale metallico. Ciò ha permesso un confronto di massima sull'impatto dei due tipi di vetro sulla CPL, limitato alla posizione laterale dove il segnale incide direttamente sui finestrini. I risultati delle analisi hanno mostrato che l'utilizzo di vetri oscurati aumenta la CPL media di 0.24 - 0.94 dB, con effetto più marcato a 2600 MHz (0.94 dB) e nella banda 3.4-3.8 GHz (0.64 dB). Questo dato è in linea con i risultati delle precedenti analisi [4].

Si prevede, anche sulla base di riscontri in letteratura [11], che aumenti maggiori possano verificarsi in caso di vetri completamente metallizzati. Tuttavia, non è stato possibile indagare questo aspetto a causa dell'indisponibilità di un veicolo idoneo.

2.5 – Confronto tra dato misurato e modello teorico

La CPL a valore singolo è una metrica statistica usata per rappresentare in un unico numero l'attenuazione complessiva del segnale all'interno di un veicolo, semplificando un fenomeno altamente variabile; tale variabilità è stata registrata nella prima campagna di misura [4], [8], [9] e confermata ulteriormente dalle indagini oggetto di questo articolo.

Sebbene la definizione di un singolo valore di CPL sia complessa a causa di variabili come l'orientamento del veicolo rispetto alla direzione del segnale radio, la posizione del ricevitore e la composizione dei finestrini, l'uso di tale metrica è giustificato dalla assenza di una relazione tra CPL e frequenza nel range oggetto di studio.

I risultati della presente campagna di misurazione confermano la variabilità della CPL (supportata dalle elevate deviazioni standard) i cui valori variano da 1.81 a 4.98 dB, in linea con studi precedenti [4].

Ai fini del confronto tra dato misurato e dato teorico, i valori medi e le deviazioni standard ottenuti sono stati confrontati con i valori medi (μ) e le deviazioni standard (σ) del modello CPL O2I standardizzato dal 3GPP nel Report Tecnico 3GPP TR38.901 [3] e valido nel range di frequenza 0.6 – 60 GHz.

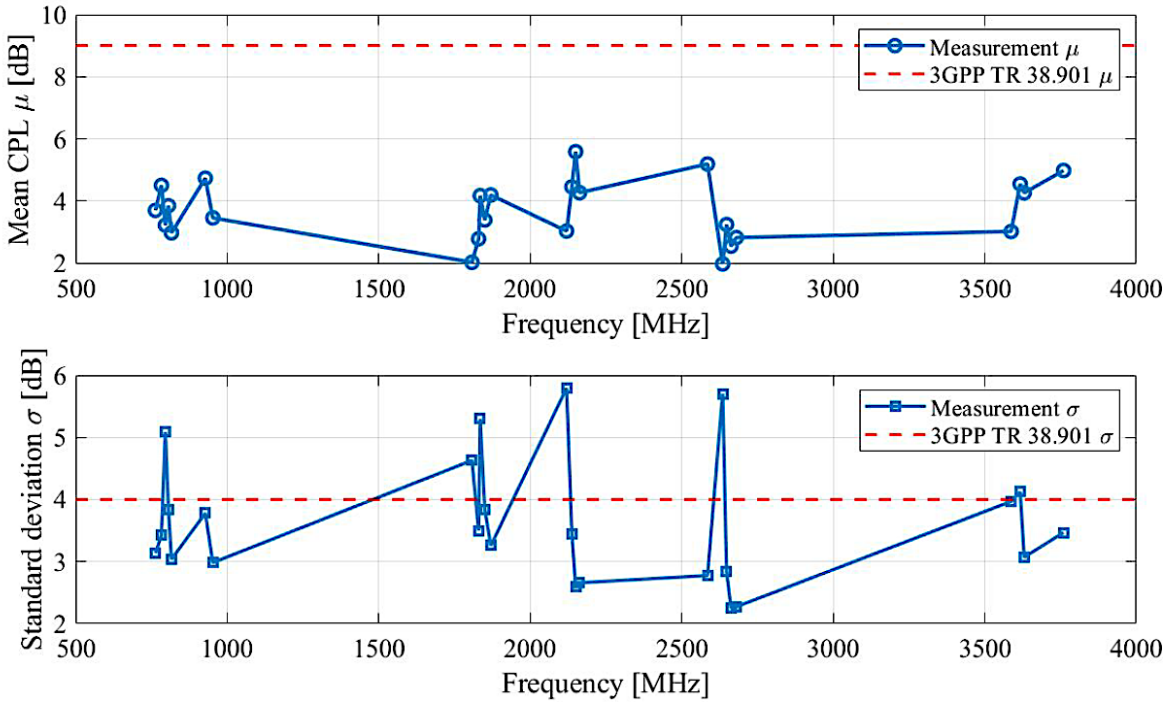


***Figura 5** - Confronto con modello 3GPP38.901 – dati aggregati*

È opportuno notare che anche il 3GPP [3] fornisce un valore unico di CPL inteso come media (μ) con la relativa deviazione standard (σ). Di seguito viene riportata una breve descrizione, non esaustiva, del modello [3] riguardante i contesti in-car.

In [3] la perdita di cammino che incorpora la perdita di penetrazione O2I di un veicolo è modellata come segue:

$$PL = PL_b + N(\mu, \sigma_P^2) \qquad (3)$$

Dove PL_b sono le perdite di cammino in ambiente outdoor, μ =9 e σ_P = 5; per le macchine con finestrini in vetro metallizzato viene posto μ =20. I due parametri μ e σ rappresentano la CPL e la relativa deviazione standard.

L'esito del confronto tra la CPL media misurata e la relativa deviazione standard e i valori di μ e σ riferibili al modello [3] è mostrato in Figura 5 dove sono state considerate tutte le posizioni analizzate, bagagliaio incluso.

Dalla analisi di Figura 5 emerge che la CPL media misurata è inferiore al valore di riferimento indicato da 3GPP (pari a 9 dB) [3], mentre la deviazione standard è comparabile.
Questa discrepanza nella media potrebbe essere attribuibile a diversi fattori:

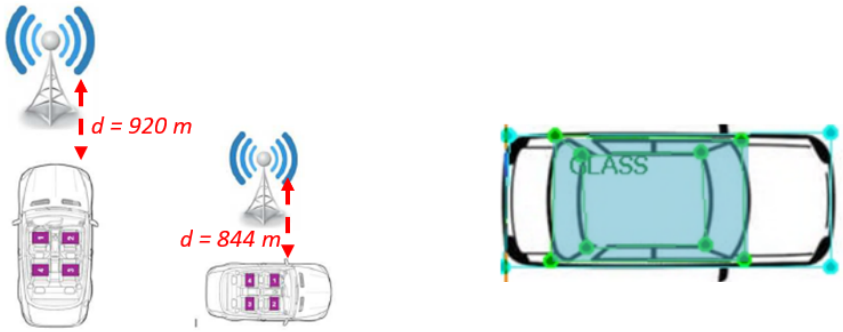
1. **Condizioni ambientali e materiali**: Le condizioni ambientali durante la campagna di misura potrebbero essere state più favorevoli rispetto a quelle assunte da 3GPP [3]. Ad esempio, la presenza di vetri meno attenuanti o finestrini più ampi, o l'effetto di riflessioni esterne (come quelle provenienti dal terreno, non incluse nel modello) potrebbero avere giocato un ruolo fondamentale.
2. **Somma costruttiva**: In un ambiente reale le riflessioni multiple all'interno del veicolo possono creare fenomeni di somma costruttiva, aumentando l'intensità del campo interno al veicolo e riducendo così la perdita di penetrazione apparente.
3. **Range di frequenza**: Il range di frequenza considerato nella campagna di misura (700 – 3800 MHz) potrebbe comportare un'attenuazione media inferiore rispetto al range più esteso considerato nel Technical Report TR38.901 [3].

La deviazione standard, comparabile con quella indicata in [3], conferma invece l'elevata e prevista variabilità del segnale causata dagli effetti multipath e dalla complessa geometria del veicolo.

3 - Simulazioni numeriche

Le simulazioni numeriche sono state condotte, al fine di un confronto con i dati misurati, su due scenari distinti illustrati in Figura 6-a:

- Scenario 1 – vettura posizionata frontalmente rispetto alla direzione del segnale
- Scenario 2 – vettura posizionata lateralmente rispetto alla direzione del segnale radio



a) Scenari e distanze b) Modello per la vettura

***Figura 6** – Scenari simulati e modellizzazione della vettura*

3.1 – Tool di simulazione e parametri

Data la complessità intrinseca che caratterizza la creazione del modello di una automobile, per non complicare ulteriormente lo scenario si è deciso di ricorrere ad un ambiente semplificato dal punto di vista della geometria che include unicamente il veicolo e la Stazione Radio Base. Si è quindi assunto che il ricevitore sia posto all'interno della macchina e che non siano presenti altri ostacoli tra la BS trasmittente (Tx) ed il ricevitore (Rx).

Il modello veicolare (Figura 6-b) consiste in un telaio metallico con finestrini in vetro ordinario e il tettuccio metallico; risultano quindi tre microambienti distinti al fine della propagazione del segnale radio:

1. Parte inferiore dell'abitacolo, dal pavimento dell'auto fino ai finestrini, caratterizzata dalla presenza predominante di materiale metallico che blocca completamente o parzialmente l'ingresso del segnale radio ma non le riflessioni di quest'ultimo all'interno;
2. Area dei finestrini – zona vetrata che permette una facile penetrazione del segnale;
3. Bagagliaio dell'auto – costituisce un ambiente separato e distinto.

Nel modello non sono stati considerati gli interni dell'auto (sedili inclusi), tipicamente costituiti in plastica o pelle.

Le simulazioni numeriche, destinate al confronto con i dati misurati, sono state eseguite con il tool proprietario ARMONICA [12] (sviluppato dalla Fondazione Ugo Bordoni in collaborazione con l'Università di Bologna) basato su tecniche di ray-tracing 3D che tengono conto dei fenomeni di assorbimento, riflessione e diffrazione [13].

Sono state eseguite due simulazioni distinte per ciascuna posizione di ricezione:

- Simulazione ad alta risoluzione (dimensioni del pixel 0.01x0.01 m^2) dei livelli di campo *E* nell'area evidenziata in blu di Figura 6-b effettuata con l'obiettivo di ottenere valori di CPL interni all'abitacolo da utilizzare negli studi di compatibilità, condivisione, copertura, impatto ambientale e comunicazione V2X.
- Simulazione dell'intero veicolo all'interno di uno scenario più ampio (scenario Near-Car) finalizzata a visualizzare gli effetti della presenza del veicolo sulla propagazione del segnale radio outdoor. Questa analisi, al momento solo preliminare, è destinata ad applicazioni Vehicle-to-Vehicle e soprattutto Vehicle-to-Everything.

I parametri utilizzati per le simulazioni numeriche sono riepilogati in Tabella 4.

Tabella 4. Parametri per simulazioni numeriche

Parametro	Valore
Frequenza	700, 1800, 2100, 2600, 3700 MHz,6 GHz, 26 GHz
Altezza della BS	4 m
EIRP	59.83 dBm
Piano di simulazione	Orizzontale
Altezza del piano di simulazione	1.05 m da terra
Dimensioni pixel	0.01x0.01 m^2 per scenario in-car 0.10 x 0.10 m^2 per scenario near-car

Il segnale radio viene generato da una singola BS, posizionata a una distanza variabile dall'auto a seconda dello scenario (come illustrato in Figura 6-a): 920 cm dall'inizio del cofano (Scenario 1) o 844 cm dalla portiera laterale (Scenario 2).

4 - Risultati delle simulazioni e confronti

Per il calcolo della CPL è stato adottato l'approccio "point to point" descritto in [4] che segue tre passaggi chiave:

1. Simulazione del campo elettrico E interno all'auto (area blu di Figura 5-b) con ray-tracing 3D;
2. Simulazione del campo elettrico E in spazio libero nell'area occupata dalla vettura;
3. Confronto dei due valori di campo (espressi in dB).

I risultati numerici sono stati poi messi a confronto con i dati misurati per entrambi gli scenari definiti e descritti in Sezione 3.1.

4.1 – Scenario 1 – Posizione frontale

Figura 7-a e Tabella 5 mostrano il confronto tra i valori medi di CPL ottenuti dalle simulazioni (colonna 2) con i risultati delle misure. Le colonne successive di Tabella 5 riportano la CPL media calcolata per la posizione frontale sull'intera auto (colonna 3) e i valori medi assoluti di CPL aggregati per tutte le posizioni di misura e gli orientamenti (colonna 4).

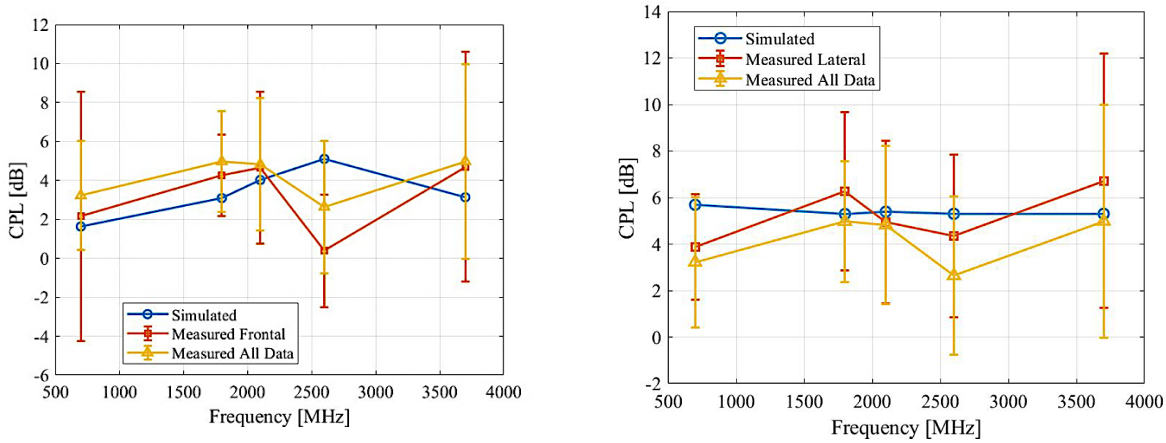
Tabella 5.CPL simulate e confronto con i risultati delle misure – scenario frontale

Frequenza (MHz)	$CPL_{simulata}$ (dB)	$CPL_{mis\text{-}front}$ (dB)	CPL_{mis_gen} (dB)	% fenomeni costruttivi*
700	1.63	2.16 ± 6.4	3.22 ± 2.8	69.2
1800	3.09	4.26 ± 2.1	4.97 ± 2.6	40.82
2100	4.02	4.64 ± 3.9	4.82 ± 3.4	34.62
2600	5.1	0.38 ± 2.9	2.64 ± 3.4	32.4
3700	3.13	4.7 ± 5.9	4.98 ± 5	38.4
6000	3.84	-	-	35.8
26000	1.72	-	-	52.4

* Nota: per pixel con fenomeni costruttivi si intendono i pixel per i quali è vera la relazione $E_{RT-pix}(i) > E_{FS-pix}(i)$

L'analisi dei dati in Tabella 5 ed in Figura 6 evidenzia, tenendo conto delle elevate deviazioni standard che caratterizzano i dati sperimentali, una concordanza complessiva tra i dati misurati e quelli simulati sia in termini di tendenza che di valori assoluti.

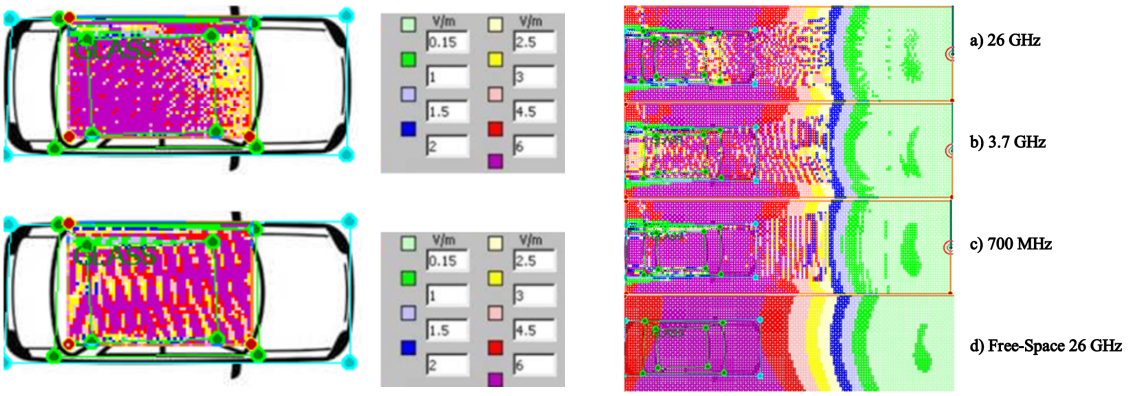
La Figura 8-a mostra come la distribuzione del campo elettrico all'interno del veicolo vari con la frequenza e mette a confronto i pattern simulati a 3.7 GHz (immagine in alto) e a 26 GHz (immagine in basso); tale variazione è causata dalle diverse dinamiche di riflessione del segnale all'interno dell'abitacolo. Figura 8-b mostra l'impatto del veicolo sulla propagazione esterna del segnale radio. Dal confronto tra lo scenario con l'auto e quello in spazio libero emerge che la vettura introduce una significativa perturbazione della distribuzione del campo elettrico che si manifesta come scattering (dispersione) che arriva ad estendersi fino a circa 3 m dal cofano. Oltre i 3 m (aree blu e verdi nella mappa di Figura 8-b), l'effetto risulta meno evidente.



a) Scenario frontale

b) Scenario laterale

Figura 7 *- Confronto tra CPL medio simulato e CPL medio misurato con deviazione standard*



a) Distribuzione del campo "in-car" b) Campo "near-car"

Figura 8 *- Campo elettrico simulato "in-car" e "near-car" scenario frontale*

Questo risultato è atteso in quanto la presenza del veicolo influenza il segnale radio attraverso complessi fenomeni fisici quali:

- **Riflessione e multipath** - I segnali radio riflessi all'interno della vettura generano percorsi multipli che possono sommarsi in modo costruttivo, aumentando l'intensità di campo ricevuto, o distruttivo (riducendone l'intensità finale), a seconda dell'allineamento di fase [14].

- **Diffrazione** –Il segnale si 'curva' attorno ai bordi della carrozzeria dell'auto (tetto, paraurti, specchietti laterali); ciò gli consente di raggiungere aree che altrimenti sarebbero in ombra, come le zone dietro l'auto.

In sintesi, le mappe di Figura 8 rivelano un complesso scenario multi-cammino che determina contributi sia costruttivi che distruttivi. L'entità numerica della perturbazione esterna "Near-car" e la sua dipendenza dalla distanza tra auto e BS non sono state ancora analizzate.

In caso di allineamento in fase, in alcuni pixel i livelli di campo elettrico interno al veicolo possono superare i valori simulati in spazio libero; si tratta di un fenomeno di potenziamento del segnale definito dalla relazione:

$$E_{RT-pix}(i) > E_{FS-pix}(i) \qquad (3)$$

Dove $E_{RT-pix}(i)$ è il valore del campo E nel pixel i-esimo ottenuto tramite simulazioni con tecniche di 3D ray-tracing e $E_{FS-pix}(i)$ è il valore del campo elettrico nel pixel i-esimo ottenuto con la simulazione in spazio libero (scenario "No-Car"). L'analisi dei dati specifici (Tabella 5, ultima colonna) ha rivelato che la percentuale media di pixel che soddisfa la condizione (3) è pari al 43%, stabile nel range 2100 – 6000 MHz. L'unico dato inatteso è l'alta percentuale di fenomeni costruttivi riscontrata a 700 MHz, che riduce significativamente la CPL ed è probabilmente imputabile alle riflessioni sul cofano. Tale risultanza sarà oggetto di indagini future tramite misurazioni e simulazioni mirate. Per coerenza con il protocollo di misura, le simulazioni frontali sono state eseguite su un piano che si trova 5 cm sopra il cofano, pertanto la mappatura di Figura 8-a non mostra gli effetti di schermatura da parte del corpo metallico dell'auto. L'analisi visiva degli scenari "Near-Car" simulati (Figura 8-b) conferma che la presenza di un veicolo genera una perturbazione del segnale a radiofrequenza che si manifesta come una alternanza di aree ad alto e basso campo elettrico. Questo aspetto, unitamente alla variabilità del segnale interno alla vettura dovuta a riflessioni e multipath (confermata sia da misure che da simulazioni), deve essere considerato come un fattore chiave per la caratterizzazione e la garanzia della continuità del segnale in contesti V2V e V2X, soprattutto in caso di scenari a basso impatto elettromagnetico.

4.2 – Scenario 2 – Posizione laterale

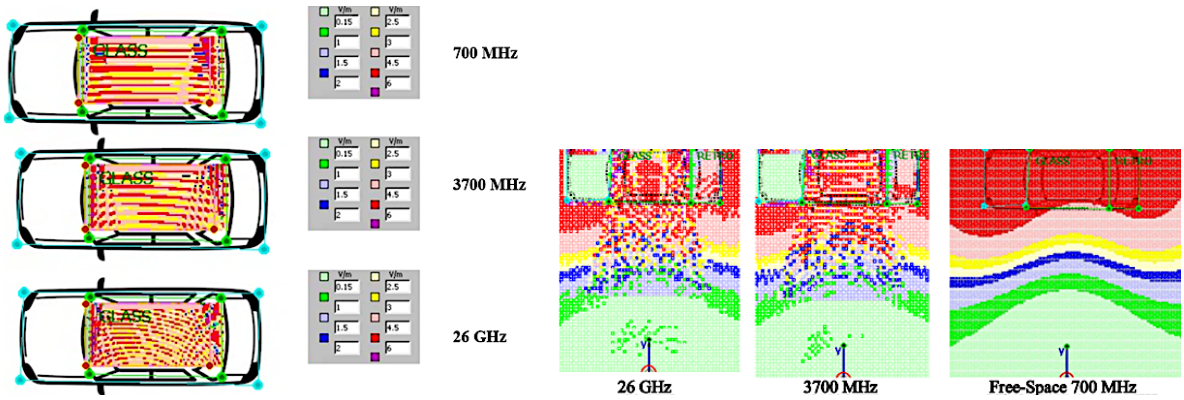
L'analisi numerica per la posizione laterale è stata condotta a sua volta con il metodo "point-to-point" sinteticamente descritto ad inizio sezione. La Tabella 6 mette a confronto i valori medi di CPL simulati con i risultati delle misurazioni relative all'orientamento laterale.

Rispetto ai dati relativi alla posizione frontale (Tabella 5) si nota una minore variabilità della CPL e percentuali inferiori di eventi costruttivi. Questa differenza è presumibilmente dovuta all'assenza delle riflessioni provenienti dal cofano, che, nello scenario frontale, aumentano la complessità del multipath.

Tabella 6. CPL simulate e confronto con i risultati delle misure – scenario laterale

Frequenza (MHz)	$CPL_{simulata}$ (dB)	$CPL_{mis\text{-}lat}$ (dB)	CPL_{mis_gen} (dB)	% fenomeni costruttivi*
700	5.69	3.87 ± 2.26	3.22 ± 2.8	34.7
1800	5.29	6.26 ± 3.4	4.97 ± 2.6	39.6
2100	5.39	4.94 ± 3.49	4.82 ± 3.4	40.9
2600	5.30	4.34 ± 3.49	2.64 ± 3.4	37.4
3700	5.30	6.72 ± 5.46	4.98 ± 5	38.3
6000	5.17	na	na	40.0
26000	5.22	na	na	38.4
* Nota: per pixel con fenomeni costruttivi si intendono i pixel per i quali è vera la relazione $E_{RT-pix}(i) > E_{FS-pix}(i)$				

Il grafico di Figura 7-b, che mette a confronto il dato simulato con quello misurato per l'orientamento laterale, conferma la minore variabilità dei risultati nello scenario laterale rispetto alla posizione frontale. Considerate le elevate deviazioni standard si riscontra un buon accordo tra dati misurati e simulati, sia in termini di andamento che in termini assoluti.



a) Distribuzione del campo "in-car" b) Campo "near-car"

***Figura** 9 - Campo elettrico simulato "in-car" e "near-car" - scenario laterale*

La Figura 9-a mostra la distribuzione del campo E interno alla vettura per lo scenario laterale. Dalla analisi delle mappe e della Tabella 6 si evince che:

- i livelli di campo elettrico all'interno della vettura sono inferiori rispetto all'orientamento frontale. I colori predominanti nelle mappe relative all'orientamento laterale sono infatti il giallo ed il rosso che indicano livelli di campo elettrico più bassi rispetto al viola che è il colore predominante per gli scenari ad orientamento frontale.
- le zone caratterizzate da fenomeni costruttivi e distruttivi seguono schemi più regolari che sembrano dipendere dalla frequenza del segnale incidente.

La Figura 9-b mostra la situazione nelle zone vicine alla vettura, dove quest'ultima genera perturbazioni del campo elettrico che si estendono fino a 5 m. Queste simulazioni sono state eseguite a un'altezza inferiore rispetto al caso frontale (5 cm in meno) per tenere conto degli effetti di schermatura del bagagliaio, consentendo la penetrazione del segnale solo tramite finestrini e piccole aperture.

5 - Considerazioni finali e prossime attività di studio

La perdita di penetrazione è un parametro chiave negli studi sulla comunicazione wireless e per i sistemi V2X (Vehicle-to-Everything) e V2V (Vehicle-to-Vehicle) in quanto determina la potenza del segnale ricevuto all'interno del veicolo. La sua corretta conoscenza è essenziale per garantire le prestazioni e l'affidabilità V2X, per determinare i livelli di segnale del ricevitore all'interno dell' abitacolo e l'effettiva copertura per scenari V2V con antenne interne e, in fase di test per comprendere quali segnali esterni penetrano nell'abitacolo e in che misura al fine di creare scenari di simulazione il più possibile aderenti alle condizioni reali.

Questo studio, basato su campagne di misura e simulazioni numeriche, ha come obiettivo di caratterizzare sperimentalmente i valori di CPL e derivare per quanto possibile un modello di riferimento da applicare negli scenari futuri. La nuova campagna di misura ed i risultati delle simulazioni numeriche confermano, in linea con studi precedenti [4], l'assenza di una dipendenza della CPL dalla frequenza nell'intervallo 700 – 3800 MHz. Questo può consentire l'utilizzo di un valore di CPL rappresentativo per future ricerche in questa banda. I risultati dell'analisi dei dati di misura mostrano valori medi di CPL calcolati considerando l'auto come un'entità unica compresi tra 1.81 e 4.97 dB, in linea con le risultanze di analisi precedenti [4] e con quanto riportato in letteratura [5],[6], [7].

Lo scenario si è rivelato altamente complesso e caratterizzato da una elevata variabilità spaziale, elemento critico per la stabilità delle comunicazioni V2X. Le analisi condotte hanno mostrato che la CPL è influenzata dall'orientamento del veicolo (frontale, laterale), dalla posizione del ricevitore a bordo e dalle caratteristiche dei finestrini (ad esempio, i vetri oscurati aumentano la CPL di quasi un dB).

L'orientamento frontale presenta valori di CPL media inferiori (3.02 dB), probabilmente a causa delle riflessioni sul cofano. I ricevitori sui sedili posteriori mostrano un aumento medio della CPL variabile tra 1.32 ed 1.97 dB, mentre il bagagliaio registra l'attenuazione maggiore (fino a 6.71 dB).

I risultati di simulazioni e misure concordano nell'evidenziare che l'interferenza costruttiva crea, all'interno della vettura, "hot spots" di campo elettrico molto elevato, che risultano in CPL negative o molto basse in specifici punti, a conferma dell'alta variabilità spaziale del segnale in-car. Le simulazioni "Near-Car" hanno evidenziato che la presenza di un veicolo genera perturbazioni del campo elettromagnetico esterno (scattering) che possono influenzare la comunicazione V2X; i disturbi si estendono fino a 3 m in posizione frontale e oltre i 5 m in posizione laterale. Queste perturbazioni devono essere integrate nella progettazione dei sistemi V2X per garantire una comunicazione affidabile e prevenire problemi di carattere prevalentemente interferenziale.

L'attività di ricerca per il futuro mira a colmare le lacune per arrivare ad una caratterizzazione completa e affidabile e prevede:

1. Indagini sugli effetti specifici delle riflessioni e sull'impatto del tilt dell'antenna trasmittente sulla CPL.
2. La caratterizzazione delle perturbazioni del campo elettromagnetico indotte dal veicolo e del loro impatto sui sistemi V2X
3. L'estensione dello studio alle bande di frequenza superiori (6 GHz, 26 GHz e FR2/FR3), fondamentali per i sistemi 5G NR V2X
4. Studi in condizioni controllate attraverso l'impiego di generatori di segnale
5. L'ampliamento della ricerca con campagne di misura su diversi modelli di veicolo per convalidare l'applicabilità di un valore unico di CPL.

6 – Ringraziamenti

Questo lavoro è stato sostenuto dall'Unione Europea nell'ambito del Piano Nazionale Italiano per la Ripresa e la Resilienza (PNRR) di NextGenerationEU, partenariato sulle "Telecomunicazioni del futuro" (PE00000001 - programma "RESTART", Progetto strutturale 6GWINET).

7 - Bibliografia

[1] CEPT, CEPT Report 17, "Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to: identify the conditions relating to the harmonised introduction in the European Union of radio applications based on Ultra-WideBand (UWB) technology", 2017.

[2] ITU, Report ITU-R M.2412-0, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020", 2017.

[3] 3GPP Technical Specification 3GPP TR 38.901, "5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz", version 18.0.0.

[4] S. Valbonesi, C. Carciofi, A. Garzia "Characterization of in-car and in-train Penetration Loss: measurements and simulations", *AEIT 2025 International Annual Conference*, 2025.

[5] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock and L. Martens, "Evaluation of Vehicle Penetration Loss at Wireless Communication Frequencies," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2036-2041, 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.912164.

[6] U. T. Virk, K. Haneda, V. -M. Kolmonen, P. Vainikainen and Y. Kaipainen, "Characterization of Vehicle Penetration Loss at wireless communication frequencies", *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, Netherlands, 2014, pp. 234-238, doi:10.1109/EuCAP.2014.6901733.

[7] LSTelcom/OFCOM, "In-car Mobile Signal Attenuation Measurements - Final Report", 2017.

[8] C. Carciofi, M.Faccioli, A.Garzia, V.Petrini, E. Mammi, S.Valbonesi – "*Metodologie di valutazione e analisi del fattore Building Entry Loss per scenari di coesistenza indoor*" – Rivista La Comunicazione – Note, Recensioni, Notizie n.69 – 2025

[9] S. Valbonesi, C. Carciofi, A. Garzia – "*Characterization of in-car and in-train Penetration Loss: measurements and simulations*" - CA20120 TD(25)11009, Gothenburg, Sweden, June 16-19, 2025

[10] NARDA SRM-3006 - Frequency-selective EMF measurement https://www.narda-sts.com/en/products/emf-selective-measuring-devices/srm-3006/

[11] CEPT Report 17, "Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to: identify the conditions relating to the harmonised introduction in the European Union of radio applications based on Ultra-WideBand (UWB) technology", 2017.

[12] A. Garzia, A. Iodice, F. Lodato, F. Matera, R. Massa, G. Ruello, S. Valbonesi, "Human exposure to electromagnetic fields for new wireless technologies and frequencies: software characterization study," *2023 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Rome, Italy, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEIT60520.2023.10330410. "

[13] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface", *Proc. IEEE*, vol. 62, no.11, pp. 1448-1461, 1974.

[14] P. Juyal, J. Fu and A. Zajic, "Effects of Modes on THz Wireless Channels Inside Metal Enclosures,"*2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*, Rome, Italy, 2020, pp. 1-2, doi: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232451.