

Manuela Vaser
 Università degli Studi di Roma
 "Tor Vergata" - Dipartimento
 di Ingegneria Elettronica

Giuseppe Pierri
Roberto Dal Molin
 DGTCSI - ISCTI

Massimo Celidonio
Ermanno Fionda
 Fondazione Ugo Bordoni

Onde millimetriche in ottica 5G. Studio delle caratteristiche di canale con misure sperimentali indoor e outdoor

mmWave in 5G. Channel characteristics and indoor outdoor experimental measurements

Sommario: *L'utilizzo delle onde millimetriche e centimetriche nei collegamenti radiomobili cellulari è oggi una possibilità sempre più concreta, complice il prossimo lancio delle reti 5G. Queste reti, infatti, con i loro requisiti prestazionali altamente stringenti stanno portando a considerare soluzioni alternative a quelle consolidate negli attuali sistemi radiomobili. Ciò porta all'esigenza di approfondire quali siano gli effetti che il segnale, trasmesso a queste frequenze, subisce quando si propaga in ambiente urbano.*

Per questo motivo, attraverso attività sperimentali realizzate in collaborazione con la Fondazione Ugo Bordoni presso i laboratori dell'Istituto Superiore C.T.I., sono state realizzate alcune misure sperimentali per studiare la propagazione di segnali radio ad onde millimetriche (a 33 e 40 GHz) in uno scenario urbano, sia in ambienti indoor che aree outdoor.

Abstract: *Millimeter and centimeter waves in cellular mobile radio links is today a concrete possibility, thanks to the upcoming launch of 5G networks, that promise highly stringent performance requirements. For this reason, alternative solutions at higher frequency with respect to those established for legacy mobile radio systems are becoming more and more interesting.*

This leads to evaluate the signal impairments and effects due to the surrounding urban environment.

For this reason, in collaboration with the Fondazione Ugo Bordoni, thanks to the experimental instrumentation of Istituto Superiore C.T.I., the propagation of high frequency signals has been analysed through the radio channel in an urban scenario, both indoor and outdoor.

1. Introduzione

Studi sperimentali realizzati negli ultimi anni hanno messo in evidenza come l'uso delle onde millimetriche da parte dei collegamenti cellulari, non sia più un obiettivo irraggiungibile ma una realtà sempre più concreta.

I requisiti prestazionali molto esigenti delle reti di comunicazione di quinta generazione si traducono, in termini di accesso radio, in segnali caratterizzati da un maggiore larghezza di banda. Per questo motivo, visto il poco spazio disponibile nella parte dello spettro al di sotto del GHz, gli operatori del settore si interrogano sul possibile uso delle onde

millimetriche nei sistemi radiomobili. È oramai evidente che, per i servizi 5G, si svilupperà la tendenza a migrare sempre più verso le bande di frequenze ad onde millimetriche, che possono offrire larghezze di banda tali da garantire una capacità di trasmissione dati dell'ordine del Gb/s.

Ciò garantirà non solo reti più veloci ma anche più efficienti dal punto di vista energetico. Studi recenti hanno infatti dimostrato che il consumo di energia da parte dei dispositivi wireless decresce con l'aumentare della banda del segnale.

Inoltre l'uso delle onde millimetriche consentirà di realizzare antenne miniaturizzate e di alto guadagno, facilitando l'integrazione delle stesse all'interno dei dispositivi, e di sviluppare sistemi di ricetrasmisione sempre più complessi, in grado di adattarsi alle varie situazioni di propagazione del segnale, soprattutto in ambiente urbano. Tali antenne saranno infatti dotate di una forma di "intelligenza", e saranno pertanto in grado di determinare, attraverso procedure automatizzate e l'utilizzo di toni pilota, la direzione dalla quale il segnale arriva con maggiore potenza (AoA, Angle of Arrival) così come quella verso la quale trasmettere il segnale al fine di ottenere le massime prestazioni dal sistema di telecomunicazione (AoD, Angle of Departure).

Finora, lo sfruttamento delle porzioni di spettro ad onde millimetriche ha trovato applicazioni soprattutto per collegamenti in cui trasmettitore e ricevitore sono in linea di vista (LoS, Line of Sight).

Tradizionalmente, queste frequenze non sono considerate abbastanza robuste da poter essere impiegate in applicazioni *mobile broadband*, in ragione delle alte attenuazioni subite nella propagazione del segnale. Tuttavia, negli ultimi anni, diversi studi hanno dimostrato che collegamenti radio realizzati ad onde millimetriche in condizioni di nLOS (non Line of Sight) non solo sono fattibili per collegamenti fissi ma, entro certe distanze, utilizzabili anche con i sistemi radiomobili.

Inoltre, adottando frequenze intorno ai 40 GHz, l'attenuazione del segnale da parte dei gas presenti in atmosfera, non risulta essere particolarmente rilevante (circa 0,1 dB/Km) [1] soprattutto se si considera che le distanze ipotizzate per essere coperte da eventuali celle radio operanti in queste bande di frequenza, non supereranno i 200 metri.

In particolare celle radio di questa dimensione sono previste in uno degli scenari previsti per le reti 5G: le Ultra-Dense Network (UDN). In questo scenario si prevede una densificazione dei nodi di accesso radio e quindi celle di dimensioni minori, nelle quali l'impiego di stazioni radio base che operano a onde millimetriche è altamente auspicabile.

Tuttavia, in uno scenario tipico UDN, dove le stazioni radio base possono essere posizionate sui tetti, sulle facciate dei palazzi o anche sui lampioni utilizzati per l'illuminazione stradale, e dove gli utenti si trovano sul piano stradale, la presenza di vegetazione in ambito urbano, come nel caso degli alberi, può influenzare fortemente la propagazione dei segnali [2].

Le sperimentazioni condotte presso il laboratorio a Microonde della Divisione IV dell'ISCTI, in collaborazione con la Fondazione Ugo Bordoni, hanno cercato di approfondire la conoscenza sul comportamento delle

onde millimetriche quando queste si propagano in tipici ambienti urbani sia indoor che outdoor ed anche in presenza di vegetazione.

In questo studio sono stati presi in considerazione segnali radio operanti alle frequenze di 33 e 40 GHz. La scelta è caduta su tali frequenze perché sono tra quelle candidate dalla World Radiocommunication Conference WRC-15 [3] per essere utilizzate nei sistemi IMT-2020.

I risultati sperimentali sono stati analizzati ed utilizzati per caratterizzare il canale di propagazione. Inoltre, nel caso di misure realizzate in presenza di vegetazione, i valori di attenuazione ottenuti sono stati confrontati con quelli ottenuti con i modelli di path loss noti in letteratura e che sono comunemente adottati per caratterizzare la propagazione attraverso la vegetazione (fogliame).

2. Modelli di propagazione di segnali a onde millimetriche in presenza di vegetazione

La stima dell'attenuazione del segnale a causa delle condizioni ambientali di propagazione è stata oggetto di molti studi nel corso degli anni.

Storicamente, uno dei primi modelli per tenere conto dell'attenuazione causata da vegetazione (strutture arboree) nella propagazione di segnali ad onde millimetriche è stato proposto nel 1982 da Weissberger [4], a partire da altri modelli già esistenti in letteratura. Il modello è stato chiamato *Modified Exponential Decay* (MED) e fornisce una stima dell'excess attenuation loss (L in dB), in base alle seguenti espressioni:

$$\begin{cases} L(\text{dB}) = 1.33f^{0.284}d_f^{0.588} & 14 \leq d_f \leq 400 \\ L(\text{dB}) = 0.45f^{0.284}d_f & 0 \leq d_f \leq 14 \end{cases} \quad (1)$$

dove f è la frequenza espressa in GHz, e d_f è la distanza, espressa in metri, che il segnale percorre nella vegetazione. Il modello è valido per dimensioni della vegetazione attraversata pari a un massimo di 400 metri, e per un intervallo di frequenze tra 230 MHz e 95 GHz.

Nel 1986, il CCIR (oggi ITU) propose un modello di attenuazione [5] valido nel caso di percorso propagatosi nella vegetazione inferiore a 400 m, e con una validità in un intervallo di frequenze tra 200 MHz e 95 GHz, la cui espressione è data da:

$$L(\text{dB}) = 0.2f^{0.3}d_f^{0.6} \quad (2)$$

Successivamente è stata proposta una versione più sofisticata, detta Fitted ITU-R (FITU-R) [6], in grado di stimare il parametro L in condizioni di propagazione *in-leaf* (ossia alberi con foglie) oppure *out-of-leaf* (ossia alberi senza foglie), per segnali trasmessi nell'intervallo di frequenza da 10 e 40 GHz:

$$\begin{cases} L(\text{dB}) = 0.39f^{0.39}d_f^{0.25} & \textit{in-leaf} \\ L(\text{dB}) = 0.37f^{0.18}d_f^{0.59} & \textit{out-of-leaf} \end{cases} \quad (3)$$

Da notare come i modelli indicati nelle equazioni (1), (2) e (3) sono tutti di tipo empirico. In aggiunta a questi, nel 2002, è stato sviluppato un modello basato su un approccio analitico per la stima degli effetti della propagazione attraverso la vegetazione valido per segnali ad onde millimetriche [7], che usa la tecnica detta “*Radiative energy transfer*” (RET) per modellizzare la propagazione. Questo modello è stato adottato nella Raccomandazione ITU-R P.833 [8], e fornisce una stima della perdita di potenza del segnale causata dalla vegetazione come somma di diversi contributi. Nel presente studio, dei vari contributi valutati nella Raccomandazione ITU-R P.833, è stato considerato solo quello riferito al segnale trasmesso che attraversa direttamente la vegetazione, trascurando il contributo delle componenti che raggiungono il ricevitore, per effetti dovuti alla diffrazione, passando ai lati della vegetazione.

3. Parametri “small scale” tipici per caratterizzare il canale di trasmissione

Il segnale trasmesso attraversa un canale di propagazione, le cui peculiarità possono influire sulle caratteristiche del segnale attraverso fenomeni di riflessione o scattering.

Per questa ragione, il segnale viene ricevuto sotto forma di una serie di repliche, sfasate nel tempo e con diversi livelli di potenza; si verifica in altre parole il fenomeno conosciuto come *multipath*. Tale fenomeno è dovuto all’interazione del segnale, durante la propagazione, con gli oggetti presenti nell’ambiente. Queste repliche, anche se attenuate in potenza rispetto al cammino principale, possono essere dannose per la qualità della trasmissione, causando problemi di interferenza intersimbolica, e inducendo dispersione e path loss di segnale.

Al fine di caratterizzare e quantificare l’effetto di questi fenomeni, sono stati presi in considerazione alcuni parametri, noti in letteratura come *small scale parameters*, calcolati sulla base del profilo dei ritardi stimato con l’elemento S_{21} della matrice di scattering nel dominio del tempo, fornito come output dell’analizzatore di spettro, e che rappresenta l’andamento nel tempo del livello di potenza del segnale ricevuto.

I parametri sono calcolati fissando una soglia del profilo dei ritardi al di sotto della quale i valori di potenza sono trascurati. Nello specifico i parametri presi in esame sono di seguito dettagliati.

Excess Delay Spread: espresso in secondi, è definito come la differenza temporale tra il primo e l’ultimo cammino multiplo del profilo dei ritardi.

Mean Excess Delay: espresso in secondi, è definito come il primo momento del profilo dei ritardi, ossia la media dei ritardi dei cammini multipli. Matematicamente può essere espresso come in (4), dove P è il profilo dei ritardi (dB), τ è il tempo e k è il numero di campioni.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P_k \tau_k}{\sum_k P_k} \quad (4)$$

RMS Delay Spread: espresso in secondi, è definito come il secondo momento centrale del profilo dei ritardi. Matematicamente può essere espresso come in (5):

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (5)$$

dove $\overline{\tau^2}$ è calcolabile come:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P_k \tau_k^2}{\sum_k P_k} \quad (6)$$

Banda di coerenza: è l'intervallo di frequenze all'interno del quale il canale può essere considerato "flat", ossia non selettivo nel tempo. Si calcola come in (7):

$$B_c = \frac{1}{50\sigma_t} \quad (7)$$

Propagation Delay Main Path: espresso in secondi, indica il ritardo di propagazione relativo al cammino multiplo a potenza maggiore.

Numero di cammini multipli: numero di massimi relativi del profilo dei ritardi al di sopra della soglia scelta.

Dal profilo dei ritardi, inoltre, si possono individuare, osservando i picchi di potenza, gli echi dei cammini multipli che il segnale segue per arrivare in ricezione. Chiaramente, l'eco del cammino principale è quello a potenza più elevata.

4. Le campagne di misura realizzate: scenari e set-up sperimentali

Sono state pianificate e portate a termine diverse campagne di misura, con l'obiettivo di studiare e analizzare l'impatto dell'ambiente di propagazione, indoor ed outdoor, su segnali sinusoidali a frequenze rispettivamente di 40 e 33 GHz. Nelle sezioni seguenti si illustrano gli scenari, ed i set-up sperimentali.

A – Indoor Non Line of Sight (InH NLOS) a 40 GHz

Per quanto riguarda la propagazione in scenari indoor, sono state condotte una serie di misure, con lo scopo di conoscere le caratteristiche di propagazione di un canale radio, in presenza di segnali sinusoidali ad onde millimetriche nella banda dei 40 GHz, in condizione di Non Line-of-Sight.

Per questo tipo di scenario, sono state utilizzate antenne direttive sia in trasmissione che in ricezione.

I dati raccolti sono stati elaborati attraverso il software Matlab, al fine di estrapolare i parametri utili per la caratterizzazione del canale radio.

In particolare, in Figura 1 è illustrato lo schema a blocchi del set-up di laboratorio per le misure a 40 GHz, costituito da un analizzatore vettoriale di rete, di due antenne a tromba, una in trasmissione ed una in ricezione, collegate entrambe all'analizzatore di rete con cavo coassiale, e di un sistema di conversione up e down per la frequenza. L'analizzatore vettoriale di rete fornisce in uscita l'elemento S_{21} della matrice di scattering nel dominio del tempo.

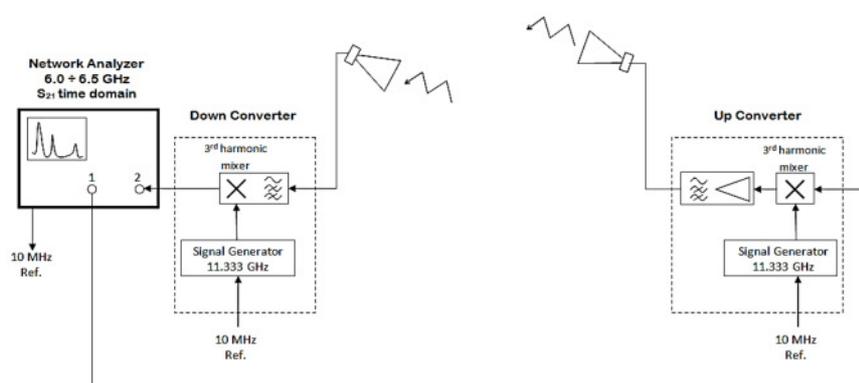


Figura 1. Set up di laboratorio per le misure indoor a 40 GHz.

Lo scenario indoor di riferimento è costituito da due stanze comunicanti per mezzo di un'apertura nella parete, come mostra la Figura 2. L'antenna in trasmissione opera nella stanza A, e viene spostata nella stanza seguendo uno schema di 18 posizioni equidistanti tra loro. L'antenna in ricezione, invece, opera nella stanza B, in posizione fissa RX.

In dettaglio, l'antenna in trasmissione è spostata nelle diverse posizioni, indicate da 1 a 18, distanti tra loro 3 mattonelle in larghezza e in lunghezza, ciascuna di dimensioni 0.3 m x 0.3 m.

La parete di separazione tra le due stanze è costituita da una componente in muratura (indicata in grigio) e una componente metallica (indicata in marrone). La componente in muratura attenua di circa 50 dB la potenza del segnale trasmesso, quando le due antenne sono poste ad una distanza di 1.2 m. La componente metallica, invece, nelle stesse condizioni operative, attenua totalmente il segnale.

Sia le porte che le finestre delle due stanze sono rimaste chiuse per l'intera durata delle misurazioni.

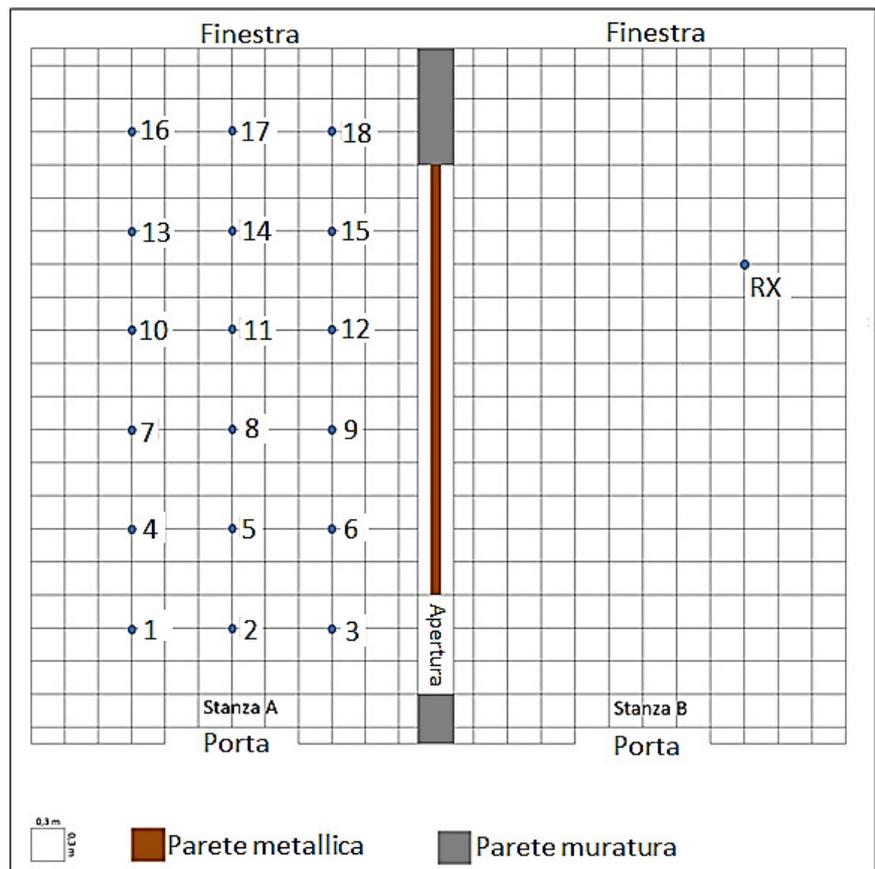
Come accennato, durante questa campagna di misura è stato fatto uso di antenne direttive sia in trasmissione che in ricezione. L'antenna in trasmissione è stata fatta ruotare da 0° a 360° per ogni posizione della griglia, evidenziata in Figura 2. Come riferimento di 0° è stata presa la verticale in direzione delle porte delle stanze. L'antenna in ricezione, invece, è stata mantenuta fissa e direzionata verso la porta con un angolo di 30° rispetto al riferimento.

Per ogni posizione dell'antenna in trasmissione è stato individuato l'angolo di trasmissione per il quale si ottiene il picco massimo di potenza in ricezione. Sotto questa condizione, è stato registrato il profilo

dei ritardi caratteristico della particolare posizione dell'antenna in trasmissione, così come misurato dall'analizzatore di rete, e l'angolo di trasmissione per il quale è ottenuto, chiamato AoD (Angle of Departure).

In Figura 3 è mostrato un esempio del profilo dei ritardi di una delle configurazioni implementate. Le ascisse indicano il tempo in ns, mentre le ordinate mostrano la potenza del segnale ricevuto in dB. Il Marker 1 indica il punto a maggiore potenza, rappresentando il cammino principale.

Figura 2. Scenario indoor NLOS per le misure sperimentali indoor a 40 GHz.



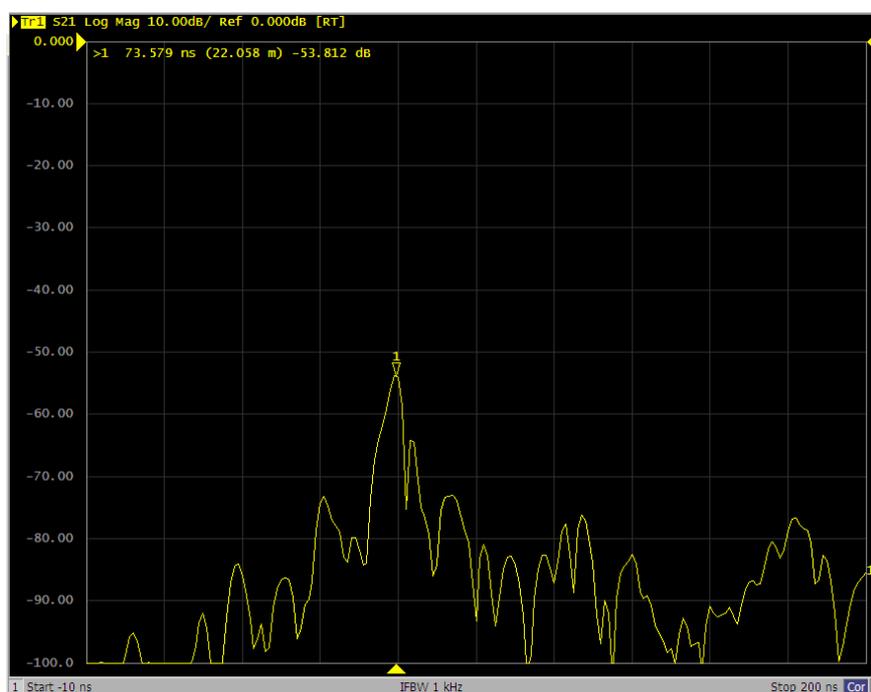


Figura 3. Profilo dei ritardi di una delle configurazioni implementate durante la prima campagna di misure a 40 GHz.

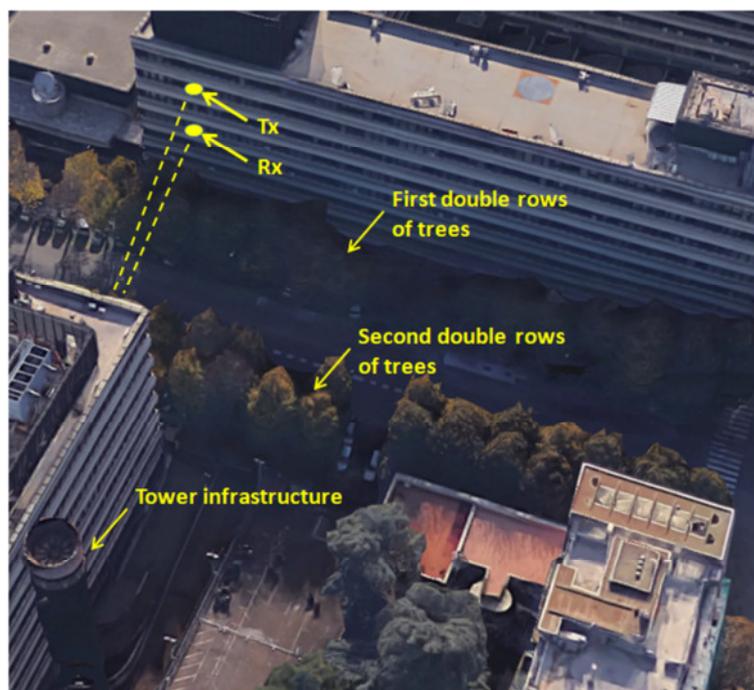
B – Outdoor Urban Microcell Non Line of Sight (Umi NLOS) a 33 GHz

Per quanto riguarda la propagazione outdoor, sono state condotte una serie di misure, con lo scopo di valutare l’impatto della vegetazione su un segnale radio CW ad onde millimetriche nella banda dei 33 GHz, in condizione di Non Line of Sight.

Per questa sperimentazione, oltre alla valutazione dei parametri di tipo small scale descritti nella sezione 4, è stato verificato l’andamento dell’attenuazione misurato sperimentalmente, e quest’ultimo è stato messo in relazione ai modelli di attenuazione illustrati nella sezione 3.

Lo scenario di riferimento è illustrato nella Figura 4, che si riferisce ad un’immagine acquisita con Google Maps.

Figura 4. Scenario sperimentale urbano outdoor NLOS, Viale Europa, in presenza di vegetazione.



Le sezioni trasmittente e ricevente del set-up sperimentale sono state predisposte rispettivamente al sesto e quarto piano dell'edificio del MISE, con le antenne posizionate nei pressi delle finestre aperte, e con il lobo d'antenna che puntava verso l'esterno del palazzo. La distanza in verticale tra le due antenne è di sette metri.

Opposto alle finestre, ad una distanza di circa 45 metri, è presente un altro edificio, con una struttura molto simile a quello del MISE. Tra i due palazzi c'è una strada alberata, con due doppie file di alberi di tiglio, il cui fogliame occupa circa il 70% dello spazio tra i due edifici, fino ad un'altezza di circa 18 m (altezza che corrisponde circa al quinto piano degli edifici). Le due antenne sono orientate in modo tale da puntare entrambe verso il quinto piano dell'edificio opposto.

In questa configurazione, il percorso del segnale che dall'antenna trasmittente arriva fino all'edificio di fronte è sostanzialmente libero dalla vegetazione. Al contrario, il percorso che va dall'edificio di fronte all'antenna ricevente attraversa per la quasi totalità della distanza la fronda degli alberi di tiglio. Il percorso completo da antenna trasmittente ad antenna ricevente è di circa 91 m.

Le misure sono state condotte in periodi differenti dell'anno, per dar vita a differenti scenari:

- (a) assenza di foglie sugli alberi (*out-of-leaf*);
- (b) presenza di foglie sugli alberi (*in-leaf*);
- (c) assenza di alberi (*spazio libero*).

La Figura 5 mostra i tre scenari urbani sopra indicati. In particolare, le misure in assenza di alberi sono state fatte spostando di un piano sia il trasmettitore che il ricevitore, così che anche il cammino di ritorno fosse libero dalle fronde degli alberi.

Tutte le misure sono state effettuate in presenza di aria chiara, quindi senza pioggia o nebbia.

Anche in questo caso, è stato approntato un set-up, come mostrato nella Figura 6. Esso consiste di un analizzatore di rete, detto anche Vector Network Analyzer (VNA), che restituisce come output il profilo dei ritardi nel dominio del tempo, un up-converter lato trasmissione, ed un down-converter lato ricezione.

Il VNA opera in un range di frequenze tra 3.5 e 4 GHz, ed è in grado di fornire una rappresentazione della potenza ricevuta nel dominio del tempo. L'oscillatore locale dei convertitori di frequenza è in fase con la sorgente di riferimento a 10 MHz dell'analizzatore di rete. Il segnale risultante ha una larghezza di banda di 500 MHz, ed è trasmesso nell'intervallo tra 33 e 33.5 GHz, ad una potenza di -20 dBm. Esso viene irradiato mediante un'antenna a tromba, che ha un guadagno di 20 dBi, e perciò la potenza risultante in trasmissione è 0 dBm. Lo stesso tipo di antenna viene montato nella sezione ricevente. Durante le misure, le strumentazioni di trasmissione e ricezione sono state poste ognuna su carrelli mobili, e le antenne sono state posizionate ad 1.5 m dal pavimento.

Prima di ogni misura, sono state condotte operazioni di calibrazione e sincronizzazione, così da consentire una misura accurata dei ritardi degli echi.

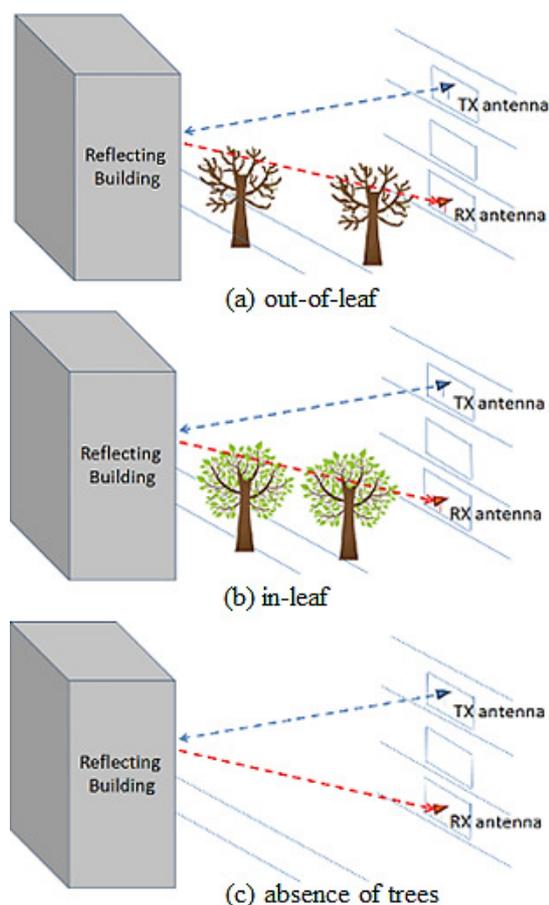
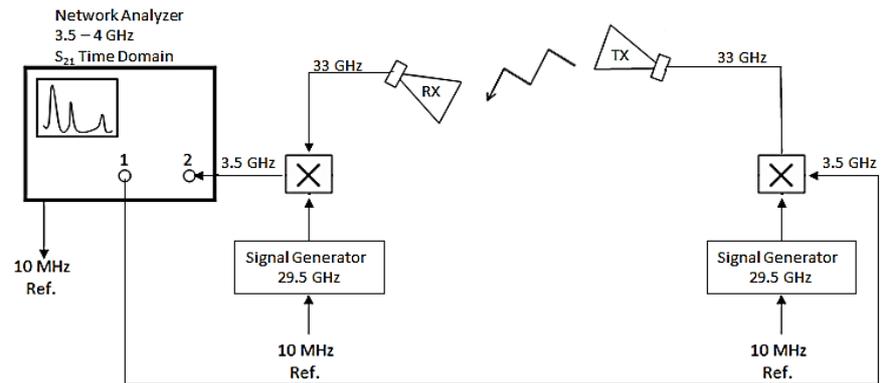


Figura 5. Scenari outdoor di riferimento: (a) out-of-leaf (in assenza di foglie sugli alberi); (b) in-leaf (in presenza di foglie sugli alberi); (c) in assenza di alberi.

Figura 6. Set up sperimentale delle misure aoutdoor NLOS a 33 GHz.



5. Risultati delle sperimentazioni

Le campagne alle due differenti frequenze hanno condotto ad alcuni risultati, che sono stati analizzati e concretizzati in termini di:

- Distribuzione delle potenze massime in ricezione, in scala di colori, per quanto riguarda la campagna a 40 GHz;
- Calcolo dei parametri "small scale" sperimentali in ambiente Matlab, sia per la campagna a 40 GHz che per quella a 33 GHz;
- Analisi della risposta impulsiva di canale, o equivalentemente del profilo dei ritardi, per la campagna a 33 GHz;
- Confronto della perdita da attenuazione da vegetazione misurata con i modelli presenti in letteratura e descritti nella sezione 3, per la campagna a 33 GHz.

A – Indoor Non Line of Sight (InH NLOS) a 40 GHz - RISULTATI

La Figura 7 rappresenta la distribuzione, in scala di colori, delle potenze massime del segnale ricevuto per ogni posizione dell'antenna in trasmissione (1-18) per la prima campagna di misura. Il colore rosso indica una potenza maggiore, il blu una potenza più bassa. Inoltre, ciascuna posizione è caratterizzata da uno specifico AoD, indicato sia numericamente che dal vettore concorde con il riferimento angolare considerato.

Nelle posizioni 8 e 13, con un orientamento dell'antenna di 330°, si ottiene il picco di potenza in ricezione. Osservando la scala di colori, è visivamente chiaro che questo picco si ha verso la direzione dell'apertura che rende le stanze comunicanti.

La Tabella 1 mostra i parametri sperimentali scelti per stimare le caratteristiche propagative del canale. Dall'osservazione dei valori numerici ottenuti, si può notare come, nei punti dove il livello di potenza è maggiore, si abbia sia un minor numero di cammini multipli, e come ci si aspettava, anche una banda di coerenza più alta.

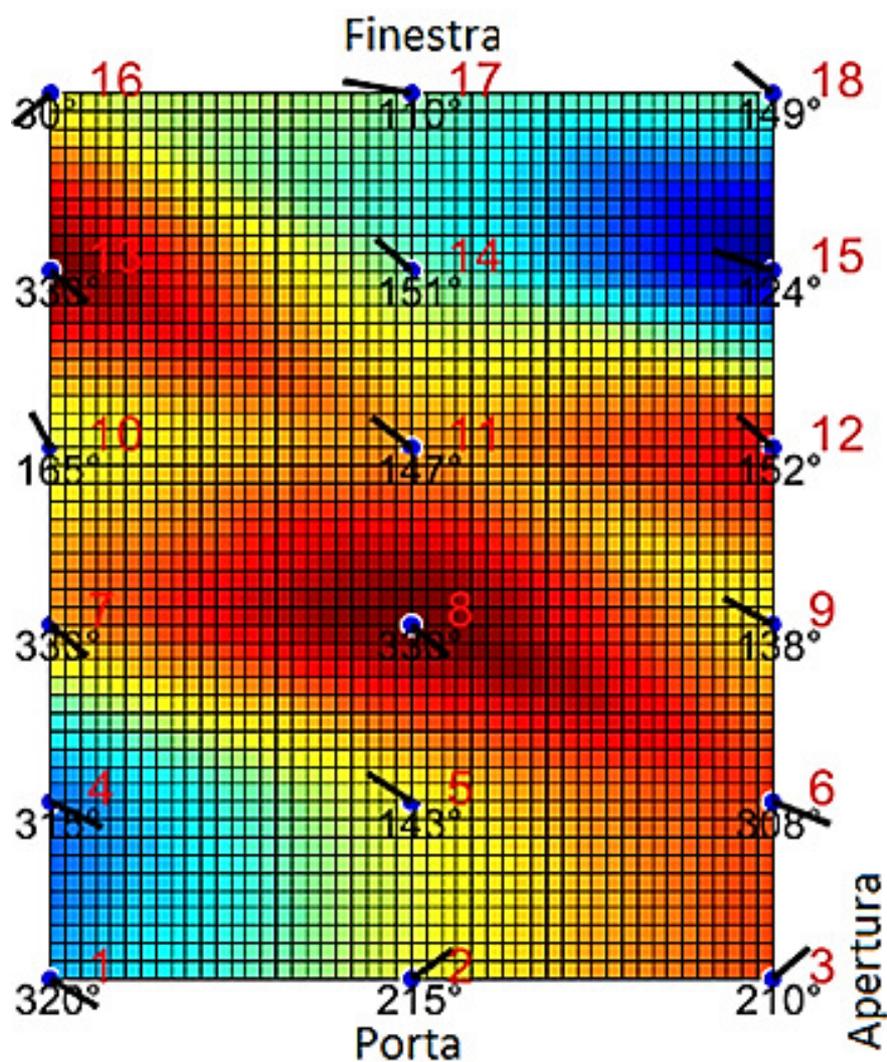


Figura 7. Distribuzione delle potenze massime in ricezione per la campagna di misura indoor NLOS a 40 GHz.

Tabella 1. Parametri di small-scale per la campagna di misura indoor NLOS a 40 GHz.

Posizioni	Parametri di small-scale					
	Excess Delay Spread [s]	Mean Excess Delay [s]	RMS Delay Spread [s]	Propagation Delay Main Path [s]	Cammini multipli	Banda di coerenza [Hz]
1	$1.32 \cdot 10^{-7}$	$7.41 \cdot 10^{-8}$	$9.82 \cdot 10^{-9}$	$7.30 \cdot 10^{-8}$	7	$2.04 \cdot 10^6$
2	$3.78 \cdot 10^{-8}$	$6.73 \cdot 10^{-8}$	$3.66 \cdot 10^{-9}$	$6.77 \cdot 10^{-8}$	5	$5.46 \cdot 10^6$
3	$4.20 \cdot 10^{-8}$	$6.57 \cdot 10^{-8}$	$3.89 \cdot 10^{-9}$	$6.56 \cdot 10^{-8}$	6	$5.14 \cdot 10^6$
4	$6.99 \cdot 10^{-8}$	$7.60 \cdot 10^{-8}$	$3.95 \cdot 10^{-9}$	$7.72 \cdot 10^{-8}$	9	$5.06 \cdot 10^6$
5	$3.99 \cdot 10^{-8}$	$5.48 \cdot 10^{-8}$	$2.63 \cdot 10^{-9}$	$5.51 \cdot 10^{-8}$	5	$7.59 \cdot 10^6$
6	$2.52 \cdot 10^{-8}$	$2.30 \cdot 10^{-8}$	$2.79 \cdot 10^{-9}$	$2.26 \cdot 10^{-8}$	4	$7.16 \cdot 10^6$
7	$6.93 \cdot 10^{-8}$	$3.14 \cdot 10^{-8}$	$4.28 \cdot 10^{-9}$	$3.10 \cdot 10^{-8}$	8	$4.67 \cdot 10^6$
8	$3.15 \cdot 10^{-8}$	$2.72 \cdot 10^{-8}$	$3.24 \cdot 10^{-9}$	$2.78 \cdot 10^{-8}$	4	$6.18 \cdot 10^6$
9	$7.86 \cdot 10^{-8}$	$5.42 \cdot 10^{-8}$	$4.23 \cdot 10^{-9}$	$5.41 \cdot 10^{-8}$	7	$4.72 \cdot 10^6$
10	$3.57 \cdot 10^{-8}$	$5.08 \cdot 10^{-8}$	$5.41 \cdot 10^{-9}$	$4.99 \cdot 10^{-8}$	5	$3.69 \cdot 10^6$
11	$1.25 \cdot 10^{-7}$	$5.10 \cdot 10^{-8}$	$7.29 \cdot 10^{-9}$	$5.09 \cdot 10^{-8}$	6	$2.74 \cdot 10^6$
12	$3.36 \cdot 10^{-8}$	$5.37 \cdot 10^{-8}$	$3.26 \cdot 10^{-9}$	$5.41 \cdot 10^{-8}$	4	$6.13 \cdot 10^6$
13	$3.04 \cdot 10^{-8}$	$3.37 \cdot 10^{-8}$	$2.25 \cdot 10^{-9}$	$3.41 \cdot 10^{-8}$	5	$8.87 \cdot 10^6$
14	$2.84 \cdot 10^{-8}$	$4.97 \cdot 10^{-8}$	$2.84 \cdot 10^{-9}$	$4.99 \cdot 10^{-8}$	6	$7.04 \cdot 10^6$
15	$1.20 \cdot 10^{-7}$	$5.60 \cdot 10^{-8}$	$1.33 \cdot 10^{-8}$	$5.30 \cdot 10^{-8}$	11	$1.50 \cdot 10^6$
16	$6.51 \cdot 10^{-8}$	$4.24 \cdot 10^{-8}$	$6.88 \cdot 10^{-9}$	$4.15 \cdot 10^{-8}$	7	$2.91 \cdot 10^6$
17	$8.31 \cdot 10^{-8}$	$4.75 \cdot 10^{-8}$	$7.74 \cdot 10^{-9}$	$4.67 \cdot 10^{-8}$	8	$2.58 \cdot 10^6$
18	$7.50 \cdot 10^{-8}$	$5.33 \cdot 10^{-8}$	$1.14 \cdot 10^{-8}$	$5.09 \cdot 10^{-8}$	9	$1.75 \cdot 10^6$

B – Outdoor Non Line of Sight (Umi NLOS) a 33 GHz -RISULTATI

Per quanto riguarda la campagna a 33 GHz, gli scenari (a), (b) e (c) illustrati nella Figura 5 sono stati realizzati in diversi periodi dell'anno, sempre seguendo la stessa serie di misure, e raccogliendo dati che sono stati poi confrontati tra loro.

Le Figure 8, 9, 10 mostrano il profilo dei ritardi in ricezione restituito dall'analizzatore di rete nei tre differenti casi.

Per meglio evidenziare il contributo della vegetazione sulla propagazione, sono stati individuati 4 gruppi di echi. Si precisa che per lo scenario (c), ovvero in assenza di alberi, a differenza degli altri due casi di studio, il profilo dei ritardi è stato rappresentato su una scala dei tempi di 1600 ns anziché 800 ns, per poter visualizzare anche altri gruppi di echi, che poi si sono mostrati in un secondo momento non rilevanti ai fini dello studio in oggetto.

Un primo evidente effetto della vegetazione si traduce in una forte attenuazione della potenza di picco del cammino diretto Tx-Rx.

Confrontando la potenza di picco del cammino principale in Figura 9, indicato con *Group 3*, con il corrispondente valore nelle Figure 8 e 10, si evidenzia un valore più basso di potenza, causato dalla presenza delle foglie.

In più, in Figura 9, a causa della presenza di foglie, si generano dei fenomeni di scattering che rendono indistinguibili i *Group 2* e *Group 4*, altrimenti evidenti in Figura 8, quando sugli alberi non c'è fogliame.

In particolare, il *Group 1* si riferisce al segnale riflesso dalla prima linea di alberi di Viale America, e si trova ad una distanza misurata dallo strumento di 14 m dal trasmettitore (distanza confermata da misure in loco), e con un livello di potenza ricevuta di -80 dBm.

Nonostante la presenza di foglie, questo gruppo di echi è ben visibile negli scenari (a) e (b) con la stessa potenza di picco.

Inoltre, il *Group 2* si riferisce al segnale riflesso dalla seconda fila di alberi a bordo strada in Viale America, e si trova ad una distanza misurata di 32 m, con un livello di potenza ricevuta di -77 dBm.

Group 3 è l'eco del cammino principale, cioè quello che viene riflesso dall'edificio sull'altro lato della strada, che si trova ad una distanza di 45 m, e con un livello di potenza ricevuta di -50 dBm.

Infine, il *Group 4* rappresenta gli echi dovuti alle doppie riflessioni degli altri gruppi tra i due edifici.

Considerando gli scenari (a) e (c) in Figura 8 e Figura 10, la potenza ricevuta dell'eco principale differisce di circa 2.5 dB.

Prendendo invece in considerazione gli scenari (b) e (c) in Figura 9 e Figura 10, questa differenza arriva a 19 dB, a causa dei fenomeni di scattering ed attenuazione indotti dalla presenza del fogliame sugli alberi di tiglio.

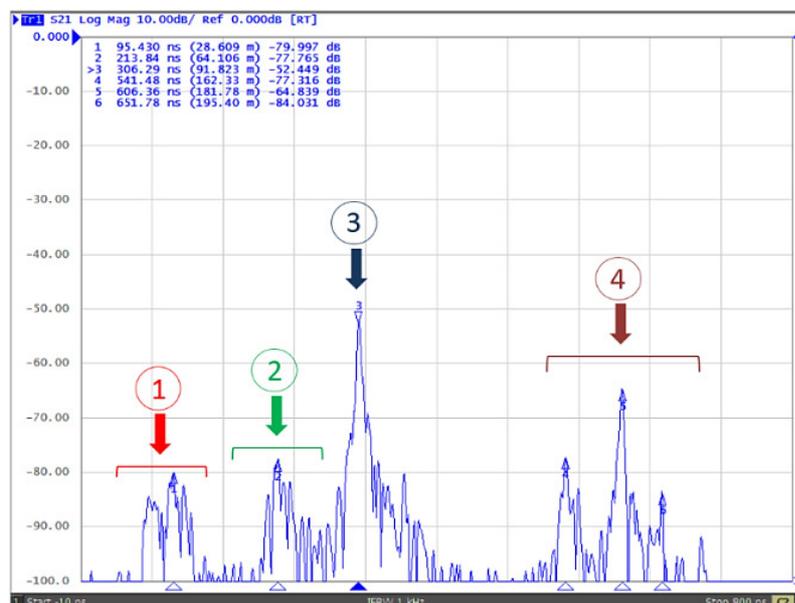


Figura 8. Profilo dei ritardi per lo scenario (a) out-of-leaf, in assenza di foglie sugli alberi.

Figura 9. Profilo dei ritardi per lo scenario (b) in-leaf, in presenza di foglie sugli alberi.

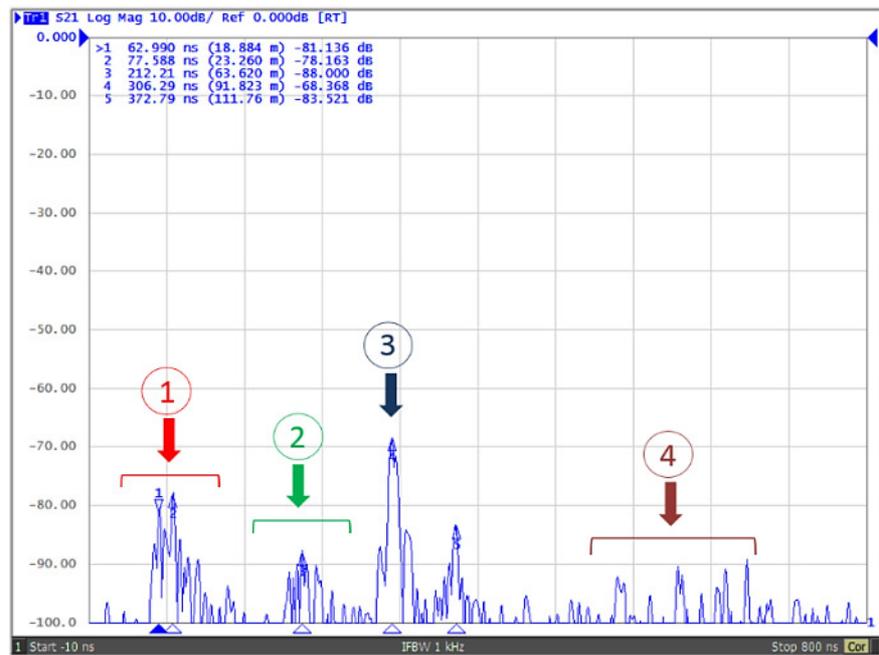
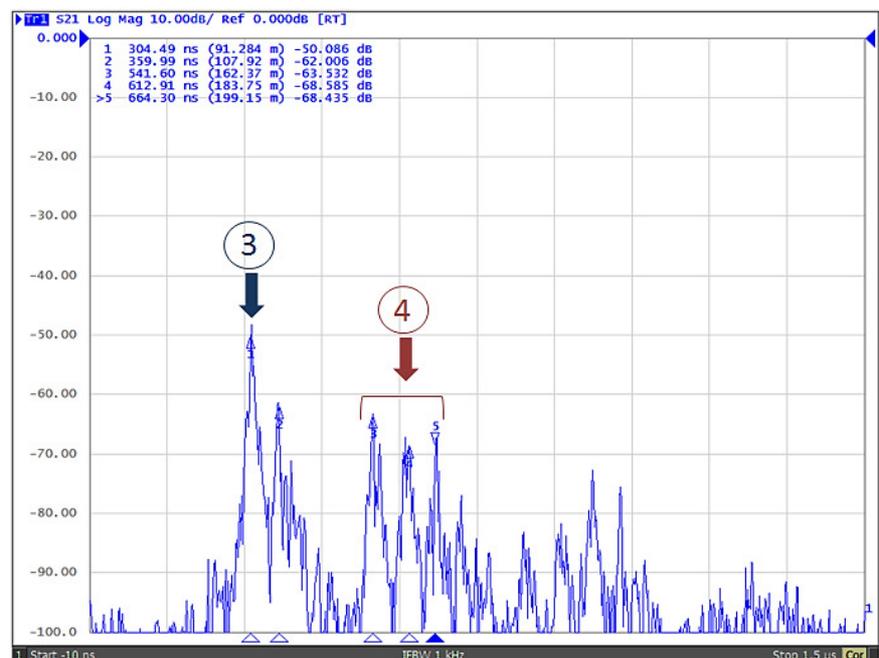


Figura 10. Profilo dei ritardi per lo scenario (c), in assenza di alberi.



Si possono trarre ulteriori considerazioni riguardo l'attenuazione misurata, e mettendola a confronto con l'attenuazione che si può calcolare adottando i modelli descritti nel paragrafo 3.

I risultati di questa analisi sono riportati in Tabella 2. Nelle formule, d_f è stata fissata a 31 m, e f a 33 GHz. I valori calcolati dai modelli sono stati confrontati con l'attenuazione misurata nei casi (a) alberi senza foglie, e (b) alberi con foglie. Dal confronto, l'attenuazione misurata risulta essere in linea con quella calcolata da modello stabilito nella Raccomandazione ITU-R P833-9.

Per quel che riguarda la valutazione dei parametri small-scale, in accordo con le definizioni del paragrafo 4, in Tabella 3 sono riportati i valori numerici calcolati con appositi codici scritti in Matlab, partendo da una soglia di livello di potenza ricevuta di 20 dB sotto il livello dell'eco principale. Tutti i picchi di potenza che si trovano al di sotto di 20 dB rispetto al livello di picco non sono stati ritenuti significativi ai fini della sperimentazione.

Come ci si aspettava, l'ambiente circostante, alla frequenza di 33 GHz, risulta impattare fortemente sulle caratteristiche di selettività del canale, come dimostra il valori della banda di coerenza, che in caso di alberi con foglie, risulta di 65 kHz. Questo risultato è leggermente migliore rispetto al caso di assenza di alberi, probabilmente come conseguenza del fatto che in presenza di fogliame gli echi sono maggiormente attenuati.

Modelli di attenuazione	Formulazione del modello	Attenuazione calcolata dal modello [dB]	Attenuazione misurata [dB]
MED	$L(\text{dB})=1.33f^{0.284}d_f^{0.588}$ (14 m $\leq d_f \leq$ 400 m)	27.0	2.5 (a) Alberi senza foglie & 18.8 (b) Alberi con foglie
	$L(\text{dB})=0.45f^{0.284}d_f$ (0 m $\leq d_f <$ 14 m)		
CCIR	$L(\text{dB})=1.33f^{0.284}d_f^{0.588}$	4.5	
FITU-R	$L(\text{dB})=0.39f^{0.39}d_f^{0.25}$ (in-leaf)	3.6	
	$L(\text{dB})=0.37f^{0.18}d_f^{0.59}$ (out-of-leaf)	5.3	
ITU-R P.833-9	Vedere riferimento [7]	20.03	

Tabella 2. Attenuazione calcolata con i modelli individuati in letteratura, ed indicati nel paragrafo 3.

Scenari	Parametri di Small-Scale				
	Threshold value (dB below max)	Mean Excess delay [s]	RMS Delay Spread [s]	Coherence bandwidth [Hz]	# di cammini
(a)	20	$2.83 \cdot 10^{-7}$	$7.39 \cdot 10^{-8}$	$63.27 \cdot 10^3$	11
(b)	20	$3.21 \cdot 10^{-7}$	$6.30 \cdot 10^{-8}$	$65.15 \cdot 10^3$	4
(c)	20	$3.21 \cdot 10^{-7}$	$5.62 \cdot 10^{-8}$	$53.62 \cdot 10^3$	8

Tabella 3. Valore dei parametri small scale nello scenario OUTDOOR.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati presentati in questo lavoro riguardano set-up sperimentali operanti a 33GHz e 40 GHz sia in ambito INDOOR che OUTDOOR. Nel caso di scenario INDOOR le misure sono state realizzate in due stanze comunicanti del Ministero dello sviluppo economico mentre nello scenario OUTDOOR le misure sono state condotte in un contesto urbano NLOS e in presenza di alberi di taglio.

Per quanto riguarda lo scenario INDOOR:

- è stato misurato un livello di potenza ricevuta maggiore nei punti sulla griglia che si trovano sulla diagonale che va dall'angolo in alto a sinistra della stanza, a quello in basso a destra dove si trova l'apertura di comunicazione tra i due ambienti;
- Al contrario, agli angoli in corrispondenza della seconda diagonale, a causa delle doppie riflessioni dei cammini, il segnale giunge in ricezione con livelli di potenza minori;
- La banda di coerenza, come auspicato, è maggiore nei punti a massima potenza, dove si osserva quindi un numero minore di cammini multipli.

Viceversa, per lo scenario OUTDOOR, i risultati ottenuti si possono sintetizzare come segue:

- è stata effettuata una panoramica dei principali modelli di propagazione disponibili in letteratura per il calcolo dell'attenuazione per segnali ad onde millimetriche quando questi si propagano in presenza di vegetazione;
- l'attenuazione misurata nello scenario sperimentale, quando il segnale si propaga in presenza di tigli, è pari a circa 19 dB, ed il dato sembra essere in linea con quanto si ottiene utilizzando il modello ITU-R P833;
- l'ampiezza della banda di coerenza risulta pari a circa 64 kHz, e sembra non dipendere dalla presenza o dall'assenza di fogliame sugli alberi. Invece risulta leggermente superiore nel caso di propagazione nello spazio libero.

Una possibile spiegazione di quest'ultimo risultato è che, nel segnale ricevuto, sono presenti anche alcuni echi del segnale trasmesso di minore intensità che, nel caso di presenza di vegetazione, risultano essere ulteriormente attenuati. Tale risultato conferma la necessità di adottare, per i sistemi 5G, una modulazione multicarrier come, ad esempio, l'F-OFDM [25] con una distanza tra sottoportanti inferiore a 64 kHz.

Infine, volendo fare un confronto tra le due situazioni in termini di banda di coerenza, nella propagazione outdoor, a causa della presenza della vegetazione, il canale risulta essere più selettivo rispetto al canale dello scenario indoor. Il valore massimo di banda di coerenza, infatti, per lo scenario indoor è di 8.87 MHz, mentre per lo scenario outdoor arriva al massimo a circa 64 kHz.

Occorre tuttavia sottolineare che, per confermare e migliorare i risultati sopra citati, saranno necessari ulteriori studi e misure sperimentali che dovrebbero prendere in esame, ad esempio, sia altre tipologie di alberi sia altre bande di frequenza ad onde millimetriche tra quelle proposte per i sistemi 5G.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ITU-R Recommendation P.676-10: Attenuation by atmospheric gases; P Series Radiowave propagation, Geneva (CH) 2013
- [2] Seville A.U, Yilmaz P.G.V, Charriere N.Powell and Craig K.H, "Building scatter and vegetation attenuation measurements at 38GHz", *Antennas and Propagation*, 4-7 pp. 46 – 50. April 1995.
- [3] Z. Pi and F. Khan, "An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems", *IEEE Communications Magazine*, June 2011.
- [4] M. A. Weissberger, "An Initial Critical Summary of Models for Predict-ing the Attenuation of Radio Waves by Trees," tech. rep., July 1982.
- [5] International Radio Consultative Committee (CCIR), "Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation", *CCIR Report*, pp. 235-236, Geneva, 1986.
- [6] M. O. Al-Nuaimi and R. B. L Stephens, "Measurements and prediction model optimization for signal attenuation in vegetation media at centimeter wave frequencies," *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, vol. 145, no. 3, pp. 201–206, 1998.
- [7] Rogers N.C, A. Seville, J. Richter, D. Ndzi, R.F.S Caldeirinha, A.K Shukla, M.O Al-Nuaimi, K. Craig, E. Vilar and J. Austin, "A generic model of 1-60 GHz radio propagation through vegetation – Final Report", *Qinetiq/ki/com.cr020196/1.0*, 2002.
- [8] International Telecommunication Union (ITU), *Attenuation in Vegetation*, ITU-R Recommendation P833-9. Geneva, September 2016.