

LA COMUNICAZIONE

Note Recensioni & Notizie

Pubblicazione della Direzione Generale per le Tecnologie delle Comunicazioni e la Sicurezza Informatica - Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione



SICUREZZA INFORMATICA ♦ QUALITÀ DEI SERVIZI ♦ MARCATURA CE ♦ INTEROPERABILITÀ
NUMERAZIONE ♦ INTERNET GOVERNANCE ♦ RETI OTTICHE NGN ♦ MICROONDE ♦ PROGETTI DI RICERCA
PROGETTI EUROPEI ♦ SCUOLA SUPERIORE DI SPECIALIZZAZIONE ♦ PATENTE EUROPEA DEL COMPUTER
CERTIFICAZIONI EUCIP ♦ SEMINARI FORMATIVI ♦ EVENTI DI COMUNICAZIONE ESTERNA
RIVISTA LA COMUNICAZIONE ♦ INTERCONNESSIONE ♦ STANDARDIZZAZIONE ♦ SPECIFICHE TECNICHE



Ministero dello Sviluppo Economico
DGTCSI - ISCTI
Viale America, 201- 00144 Roma
www.mise.gov.it - www.isticom.it



Ministero dello Sviluppo Economico
Direzione Generale per le Tecnologie delle Comunicazioni
e la Sicurezza Informatica - Istituto Superiore delle
Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione

LA COMUNICAZIONE
Note Recensioni & Notizie
Pubblicazione della Direzione Generale per le Tecnologie delle
Comunicazioni e la Sicurezza Informatica - Istituto Superiore delle
Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione

Numero Unico Anno 2019
Vol. LXII

Direttore: Dott.ssa Eva Spina

Hanno collaborato per la redazione di questo numero:

Eva Maria Alfieri, Andrea Ferraris,
Marcella Graziosi, Corrado Pisano

Supporto Tecnico e Grafica:
Ing. Fabrizio Zanuccoli

SOMMARIO

Dott.ssa Eva Spina

*(Direttore dell'Istituto Superiore
delle Comunicazioni e delle
Tecnologie dell'Informazione)*

5 Introduzione del Direttore

Manuela Vaser

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

Giuseppe Pierri**Roberto Dal Molin**

Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione – ISCOM

Massimo Celidonio**Ermanno Fionda**

Fondazione Ugo Bordoni

7**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

Angelo Pizzoleo**Luigi Salamandra**

(Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione e Dipartimento di Ingegneria Elettronica – Università degli Studi di Roma "Tor Vergata")

25**Radio over fibre: una tecnologia chiave per le reti 5G**

Radio over Fibre: a key technology for 5G network

Enrico Manca

(Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione)

Francesco Matera,**Edion Tego**

(Fondazione Ugo Bordoni)

Stefania Michelangeli,**Emanuele Nastri**

(Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione)

31**Sperimentazione di Tecniche Slicing in una Wide Area Geographical Network per Servizi 5G a Bassa Latenza**

Slicing Experiments in a Wide Area Geographical Network for Low Latency 5G Services

Massimo Celidonio
Ermanno Fionda
(Fondazione Ugo Bordon)

Carlo Riva
(Politecnico di Milano
Dipartimento di Elettronica
Informazione e Bioingegneria)

45

Studio sui contributi attenuativi generati da agenti troposferici su collegamenti wireless terrestri nella banda THz

Study on signal attenuation due to tropospheric components on terrestrial wireless links in the THz band

Luigi Salamandra
Angelo Pizzoleo
(Istituto Superiore delle
Comunicazioni e delle Tecnologie
dell'Informazione e Dipartimento di
Ingegneria Elettronica – Università
degli Studi di Roma "Tor Vergata")

Enrico Manca
(Istituto Superiore delle
Comunicazioni e delle Tecnologie
dell'Informazione)

75

Visible Light Communication e rete Internet globale

Visible Light Communication and global Internet network

Giancarlo Butti
Europrivacy

87

Aziende resilienti

Resilient compaines

Introduzione del Direttore

La Rivista "La Comunicazione - Note, recensioni, notizie" ha sin dal 1952 l'obiettivo di fare divulgazione tecnico-scientifica nel settore delle comunicazioni elettroniche.

La linea editoriale ha sempre avuto quindi come scopo principale l'individuazione di nuovi oggetti e di nuove aree di analisi, anche attraverso gli studi compiuti nell'ambito di ricerche e laboratori organizzati presso l'Istituto Superiore CTI in collaborazione con Università e Centri di Ricerca.

Giovani ricercatori ed esperti nel tempo hanno espresso su queste pagine una varietà di approcci e di metodologie, rappresentando studi e ricerche tecnico-scientifiche su temi innovativi e di attualità.

L'edizione 2019 concentra principalmente la sua attenzione sul 5G, tecnologia necessaria per le nuove sfide tecnologiche a livello mondiale.

Il tema, oggetto ancora di studio nelle sue varie sfaccettature, costituisce un argomento prioritario e sfidante dal punto di vista scientifico e nelle modalità applicative. Gli articoli della Rivista 2019 toccano differenti aspetti del 5G, quali le nuove bande di frequenze utilizzate, le onde millimetriche, o lo *slicing* ovvero la capacità di creare dinamicamente fette di rete per rispondere in modo ottimale ai requisiti delle diverse applicazioni, elaborati attraverso le esperienze maturate nei laboratori dell'Istituto e rappresentati come occasione di condivisione e diffusione della conoscenza da parte dei ricercatori universitari e del personale coinvolto.

Per l'edizione 2019, presentata in un momento di cambiamento organizzativo del Ministero, un ringraziamento particolare è rivolto al personale della Redazione che con professionalità e passione si dedica alla pubblicazione di ogni numero.

Eva Spina

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 Bordononi

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 Bordononi 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 Bordononi, 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.

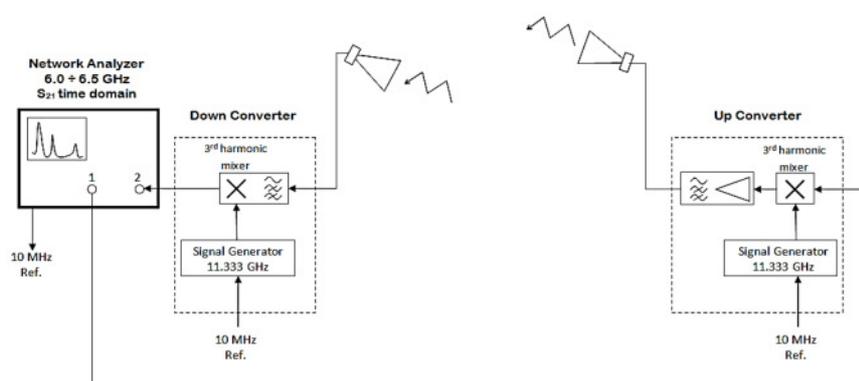


Figura 1. Set up di laboratorio per le misure indoor a 40 GHz.

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.

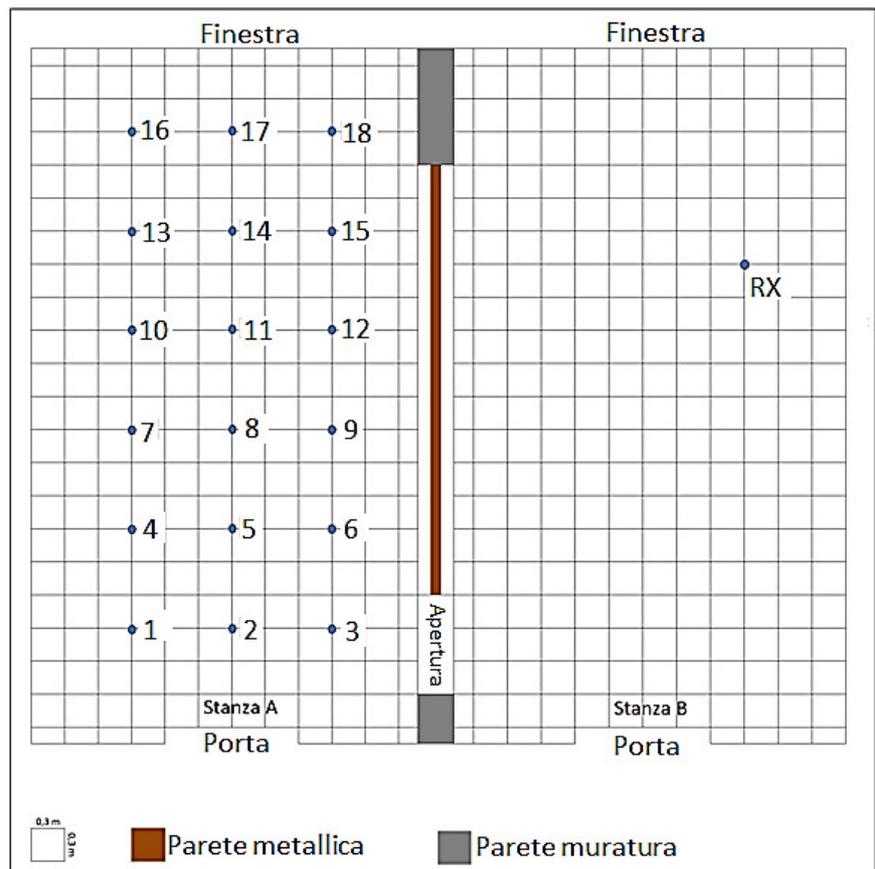
Come accennato, durante questa campagna di misura è stato fatto uso di antenne direttive sia in trasmissione che in ricezione. L'antenna in trasmissione è stata fatta ruotare da 0° a 360° per ogni posizione della griglia, evidenziata in Figura 2. Come riferimento di 0° è stata presa la verticale in direzione 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.



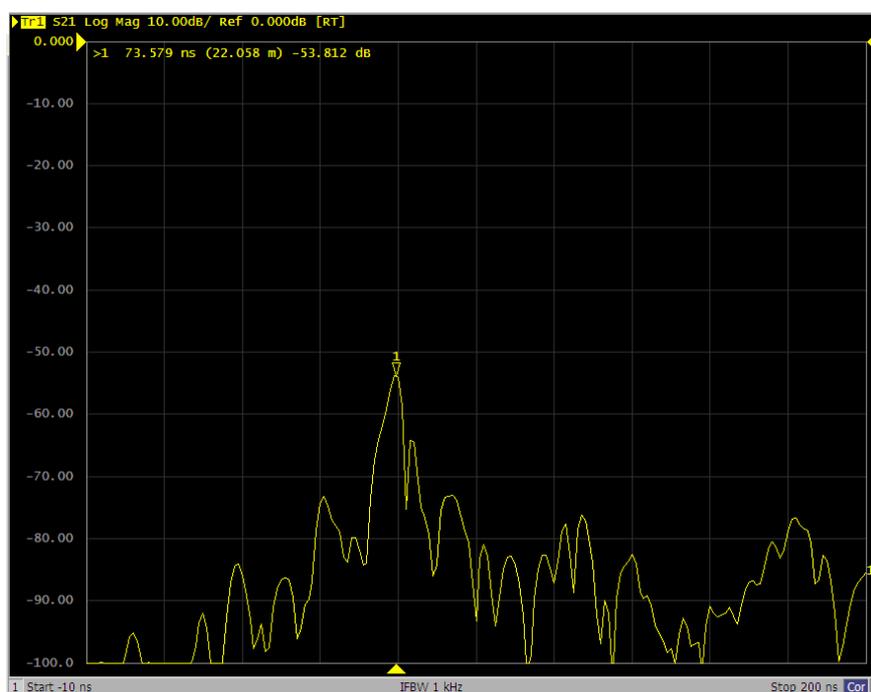


Figura 3. Profilo dei ritardi di una delle configurazioni implementate durante la prima campagna di misure a 40 GHz.

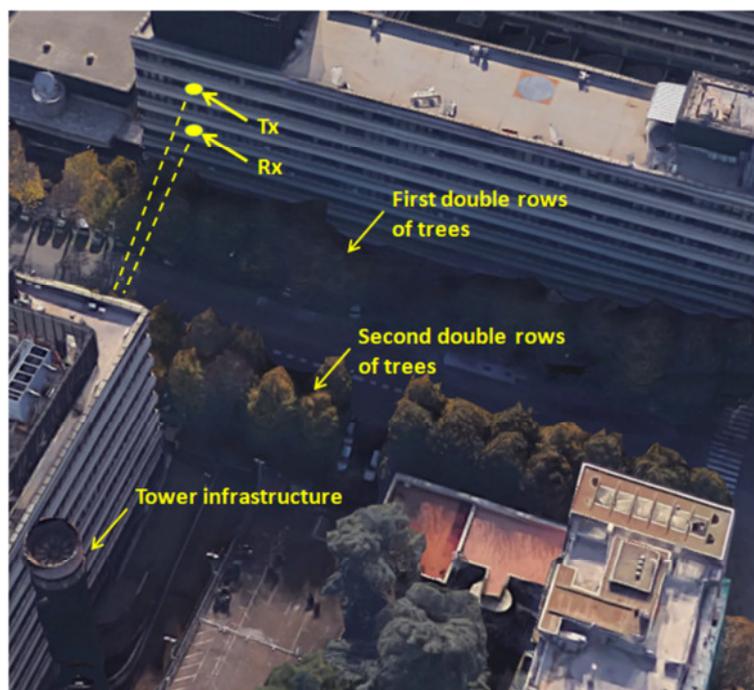
B – Outdoor Urban Microcell Non Line of Sight (Umi NLOS) a 33 GHz

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.

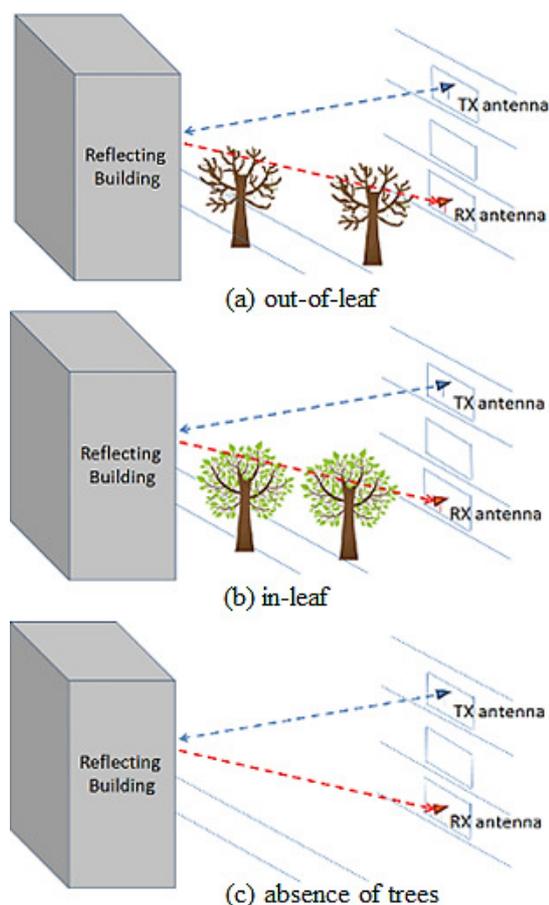
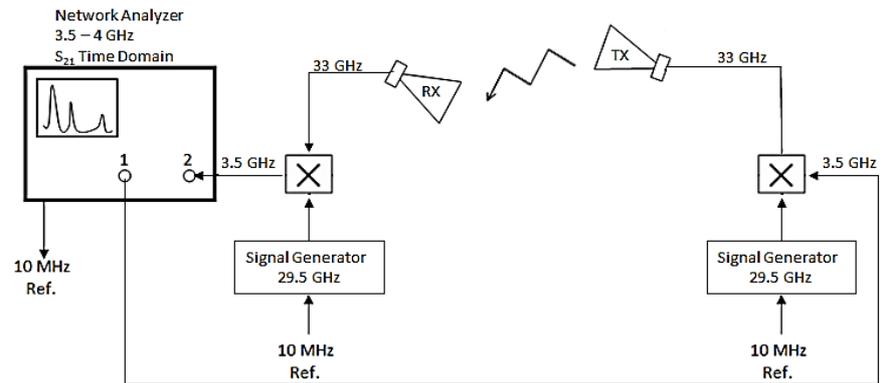


Figura 5. Scenari outdoor di riferimento: (a) out-of-leaf (in assenza di foglie sugli alberi); (b) in-leaf (in presenza di foglie sugli alberi); (c) in assenza di alberi.

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.

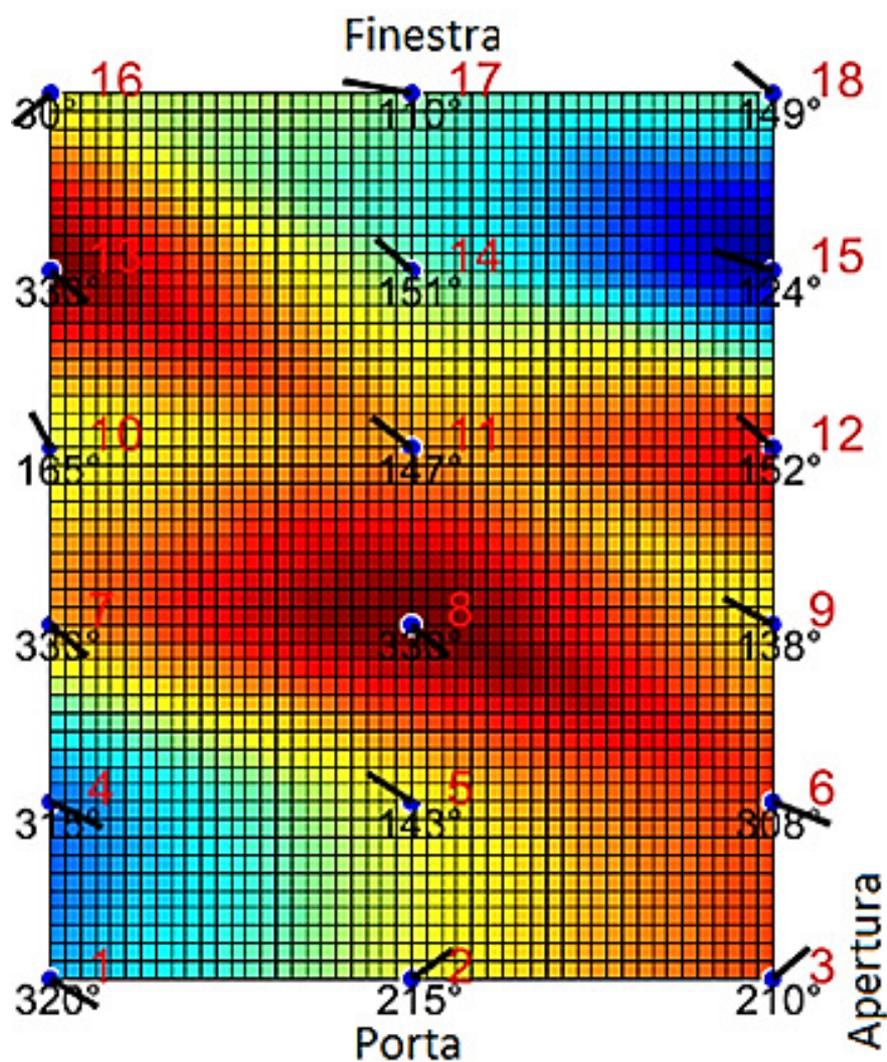


Figura 7. Distribuzione delle potenze massime in ricezione per la campagna di misura indoor NLOS a 40 GHz.

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 diiglio.

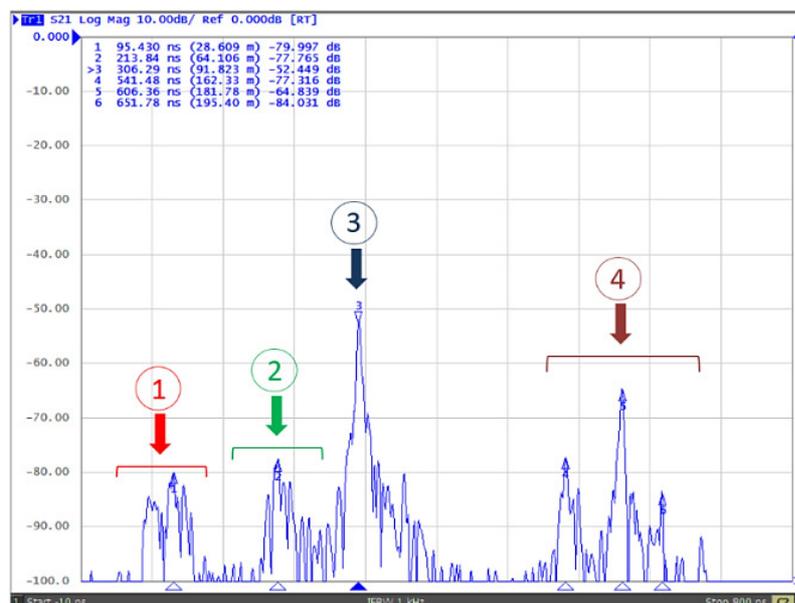


Figura 8. Profilo dei ritardi per lo scenario (a) out-of-leaf, in assenza di foglie sugli alberi.

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

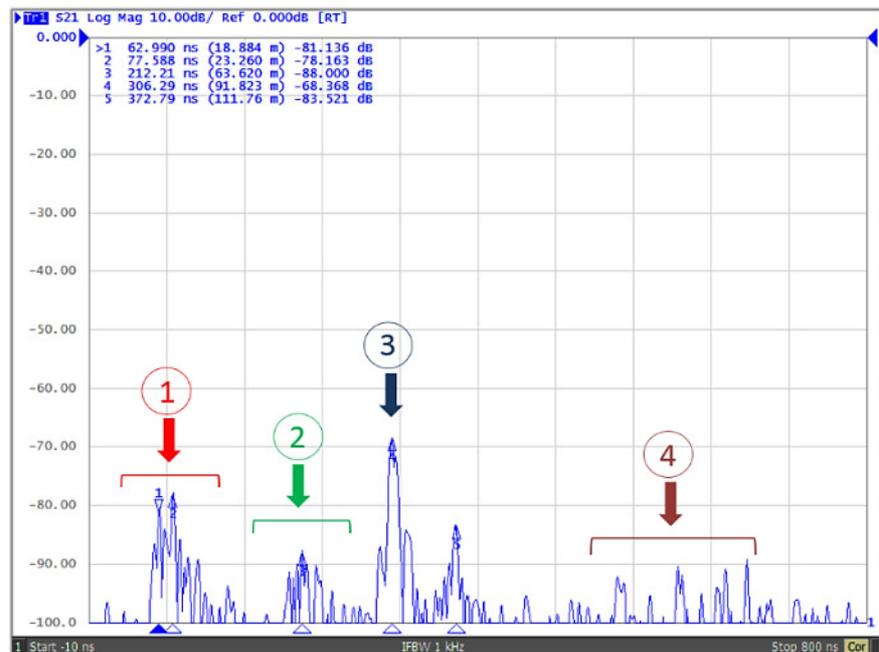
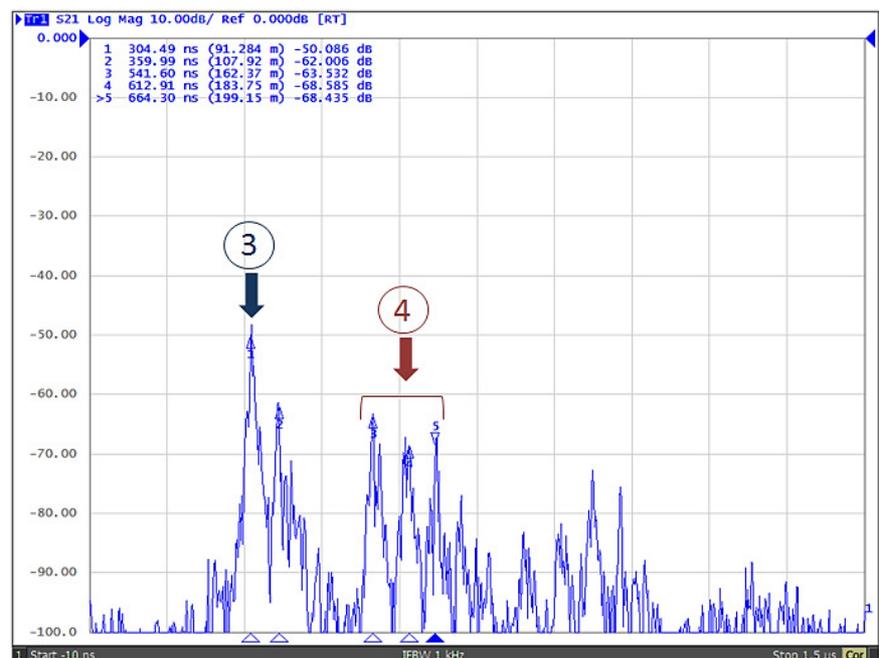


Figura 10. Profilo dei ritardi per lo scenario (c), in assenza di alberi.



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.

Angelo Pizzoleo

Luigi Salamandra

DGTCSI-ISCTI – Università degli
Studi di Roma “Tor Vergata”

Enrico Manca

DGTCSI-ISCTI

Radio over fibre: una tecnologia chiave per le reti 5G

Radio over Fibre: a key technology for 5G network

Sommario: *Radio over Fibre è il termine che racchiude la famiglia di tecnologie che permettono la trasmissione di segnali in radiofrequenza attraverso la rete in fibra ottica. Queste tecnologie risultano essere fondamentali per la diffusione delle reti di nuova generazione poiché permettono la distribuzione dei servizi wireless su ampie aree ma nel contempo una copertura capillare delle unità remote di interfaccia con gli utenti. In questo articolo sono spiegati i principi di funzionamento e le architetture di base per il Radio over Fibre.*

Abstract *Radio over Fibre is a term that collects the technologies family which allow to transmit a radiofrequency signal over a optical fibre link. These technologies turn out to be essential components for the diffusion of next generation networks because enable wireless services distribution on extended areas with a widespread coverage of user interface remote units. Radio over Fibre operating principles and basic architectures are explained in this paper.*

1. Introduzione

L'attuale diffusione dei servizi per radiocomunicazione, con il conseguente aumento del numero di utenti, spingono verso trasmissioni con bit rate sempre più elevati i quali comportano l'utilizzo di portanti radio a più alte frequenze, rispetto a quelle utilizzate nei precedenti sistemi, per poter soddisfare la crescente domanda di accesso alla banda larga. Come conseguenza dell'aumento di frequenza l'infrastruttura necessaria per supportare i servizi di radiocomunicazione richiede l'uso di punti di accesso radio che coprano un'area più piccola dal punto di vista fisico, a causa dell'attenuazione, portando ad un drastico aumento del numero di antenne; inoltre ci sono molte aree inaccessibile alle onde radio come aree sotterranee, tunnel, regioni montagnose o isolate da ostacoli toponomastici che necessitano di essere raggiunte dalla rete. Per agevolare la realizzazione dell'infrastruttura radio con celle più piccole e coprire le zone d'ombra si stanno studiando diverse tecnologie radio over fibre nel campo della ricerca e sviluppo della microwave photonics. Con il termine Radio over Fibre (RoF) si indicano tutte quelle tecnologie grazie alle quali è possibile trasmettere un segnale nativo in radio frequenza attraverso una rete in fibra ottica sfruttando la luce come portante. La fibra ottica risulta essere di estremo interesse in quanto, teoricamente, ha una larghezza di banda illimitata. Le frequenze delle portanti ottiche utilizzate si trovano nell'intorno dei 200 THz mentre le frequenze delle portanti a microonde sono nell'intorno di 1GHz; la portante ottica modulata, considerando un fattore limitato all'1%, presenta già un bit rate di circa 2Tbps, questa enorme larghezza di

banda rende la fibra ottica la migliore scelta come supporto all'infrastruttura di rete radio. I vantaggi nell'uso della fibra ottica non si fermano alla sola larghezza di banda infatti la fibra ottica possiede per sua natura una bassissima attenuazione, circa 0.2 dB/Km alla lunghezza d'onda di 1550 nm, che la rende ideale per trasmissione su lunghe distanze senza la necessita di rigenerare il segnale, inoltre permette una facile installazione e necessita di bassi costi di manutenzione.[1]

2. Radio over Fibre

In un generico sistema Radio over Fibre, come mostrato in Fig.1, il segnale radio deve essere trasportato su portante ottica senza sostanziali cambiamenti sulla sua forma d'onda, il sistema deve quindi risultare trasparente dopo la riconversione in radiofrequenze, e dovrebbe essere trattato, in generale, come un segnale analogico. La frequenza portante del segnale radio non subisce alcun processamento in banda base prima della conversione elettro/ottica e non è quindi considerata in questa fase.[2]

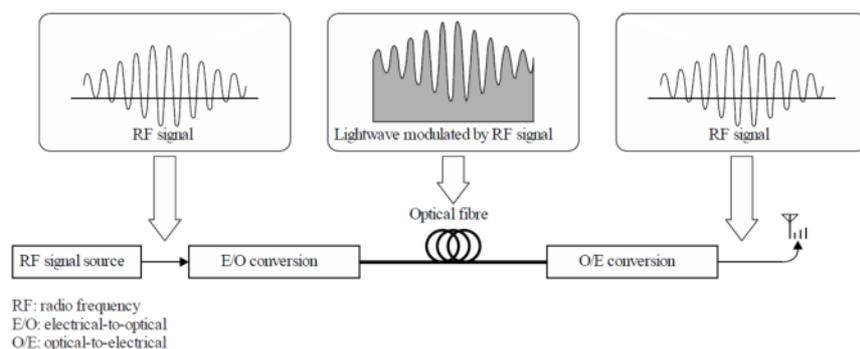


Figura 1. Schema basilare di un sistema RoF

Le caratteristiche principali di questa tipologia di trasmissione sono la conservazione della forma d'onda durante la trasmissione in fibra e l'immunità rispetto a interferenze elettromagnetiche di segnali radio in prossimità, grazie alle caratteristiche fisiche proprie della luce, che ne preserva integrità e qualità.[3] Per massimizzare le potenzialità dei sistemi RoF e sfruttare al meglio le sue caratteristiche è necessario porre attenzione nella gestione della figura di rumore e delle non linearità del sistema accrescendo così il rapporto segnale rumore in potenza e il range dinamico.

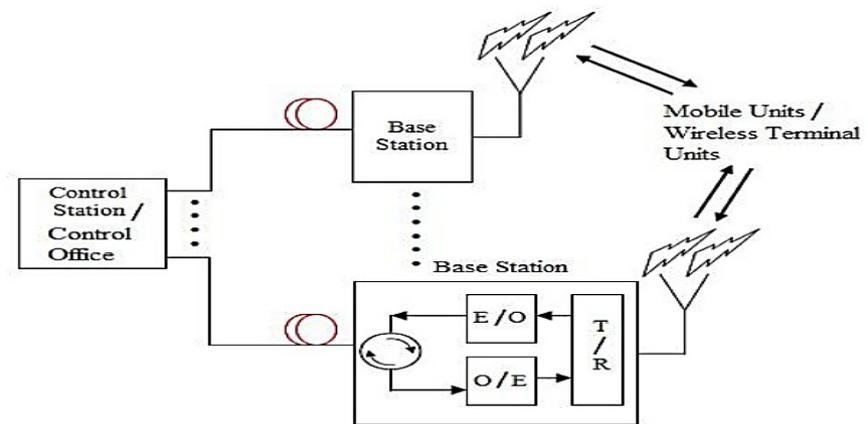
Un metodo alternativo tenuto in grande considerazione consiste nella trasmissione in fibra ottica di segnali in forma digitale; questa tecnologia, denominata D-RoF (Digitized RoF); costituisce una ottima alternativa per la trasmissione di forme d'onda specialmente in casi dove distorsioni e sensibilità insufficiente al ricevitore possono ostacolare l'utilizzo del segnale analogico di origine. Tuttavia bisogna tenere in considerazione il fatto che la sua realizzazione ed efficacia dipendono fortemente dalle prestazioni della funzione DSP (Digital Signal Processing) la quale sarà a sua volta influenzata dalle prestazioni del convertitore analogico/digitale ADC (Analogue-to-Digital Converter)

e digitale/analogico DAC (Digital-to-Analogue Converter). Ulteriore difficoltà è rappresentata dalla presenza del rumore di quantizzazione, derivante dal processo di digitalizzazione, che risulta di difficile rimozione e causa distorsioni della forma d'onda. Altro fattore da considerare è che ogni campione nel dominio del tempo digitalizzato necessita di diversi bit, di conseguenza l'efficienza in termini di larghezza di banda del D-RoF può essere di molto inferiore rispetto a quella del RoF analogico.[2]

3. Architetture per sistemi RoF

Essendo una strategia trasmissiva il RoF non è caratterizzato da una architettura standard, un generico sistema, Fig.2, consta essenzialmente di componenti per la conversione elettro/optica (E/O), una fibra ottica per il trasporto, una Base Station (BS) e diverse antenne remote.[1]

Figura 2. Elementi essenziali di una architettura RoF



La Figura 3 illustra le architetture generiche e fondamentali per la trasmissione Radio over Fibre, in particolare per la trasmissione di tipo analogico, Figura 3a, e di tipo digitale, Figura 3b. Nell'immagine si assume che le apparecchiature che svolgono le funzioni rappresentate alla sinistra del collegamento in fibra ottica siano allocate nel central office mentre quelle a destra nell'antenna remota.

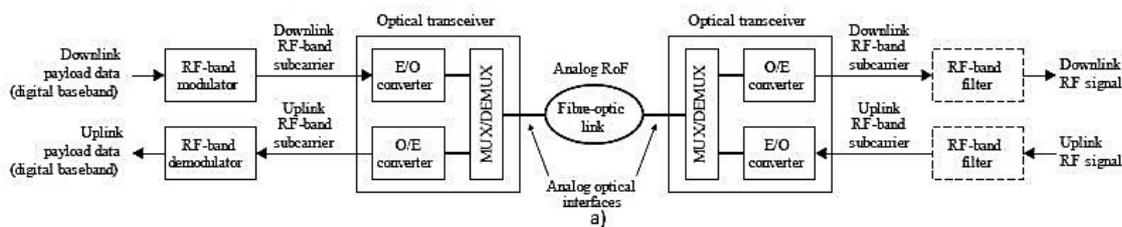


Figura 3a

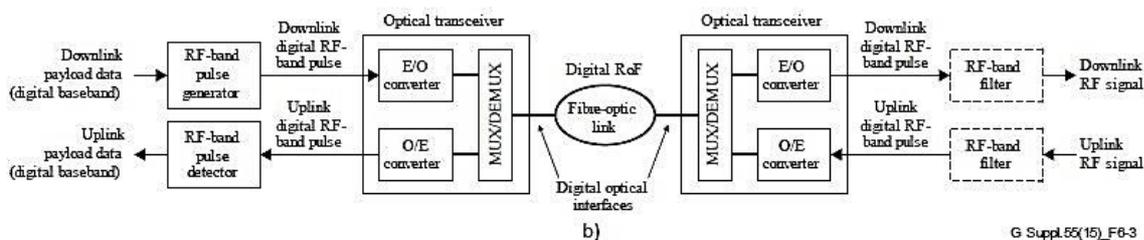


Figura 3b

G Suppl.55(15)_F8-3

In uno schema di trasmissione in banda RF, Figura 3a, il sistema consta in un modulatore/demodulatore in banda RF, una coppia di ricetrasmittitori ottici, un collegamento in fibra ottica e due filtri in banda RF. Considerando il downlink, la portante in banda RF viene modulata, in base all'informazione che si vuole trasmettere, attraverso un modulatore RF nel local office; il segnale della sottoportante così generato modula una portante ottica utilizzando un convertitore elettro/ottico che si trova all'interno dell'apparato di ricettazione ottico. Il segnale RoF analogico generato viene quindi trasmesso lungo il collegamento in fibra ottica e giunto all'antenna remota viene ricevuto da un convertitore ottico/elettrico ottenendo idealmente un segnale elettrico identico alla modulante in banda RF. Per la parte uplink il procedimento è simile ed alla fine il segnale modulante in RF viene demodulato recuperando l'informazione trasportata.

La Figura 3b) illustra una generica architettura per la trasmissione di segnali radio digitali di cui RF-band pulse è un tipico esempio. Come per i casi precedenti si assume che il lato sinistro al collegamento in fibra sia situato nel local office mentre la parte destra nell'antenna remota. Nello schema di trasmissione RF-band pulse il sistema consiste in un generatore di impulsi in banda RF, un rilevatore di impulsi in banda RF, una coppia di ricetrasmittitori ottici, un collegamento in fibra ottica e due filtri in banda RF. La procedura di trasmissione per questa configurazione rimane analoga alle precedenti.[2]

In queste tipologie di trasmissione RoF le principali parti della trasmissione e ricezione radio, come il modulatore e demodulatore in dominio elettrico, possono essere posizionati nel local office in modo che la configurazione degli apparati al nodo remoto diventi più semplice; la strategia di concentrare gli apparati in un numero non elevato di punti principali comporta notevoli vantaggi tra cui l'allocazione dinamica delle risorse e una maggiore facilità di manutenzione e rinnovamento dei dispositivi permettendo anche un più facile upgrade del sistema per

Figura 3. Esempi di configurazione per la trasmissione RoF di segnali RF
a) RoF analogico
b) RoF digitale

adeguarsi ai cambiamenti nel mondo dei servizi per telecomunicazioni senza investimenti eccessivamente onerosi.[1]

4. Conversione elettro\ottica: Intensity Modulation Direct Detection (IMDD)

Figura 4. Schema di trasmissione con modulazione diretta.

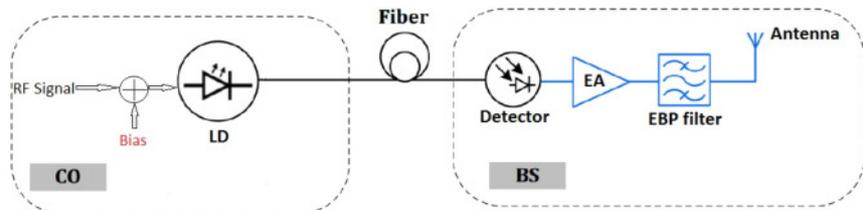
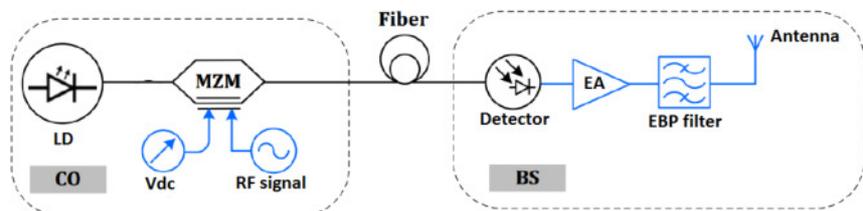


Figura 5. Schema di trasmissione con modulazione esterna.



Con questa metodologia di trasmissione del segnale il processo di conversione elettro/ottica viene svolto in due modi: modulazione diretta (Figura 4) o modulazione esterna (Figura 5) della sorgente laser. In entrambi i casi l'intensità della portante ottica è direttamente modulata dal segnale in RF e successivamente, nel lato antenna remota, riconvertita nel dominio elettrico attraverso una rivelazione diretta utilizzando un photodetector, tipicamente un fotodiodo, per recuperare il segnale in RF[4]; la fotocorrente generata sarà una replica esatta del segnale utilizzato per la modulazione e a questo punto il segnale ottenuto, dopo essere stato filtrato ed amplificato verrà trasmesso dall'antenna. Questo metodo risulta essere il più semplice, robusto ed economico per la trasmissione ottica di segnali radio. Per quanto riguarda la modulazione della portante ottica utilizzando quella diretta le prestazioni di questa tecnica sono fortemente penalizzate dai limiti fisici della sorgente ottica. Sono disponibili sul mercato laser che permettono una modulazione diretta nel dominio delle microonde ma possono arrivare fino a circa 2 GHz quindi possono essere utilizzati per servizi come il GSM e UMTS. Per superare i limiti della modulazione diretta della sorgente ottica la scelta migliore è rappresentata dalla modulazione esterna che permette di generare segnali ottici modulati con onde millimetriche che conservano una buona purezza spettrale; la modulazione esterna è spesso usata ad alte radiofrequenze al di sopra dei 10GHz. L'implementazione più semplice consiste in un laser in continua seguito da un modulatore esterno, il fatto che il laser operi in continua evita l'eccessivo chirping degli impulsi nel modulatore esterno. Si possono utilizzare diversi tipi di modulatori ad alta velocità come il modulatore Mach-Zehnder (MZM), il modulatore a elettroassorbimento o il modulatore di fase[4]. Il modulatore di tipo Mach-Zehnder è tra i più

utilizzati, il suo funzionamento si basa sul comportamento fisico del cristallo di niobato di litio, che si trova al suo interno, il quale è in grado di variare la fase del segnale ottico che lo attraversa proporzionalmente alla tensione applicata; la portante ottica in ingresso al modulatore viene divisa in due parti, tramite un splitter, che attraversano due distinti percorsi e vengono successivamente riaccoppiati in uscita. La differenza di fase tra i due segnali ottici in uscita, dopo aver attraversato il cristallo di niobato di litio, si traduce in una interferenza costruttiva o distruttiva al momento dell'accoppiamento con conseguente variazione dell'intensità della portante ottica il cui involuppo sarà proprio il segnale RF che si vuole trasportare.

5. Conclusioni

Attualmente i sistemi Radio over Fibre sono certamente una tecnologia chiave per lo sviluppo della rete attuale e futura, l'unione della radiofrequenza con la fibra ottica sembra essere l'unica strategia che permetta di rendere reali gli ambiziosi requisiti richiesti per la rete 5G e le generazioni future; la larghezza di banda e la bassa attenuazione della fibra ottica permettono di supportare i crescenti bit rate necessari per sostenere gli attuali e futuri servizi che si vogliono offrire agli utenti. La possibilità di concentrare le risorse di rete in pochi punti strategici e poterle gestire dinamicamente rende la rete sostenibile anche dal punto di vista energetico. I maggiori difetti che affliggono questi sistemi sono il rumore e le distorsioni, la ricerca oggi si concentra nel superare questi problemi e creare sistemi sempre più performanti.

Bibliografia

- [1] Balinder Singh, Davender Singh, A review on advantages and applications of Radio over Fiber system, International journal of Current engineering and technology, 2016
- [2] ITU-T G Sup.55, Radio over Fibre technologies and their applications.
- [3] R. Karthikeyan, Dr. S. Prakasam, A review OFDM-RoF system for wireless network, International journal of research in computer and communication technology, Vol.3, 2014.
- [4] Shivika Rajpal, Rakesh Goyal, A review on Radio over Fiber technology-based integrated (optical/wireless) networks, j.Opt. Commun. 2017.

Francesco Matera,
Edion Tego
Fondazione Ugo
Bordoni

Stefania Michelangeli,
Emanuele Natri
DGTCSI - ISCTI

Sperimentazione di Tecniche Slicing in una Wide Area Geographical Network per Servizi 5G a Bassa Latenza

Slicing Experiments in a Wide Area Geographical Network for Low Latency 5G Services

Sommario: In questo articolo riportiamo i risultati sperimentali ottenuti nell'ambito del progetto Tecnologie Emergenti di Reti di Telecomunicazioni (TERT), che ha operato nell'ambito di una Convenzione tra l'Istituto Superiore delle Telecomunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI) e la Fondazione Ugo Bordoni, riguardanti principalmente le modalità per ottenere delle partizioni logiche (slice) in una rete sperimentale di tipo Wide Area Geographical Network con accessi basati su sistemi in fibra ottica di tipo GPON e NG-PON2, con l'obiettivo di realizzare l'instradamento del traffico con particolari caratteristiche di qualità del servizio e soprattutto con bassa latenza. La gestione degli slice è ottenuta con modalità di tipo Software Defined Network utilizzando la piattaforma mPlane per il monitoraggio delle prestazioni della rete. L'architettura così realizzata si propone come un modello per le connessioni delle antenne 5G ed in particolare per la gestione dei servizi riguardanti alcuni verticals che richiedono particolari prestazioni come nel caso dell'Automotive.

Abstract: In this paper we report the experimental results obtained within the Emerging Technologies of Telecommunications Networks (TERT) project, which operated within the framework of an Agreement between the Istituto Superiore delle Telecomunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI) and the Ugo Bordoni Foundation, mainly concerning the methods for obtaining logical partitions (slices) in an experimental Wide Area Geographical Network with accesses based on GPON and NG-PON2 optical fiber systems, with the aim of obtaining a traffic routing with particular quality of service characteristics and above all with low latency. Slice management is achieved using Software Defined Network methods using the mPlane platform for monitoring network performance. The architecture thus created is proposed as a model for the connections of 5G antennas and in particular for the management of services concerning some verticals that require particular performance such as in the case of the Automotive.

1. Introduzione

Con le reti di quinta generazione (5G) [1-3] assisteremo a una profonda trasformazione dell'intera rete di telecomunicazioni, che vedrà una spiccata interoperabilità tra reti wireless e reti cablate dal segmento di accesso fino alla dorsale (rete core). Le reti 5G permetteranno tutta

una nuova serie di servizi che coinvolgeranno anche settori che fino ad ora non avevano sfruttato le potenzialità offerte dal campo ICT; tra questi i settori dell'Automotive, dell'Energia, della sanità ecc.

Il 5G, oltre ad aumentare la capacità trasmissiva dei terminali, consentirà latenze molto basse, aumenterà il grado di mobilità e consentirà la connessione di un numero praticamente infinito di dispositivi tramite il cosiddetto Internet of Things (IoT); ma soprattutto sovverterà i classici paradigmi di rete introducendo nuove modalità di gestione del traffico e questo soprattutto grazie all'introduzione di nuove bande di frequenze radio, come la banda 700 MHz, quella a 3.6 GHz e quella intorno ai 26 GHz.

Per quanto riguarda gli aspetti architettonici, la connessione delle interfacce radio avverrà attraverso la creazione di reti logiche e fisiche, denominate *slice* [4-5] che potranno avere estensioni geografiche molto ampie e ciò avverrà grazie alla segmentazione della rete di trasporto in molte sottoreti indipendenti, ognuna con caratteristiche specifiche per il servizio che dovrà supportare; la gestione di queste sezioni di rete, sarà ottenuta con metodi tipici delle Software Defined Networks (SDN) [5-6] e con l'uso di risorse basate sulla Network Function Virtualization (NFV) [5][7].

Questa rivoluzione nelle telecomunicazioni stimolerà anche una vasta richiesta di nuovi servizi e applicazioni che coinvolgeranno tutta una serie di soggetti (*verticals*) che utilizzeranno la rete di telecomunicazioni con metodi finora non esplorati. In questo ambiente, l'intera rete dovrà soddisfare, in ciascun segmento logico (o fisico), requisiti specifici in termini di larghezza di banda, affidabilità, latenza o più in generale in termini di qualità del servizio (QoS).

Il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), tramite l'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI), ha cercato, sin dalle prime iniziative sul 5G, di avere un ruolo attivo in questa rivoluzione tecnologica mediante l'ampliamento del laboratorio di rete Next Generation Networks (NGN)¹ [8-9] per sperimentare nuove funzionalità tipiche del paradigma 5G riguardante quella tratta che va dall'antenna radio verso la rete core. Tra le sperimentazioni vanno ricordate quelle riguardanti il Free Spectral Optics (FSO) [10], i processi di slicing [11-12], le tecniche SDN [9], i metodi di valutazione della Qualità del Servizio (QoS) [14] e della Qualità dell'Esperienza (QoE) [15]. In questo articolo riportiamo alcuni risultati ottenuti nell'ambito del progetto *Tecnologie Emergenti di Reti di Telecomunicazioni* (TERT), che ha operato nell'ambito di una convenzione tra l'ISCTI e la Fondazione Ugo Bordoni nel periodo 2016/2018, con alcune attività che hanno continuato anche nel 2019, e

¹ Il laboratorio NGN dell'ISCTI è una piattaforma sperimentale costituita da un gruppo di core routers e diversi sistemi di accesso come reti GPON, NG-PON2, sistemi xDSL e reti Wi-Fi, oltre ad una serie di dispositivi per la creazione, la gestione e la misura del traffico e delle prestazioni delle reti in generale. Negli anni precedenti le principali attività di ricerca avevano riguardato la gestione e la misura della qualità del servizio, la sperimentazione di tecniche di instradamento basate sul carrier ethernet e sul processamento interamente ottico. Maggiori dettagli sono riportati nei riferimenti bibliografici indicati [8-9].

che si è occupato in particolare degli aspetti di slicing, SDN, backhauling/fronthauling, ed ha anche affrontato alcuni studi teorici sulla evoluzione dell'instradamento dell'informazione analizzando nuovi protocolli di comunicazione come la modalità Content Centric Networks [16-17].

Va inoltre precisato che nel corso del 2019, per la realizzazione delle finalità previste al comma 1041 della legge 205/2017², la Fondazione Ugo Bordoni per estendere queste sperimentazioni al segmento radio ha realizzato una piattaforma emulativa con un codice NS3 che sta permettendo la gestione del traffico dal segmento core a quello radio (al momento LTE) e di studiare quindi quei processi testati con successo sulla rete del laboratorio NGN ora anche in ambito mobile [18].

2. Architetture di rete fissa per il 5G

Dal punto di vista della rete cablata, il 5G richiederà profonde innovazioni per la connessione delle antenne con tecniche di backhauling e fronthauling [19]. In particolare per quanto riguarda l'integrazione tra reti cablate e wireless, va notato che le reti 5G, oltre ad operare con capacità molto più elevate di quelle 4G, potranno anche dover servire milioni di dispositivi connessi per chilometro quadrato, cioè migliaia di volte in più rispetto a oggi, in altri casi invece saranno richieste prestazioni particolari come una bassissima latenza. Seguendo queste caratteristiche è opportuno distinguere quindi tre principali architetture 5G: *enhanced Mobile BroadBand (eMBB)*, *massive Machine Type Communications (mMTC)* e *Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (URLLC)* [3].

In generale, un dispositivo sarà in grado di connettersi a diversi tipi di celle, che possono avere dimensioni molto diverse (da femto a macrocelle) e tutte queste celle devono essere collegate al resto della rete attraverso sistemi ad alta capacità, poiché il volume del traffico aggregato può raggiungere molti Gigabit al secondo. Questa evoluzione condiziona in particolare la rete di accesso, che attualmente è oggetto di importanti investimenti per la installazione di cavi in fibra ottica verso le abitazioni. Va notato che il 5G, in particolare con trasmissioni a 26 GHz, sarà in grado di dare un grande contributo per la copertura in termini di banda ultralarga (30-100 Mb/s) soprattutto nelle aree rurali, evitando costose installazioni in fibra ottica nelle aree a bassa densità di popolazione, e grazie ad una sinergia tra le architetture Fiber To The Antenna (FFTA) e Fiber To The Home (FTTH) potremmo ottenere risparmi fino al 40% nella realizzazione di reti ultrabroadband rispetto alle reti basate solo sul FTTH [20].

La configurazione tipica utilizzata per la connessione delle reti radio eterogenee (HetNet) sarà basata sul backhauling con sistemi in fibra ottica Point to Point (P2P) per macrocelle e GPON e NG-PON2 per celle più piccole. È stato dimostrato che l'architettura della Fig. 1 è anche

² Tale comma recita: "Il Ministero dello sviluppo economico provvede a favorire la diffusione della tecnologia 5G attraverso la realizzazione di sperimentazioni e di laboratori specifici in coerenza con gli obiettivi del Piano di azione per il 5G..."

quella che consente il minor consumo di energia [21], distinguendo anche la trasmissione del backhauling dal fronthauling [22].

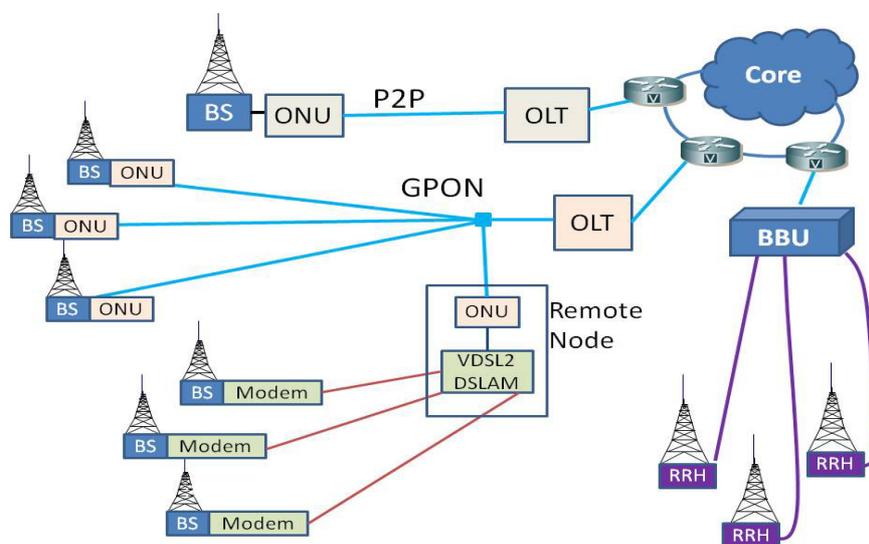


Figura 1. Architettura di backhauling e fronthauling per la copertura con celle Macro e Micro

Dalle antenne verranno creati dei percorsi logici o fisici per realizzare così delle sottoreti (slice) su cui verranno trasportati i contenuti di specifici servizi; questi slice saranno gestiti con tecniche SDN e con processi di virtualizzazioni NFV atti a creare ambienti per il trasporto delle informazioni adatti a specifiche necessità di utenti e operatori. Questa gestione riguarda sia le reti wireless (Software Wireless Defined Networks) che le reti fisse, operando in ambito core con sistemi Wavelength Division Multiplexing (WDM) con capacità anche di decine di Tb/s su singola fibra ottica [7]. E' da sottolineare che anche in ambito di accesso, specialmente per il fronthauling delle antenne 5G, saranno richieste capacità superiori al Tb/s su singola fibra.

La transizione al 5G sta portando a un ulteriore ripensamento sulla elaborazione dei dati nella rete, ed in particolare per servizi che richiedono una risposta in tempi brevissimi, si stanno affermando architetture in cui l'elaborazione dell'informazione avviene in punti prossimi al luogo in cui i dati sono generati secondo schemi EDGE e FOG [23].

Infine si pensa anche che, per un più efficiente trattamento dell'informazione, i processi di routing dovranno essere assistiti da modalità che facilitino l'instradamento utilizzando percorsi definiti sulla base dei contenuti. In questo ambito le proposte oggi più innovative riguardano le cosiddette Information Centric Networks (ICN) basate sul rivoluzionario passaggio dal paradigma client-server (definito proprio dal protocollo IP) a quello client-content [16]. E' stato questo un argomento molto approfondito nell'ambito del progetto TERT, dove le ICN sono state considerate principalmente in termini di Content Centric Networks (CCN), e in cui sono stati mostrati gli enormi vantaggi che questo nuovo protocollo potrebbero portare in termini di riduzione del traffico totale e quindi anche di consumo energetico [17]; tuttavia è stato anche

mostrato che questa rivoluzione richiederebbe degli investimenti da parte degli operatori troppo elevati e al momento non sostenibili. E' probabile, quindi, che il passaggio verso il modello client-content necessiti di tempi più lunghi ma al contempo è possibile prevedere un'evoluzione della struttura delle reti con server sempre più distribuiti e operazioni di trasporto e memorizzazione dell'informazione sempre più basate sulle caratteristiche del contenuto, intese come QoS, popolarità, valore e sicurezza.

3. Approccio Slice e SDN utilizzato nel progetto TERT

Seguendo le brevi considerazioni riportate nel cap. 2 il laboratorio NGN dell'ISCTI è stato configurato per avere uno scenario di tipo Slicing e cioè di una partizione logica della rete in tanti segmenti End-to-End (server-client), dove in ciascun segmento poteva esser definita una specifica classe di servizio [12-13].

Dopo una accurata analisi della letteratura scientifica e prendendo spunto da precedenti sperimentazioni nel LAB ISCTI sulle tecniche di gestione automatica delle risorse, intese come connessioni GbE e percorsi logici di tipo VPLS-MPLS, ma soprattutto considerando gli apparati attualmente disponibili in LAB, si è deciso di utilizzare uno schema con un Orchestrator che comandava direttamente i router con messaggi Simple Network Management Protocol (SNMP). La principale innovazione per il nostro schema SDN è nella gestione della QoS, infatti l'orchestrator è comandato con messaggi provenienti dalla rete di monitoraggio mPlane [24], che la FUB realizzò nell'ambito del progetto EU FP7 mPlane; tale rete permette di conoscere lo stato degli accessi utilizzando sonde attive e il traffico mediante un monitoraggio passivo [16-17]. Mediante l'analisi tra la correlazione dei dati delle sonde passive e attive è possibile vedere se in un punto della rete è presente una congestione o una riduzione del rapporto SNR. Le informazioni circa le criticità della rete sono passate da mPlane all'Orchestrator che provvederà ad esempio ad aumentare la capacità di un collegamento tra due router [26-27].

Con questa configurazione, il laboratorio si presta come una piattaforma base per una rete completa di tipo 5G per la gestione di tante reti radio di tipo eterogeneo. Inoltre la suddivisione della rete in tanti segmenti logici è uno degli approcci fondamentali per la gestione di servizi multi-verticals con importanti sviluppi verso i programmi di Industria 4.0.

Per aiutare il lettore, nella fig. 2 riportiamo lo schema della rete di monitoraggio mPlane, che è costituita da un'infrastruttura distribuita per eseguire misure attive, passive e ibride a diversi livelli della pila OSI. Un repository raccoglie, memorizza e analizza i dati raccolti tramite una elaborazione parallela e un reasoner che cerca in modo iterativo la causa di una degradazione nella rete, anche determinando le condizioni che portano ad alcuni problemi. In particolare lo strato di misura utilizza una serie di sonde programmabili (software e hardware) sia realizzate nel

progetto stesso sia già disponibili ma adattate però all'architettura mPlane.

Uno degli obiettivi principali di mPlane è quello di assistere l'utente in tutte le sue esigenze relative all'accesso alla rete, in particolare per quanto riguarda i test di qualità del servizio (QoS) e per la verifica e la certificazione del SLA tra utente e ISP. Quindi, lo strato di misura di mPlane risulta fondamentale per le SDN in quanto fornisce un quadro di monitoraggio completo della rete.

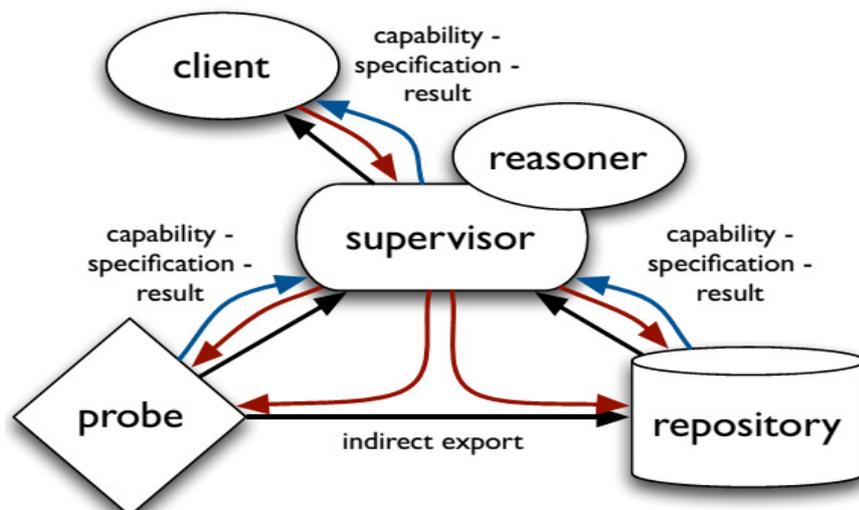


Figura 2. Architettura di backhauling e fronthauling per la copertura con celle Macro e Micro

4. Set up sperimentale

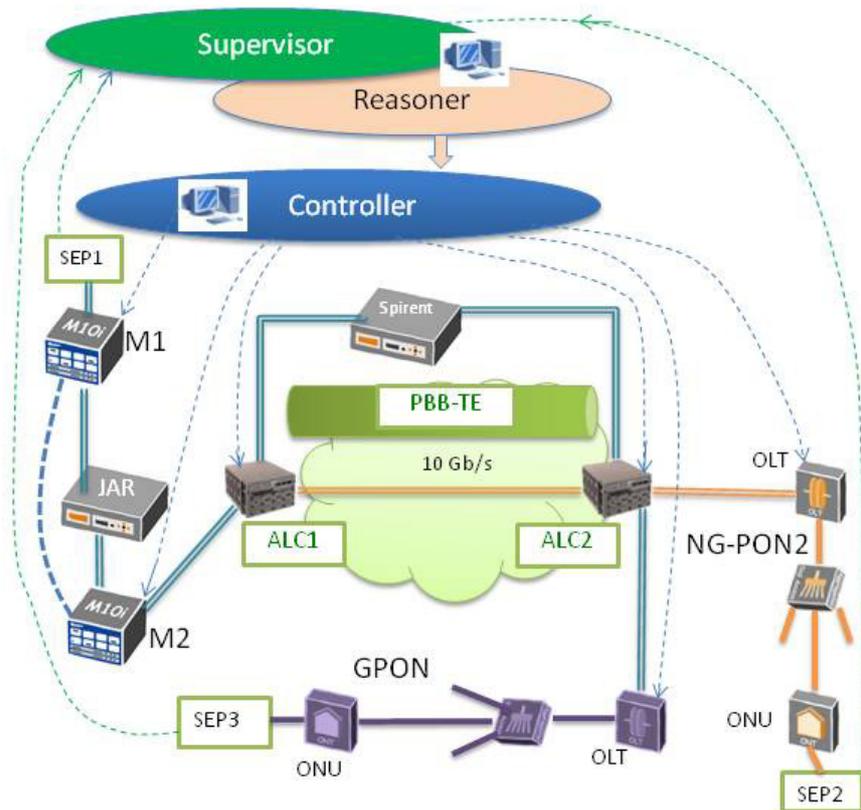
Nella fig. 3 possiamo vedere una sezione del LAB ISCTI configurato con il nostro metodo SDN.

L'originalità di questo lavoro risiede nell'uso della sonda attiva mPlane (mSLAcert)[25] che in questa configurazione opera anche come Slicing End Point (SEP), ovvero come l'apparato di terminazione dello slice che comunica con il supervisor mPlane (vedi fig. 2) al fine di disporre delle risorse e di tutte le strutture per gestire i servizi operanti sulla rete. In particolare, il supervisor gestisce anche tutte le istanze di slicing come la preparazione, la messa in servizio, il funzionamento e la disattivazione [3].

I requisiti di slicing vengono inoltrati dal supervisor al Reasoner mPlane, fino al Controller che tiene conto di tutta la disponibilità di risorse e decide sui router come impostare il trattamento del traffico ai terminali Optical Line (OLT) della PON mediante un percorso di tipo VLAN / PBB-TE effettuato sui collegamenti GbE [28]. Ricordiamo che, per quanto riguarda i percorsi slice, le tecniche VLAN, MPLS e PBB-TE sono approcci fondamentali poiché ci consentono di implementare percorsi logici a Layer2-Layer3 con diverse procedure di Class of Service (CoS) [29]. Come nella sua versione mPlane originale, il Reasoner può monitorare tutte le prestazioni della rete mediante sonde attive (SEP in

questo caso) e passive situate in punti diversi dell'infrastruttura. Dal monitoraggio della di rete il Reasoner può rivelare degradazioni e anomalie e comunicare con il Controller (Orchestrator) che gestisce tutti gli elementi della rete; il Reasoner può quindi richiedere al Controller di apportare modifiche nei percorsi fisici e logici per migliorare le prestazioni [30].

Figura 3. Architettura e set up sperimentale



Tornando alla figura 3 il cloud con i router ALC1-ALC2 rappresenta la sezione principale, mentre la parte che circonda il cloud è quel segmento di rete oggi definito come Xhaul [31], che parte dalle antenne radio per raggiungere i punti di presenza (PoP) nelle reti di uno o più fornitori di servizi, attraversando elementi di instradamento ad alta capacità.

In tale rete il core è costituito da due router IP Juniper M10 e due router Alcatel SR7750. La parte di accesso è composta da un GPON (Alcatel 7330) e un NG-PON2 (Alcatel 7360, che qui adotta solo una lunghezza d'onda). Un dispositivo di emulazione di rete (JAR) è anche incluso nella rete e può elaborare il traffico fino a 10 Gb/s e può introdurre ulteriori ritardi e perdite di pacchetti. Il generatore di traffico Spirent è adottato per introdurre congestioni nelle reti.

I router e gli ONT sono gestiti da un PC che funge da controller che imposta l'accensione e lo spegnimento dei collegamenti ottici GbE e l'implementazione dei percorsi logici basati su VLAN / MPLS / PBB-TE. Un altro PC è dedicato al Supervisor e Reasoner. Il Supervisor gestisce tutte le istanze SEP dall'attivazione alla disattivazione.

Il supervisore gestisce anche sonde passive TSTAT situate in una delle uscite M2 e ALC2. Il Reasoner analizza tutti i dati provenienti dalle sonde attive (SEP) e passive e può generare allarmi che sono inviati al controller, che a sua volta può gestire la configurazione dei dispositivi di routing. La linea tratteggiata tra M1 e M2 rappresenta un percorso alternativo per una eventuale restoration.

In questo lavoro riportiamo solo i risultati relativi a due percorsi che differiscono principalmente per un accesso in fibra basato su GPON o NG-PON2; in particolare distinguiamo tra lo slice A) corrispondente al percorso SEP1, M1, M2, ALC1, ALC2, NG-PON2, SEP2 e lo slice B) SEP1, M1, M2, ALC1, ALC2, PON, SEP3.

Sono stati utilizzati le seguenti CoS: Expedited Forwarding (EF), Assure Forwarding (AF) e Best Effort (BE) [16-17].

5. Risultati

Prima di esaminare le procedure SEP abbiamo caratterizzato i due slice A e B testando una capacità di 1 Gb / s (che è il massimo per il percorso B) senza altri effetti che potevano produrre degradazioni (perdita, congestione, ...) e in fig. 4 riportiamo la frequenza normalizzata dei valori di latenza misurati per la sezione di attraversamento del traffico A) e B), sia per il traffico downstream (linea continua) che per il traffico upstream (linea tratteggiata). Nel caso A), operando con NG-PON2, sia per downstream che per upstream la latenza è molto inferiore allo slice B); in particolare per il downstream la latenza è di circa 0,07 ms, mentre per l'upstream il suo valore è leggermente superiore, con un valore medio di 0,14 ms. Tuttavia confrontando i valori di fig. 4 (A) possiamo vedere che sia per l'upstream che per il downstream i valori di latenza sono sempre molto più bassi del minimo richiesto per le reti 5G di tipo ultrareliable (1 ms).

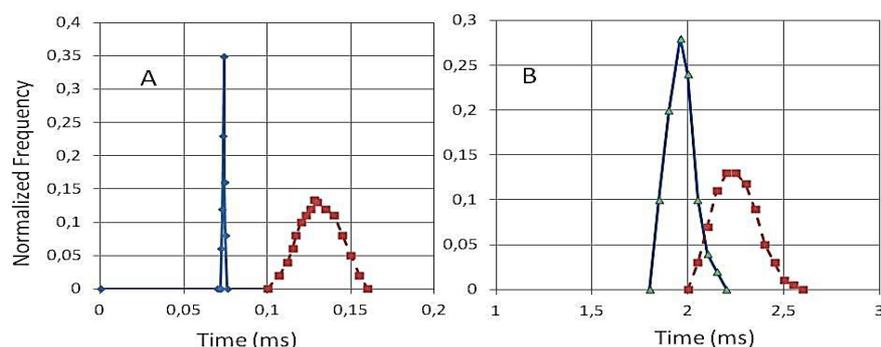


Figura 4. Distribuzione della latenza per lo slice A) and B). Linea continua si riferisce al downstream, quella tratteggiata all'upstream.

Al contrario per B) i valori di latenza sono più alti ma comunque compatibili con la maggior parte delle infrastrutture 5G che richiedono una latenza inferiore a 4 ms.

La procedura SEP inizia con l'istanza di preparazione mediante la registrazione dei tre SEP al supervisore seguendo le procedure definite nell'ambito del progetto mPlane [25]; per la messa in servizio, consideriamo tutte le procedure richieste dai SEP al supervisore per

implementare i percorsi logici dedicati alle sezioni SEP1-SEP2 (A) e SEP1-SEP3 (B), e in particolare in questo approccio i parametri si riferiscono alla creazione dei percorsi PBB-TE. Nell'operazione il supervisore comunica, tramite il Reasoner, al Controller i requisiti dei percorsi logici; il Controller verifica la disponibilità delle risorse mentre il Reasoner valuta le prestazioni attuali nella posizione del SEP (mediante le misure attive effettuate dalle funzioni mSLAcert in termini di throughput, jitter e latenza). Dopo questo controllo sulle prestazioni della rete e la disponibilità dei percorsi, il Controller individua i nuovi percorsi (logici e fisici) nei router e comunica loro le modifiche necessarie.

La modalità operativa di questa architettura è illustrata mediante la fig. 5 dove riportiamo il comportamento della latenza nel tempo per la trasmissione da SEP2 a SEP1 attraverso il percorso A, durante un intervallo di 200 s in cui i SEP richiedono CoS diverse. In questo test il dispositivo Spirent aggiunge un traffico spurio per generare una congestione, per un totale di 11 Gb / s tra ALC1 e ALC2, considerando che il collegamento ALC1-ALC2 opera a 10 Gb/s. A $T = 0$ il SEP1 chiede di essere ammesso nella rete seguendo le procedure definite per la sonda mSLAcert; dopo le procedure handshaking con il supervisore, SEP1 e SEP2 sono in grado di effettuare misurazioni dopo circa 5 s. All'inizio nessuna priorità è assegnata al traffico e quindi in presenza di una classe BE la latenza è alta. A $T = T1$ il SEP1 richiede una sezione con una classe AF tra SEP2 e SEP1, che viene trasportata da un percorso PBB-TE. Gli scambi di messaggi tra SEP e supervisore richiedono circa 7 secondi e, dopo l'accettazione della classe AF, il supervisore chiede al controllore di impostare tale percorso. Il percorso AF PBB-TE viene attivato a $T = 52$ s, e dopo questo tempo si può osservare una forte riduzione della latenza.

Il ritardo tra $T1$ e $T = 52$ s è principalmente dovuto alla procedura di handshaking telnet [7]. A $T = T2$ è quindi segnalata la necessità di una CoS migliore ed in particolare di tipo EF PBB-TE tra SEP2 e SEP1, che viene attivata a $T = 118$ s, e dove si nota una forte riduzione della latenza. Tale CoS viene mantenuto fino a $T3$ quando viene chiesto di rimuovere la sessione che si verifica a $T = 188$ s.

Nel seguito riportiamo un test riguardante una procedura di restoration per dimostrare che il nostro approccio è immune rispetto alle variazioni che si verificano nella rete core e inoltre mostriamo i vantaggi relativi al ripristino delle prestazioni in presenza di perdite di pacchetti. Guardando la Fig. 3, tramite il JAR, possiamo introdurre perdite nel collegamento tra M1 e M2 con valori di BER diversi e, come esempio, riportiamo in fig. 6 (sopra) il comportamento del throughput per l'EF (B) di 100 Mb / s. Dopo 30 secondi il JAR ha introdotto perdite di bit con un BER = 10^{-7} (nessuna perdita di bit è stata aggiunta prima) e la riduzione del throughput è mostrata tra 30 e 90 s, con la relativa ritrasmissione del pacchetto (fig. 6 sotto), misurato dalla sonda TSTAT in M2. Tuttavia, anche in queste cattive condizioni, il throughput è sempre rimasto superiore a 20 Mb / s, il che potrebbe essere una prestazione accettabile per la maggior parte dei servizi comuni. Dopo 90 s è stato impostato un BER = 10^{-6} e il throughput e la ritrasmissione dei pacchetti ha assunto valori inaccettabili. La correlazione di Pearson tra throughput e segmenti di ritrasmissione [27] calcolata dal Reasoner, ha rivelato il

superamento di una soglia e ha innescato un allarme per il controller che ha permesso allo slice di passare su un altro collegamento GbE tra M1 e M2 senza alcuna perdita a $t = 186$ s, ripristinando le condizioni prima dell'introduzione delle perdite di bit.

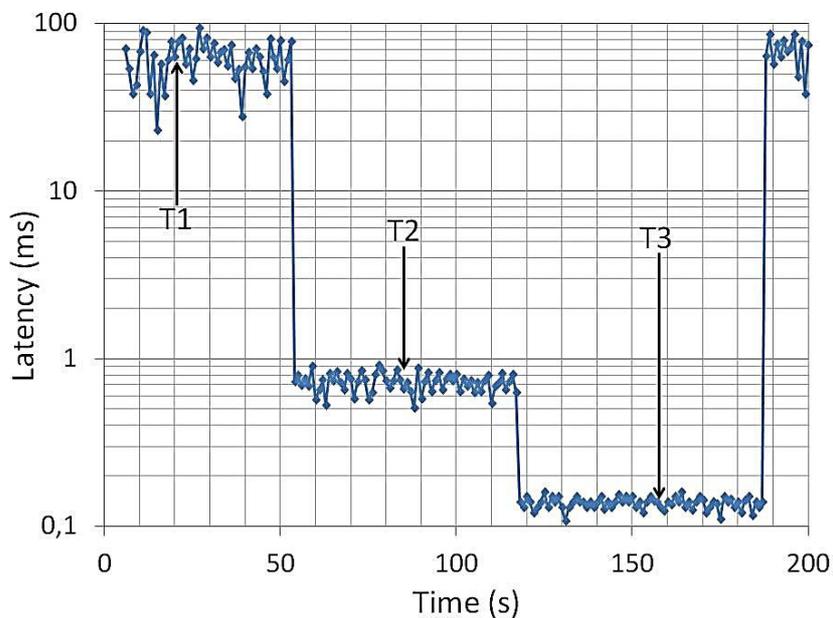


Figura 5. Andamento della latenza durante i cambiamenti di CoS.

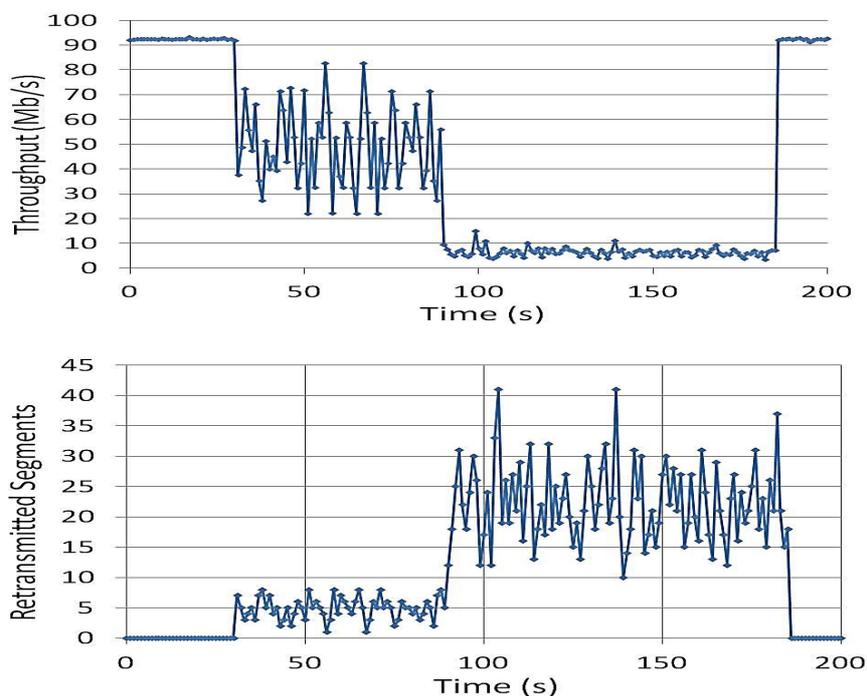


Figura 6. Throughput (sopra) e segmenti ritrasmessi (sotto) per lo slice 100 Mb/s EF (B).

6. Conclusioni

I risultati ottenuti in questo articolo ci hanno permesso di fare una approfondita analisi sull'evoluzione delle architetture di rete fissa (accesso, metro e core), considerando le esigenze necessarie per le interconnessioni delle reti di tipo 5G e per la gestione automatica della QoS. E' stata quindi dimostrata sperimentalmente una procedura completa per l'implementazione di processi di slicing in una rete access-core che include GPON e NG-PON2, consentendo l'adozione di diverse CoS basate sull'instradamento di tipo VLAN / MPLS / PBB-TE. I requisiti di slice sono gestiti dalla nostra proposta del terminale SEP che può essere considerato come l'interfaccia tra i verticali e la rete. Il SEP e la gestione SDN si basano sull'architettura mPlane e in particolare il SEP è ottenuto mediante una evoluzione della sonda attiva mSLAcert, che consente di richiedere specifici indicatori di prestazioni per i suoi percorsi logici e fisici.

I risultati mostrano l'efficienza di questa procedura specie per la riduzione della latenza e la combinazione mPlane-SDN consente anche un efficiente ripristino in caso di eventi che producono forti degradazioni in alcuni percorsi della rete. Inoltre, i risultati confermano l'importanza delle reti NG-GPON2 per ridurre la latenza e la loro adattabilità ai processi di slicing.

Bibliografia

- [1] Andrews, J., Buzzi, S. Choi, W., Hanly S. V., Lozano, A., Soon, A., Zhang, J. C., 2014 "What will 5G be?", IEEE Journal of Selected Area in Telecommunications, vol. 32, n.6, pp. 1065-82
- [2] Rost, P., Banchs, A., Berberania, I., Breibach, M., Doll, M., Droste, H., Manweiler, C., Puente, M. A., Samdanis, K., Sayadi, B., May 2016 "Mobile Network Architecture Evolution towards 5G", IEEE Comm. Magazine, pp. 84-91
- [3] "5G white paper" by NGMN Alliance, https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf.
- [4] Zhou, Li, X., Chen, R., Zhang, H., May 2016" Network slicing as a Service: Enabling Enterprises' Own Software-Defined Cellular Networks" IEEE Communication Magazine, Vol. 54, n. 7, pp. 146-153.
- [5] J. O. Lucerna, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. J. Ramos-Munoz, J. Lorca, J. Folgueira, "Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges," IEEE Comm. Magazine, Vol. 55, no. 5, p. 80 (2017).
- [6] Sezer, S.; Scott-Hayward, S.; Chouhan, P.K.; Fraser, B.; Lake, D.; Finnegan, J.; Viljoen, N.; Miller, M.; Rao, N., 2013 "Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks, IEEE Communications Magazine, 51, (7) , pp. 36 – 43
- [7] Eramo V., Lavacca F. G. "Proposal and Investigation of a Reconfiguration Cost Aware Policy for Resource Allocation in Multi-Provider NFV Infrastructures interconnected by Elastic Optical Networks" IEEE Journal of Lightwave Technology, 6 June 2019
- [8] E. Tego, F. Idzikowski, L. Chiaraviglio, A. Coiro, F. Matera "Facing the reality: validation of energy saving mechanisms on a testbed" J. of Elect. and Comp. Engin., Hindawi, March (2014).
- [9] Tego, F. Matera, D. Del Buono, V. Attanasio, "Quality of Service Management based on Software Defined Networking Approach in wide GbE Networks" EuMed Telco 2014 Napoli, Novembre 201
- [10] S. Di Bartolo S., Pizzoleo A., Penna S., Tosi Beleffi G. M., Matera F., Pompei S. "Experimental demonstration of a GPON Free Space Optical Trunk for full duplex communications" Fotonica 2014, Napoli, May 12-14 2014.
- [11] Tego E., Matera F., Attanasio V., Nastri E. "A Measurement Plane to Monitor and Manage QoS in Optical Access Networks" IEEE Fiber Optics in Access Networks 2017 (FOAN 2017) Conference, Munich, Germany, November 7, 2017

- [12] Tego E., S., Matera, F., Rea, L., Attanasio V., Nastri E., 2018 "Role of a Measurement Plane to Monitor and Manage QoS in Optical Access Network " *Fiber and Integrated Optics*, Taylor & Francis, Vol. 37, n.5, pp. 239-255
- [13] S. Pompei et al "Verso il LAB ISCTI 5G: Il segmento XHAUL" *La Comunicazione* 2018
<http://www.isticom.it/index.php/divulgazione/la-rivista/rivista20172018>
- [14] M. Mellia, S. Traverso, E. Tego, A. Rufini, A. Valenti, F. Matera, M. Scarpino, A. Kahveci, F. Invernizzi "Quality of Service monitoring adopting correlation among active and passive measurements" 17th International Network Strategy and Planning Symposium-Network 2016, Montreal September 26-28, 2016.
- [15] L. Costantini et al, "Polynomial Regress Model to explain the relationship between Network and Service Key Performance Indicators" *IET Networks* 2017.
- [16] Md. F. Bari, S. R. Chowdhury, R. Ahmed, R. Boutaba, B. Mathieu, "A Survey of Naming and Routing in Information-Centric Networks" *IEEE Communication Magazine* December 2012, pp. 44-53.
- [17] Matera F., Nastri E. "Optical Network Design in Content Centric Network Scenario" *Fotonica* 2017, Padova, May 3-5, 2017
- [18] Lavacca F.G., Salvo P., Costantini L., Mammi E., Pompei S., Rea L., Teodori M. "Studying and Simulation of a NS3 Framework Towards a 5G Complete Network Platform" *FOAN* 2019, 2-4 September 2019, Sarajevo, Bosnia & Herzegovina
- [19] Mitchel, J. E., 2014 "Integrated Wireless Backhaul Over Optical Access Networks", *J. of Lightwave Technology* Vol. 32, n. 20, pp. 3373-3382.
- [20] F. Matera, A. Penza "Architectures for 5G: cooperation among wireline and wireless networks" *CTTE&FITCE* 2019, 25-27 settembre 2019, Ghent, Belgium
- [21] F Carciofi C., Grazioso P., Matera F. "Power Consumption in Mobile HetNets" *AEIT International Annual Conference* 2017, Cagliari, September 20/22, 2017
- [22] Carciofi C., Grazioso P., Matera F., Nastri E., Restuccia E. Fronthauling-Backhauling Contributions to Power Consumption in 5G Optical Links *Fotonica* 2018 *AEIT*, Lecce, 23-25 maggio 2018
- [23] Flavio Bonomi et al., Fog computing and its role in the internet of things., in *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*. ACM, 2012

- [24] P. Casas, et al., "Unveiling network and service performance degradation in the wild with mplane" *IEEE Comm. Magazine*, Vol. 54, no. 3, p. 71 (2016).
- [25] <https://www.ict-mplane.eu/public/mslacert-active-probe>
- [26] E. Tego, F. Matera, V. Attanasio, E. Nastri, "Experimental Verification on a Slicing Management Based on the mPlane Monitoring Plane With GPON Comparison " *Fiber and Integrated Optics*, online July 2019.
- [27] M. Mellia, S. Traverso, E. Tego, A. Rufini, A. Valenti, F. Matera, M. Scarpino, A. Kahveci, F. Invernizzi "Quality of Service monitoring adopting correlation among active and passive measurements" *17th International Network Strategy and Planning Symposium-Network 2016*, Montreal September 26-28, 2016.
- [28] Tego E., Carciofi C., Grazioso P., Petrini V., Pompei S., Matera F., Attanasio V., Nastri E., Restuccia E. 2017 "A Measurement Plane for Optical Networks to Manage Emergency Events" *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 36, n.1, pp. 1-15.
- [29] Coiro, A. Valenti, S. Pompei, F. Matera, P. Testa, M. Settembre, "Network Evolution towards Carrier-Grade Ethernet Transport Network", *Fiber and Integrated Optics*, vol. 28, n. 6, pp. 393-411.
- [30] M. Giuntini, P. Grazioso, F. Matera, A. Valenti, V. Attanasio, S. Di Bartolo, and E. Nastri: "Enabling Optical Network Test Bed for 5G Tests", *Fiber and Integrated Optics*, published online Dec. 14th, 2016, Taylor & Francis
- [31] De la Oliva, F. Cavaliere, P. Iovanna et al. "Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks". *IEEE Wireless Communications*, 22(5), pp. 32-40, October 2015.

Massimo Celidonio
Ermanno Fionda
 Fondazione Ugo Bordoni

Carlo Riva
 Politecnico di Milano
 Dipartimento di Elettronica
 Informazione e Bioingegneria

Studio sui contributi attenuativi generati da agenti troposferici su collegamenti wireless terrestri nella banda THz

Study on signal attenuation due to tropospheric components on terrestrial wireless links in the THz band

Sommario: A seguito dello sviluppo dei dispositivi e dei circuiti integrati che operano a frequenze maggiori di 40 GHz, gli operatori di telecomunicazione per rispondere alla crescente richiesta di banda da parte degli utenti, si stanno orientando, sempre di più, a verificare la fattibilità di connessioni wireless operanti anche a frequenze sub-millimetriche (300 – 1 THz). L'uso di questa regione spettrale, che offre una maggiore disponibilità di bande contigue, è oggetto di indagini da parte di organismi internazionali di standardizzazione quali ITU e CEPT. Il presente studio intende fornire degli elementi utili per definire le caratteristiche tecniche ed operative per le applicazioni rivolte ai servizi fissi terrestri che operano in bande fino a 1 THz. I risultati delle simulazioni qui discusse, potranno essere utili per ulteriori analisi finalizzate a verificare la condivisione e compatibilità tra i servizi fissi e i servizi passivi che operano nelle stesse bande o in bande adiacenti. Le simulazioni hanno riguardato la stima dei livelli attenuativi specifici dovuti alla componente gassosa, agli eventi precipitativi e nebbiosi presenti nella troposfera in prossimità del suolo. Inoltre, è stata anche stimata la rifrattività radio. Lo studio ha preso in esame l'intero territorio italiano e le frequenze da 40 a 840 GHz.

Abstract: Due to the development of devices and integrated circuits operating at frequencies greater than 40 GHz, telco operators in order to face with the growing demand for bandwidth from users are increasingly orienting themselves to verify the feasibility of wireless links also at sub-millimeter frequencies (300 – 1 THz). This spectral region, which offers a greater availability of contiguous bands, is under investigations by international standardization bodies such as ITU and CEPT. The present study intends to provide useful elements to define technical and operational characteristics for applications aimed at land-based fixed services operating in bands up to 1 THz. The results of the simulations here reported may be useful in order to carry out sharing and compatibility analysis between fixed and passive services operating in the same bands or in adjacent bands. The simulations provide an estimation of attenuation levels due to the gaseous component, precipitating and foggy events present in the troposphere at the ground level. Furthermore, radio refractivity was also estimated. All results are referred to the entire Italian territory and for frequencies ranging from 40 to 840 GHz.

1. Introduzione

La prima domanda che sorge spontanea quando si affrontano argomenti riguardanti l'uso della banda dei TeraHertz (THz) per i sistemi wireless è "Perché è necessario ricorrere a tali bande di frequenza?" La risposta più immediata è che queste bande, comprese tra i 100 GHz e il THz (in termini di lunghezza d'onda da 3 mm - 0.3 mm) saranno fondamentali per sfruttare al meglio la tecnologia 5G e sue evoluzioni e per rispondere a tutte le aspettative e le potenzialità attese da essa, con particolare riguardo al settore dell'IoT (Internet of Things). Infatti, i sistemi di comunicazione di tipo 5G operanti in bande millimetriche, che a breve saranno diffusamente immessi sul mercato, potrebbero non essere in grado di soddisfare la vorticoso crescita della domanda di connettività wireless ad elevate prestazioni, coniugata anche con la sensibile riduzione delle necessità energetiche. Da qui nasce l'opportunità di indagare le bande THz che sono in grado di offrire una grande quantità di banda.

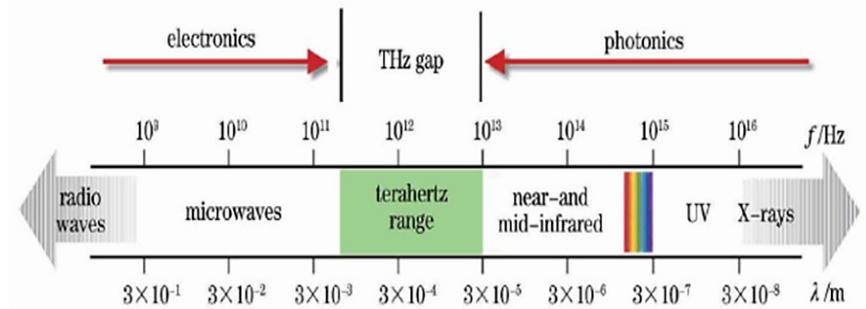
Per i futuri e sofisticati sistemi wireless in banda THz, si possono ipotizzare capacità dati dell'ordine dei 102 Gbps a bassa latenza, anche inferiore a 10^{-3} sec., utilizzando larghezze di banda del segnale di decine di GHz.

Alcuni centri di ricerca privati e pubblici, inoltre, sono al lavoro per far evolvere ulteriormente i sistemi radiomobili verso una nuova tecnologia (6G). Uno degli obiettivi di questi studi è trovare il modo di gestire, in modo ancora più efficiente, reti dense di variegati e differenti sensori e dispositivi IoT, dell'ordine delle centinaia-migliaia di unità, che richiedono di poter comunicare, soprattutto con connessioni wireless, in modo simultaneo senza disturbarsi l'uno con l'altro. Un altro obiettivo è individuare soluzioni per rendere fruibili capacità di dati di 1 o 2 ordini di grandezza più elevati rispetto quelle ad oggi attese per il 5G.

2. Utilizzo della Banda THz da parte di sistemi 5G evoluti

Quanto sopra accennato, pone anche una necessità di tipo Regolatorio per la fruibilità/allocazione delle bande THz. L'International Telecommunication Union (ITU) è già al lavoro su queste bande e un primo report che prende in esame lo sviluppo delle comunicazioni wireless nella banda di frequenza 275 - 1000 GHz (banda THz) (vedi Figura 1) è stato già pubblicato [1]. In tale report si osserva come i sistemi che operano a frequenze che si trovano oltre le microonde e a quelle millimetriche mostrano alcune similitudini con le comunicazioni wireless laser. D'altra parte si rileva anche che le comunicazioni a microonde e quelle che fanno uso di sistemi laser non saranno sostituite dai sistemi che agiranno nella banda dei THz, poiché questi ultimi hanno peculiarità uniche che li distinguono.

Figura 1. Banda THz (fonte ITU [1]).



L'uso della banda THz, in base a quanto indicato attualmente nelle Radio Regulation (RR), è rivolta a servizi scientifici di tipo passivo quali la radio-astronomia, l'esplorazione della terra via satellite (EES) e la ricerca in ambito spaziale. Tuttavia, in ambito ITU, sono in corso degli studi per valutare la possibilità d'uso della banda THz anche per i servizi attivi. Infatti, lo sviluppo di dispositivi e circuiti integrati sopra i 275 GHz consentono di realizzare applicazioni sofisticate in settori quali:

- spettroscopia;
- realtà aumentata;
- "imaging" medico, per indagini non invasive in grado di ottenere immagini all'interno di oggetti "opachi" (tra cui anche il corpo umano);
- telecamere sensibili nella regione spettrale dei THz.

Inoltre, i sistemi di comunicazione che opereranno alle frequenze dei THz potranno usufruire di una larghezza di banda molto estesa (ultra broadband), ancora maggiore di quella realizzabile alle microonde e nelle bande delle onde millimetriche. Ciò potrebbe consentire di sviluppare sistemi di comunicazione wireless ad altissima velocità.

Anche l'IEEE nell'ambito del IEEE 802.15.3 Task Group, dal 2014, sta lavorando ad uno standard IEEE 802 che includa uno strato fisico (PHY) operante oltre i 275 GHz e, nel settembre 2017, è stato approvato lo standard IEEE 802.15.3d-2017 che è stato poi pubblicato nell'ottobre 2018. Esso rappresenta il primo standard di comunicazione wireless al mondo che opera nella gamma di frequenze dei 300 GHz. La banda sopra i 275 GHz, dal punto di vista della radiopropagazione, ha caratteristiche particolari rispetto ad altre bande di frequenza. Le principali sono le seguenti:

1) Alta permittività elettrica

Il segnale radio sopra i 275 GHz ha caratteristiche di buona penetrazione in molti materiali dielettrici e liquidi non polari, quindi può penetrare materiali o oggetti opachi e potrebbe anche essere usato per test, non distruttivi, come ad esempio nel controllo di qualità o nell'ispezione di oggetti e persone nelle operazioni finalizzate alle misure di sicurezza. Inoltre, poiché la lunghezza d'onda è più grande delle dimensioni delle "polveri" sospese nell'aria, quando un segnale a queste frequenze viene trasmesso in presenza di queste sostanze, l'attenuazione è relativamente ridotta. Possono quindi essere utilizzati

per ottenere una rappresentazione dell'ambiente in presenza di fumo, come nel caso di situazioni di soccorso in caso di incendi, oppure in presenza di tempeste di sabbia, ad esempio in aree vicino a zone desertiche.

2) Elevata attenuazione in acqua e in aria

Il segnale radio sopra i 275 GHz presenta un'elevata attenuazione in presenza di acqua. Questa caratteristica rende questi segnali particolarmente sicuri per gli esseri umani (si ricorda che la struttura umana è composta per circa il 65 % da liquidi). Inoltre, grazie a questa caratteristica, possono essere utilizzati in campo medico per specifiche applicazioni terapeutiche. Un'altra caratteristica chiave dello spettro al di sopra di 275 GHz sono gli alti livelli di assorbimento gassoso che possono anche arrivare ad alcune centinaia di dB/km per frequenze superiori a 500 GHz. Inoltre, i sistemi wireless che operano in ambiente outdoor a queste frequenze devono far fronte all'attenuazione della pioggia e ad altri effetti come le scintillazioni. La pioggia può avere un effetto critico, in particolare, nei casi in cui sono richieste alte disponibilità. La stima dei possibili livelli attenuativi da componenti gassosi e da eventi precipitativi troposferici sono oggetto del presente studio e tali tematiche saranno approfondite nel paragrafo 3.

3) Elevata capacità dati e direttività

La banda THz consente di trasportare più informazioni nell'unità di tempo. Con una lunghezza d'onda più breve rispetto alle onde millimetriche-microonde, inoltre, è possibile ottenere una buona direttività del segnale, caratteristica molto utile in determinate applicazioni di comunicazione wireless. Come già accennato precedentemente, esistono numerose attività di ricerca sui sistemi di comunicazione wireless a banda ultra larga nelle gamme di frequenza superiori ai 275 GHz. Vista la loro elevata capacità di trasmissione e tenendo conto della notevole attenuazione che subiscono i segnali radio trasmessi su queste frequenze, i collegamenti che operano su queste bande di frequenza potrebbero essere consigliati in applicazioni da ultimo miglio, ma non si esclude un loro utilizzo più esteso sia in ambito indoor che outdoor. Sperimentazioni in campo su queste bande di frequenza sono state già avviate e i risultati di tali studi sono stati pubblicati in letteratura [1]. In sintesi, nell'esaminare i casi d'uso delle comunicazioni nella banda dei THz, occorre tenere presenti le seguenti specificità:

- Utilizzo di larghezze della banda ultra wide;
- Possibilità di miniaturizzazione delle antenne e dei dispositivi di trasmissione;
- Alta direttività ed elevata attenuazione di spazio libero (la lunghezza d'onda è inferiore a 1/5 di quella in banda 60 GHz ma l'attenuazione di spazio libero maggiore di 25 volte o più, è compensata dall'elevato guadagno dell'antenna).

Di seguito sono elencati alcuni dei casi d'uso più significativi che, ad oggi, sono stati individuati per le comunicazioni nella banda dei THz.

A – Caso d’uso n.1 - Comunicazioni di super-prossimità tra chip e circuiti stampati

Si prevede che il collegamento wireless di parti e circuiti stampati abbia l'effetto di eliminare il cablaggio e miniaturizzare substrati e dispositivi. Si prevede che le distanze di comunicazione durante l'implementazione di circuiti integrati e/o la stratificazione di substrati implementati in circuiti integrati varieranno da pochi mm a poche decine di cm. La velocità di trasmissione potrà superare le decine di Gb/s.

B – Caso d’uso n.2 - Sincronizzazione dei contenuti con il cloud attraverso le comunicazioni near field (NFC)

Recentemente, i servizi che utilizzano il cloud, e in particolare i servizi di collaborazione basati su smartphone, sono in rapido aumento. Il servizio di archiviazione cloud consente di sincronizzare foto e riprese video memorizzati sullo smartphone di un utente su una specifica rete senza rendere l'utente consapevole di questo processo. Attualmente, la comunicazione a pacchetto che utilizza i servizi 3G e LTE per sincronizzare (frequentemente) i contenuti sul cloud senza che l'utente ne sia consapevole, porta ad aumenti inaspettati del consumo della batteria. L'uso delle comunicazioni THz potrà consentire la sincronizzazione simultanea dei contenuti in presenza di specifici dispositivi che potranno essere installati, ad esempio, presso le biglietterie automatiche nelle stazioni ferroviarie oppure in prossimità dei dispositivi di registrazione dell'ingresso/uscita in ufficio o a scuola. Nello specifico quando si passa in prossimità di uno di tali dispositivi, avviene la sincronizzazione dei contenuti attraverso la comunicazione THz riducendo sensibilmente il consumo della batteria dello smartphone. Per questa tipologia di applicazioni, che richiede la prossimità tra dispositivi, si presuppone che l'ambiente di propagazione sia di tipo Line-Of-Sight (LOS).

C – Caso d’uso n.3 - Wireless Backhauling/Fronthauling

Un collegamento backhaul è una connessione tra la stazione base e un elemento di rete più centralizzato, mentre il collegamento fronthaul è il collegamento tra il controller dell'apparecchiatura radio di una stazione base e la testa radio remota (unità radio). Gli sviluppi futuri delle reti di telecomunicazione così come l'implementazione massiva di celle di piccole dimensioni, l'implementazione della trasmissione multipunto cooperativa (CoMP) e/o le reti di accesso radio via cloud (C-RAN), potrebbero richiedere velocità di trasmissione dati di diversi Gbit/s per il fronthauling o il backhauling o entrambi. Realizzare questi collegamenti wireless potrebbe essere necessario in situazioni in cui non siano disponibili i collegamenti in fibra tra gli elementi della rete. In letteratura, per questo tipo di applicazioni, sono riportati test sperimentali in cui è stata raggiunta una velocità dati di 24 Gbit/s su una distanza di collegamento di oltre 1 km [1].

D – Caso d'uso n.4 - THz wireless local area network (THz WLAN)

Con lo sviluppo della tecnologia di comunicazione wireless, le WLAN svolgono un ruolo sempre più importante nella vita umana, rendendo le persone libere dalla costrizione dell'uso del cavo. Al giorno d'oggi, proprio come Internet e la rete di comunicazione mobile, la rete WLAN è diventata un importante mezzo di trasmissione di informazioni ed è ampiamente utilizzata in aeroporti, uffici, ristoranti, abitazioni, ecc.. La banda THz è da 1 a 4 ordini di grandezza superiore rispetto a quella delle microonde e la velocità di trasmissione può superare i 10 Gbit/s. Considerando le caratteristiche di alta velocità, banda larga, struttura compatta, dimensioni ridotte, basso impatto da radiazioni e limitata interferenza tra segnali, le THz WLAN potrebbero essere utilizzate in applicazioni commerciali e militari, come, ad esempio, i futuri videotelefonati di alta qualità, le videoconferenze, i giochi in realtà virtuale 3D, ecc. [2].

3. La propagazione atmosferica nei sistemi wireless a frequenze superiori ai 10 GHz

Nel caso di collegamenti terrestri di tipo wireless nella banda THz, come sopra menzionato, la parte inferiore dell'atmosfera (troposfera) costituisce un mezzo complesso per la propagazione delle onde elettromagnetiche (OEM). I processi d'interazione tra le OEM e gli elementi costituenti l'atmosfera sono governati dalle caratteristiche fisico-chimiche dell'atmosfera (pressione, temperatura, umidità, costituenti, densità di vapore, proprietà microfisiche delle idrometeorie precipitanti e non precipitanti, cristalli di ghiaccio e di grandine). I processi di interazione sono complessi da modellare sia per la loro intrinseca natura tridimensionale sia per i diversi meccanismi chimico-fisici che si manifestano nei processi quali: emissione, rifrazione e diffusione (scattering). Essi possono generare livelli di degrado che sono anche funzione della frequenza utilizzata per trasmettere l'OEM. Dal punto di vista propagativo, l'atmosfera può risultare "trasparente" oppure fortemente "opaca", inficiando così la qualità dei collegamenti. Queste specificità sono dettagliate nella parte B del presente paragrafo e nel paragrafo 4. In generale, i principali processi di degrado a cui i canali trasmissivi possono essere soggetti sono:

1. attenuazioni da parte della componente gassosa;
2. attenuazioni da parte delle idrometeorie precipitanti (idrometeorie precipitanti, con diametri da circa 0.5 a 6 mm);
3. attenuazioni da strutture nuvolose o da strati nebbiosi (idrometeorie sospese di acqua o ghiaccio, con diametri da 1 a 100 micron circa);
4. attenuazioni da precipitazioni nevose e/o da grandine (idrometeorie solide precipitanti, con diametri da pochi millimetri a circa 60 mm o più);
5. depolarizzazione;
6. scintillazioni troposferiche;

7. variazioni dell'angolo d'arrivo (rifrattività radio);
8. banda di coerenza;
9. degrado del guadagno d'antenna;

L'analisi presentata in questo lavoro prende in considerazione principalmente gli effetti di degrado elencati ai punti 1, 2 e 7.

A – Cenni sulla composizione dell'atmosfera terrestre

Come ben noto l'atmosfera terrestre è costituita da una vasta gamma di elementi gassosi, da idrometeore allo stato liquido e solido e da un "particolato" denominato aerosol. In dettaglio l'atmosfera risulta composta per circa i 4/5 da azoto (N₂) e per circa 1/5 d'ossigeno (O₂), accanto a numerosi altri componenti minori, tra cui principalmente argon (Ar), vapore acqueo (H₂O) e diossido di carbonio, o anidride carbonica (CO₂) [3]. La Tabella 1 riporta le percentuali degli elementi tra cui quelli che vanno a formare la componente Dry (secca) dell'atmosfera. I valori si riferiscono alla composizione dell'aria negli strati più bassi dell'atmosfera.

Tabella 1. Componenti dell'atmosfera terrestre a livello del mare.

Componente gassosa dell'atmosfera terrestre	Contenuto (% in vol.)
Azoto (N ₂)	78,084
Ossigeno (O ₂)	20,947
Argo (Ar)	0,934
Diossido di carbonio (CO ₂)	0,032
Neo (Ne)	0,001818
Elio (He)	0,000524
Metano (CH ₄)	0,0002
Idrogeno (H ₂)	0,00005
Cripto (Kr)	0,0000114
Xeno (Xe)	0,0000087
Ozono (O ₃)	0,000004

A differenza della componente secca che è piuttosto stabile, il vapore acqueo può variare dallo 0 % al 5 %, a seconda delle regioni climatiche, della stagionalità e delle ore del giorno. Esso svolge un ruolo chiave nel trasferimento di energia tra i vari strati dell'atmosfera. Inoltre il vapore acqueo è:

- cruciale nella previsione delle precipitazioni e delle coperture nuvolose;
- il più importante e il più variabile dei gas serra.

Ad oggi, è possibile effettuare il monitoraggio del vapore acqueo sia da satellite sia da terra o da sensori "in situ" ma, queste differenti tecniche, e gli associati algoritmi, presentano vantaggi e svantaggi intrinseci per cui la misura delle quantità nello spazio e nel tempo non sono di facile attuazione.

Se si esclude il vapore acqueo, gli altri elementi gassosi si possono considerare costanti fino a circa 100 km di quota sul livello del mare. Dal punto di vista della distribuzione, circa il 90 % della massa atmosferica risulta mediamente concentrata tra il livello del suolo ed una quota di circa 8-15 km; il 9 % è distribuita alle quote successive fino a circa 45-50 km e il rimanente 1% si estende nelle zone alte dell'atmosfera fino a circa 2000-2500 Km di quota, al confine con lo spazio interplanetario. A causa di questa distribuzione, la densità dell'aria decresce esponenzialmente con la quota e a circa 30 km di altezza si riduce a circa il 1.5 % rispetto alla densità al livello del mare. Inoltre, l'atmosfera terrestre risulta caratterizzata da una specifica struttura termica verticale con gradienti e inversioni termiche.

A partire dagli anni '60 il NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), assieme alla sezione scientifica della US Air Force, codificarono un'atmosfera statica di riferimento ("US Standard Atmosphere") [4] al fine di fissare parametri, caratteristiche termodinamiche e nomenclatura, vedi Figura 2.

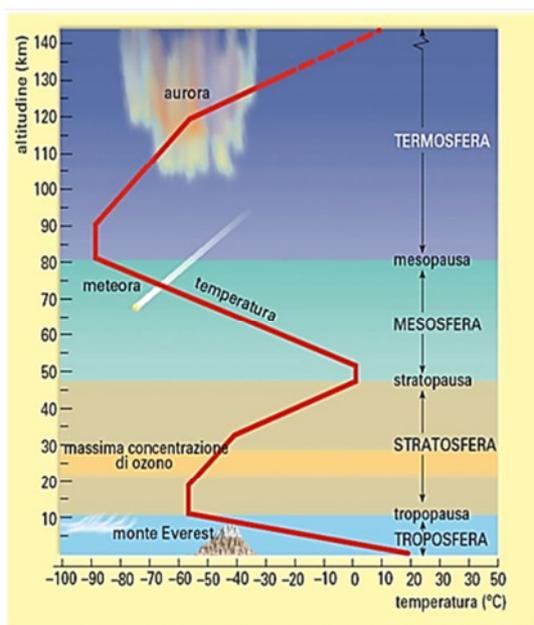


Figura 2. Struttura termica dell'atmosfera terrestre, considerando un'atmosfera standard dalle medie latitudini, circa 45° di latitudine [4].

Tale modello statico dell'atmosfera è stato preso come riferimento in diversi campi scientifici come, ad esempio, il "remote sensing" dell'atmosfera e della superficie del Terra, la radioastronomia, lo studio dei cambiamenti climatici, la radiopropagazione. Il modello "standard" dell'atmosfera è stato adottato dalla World Meteorological Organization (WMO).

Per completezza è da ricordare come l'aerosol, sia composto da particelle in sospensione allo stato solido o liquido con dimensioni da pochi nm a 100 µm, di origine naturale (eruzioni vulcaniche, polveri generate dai deserti e dall'azione del vento sul mare) o antropica (prodotti volatili inerenti alle attività industriali). Dal punto di vista chimico gli aerosol sono costituiti da silice, solfati, nitrati, ammonio, materiali organici, sale marino, ioni idrogeno ed acqua. Anche se di

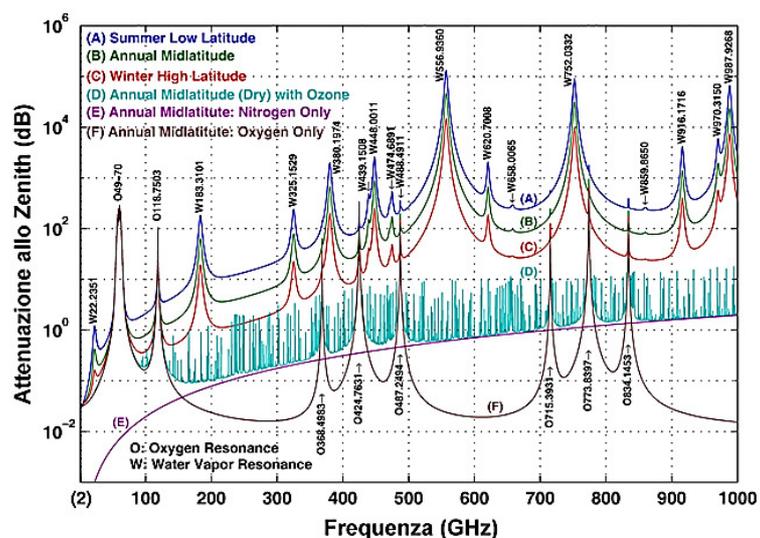
dimensioni del tutto insignificanti, essi giocano un ruolo rilevante nei processi atmosferici che vanno a determinare il bilancio energetico, il bilancio idrico globale, la formazione delle nubi, delle precipitazioni (sia esse piovose, nevose o grandini) e dei banchi di nebbia.

B – Caratteristiche spettrali dell’ossigeno e vapore acqueo fino ad 1 THz

Come sopra accennato, la propagazione delle OEM in atmosfera è governata dai processi di assorbimento/emissione e scattering che dipendono fortemente dalle frequenze delle OEM. In estrema sintesi, l’assorbimento è connesso alle transizioni fra i diversi livelli energetici molecolari e atomici dei gas atmosferici (vedi ossigeno, vapore acqueo ecc). I processi di scattering producono una diffusione (scattering) della radiazione incidente sulle idrometeore in direzioni diverse da quella incidente.

I comportamenti spettrali dei vari costituenti l’atmosfera sono da tempo oggetto di sofisticati studi nel campo della radioastronomia e delle osservazioni della Terra da satellite. In questo paragrafo non si intende approfondire in modo esaustivo tale tematica, vasta ed articolata, ma ci si limita a richiamare quanto strettamente necessario per il calcolo dell’attenuazione per collegamenti trasmissivi wireless nella banda THz. Per una trattazione rigorosa e completa si rimanda a pubblicazioni disponibili in letteratura [5, 6]. L’ossigeno (in Figura 3 indicato con il simbolo “O”) si caratterizza per numero elevato di linee spettrali di assorbimento che danno origine ad una prima intensa e larga banda d’assorbimento da 49 a 70 GHz centrata attorno ai 60 GHz. Inoltre, presenta linee di assorbimento isolate e “strette” a 118.74, 368.49, 424.76 GHz etc.

Figura 3. Attenuazione allo zenith (dB) fino ad 1 THz dovuta a ossigeno (O), vapore acqueo (W), azoto (Nitrogen) e componente secca (ossigeno e azoto prevalentemente, assieme all’ozono), in funzione di diverse tipologie di atmosfere terrestri (al fine di ottenere informazioni sulla variabilità) [7].



Il vapore acqueo (in Figura indicato con il simbolo “w”) presenta una prima debole linea di assorbimento a 22.23 GHz, e altre più intense a 183.31 GHz, a 325.15 GHz etc. Si può notare come a 556.93 GHz il vapore ha una linea di assorbimento estremamente intensa dell’ordine di

105 dB. Inoltre, il vapore acqueo in termini assorbitivi risulta essere composto da un “continuum” (un andamento crescente) a cui si vanno a sovrapporre i picchi d’assorbimento.

La Figura 3 mostra come l’atmosfera terrestre presenta degli intervalli di frequenze poco penalizzati dall’attenuazione o come si usa dire “meno opachi” (dette “finestre” trasmissive). Questi intervalli (finestre) sono di estremo interesse per i sistemi di comunicazione. Ad esempio, si nota una prima finestra favorevole alle trasmissioni si trova tra il primo picco d’assorbimento del vapore a 22 GHz e la spalla sinistra della banda di assorbimento dell’ossigeno (49-70 GHz). A seguire, una seconda finestra, più ampia, si colloca tra la spalla destra dell’ossigeno e il successivo picco di assorbimento del vapore a 118 GHz. Altre finestre seguono tra i picchi di assorbimento tra 118 GHz e 183 GHz, tra 183 GHz e 325 GHz, tra 380 GHz e 439 GHz e così via. **Queste finestre sono sotto analisi per le pianificazioni, in ambito ITU, per le future attività trasmissive connesse ai sistemi radiomobili. In particolare durante la WRC19 è stata approvata una Risoluzione nella quale si invitano le Amministrazioni a proseguire gli studi per determinare se e in quali condizioni è possibile la condivisione tra servizi attivi e passivi nelle bande superiori a 71 GHz, fino a 356 GHz (Res 731) [8].**

4. Stime dei livelli attenuativi da Raccomandazioni ITU-R fino a 1 THz

La troposfera (che si estende da 0 a circa 8-15 km di quota) impatta in modo rilevante sulla propagazione dei segnali EM sia per collegamenti via satellite (obliqui) sia terrestri (orizzontali). Nel presente studio, l’analisi riguarderà esclusivamente i collegamenti wireless terrestri fino a 1 THz.

A – Livelli attenuazione dovuti all’assorbimento della componente secca e dal vapore acqueo dalle Raccomandazioni ITU-R fino a 1 THz

L’ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication sector) pubblica raccomandazioni al fine di rendere disponibili algoritmi accurati per stimare i livelli attenuativi, dovuti alla componente “secca” e al vapore acqueo presente in atmosfera, fino a 1 THz.

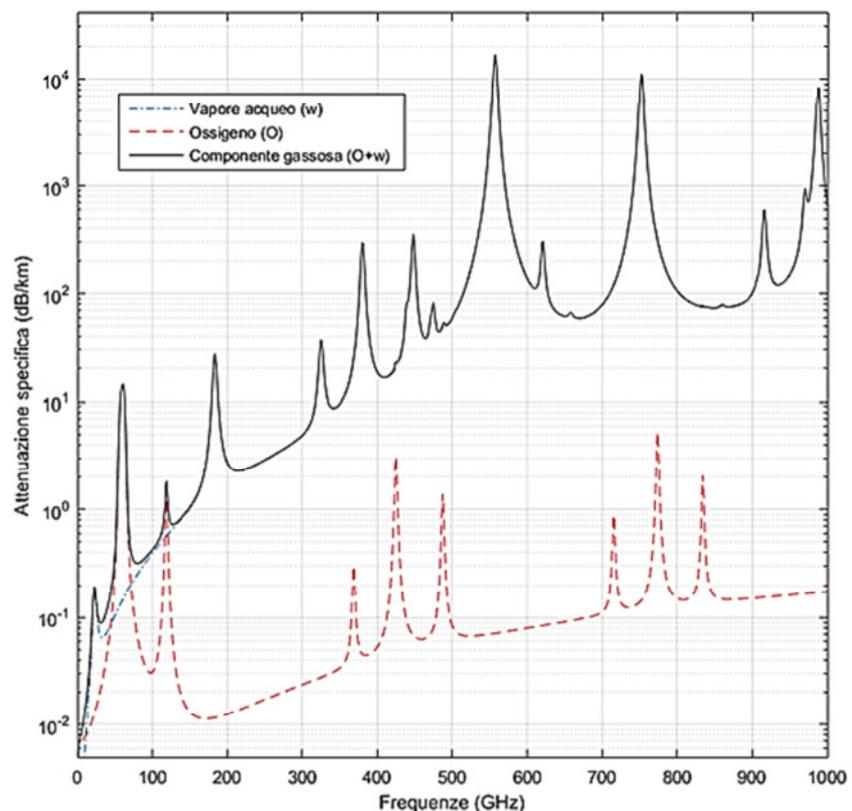
A tal proposito è da sottolineare come la componente secca, circa il 22 %, dovuta essenzialmente all’ossigeno, non presenta sensibili disomogeneità, ma può variare solo in funzione della quota. Nel caso di collegamenti orizzontali la componente secca genera un contributo attenuativo circa costante nel tempo. Al contrario, il vapore acqueo anche se è presente in quantità molto limitate, al massimo il 5% al livello del suolo, ha sensibili variabilità nello spazio e nel tempo.

Il metodo raccomandato dall’ITU-R per stimare l’attenuazione specifica da gas (dB/km) utilizza il modello line-by-line.

In questo studio, per stimare l’attenuazione specifica da parte della componente secca γ_o (in dB/km) e quella generata dal vapore acqueo γ_w

(in dB/km) si è fatto uso della Raccomandazione ITU-R P.676-11 Annex 1, [9]. Per brevità, si rimanda alle Raccomandazioni sopra indicate per un approfondimento di tutte espressioni analitiche riguardanti le suddette attenuazioni. La Figura 4 illustra i livelli delle attenuazioni specifiche (dB/km) calcolati fino ad 1 THz. Inoltre, in Figura si riporta la somma dei due contributi, denominato contributo gassoso γ_g (linea continua nera). Le attenuazioni specifiche fanno riferimento ad un'atmosfera standard al livello del suolo, con una pressione atmosferica nominale di 1013 hPa, una temperatura di 20°C ed una densità di vapore acqueo del 7.5 g/m³.

Figura 4. Attenuazione specifica (dB/km) fino ad 1 THz dovuta al vapore acqueo (γ_w) e alla componente secca (γ_o), e ad entrambi i componenti ($\gamma_{gas} = \gamma_o + \gamma_w$). Il calcolo fa riferimento ad una pressione atmosferica di 1013 hPa, una temperatura di 20°C e una densità del vapore acqueo di 7.5 g/m³.



B – Stime dei livelli attenuazioni da precipitazioni come da Raccomandazioni ITU-R fino a 1 THz

Gli effetti dell'interazione tra radiazione EM e le gocce di acqua precipitanti (idrometeore) e/o con quelle non precipitanti (idrometeore di nubi con elevata densità, es. cumulonembi) possono generare forti livelli di degrado ai sistemi di comunicazione di tipo wireless, in particolare per frequenze superiori ai 10 GHz. Il degrado è frutto dei meccanismi di assorbimento e scattering (diffusione). La modellizzazione di questi meccanismi non è stata di facile soluzione.

Adottando un approccio pratico e funzionale, al fine di stimare i livelli attenuativi della radiazione EM attraverso strati composti da idrometeore precipitanti, i modelli numerici si basano su tre assunzioni:

- l'intensità della radiazione EM (potenza) decade in modo esponenziale attraverso il volume diffondente (scatter);
- per le idrometeore precipitanti si assume la forma sferoide oblato, le quali danno origine sia a scattering sia ad assorbimento;
- nella computazione si considera lo scattering dovuto ad una singola idrometeora isolata.

Nella realtà, le strutture precipitanti e nuvolose sono costituite da volumi contenenti idrometeore con diametro e densità diversi. A tal fine, si considerano modelli di distribuzione dei diametri delle idrometeore (drop-size distributions, DSD). Inoltre, per tenere conto dell'effetto di diffusione prodotto dall'insieme delle idrometeore, si considerano in modo additivo i contributi dello scattering e dell'assorbimento dovuti alle singole idrometeore contenute nel volume. Da sottolineare che nella realtà le idrometeore, nell'attraversare gli strati di successivi di atmosfera caratterizzati da una sempre crescente densità, vengono deformate assumendo una forma oblata (la dimensione orizzontale prevalente su quella verticale). Questa particolarità induce a considerare, ai fini dell'attenuazione prodotta dalla idrometeora, la componente orizzontale in quanto si configura come il caso peggiore. L'asimmetria delle idrometeore può avere rilevanza per i problemi connessi alla perdita di polarizzazione dei segnali.

Per la stima dell'attenuazione da idrometeore, il parametro primario è il coefficiente di scattering e di assorbimento e dipende anche dalla densità delle idrometeore, della loro forma, della distribuzione dei loro diametri, e delle sue proprietà dielettriche.

Mie nel 1908 propose una soluzione brillante per il calcolo dei coefficienti in presenza di diffusori sferici con scattering elastico, con frequenza dell'onda diffusa identica a quella dell'onda incidente. Tali condizioni si hanno quando le dimensioni delle idrometeore, di forma sferica, diffondenti sono dello stesso ordine di grandezza o maggiori della lunghezza d'onda [10]. Nelle condizioni fisiche a cui fa riferimento la soluzione di Mie, lo scattering genera una diffusione angolare della radiazione incidente che risulta molto elevata nella direzione di propagazione incidente (forward scattering), ma con modeste intensità presenti anche nel verso opposto alla direzione di propagazione originaria (backward scattering). L'intensità di scattering è funzione del numero delle idrometeore diffondenti e della sezione trasversale di scattering di ogni singola idrometeora.

È da osservare che dal punto di vista modellistico la soluzione dei processi di scattering con l'approccio rigoroso di Mie non è di facile computazione. In determinate condizioni si può adottare una soluzione approssimata detta di Rayleigh. In questo caso, la computazione risulta di più facile implementazione e risulta valida per dimensioni delle idrometeore molto minori della lunghezza d'onda del segnale che attraversa lo strato diffondente (coefficiente di scattering risulta significativamente inferiore a quello d'assorbimento). In queste

condizioni la radiazione diffusa dal processo di scattering è concentrata nella direzione della radiazione incidente.

In estrema sintesi, per applicazioni nel campo delle radiocomunicazioni, un'espressione di facile computazione dell'attenuazione specifica (γ_R , in dB/km) causata dalle precipitazioni con un'intensità R (in mm/h) è fornita da una relazione esponenziale tra γ_R e R [11], [12]:

$$\gamma_R = k R^\alpha \quad (1)$$

In (1) i coefficienti k e α esprimono le caratteristiche elettromagnetiche del processo di scattering e dipendono dalla frequenza (f , in GHz) e dalla polarizzazione. La Raccomandazione ITU-R P.838-3 [13] fornisce i coefficienti k e α validi nell'intervallo di frequenze fino a 1 THz. Da sottolineare come tale coefficienti tengono conto anche di una serie di grandezze fondamentali per modellare il processo di scattering tra i quali la DSD, la velocità di caduta delle idrometeorite e la non sfericità. L'utilità pratica dell'espressione (1) è data dal fatto che il parametro R è una quantità normalmente fornita dalle osservazioni meteorologiche e che viene misurato da pluviometri di tipo "tipping bucket". Questo permette di ottenere significativi trend statistici di γ_R . Da sottolineare che l'espressione (1) è di natura empirica, ma si è dimostrata in eccellente accordo con le soluzioni rigorose di Mie [10].

Le simulazioni qui presentate fanno uso della (1) e di quanto riportato nella Raccomandazione ITU-R P.838-3, [13]. La Figura 5 illustra i livelli dell'attenuazione specifica supplementare dovuta alla somma del contributo gassoso (γ_{gas}) e alla componente precipitazione (γ_R) stimati dall'eq. 1 per differenti intensità di precipitazioni con valori di R da 0 a 150 (mm/h) [14]. Dalla Figura 5, si nota che l'attenuazione specifica (γ_R) manifesta una rapida crescita in funzione sia della frequenza (f) sia dell'intensità di precipitazione (R). Ma γ_R al crescere di f presenta un processo di saturazione. Infatti, per frequenze maggiori di circa 90 GHz, γ_R sembra diventare indipendente da f .

Ad esempio, se si considera un collegamento terrestre a 100 GHz di 1 km di lunghezza, il modello ITU-R stima un'attenuazione di circa 3 dB per un'intensità di precipitazione modesta ($R = 5$ mm/h) e di circa 30 dB per un'elevata intensità di precipitazione ($R = 100$ mm/h). Il fattore 6 tra il valore massimo e minimo dell'attenuazione da precipitazione non sembra mostrare variazioni significative da 100 a 1 THz.

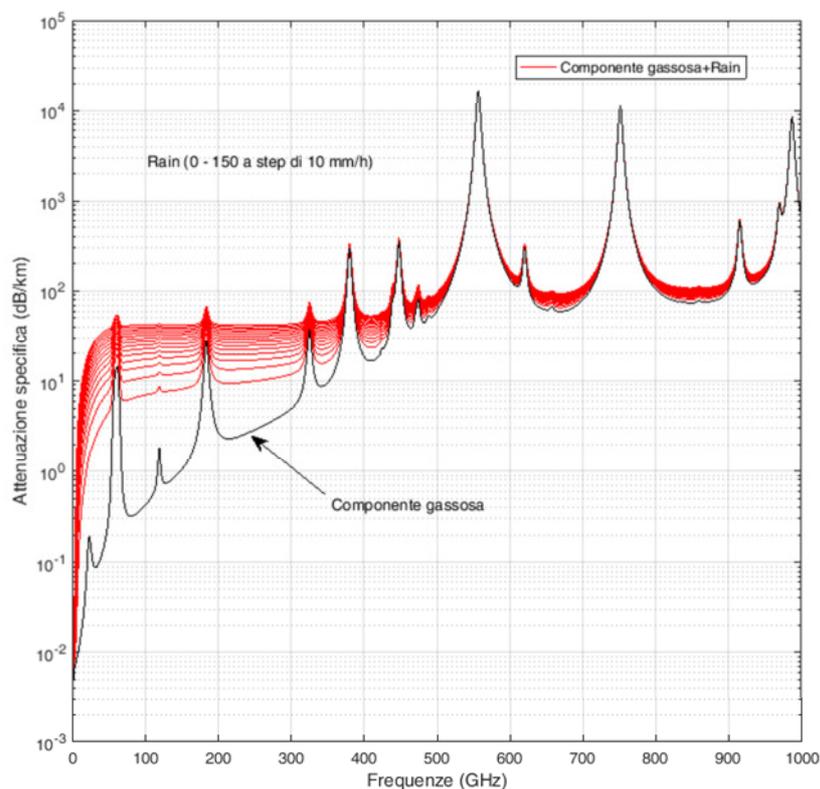


Figura 5. Attenuazione specifica supplementare dovuta alla somma del contributo gassoso (γ_{gas}) (come riportato in Figura 4) e alla componente precipitazione (γ_R) stimati dalla (1), per differenti intensità di precipitazioni con valori di R da 0 a 150 (mm/h).

C – Stima dei livelli attenuativi da nebbia come da Raccomandazioni ITU-R fino a 1 THz

I fenomeni nebbiosi, che si possono presentare lungo un collegamento trasmissivo terrestre, sono in grado di generare livelli attenuativi che sono funzione della frequenza e della densità della nebbia (M , in g/m^3). La nebbia è costituita da piccole idrometeore di acqua condensata in sospensione (ma anche cristalli di ghiaccio) generalmente inferiori a 0.01 cm. Anche in questo caso, per la stima dei livelli attenuativi si fa uso dell'approssimazione di Rayleigh che risulta pienamente valida per frequenze fino a 200 GHz. Il contributo attenuativo da nebbia può essere preso in esame come un fattore additivo ai contributi da gas e da precipitazioni per collegamenti a frequenze maggiori di 100 GHz ad alta disponibilità. Da sottolineare come la formazione di strati nebbiosi ha specificità locali e si presenta sporadicamente. L'ITU-R ha proposto un algoritmo semplificato per il calcolo dell'attenuazione specifica γ_N (dB/km) da nebbia (ITU-R P.840-8) [15]:

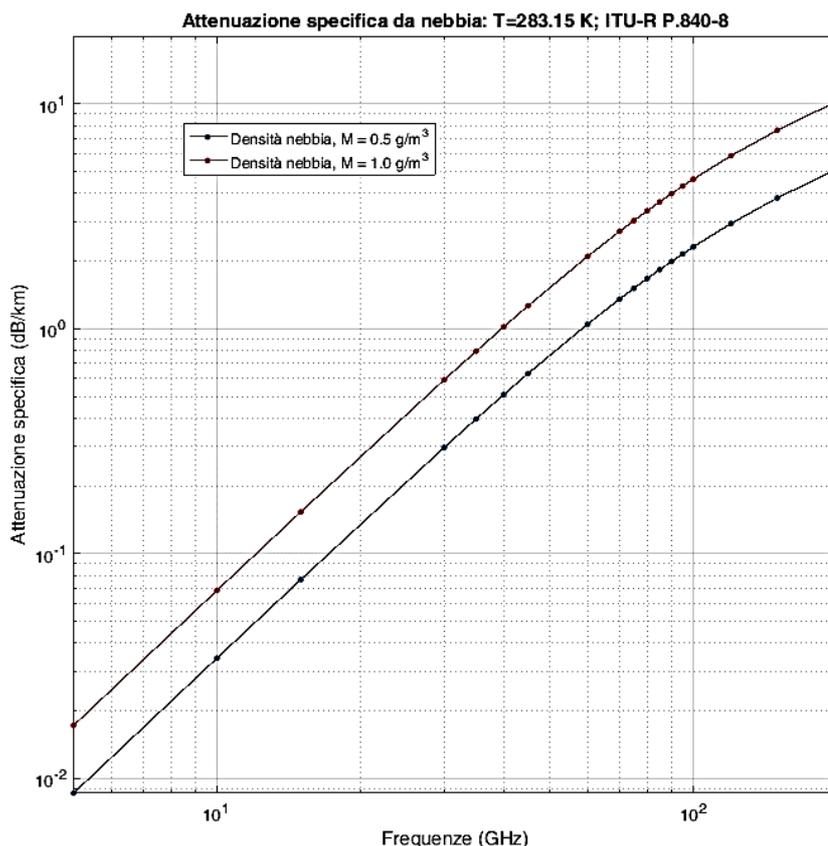
$$\gamma_N = K(f, T) M \quad (2)$$

In (2), $K(f, T)$ è il coefficiente attenuativo (dB/km/g/m^3) e M è la densità della nebbia. Ad esempio, un valore di M di 0.05 g/m^3 può essere rappresentativo di una nebbia di media consistenza (visibilità di circa 300 m), mentre un valore di M di 0.5 g/m^3 si può riferire ad una

nebbia più intensa (visibilità di circa 50 m). Nel coefficiente $K(f, T)$, f è la frequenza (in GHz) e T è la temperatura fisica media dello strato nebbioso (in °K). La Figura 6 illustra i valori di γ_N stimati dalla (2) considerando due valori della densità di 0.5 g/m^3 e 1 g/m^3 (quest'ultima può riferirsi ad una visibilità dell'ordine dei metri).

Dalle simulazioni risulta che il contributo attenuativo specifico da nebbia γ_N assume un valore massimo di circa 10 dB/km alla frequenza di 200 GHz e densità di 1 g/m^3 .

Figura 6. Attenuazione specifica (γ_N) (in dB/km) fino a 200 GHz da nebbie con densità 0.5 e 1 g/m^3 .



A frequenze maggiori di 100 GHz, l'attenuazione dovuta alla nebbia può essere significativa. Il limite di 200 GHz è consigliato nella Raccomandazione ITU-R al fine di non forzare l'applicazione dell'algoritmo che si basa, dal punto di vista teorico, sull'approssimazione di Rayleigh la quale è valida nel caso di idrometeore dell'ordine dei 0.01 cm (circa 100 micron), tipico degli eventi nebbiosi.

5. Mappe attenuative sul territorio nazionale da 40 a 840 GHz

Sulla base delle espressioni ITU-R sopra presentate sono state realizzate delle routine in Matlab® per stimare le attenuazioni specifiche (dB/Km), su tutto il territorio nazionale (da circa 45° a 35° di latitudine Nord e da circa 6° a 18° di longitudine Est), relative ai seguenti elementi troposferici quali:

- componente secca;
- vapore acqueo;
- precipitazioni.

I dati statistici dei parametri meteo-climatici, a scala sinottica, utilizzati come input nelle simulazioni sono stati:

- contenuto di vapore (g/m^3);
- temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e pressione (hPa) al suolo;
- altezza orografica sul livello del mare (m);
- intensità di precipitazione (mm/h).

Questi dati sono stati estratti dai database messi a disposizione dall'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast, Reading, UK [16]). Sono mappe di valori medi o statistiche su base annuale al livello del suolo o della superficie marina. La risoluzione geografica (lat, lon) dei relativi database climatologici riferite alle medie latitudini è la seguente:

- 1.125° per il vapore, corrispondente ad un segmento terrestre di 125 km;
- 1.5° per la temperatura, corrispondente ad un segmento terrestre di 165 km;
- 0.25° per le precipitazioni, corrispondente ad un segmento terrestre di 27 km.

Quando necessario, viene eseguita un'interpolazione lineare rispetto alla griglia dei dati dei database input per determinare i valori rispetto alle singole posizioni geografiche di interesse. La risoluzione spaziale considerata nelle simulazioni è di circa 5 km. Nelle simulazioni è stata considerata anche una risoluzione a 2 km per l'attenuazione da pioggia ma non si sono riscontrate sensibili differenze rispetto al caso con risoluzione di 5 km. Anche se qualche significativa differenza è stata notata per la distribuzione geografica dell'attenuazione gassosa, per contenere la tempistica dell'elaborazione, è stata preferita la risoluzione di 5 km (ad esempio per quanto riguarda i tempi macchina con PC core i5, le routine impiegano circa 7 ore per la risoluzione a 5 km e circa 40 ore nel caso di 2 km).

Per le simulazioni sono state selezionate otto frequenze nelle "finestre" favorevoli a possibili sistemi di comunicazione wireless 5G/6G (vedi Figura 3): 40, 80, 150, 275, 340, 410, 670 e 840 GHz. Esse sono state scelte in base alle "finestre" favorevoli a possibili sistemi di comunicazione wireless 5G/6G (vedi Figura 3). Le Figure da 7 a 22, illustrano i valori attenuativi specifici troposferici (somma dei contributi dai gas e dalle precipitazioni: $\gamma_{gas} + \gamma_R$) di seguito chiamate attenuazioni supplementari (vedi paragrafo 6). Inoltre, nel gruppo di Figure sopra menzionato si trovano anche quelle riferite al solo contributo gassoso (γ_{gas}).

A – Simulazioni a 40 GHz

Figura 7. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 40 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

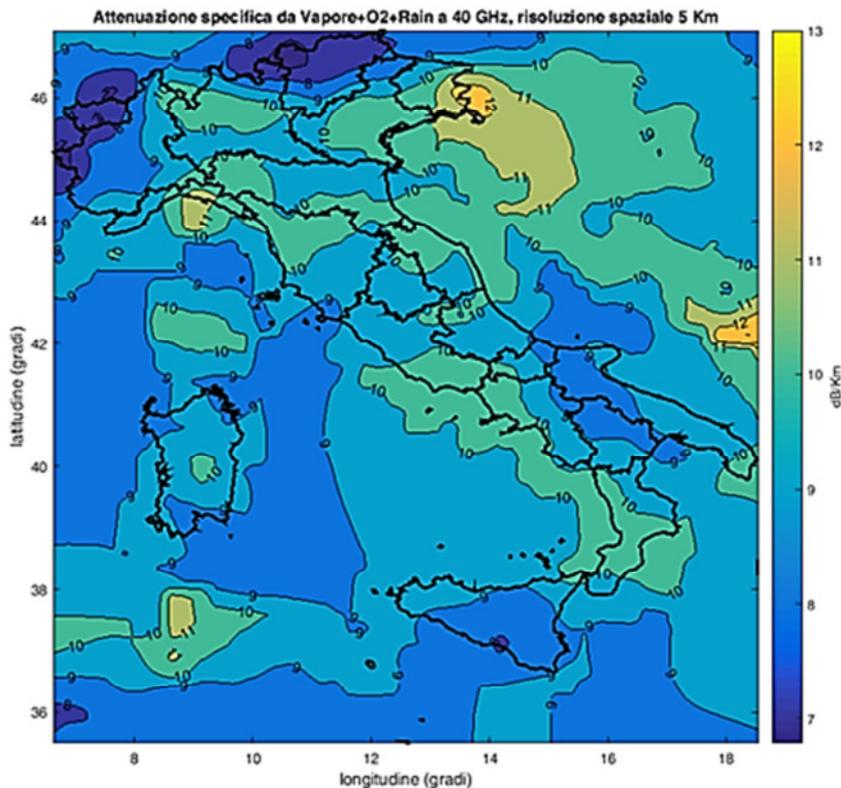
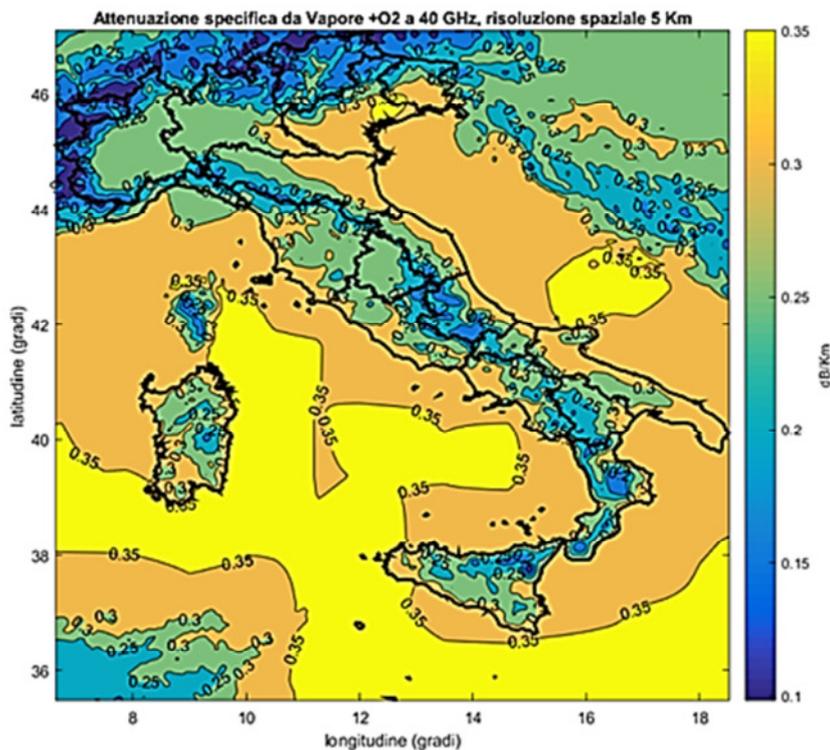


Figura 8. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 40 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.



B – Simulazioni a 80 GHz

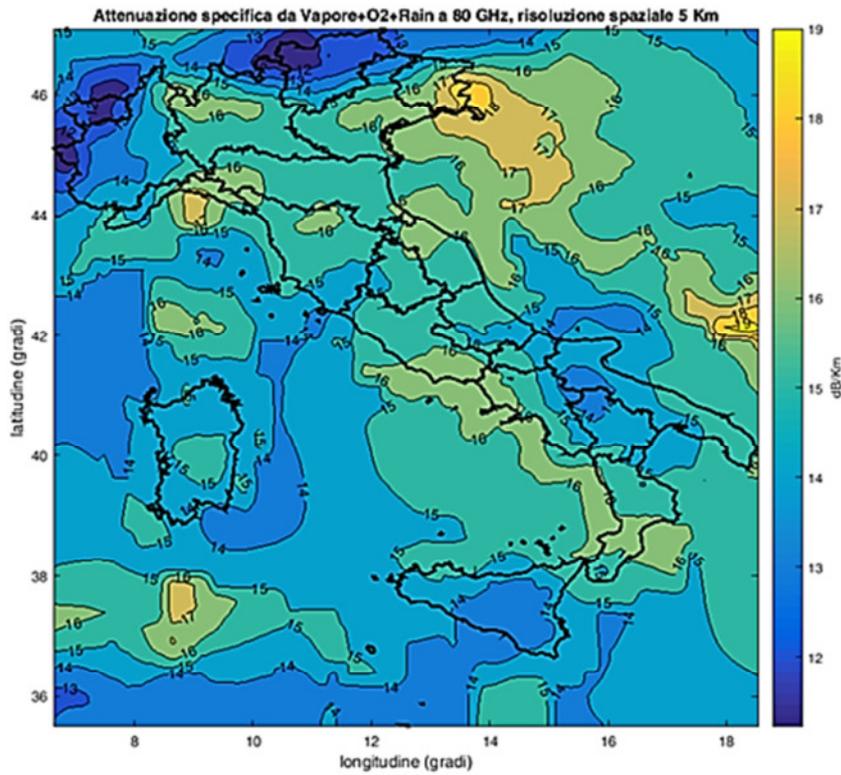


Figura 9. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 80 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

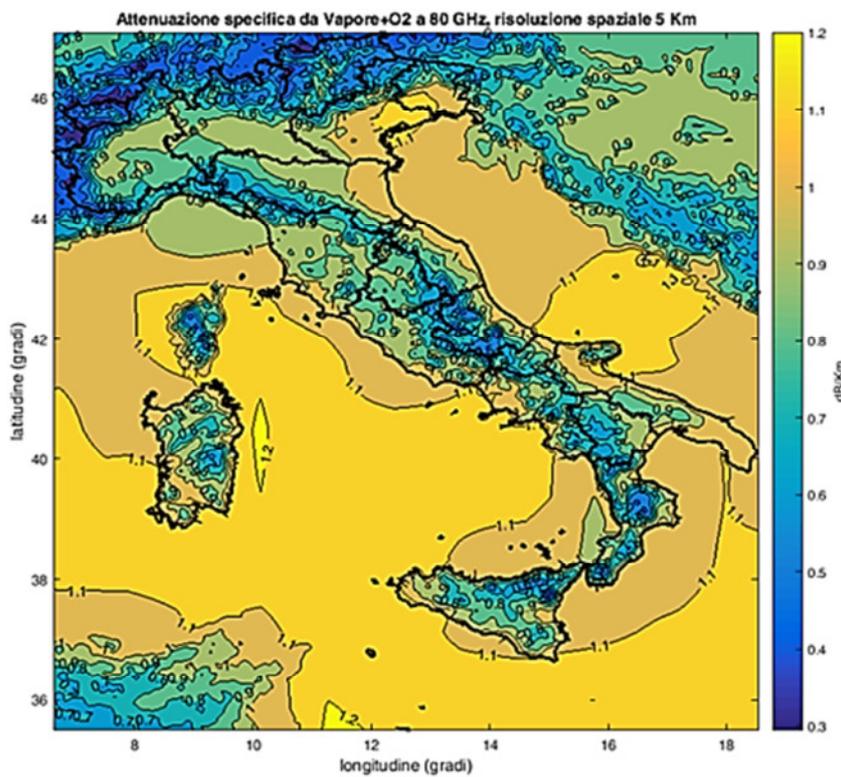


Figura 10. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 80 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.

C – Simulazioni a 150 GHz

Figura 11. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 150 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

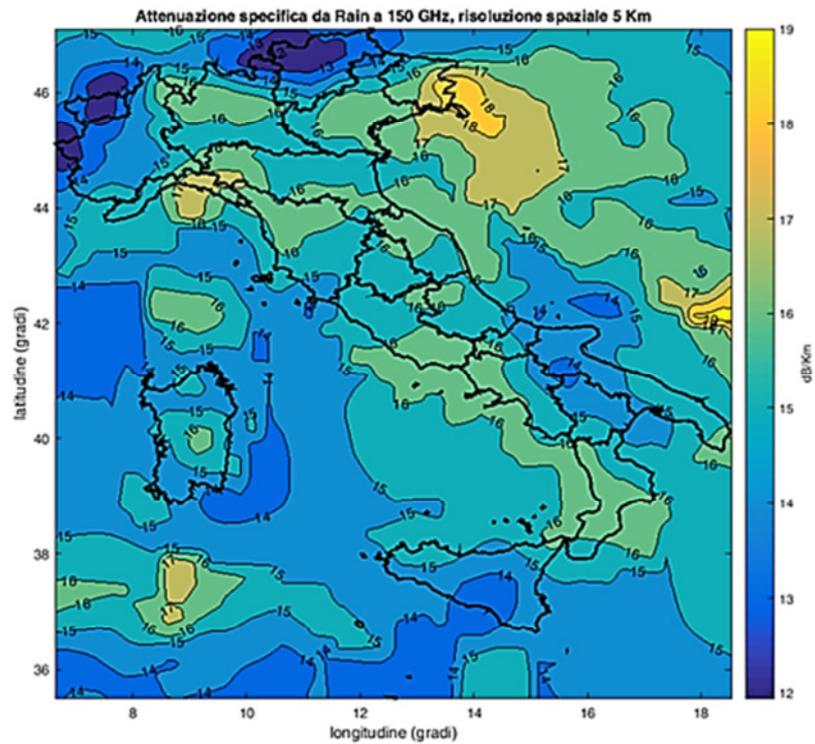
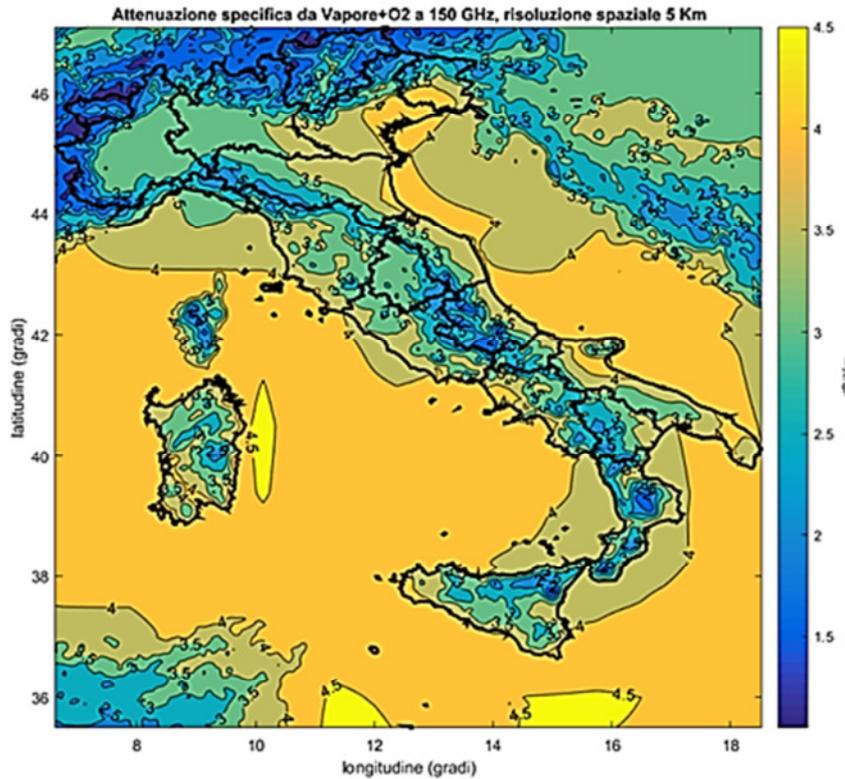


Figura 12. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 150 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.



D – Simulazioni a 275 GHz

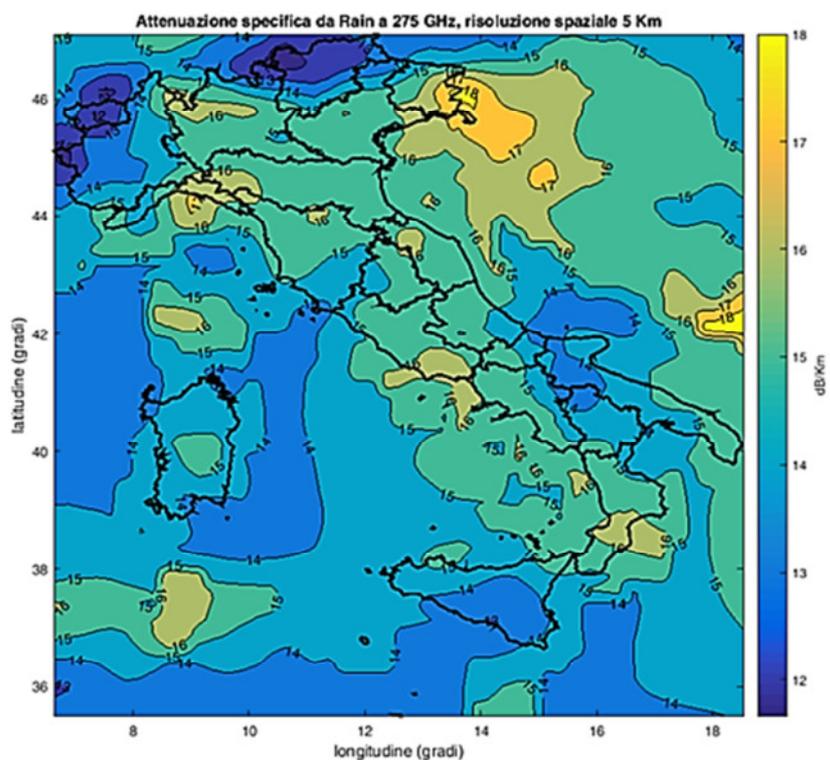


Figura 13. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 275 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

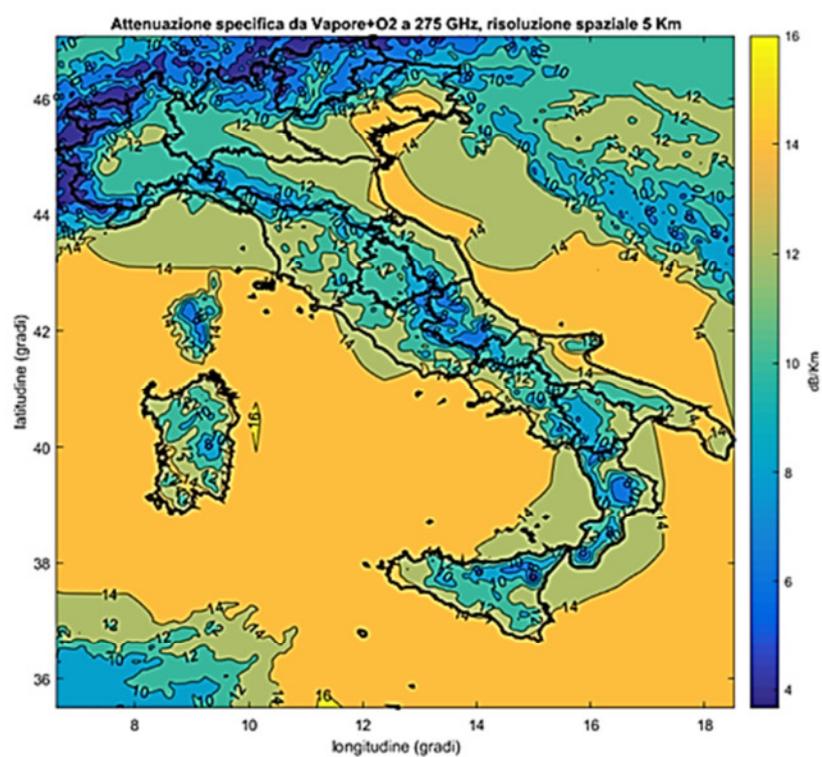


Figura 14. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 275 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.

E – Simulazioni a 340 GHz

Figura 15. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 340 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

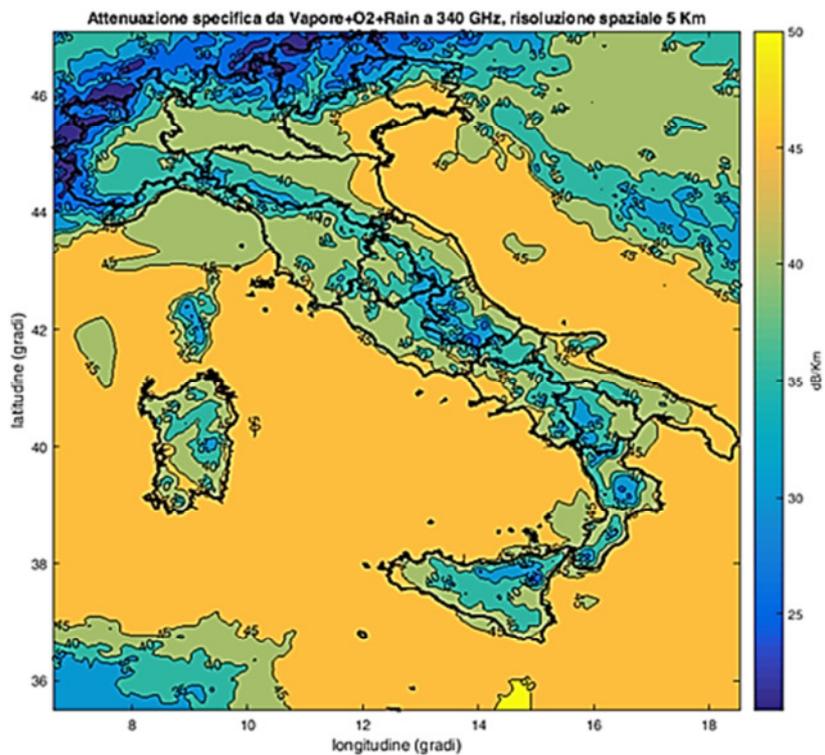
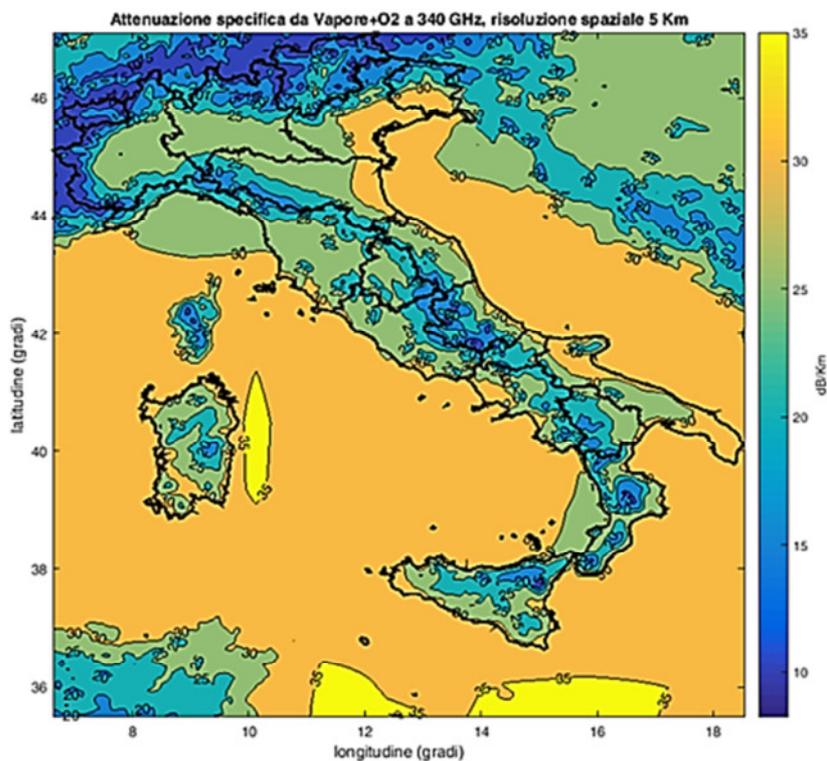


Figura 16. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 340 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.



F – Simulazioni a 410 GHz

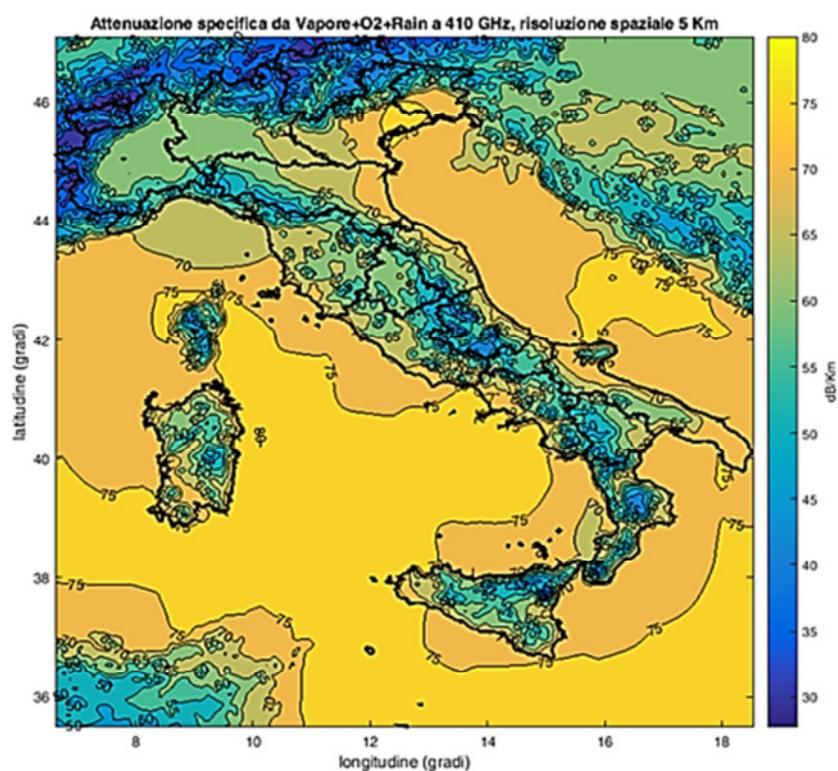


Figura 17. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 410 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

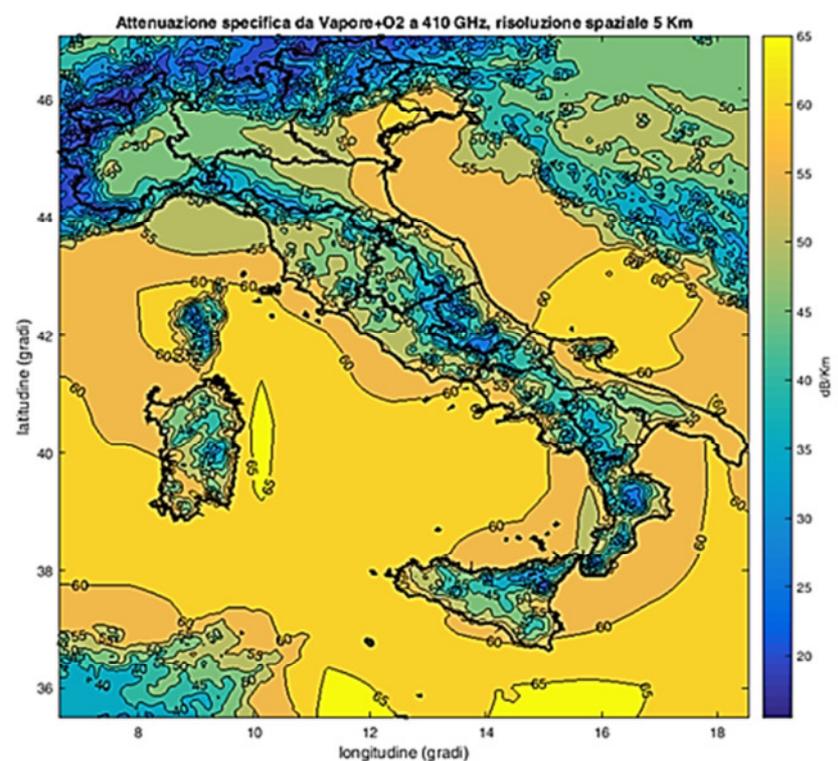


Figura 18. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 410 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.

G – Simulazioni a 670 GHz

Figura 19. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 670 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

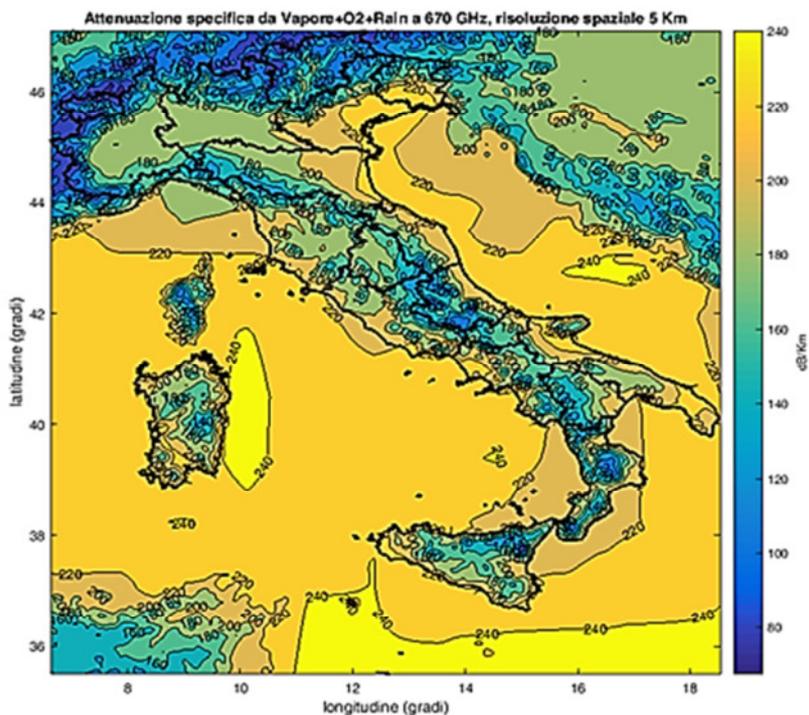
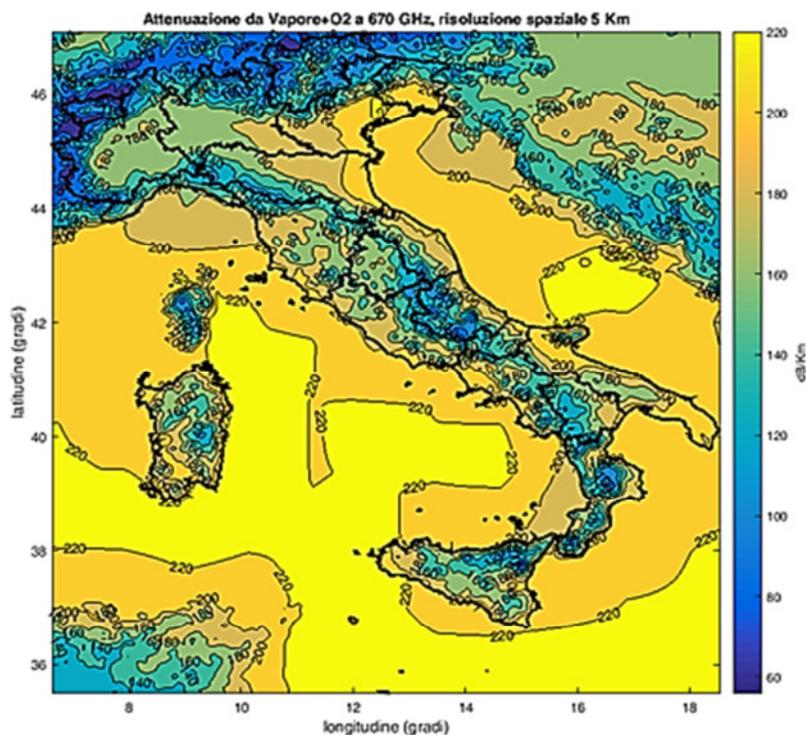


Figura 20. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 670 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.



H – Simulazioni a 840 GHz

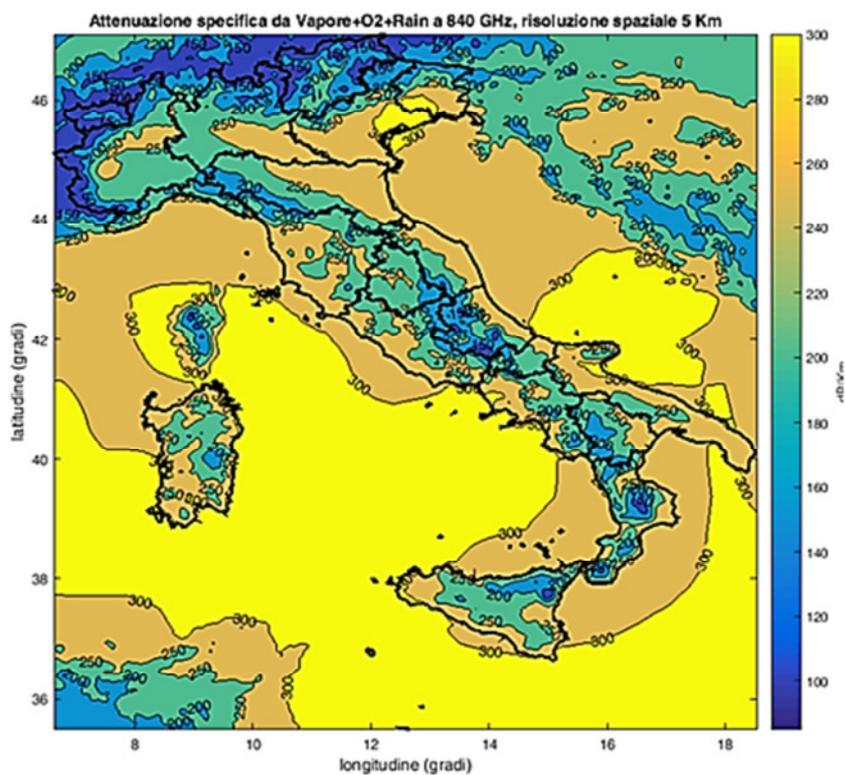


Figura 21. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica totale (in dB/km) a 840 GHz dovuta alla componente secca, al vapore acqueo ed alle precipitazioni.

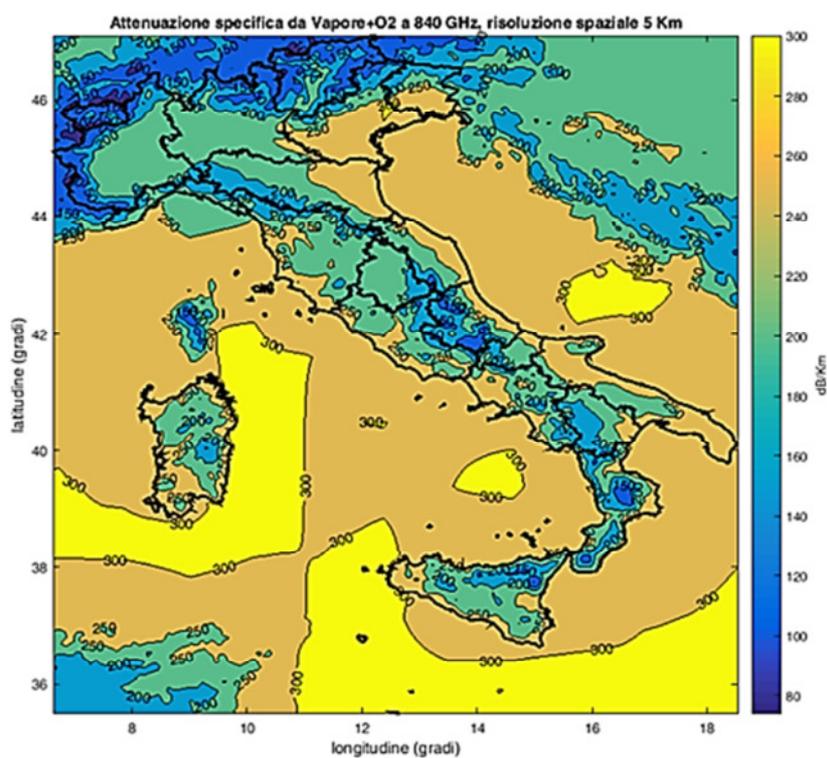


Figura 22. Distribuzione geografica dell'attenuazione specifica (in dB/km) a 840 GHz dovuta alla componente secca e al vapore acqueo.

6. Parametri per calcolare il link budget

Per calcolare il link budget di sistemi trasmissivi wireless è necessario calcolare le attenuazioni di spazio libero così come le attenuazioni supplementari che vanno a determinare l'attenuazione totale del collegamento.

A – Attenuazione da spazio libero

Per i collegamenti wireless, la distanza fisica fra il trasmettitore (TX) e il ricevitore (RX) è causa di perdita di potenza del segnale trasmesso. Tale attenuazione del segnale, in assenza di processi di riflessione o diffrazione, dipende dalla frequenza del segnale f e dalla distanza fisica tra il trasmettitore e il ricevitore d , questo. L'uso della legge di Friis permette il calcolo di quest'attenuazione detta di spazio libero (A_{SL} , in dB) che generalmente costituisce il limite inferiore delle perdite propagative:

$$A_{SL} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.45 \quad (3)$$

dove d è espresso in metri e f in GHz.

B – Attenuazione supplementari

L'attenuazione supplementare totale (A_{sup} , in dB) è data dalla somma dei singoli contributi attenuativi troposferici. Essa è determinata dalla somma dell'attenuazione causata da eventi non precipitanti (A_{gas}) e da quelli precipitativi (A_{rain}):

$$A_{sup} = A_{gas} + A_{rain} = A_{O_2} + A_{vap} + A_{rain} \quad (4)$$

C – Attenuazione totale

Considerando che i possibili collegamenti a cui si possono riferire le valutazioni esaminate in questo studio saranno del tipo punto-punto (con angoli di emissione molto stretti) e LoS, in prima approssimazione si può assumere che l'attenuazione totale del collegamento (A_{tot} , in dB), oltre ai contributi dovuti alla componente gassosa ed a quella precipitazioni, sia dovuta solo a quella nello spazio libero:

$$A_{tot} = A_{sup} + A_{SL} \quad (5)$$

7. Rifrattività radio

Nell'ambito delle analisi degli effetti della troposfera su possibili comunicazioni wireless nella banda di frequenza 275 GHz -1 THz può

essere opportuno stimare anche l'indice di rifrazione ($n \approx 1$) e la rifrattività radio (N). Il parametro n è funzione dalle grandezze termodinamiche dell'atmosfera quali la pressione totale (P , in hPa), la temperatura (T , in K) e la pressione riferita al solo vapore acqueo (e , in hPa). La pressione totale è dovuta alla somma "della pressione della componente secca (P_d) e quella dovuta al solo vapore acqueo (e in g/m^3 , che si può approssimativamente valutare come un centesimo della pressione totale). Sia n che N sono parametri scalari variabili in funzioni dell'altitudine (z) in modo esponenzialmente decrescente. Per effetto delle fluttuazioni di n , la direzione di propagazione dell'OEM può subire deviazioni rispetto a quanto atteso in termini di ottica geometrica (curvatura del percorso). A tal proposito, ipotizzando un'atmosfera stratificata e piana ogni singolo strato di essa, ai fini elettromagnetici, si caratterizza per un valore $n = n(P, T, e, z)$. Un segnale, nel propagarsi da un trasmettitore ad un ricevitore, posti entrambi sulla superficie terrestre, si troverà ad attraversare strati con diversi valori dell'indice n e sarà assoggetto alla legge di Snell. In estrema sintesi, si può affermare che nel caso di un valore della derivata $dn/dr > 0$ (dove, r rappresenta la distanza del generico punto di osservazione dal centro della Terra) il segnale sarà incurvato verso l'alto (rifratto), mentre nel caso in cui $dn/dr < 0$ verso il basso (riflesso). Se $dn/dr = 0$ si presenta un caso particolare in cui la propagazione risulta assolutamente rettilinea (curvatura infinita).

Determinare n può risultare utile per calcolare "l'orizzonte radio" o per valutare i cammini multipli (individuare la posizione dei trasmettitori/ricevitori e puntamento delle antenne). Lo studio accurato delle fluttuazioni di n riveste un ruolo primario nei collegamenti satellitari (dove possono dare origine alle scintillazioni) e nelle applicazioni GNSS (bending dei segnali GNSS nell'attraverso la troposfera). Analiticamente, l'indice n è espresso dalla seguente espressione [11]:

$$n = (1 + N) * 10^{-6} \quad (6)$$

dove N è la rifrattività radio espressa come:

$$N = 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) + 72 \left(\frac{e}{T} \right) + 3.75 * 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad (7)$$

La rifrattività radio N può essere calcolata anche con la seguente espressione (come indicato nella Raccomandazione ITU-R P.453, [17]):

$$N = 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) - 5.6 \left(\frac{e}{T} \right) + 3.75 * \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad (8)$$

I valori calcolati con l'espressione (8) si discostano da quelli di (7) per una percentuale compresa entro il 0.02% per temperature da -50°C a $+40^\circ\text{C}$.

In questo studio per il calcolo di N si è fatto uso dell'espressione (8) e per quanto riguarda i dati meteo-climatici sono stati usati gli stessi coinvolti nella stima dell'attenuazioni sopra descritte.

La Figura 23 illustra la distribuzione sul territorio nazionale della rifrattività radio (N) con una risoluzione geografica di 25 km. La Figura 24 illustra la distribuzione di N con una risoluzione di 5 km. Le mappe dei valori N sono riferiti alle quote altimetriche della superficie del suolo rispetto al livello del mare. Di particolare interesse sono le discontinuità dei valori lungo le coste dovuti ai gradienti orizzontali di N nel passaggio da superficie marina a quella terrestre. Inoltre si osserva l'impatto delle altimetrie sui valori di N .

Figura 23. Distribuzione geografica della rifrattività radio (N) calcolata con l'Eq. 8 e i parametri meteo-climatici dei database ECMWF, con una risoluzione geografica di 25 km.

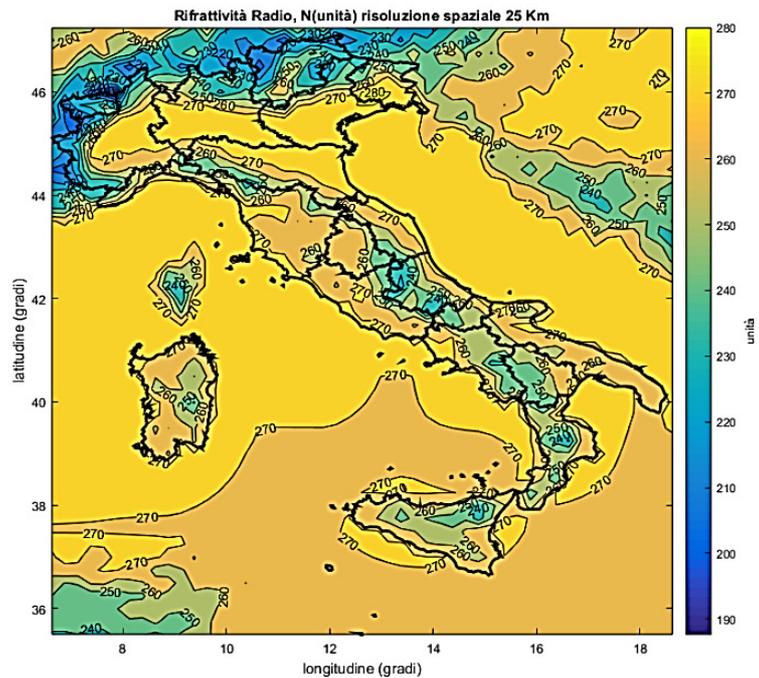
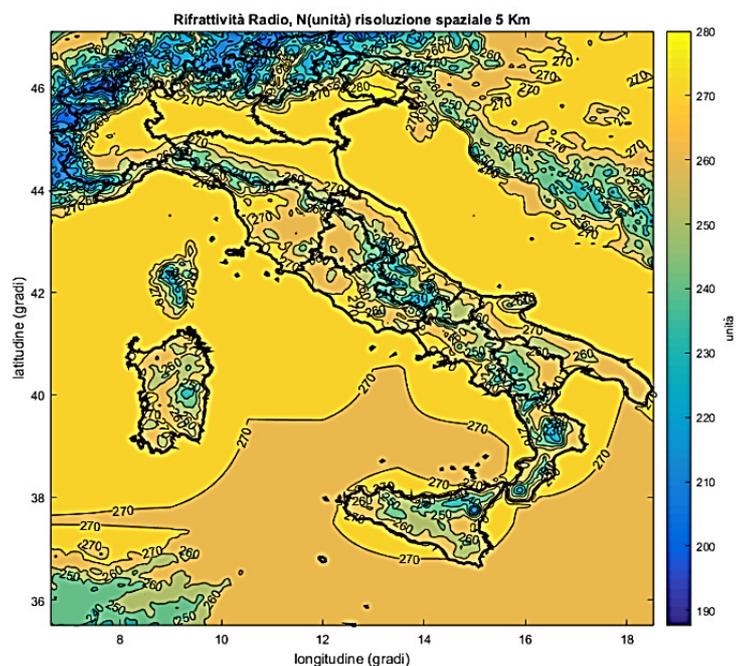


Figura 24. Distribuzione geografica della rifrattività radio (N) calcolata con l'Eq. 8 e i parametri meteo-climatici dei database ECMWF, con una risoluzione geografica di 5 km.



8. Conclusioni

La disponibilità di banda offerta ai sistemi 5G e alle sue evoluzioni nell'operare a frequenze più elevate di quelle millimetriche e sub-millimetriche, al fine d'assicurare connettività wireless outdoor, deve essere mediata con gli alti tassi attenuativi generati principalmente dai costituenti gassosi e precipitativi del mezzo troposferico: quali azoto, ossigeno argon (componente secca), vapore acqueo ed idrometeore precipitanti e non. Questi elementi possono inficiare, anche in modo distruttivo, le prestazioni dei sistemi 5G wireless a frequenze tra i 100 GHz e 1 THz.

Le simulazioni "ad hoc" realizzate in questo studio, fanno uso dei metodi di stima Raccomandati dall'ITU-R per calcolare i tassi attenuativi specifici (dB/km). Essi sono stati implementati fornendo in input dati meteo-climatici su scala sinottica, riferiti a valori medi annuali, dai database ECMWF. Le simulazioni hanno riguardato una mappa geografica che include il territorio italiano (suolo e mare), considerando otto frequenze: 40, 80, 150, 340, 410, 670 e 840 GHz. Dai risultati ottenuti si evidenzia che:

- la componente gassosa è in grado di generare valori attenuativi da qualche decimale di dB/km a circa 300 dB/km. Come atteso, i valori più elevati sono stati raggiunti nelle bande di frequenza di 670 e 840 GHz. Da notare che i valori delle attenuazioni specifiche da gas sono anche condizionati dalle altimetrie;
- gli eventi precipitativi sono in grado di sviluppare tassi attenuativi, su terra, variabili da qualche dB/km a circa 16-18 dB/km.
- l'attenuazione da precipitazioni manifesta effetti di saturazione a frequenze maggiori di circa 90 GHz.

In estrema sintesi i livelli attenuativi totali, con il crescere della frequenza, dipendono essenzialmente dalla componente gassosa.

Nell'analisi sono stati prodotti anche i valori della rifrattività radio alle quote altimetriche dei luoghi in griglia. Le mappe della rifrattività sono state calcolate sia per la terraferma sia per la superficie marina. In generale, i valori della rifrattività radio variano mediamente da circa 190 a 280 unità. Come atteso, sono evidenti sensibili discontinuità della rifrattività radio lungo le zone costiere così come è evidente l'impatto dell'altimetria.

Bibliografia

- [1] Report ITU-R SM.2352-0, Technology trends of active services in the frequency range 275-3 000 GHz, 9 June 2015.
- [2] Antes J., et al., High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0THz, Los Angeles, Jan. 2014.
- [3] Battan L.J. Fundamentals of meteorology, second editions, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (US), 1984.

- [4] U.S. Standard Atmosphere, NASA-TM-X-74335, NOAA-S/T 76-1562, US Government printing Office, Washington, D.C., 1976. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770009539.pdf>;
- [5] Ulaby F.T., R.K. Moore, A.K. Fung, Microwave remote sensing, Active and Passive, Volume I, II, III, Addison Wesley Publishing Company Reading Massachusetts (US), 1981.
- [6] Janssen M.A. (Editor), Atmospheric remote sensing by microwave radiometry, John Wiley & Sons, Inc. (USA), 1993.
- [7] Klein M., A.J. Gasiewski, Nadir sensitivity of passive millimeter and submillimeter wave channels to clear air temperature and water vapor variations, J. Geophys. Res. Vol. 105, No. D13, pp 17,841-17,511, 2000.
- [8] RESOLUTION 731 (REV.WRC-19), Consideration of sharing and adjacent-band compatibility between passive and active services above 71 GHz, Atti WRC 2019 Sharm el Sheikh, Egitto
- [9] Recommendation ITU-R P.676-11, 'Attenuation by atmospheric gases', 2016.
- [10] Mie G., Beiträge zur Optik trüber Lösungen, speziell kolloidaler Metallösungen, Ann. Physik, Vol. 25, No. 3, pp. 377-445, 1908.
- [11] Ippolito L.J. Jr, Radiowave propagation in satellite communications, Van Nostrand Reinhold Company Inc., NY, (USA), 1986.
- [12] Olsen R., D.V. Rogers and D.B. Hodge, The aRb relation in the calculation of rain attenuation, IEEE Transactions Antennas and Propagation, Vol. AP-26, No. 2, pp. 318-329, Feb 1978.
- [13] Recommendation ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005.
- [14] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations, World Meteorological Organization (WMO); Geneva, CH, 2008.
- [15] Recommendation ITU-R P.840-8, Attenuation due to clouds and fog, 2019.
- [16] <https://www.ecmwf.int/>
- [17] Recommendation ITU-R P.453, The radio refractive index: its formula and refractivity data, 2019.

Luigi Salamandra

Angelo Pizzoleo

DGTCSI - ISCTI – Università
degli Studi di Roma “Tor
Vergata”

Enrico Manca

DGTCSI - ISCTI

Visible Light Communication e rete Internet globale

Visible Light Communication and global Internet network

Sommario: *Il costante sviluppo tecnologico della rete 5G ha trainato contestualmente molte altre tecnologie per telecomunicazioni, che potranno essere utilizzate a supporto della rete stessa, ed in maniera complementare, ma anche come alternativa alle attuali, laddove impossibilitate da limiti di sicurezza o di applicabilità. Tra queste, la tecnologia basata su luce visibile come mezzo trasmissivo, Visible Light Communication - VLC, è sicuramente tra le più promettenti, in termini soprattutto di ri-utilizzo delle risorse per duplici scopi (illumin/comunicazione!), e peculiari caratteristiche di implementazione. Nondimeno, questa tecnologia è al momento in una fase embrionale, con diversi approcci realizzativi, anche ibridi (con altre pre-esistenti tecnologie) e aspetti di interfacciamento alla rete internet globale ancora in fase decisionale. Questo lavoro darà una breve panoramica dello stato dell'arte attuale della tecnologia VLC.*

Abstract: *The constant technological development of the 5G network has driven many other telecommunication technologies, which can be used to support the network itself, also in a complementary way, but more as an alternative where the present-day ones are unrealistic due to safety or feasibility limits. Among them, the technology based on visible light as transmission medium, so called Visible Light Communication - VLC, is certainly among the most promising, especially in terms of both re-use of resources for dual purposes (illumination!), and peculiar features of implementation. Nevertheless, this technology is currently in an embryonic stage, with different employment approaches, even hybrids (with other pre-existing technologies) and facets of interfacing with the global internet network still under decision. This work will give a brief overview of the current state-of-the-art of VLC technology*

1. Introduzione

Il progresso tecnologico alla base dello sviluppo del 5G rivoluzionerà in toto la vita di tutti i giorni, grazie al notevole aumento di banda (*ultra-larga*) a disposizione, non solo dell'utente finale *umano* (uso massivo dei social network, scambio foto/video alta risoluzione, servizi di streaming on-demand), ma anche di vari dispositivi 'intelligenti' IoT (Internet-of-Things), che sfrutteranno la rete per uno scambio continuo di informazioni, arrivando alla visione urbanistica (e non) della città autonomamente ed efficientemente gestita (Smart-City). Questo utilizzo ubiquo della connessione, permette lo sviluppo di altre tecnologie di telecomunicazione, oltre l'odierno binomio fibra/radio-frequenza;

queste tecnologie non necessariamente devono competere in termini di bit-rate, ma possono essere implementate in scenari alternativi e/o complementari a quelle attuali, eventualmente superando limiti intrinseci alle stesse.

Tra queste nuove tecnologie, una che si sta imponendo prepotentemente è il Li-Fi (Light-Fidelity), nome coniato per assonanza con la Wi-Fi (Wireless-Fidelity), tecnologia wireless basata sull'uso della luce visibile come veicolo di trasmissione dell'informazione. Questo concetto, più generalmente noto come Visible Light Communication (VLC), in realtà è tra i più 'vecchi' (basti pensare a segnali di fumo, fari nautici, SOS tramite luce intermittente), ma rimaneva confinato in uno stato di *non-applicabilità* per via dell'eccessiva latenza delle sorgenti ottiche (lampadine ad incandescenza, a fluorescenza, neon). Invece, grazie allo sviluppo e distribuzione di sorgenti per illuminazione artificiale d'ambiente basate su LED (Light Emitting Diode), che emettono direttamente una luce nello spettro visibile, e che sono di per sé inseribili all'interno di circuiti elettrici dedicati alla loro stessa modulazione in corrente, unito alle recenti e moderne idee di uso delle risorse senza sprechi (insito nell'idea stessa di Smart-City), ha permesso l'evoluzione, da concetto a prodotto finito, appunto della tecnologia VLC. In fin dei conti, l'illuminazione artificiale è presente ovunque, non solo in luoghi chiusi, dove il suo utilizzo è essenziale, ma anche in ambienti aperti (illuminazione stradale, insegne luminose, fari dei veicoli, semafori), e soprattutto, anche su dispositivi mobili (smartphone, tablet). Sfruttare la radiazione visibile emessa dai LED in maniera bivalente, come illuminazione e come connessione dati, 'sprecando' una *singola* risorsa è sicuramente un approccio efficiente; inoltre, la radiazione elettro-magnetica nel visibile è sicuramente più sicura, in termini sia di *safety* della persona esposta alla radiazione, sia di *salvaguardia delle informazioni* da possibili malintenzionati.

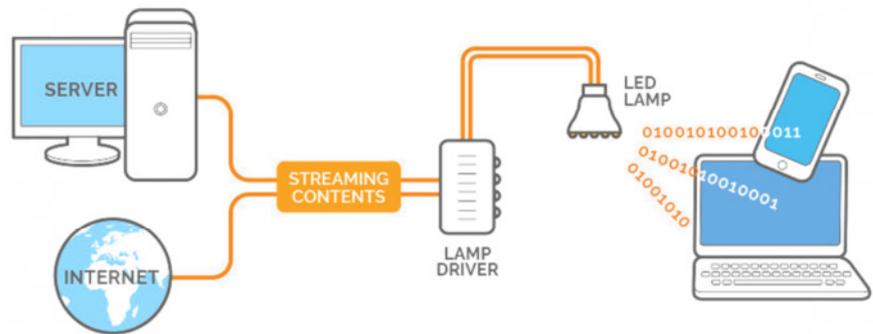
Questa tecnologia, che è già pronta alla commercializzazione in varie forme (la suddetta Li-Fi è già in fase di standardizzazione [1]), presenta, non di meno, ancora molte criticità applicative, in particolare per quanto riguarda il suo utilizzo formale come mezzo trasmissivo in uno scenario più ampio di condivisione collettiva delle informazioni (rete internet)

1. VLC: concetto base

Di fatto, è facile pensare e realizzare un link VLC uni-direzionale, che porti lo streaming dati in *down-link* dalla sorgente (server o internet) tramite il trasmettitore (LED) fino al ricevitore del dispositivo *client*. Quello che serve, sostanzialmente, è un dispositivo che riceva i dati dalla rete e traduca questo in un segnale di modulazione per il LED (*LED driver*); la luce così modulata investirà il dispositivo ricevente VLC finale (fig. 1). Anche le reti in connessioni cablate (Ethernet, Fibra Ottica e Power-Line) o wireless (Wi-Fi, Bluetooth) odierne utilizzano lo stesso paradigma, basti pensare alle reti casalinghe wireless (ma era lo stesso con quelle cablate Ethernet), in cui il segnale dall'esterno arriva su un modem connesso tramite fibra ottica (più moderna), o rete telefonica

(ad oggi ancora la più diffusa), e viene poi trasformato in un'onda elettro-magnetica (nel caso tecnologia Wi-Fi (antenna)).

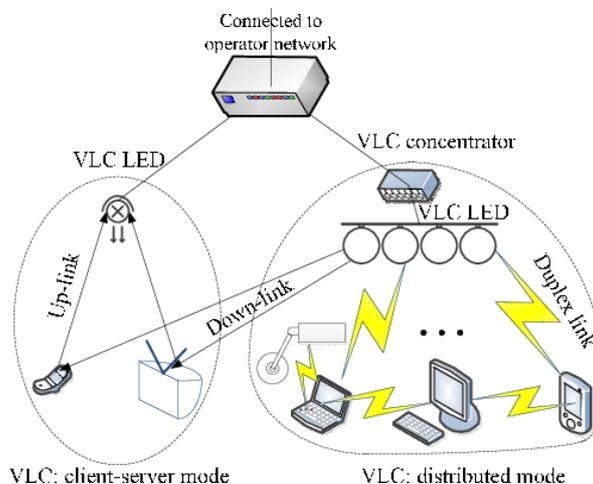
Figura 1. Schema generico di un apparato VLC (down-link). Lo streaming dati, dalla rete (o server), viene mandato al driver della sorgente LED, e diventa esso stesso il segnale modulante; la luce, quindi, verrà emessa 'modulata' con l'informazione dello streaming dati stesso, e ricevuta da vari dispositivi client



Quello che differisce, però, è il mezzo fisico con cui il dispositivo finale client riceve il segnale dati. Infatti, le connessioni di rete basate interamente su dispositivi elettrici (come le porte LAN), o quelle wireless che utilizzano un'antenna sia per trasmettere, sia per ricevere (unico mezzo fisico), sono facilmente implementabili e scalabili. Al contrario, le tecnologie ottiche, in cui serve sia un trasduttore da elettrico ad ottico (Laser o LED), sia l'inverso (foto-rilevatore), come per le reti in fibra, oppure per le Optical Wireless Communications, del quale insieme fa parte, appunto, la VLC, sono più onerose in termini anche solo di spazio condiviso per l'implementazione (Tx e Rx devono essere presenti entrambi sul dispositivo). Ancor più importante, questo limita notevolmente la capacità dei client VLC di poter utilizzare un percorso inverso di comunicazione (up-link).

In questo lavoro, quindi, verranno presentati vari approcci possibili per l'implementazione di una rete con *link duplex* basata su tecnologia VLC, sia totale, sia ibrida con altre tecnologie pre-esistenti e/o adattate, nonché l'approccio alla comunicazione della rete VLC (ibrida o meno) con l'esterno (fig. 2).

Figura 2: Schemi di tipologie di reti VLC: client-server o distribuito (duplex link). In questi schemi è previsto che il dispositivo finale client sia in grado anche di trasmettere informazione tramite tecnologia VLC



2. Link duplex VLC

Come accennato, la tecnologia VLC, in generale, prevede una bi-direzionalità del collegamento (duplex), che però risulta di difficile attuazione, soprattutto considerando la natura dei dispositivi finali, al momento non predisposti degli adeguati sistemi fisici (Tx e/o Rx). Di seguito si vedrà una breve panoramica delle possibili soluzioni.

2.1. VLC-ready duplex

Ci sono tutta una serie di dispositivi 'VLC-ready', cioè già predisposti, nativamente, di apparati interni utili alla realizzazione di un link VLC duplex. Esempi lampanti sono smartphone e tablet (fig. 3): essi ormai sono dotati di LED e foto-camera per poter fotografare e fare riprese (risulta uno dei maggiori utilizzi degli smartphone, tanto che alcune linee produttive puntano proprio sulla qualità di questa feature). Il LED del flash, quindi, è chiaramente utilizzabile come trasmettitore, e recentemente cominciano ad essere installati anche più di un LED, per cui si può azzardare l'ipotesi di trasmissione e/o comunicazione 'multi-canale'. La foto-camera, d'altronde, non è altro che un sofisticato foto-rilevatore, per cui può essere usato come ricevitore, ed anche in questo caso esistono già prodotti con due o più foto-camere. Oltre tutto, lo stesso schermo dei dispositivi smartphone e tablet (ma anche di Monitor TV!) non è altro che un trasmettitore, se opportunamente utilizzato [2].



Figura 3. Flash e foto-camera integrati in uno smartphone, utilizzabili come Tx e Rx, rispettivamente, per comunicazioni VLC. Due smartphone possono comunicare tra loro con un link VLC duplex

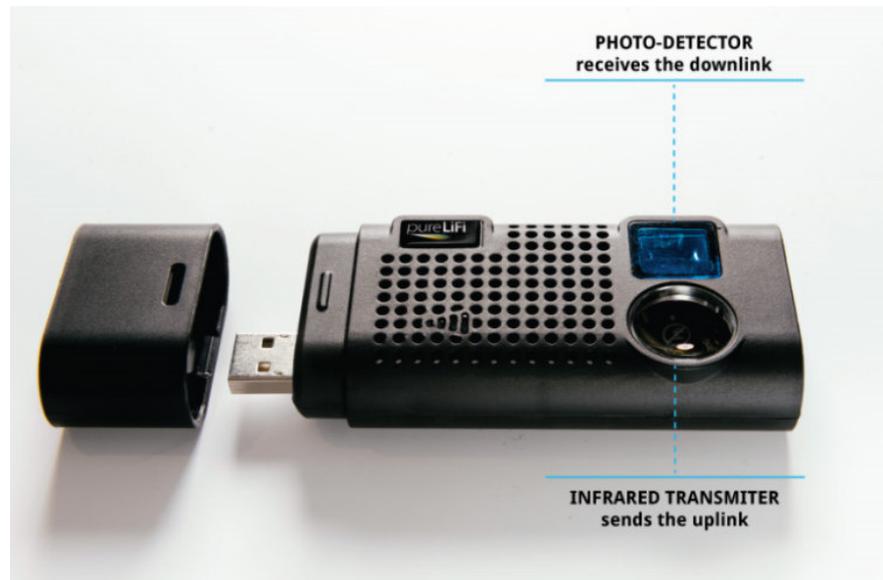
Unico inconveniente di questo approccio è la difficile definizione di uno standard adeguatamente ampio da prendere in considerazione tutte le possibili casistiche, data la natura aleatoria dei dispositivi coinvolti nel link VLC (in particolare, la latenza trasmissiva dovuta sia alle varie dimensioni delle sorgenti, flash o schermi, sia alle potenze di emissione dei LED).

2.2. Dongle-assisted duplex

L'approccio (al momento più usato) per intervenire in tal senso è quello di inserire un dongle (fig. 4), che integri al dispositivo gli elementi mancanti (LED e/o foto-rilevatore) [3], e che dia al contempo uno standard minimo comune agli apparati di trasmissione. Questo approccio è utile soprattutto per dispositivi da ufficio e macchinari (stampanti, PC desktop, condizionatori), ma può essere esteso anche ai

dispositivi VLC-ready, sempre con lo scopo di omogeneizzare le capacità di comunicazione (che risulterebbero dongle-dipendenti!).

Figura 4: Dongle USB per integrare "capacità" di comunicazione VLC a dispositivi nativamente privi di essa



2.3. Lampadari VLC

Discorso affine si può fare per quanto riguarda gli apparati 'sorgenti' della rete VLC. Come detto, infatti, una rete VLC sfrutta le capacità del LED di poter essere modulato per creare un segnale ottico nel visibile con contenuto informativo. Una qualunque lampadina LED, quindi, può diventare una sorgente VLC in down-link. Nella realtà dei fatti, dato che le attuali lampadine LED sul mercato presentano un circuito raddrizzatore a ponte di diodi, per via dell'adattamento alle pre-esistenti reti elettriche, è dubbia la fattibilità di una modulazione diretta in corrente; ma anche sorvolando su questo aspetto (la produzione di nuovi LED non comporterebbe costi aggiuntivi, e basterebbe sostituire il circuito raddrizzatore con un driver), rimane il problema della ricezione di un segnale VLC (up-link).

Figura 5. LED Panel (sinistra) e Lamp (destra) con sistemi VLC integrati



2.4. Bluetooth Low Energy (BLE)

Altro approccio possibile per risolvere il problema dell'up-link in una rete VLC è quella di sfruttare un'altra tecnologia wireless pre-esistente, o

comunque più facilmente integrabile. Viene da sé che sfruttare il Wi-Fi renderebbe inutile tutto il discorso. Serve una tecnologia che, almeno in parte, verta verso le nuove idee di risparmio energetico, riutilizzo delle risorse, basso costo, integrazione (in ambito IoT soprattutto), rispettando le idee alla base degli *smart-systems*, e del 5G stesso. Al momento la soluzione adottata è quella di sfruttare un canale sempre ottico-elettrico, sfruttando delle porte ad infrarossi (IR), economiche per definizione, visto il loro impiego in tantissimi prodotti di uso comune (telecomandi in primis); tuttavia questo approccio presenta molte criticità affini al VLC, in particolare il problema della direzionalità del canale.

Serve un metodo che sia efficiente, al contempo, in energia impiegata e raggiungibilità. In tal senso, una tecnologia molto interessante è quella del Bluetooth Low Energy (BLE) [5], anche nota come Bluetooth Smart [6]. Questa tecnologia è simile alla 'madre' Bluetooth, ma con consumi energetici e costi nettamente inferiori, pur mantenendo simili standard di comunicazione (fig. 6). In particolare, pensando ad una tecnologia ibrida BLE/VLC, in un ambiente chiuso non troppo ampio come una abitazione, oppure un ufficio, si potrebbero sfruttare la velocità di connessione in down-link tramite VLC (ordine del Gb/s), mentre l'up-link sarebbe delegato alla tecnologia BLE, capace di arrivare a velocità utili oltre 1Mb/s [5]. La BLE, inoltre, risulterebbe efficace dal punto di vista del riconoscimento del dispositivo all'interno dello spazio di azione della VLC stessa.

Bluetooth™
4.0

Low Energy
50 meter range
1 Mbt/s transfer

consumes 50-99%
less power than
Bluetooth Classic
(depending on the use case)

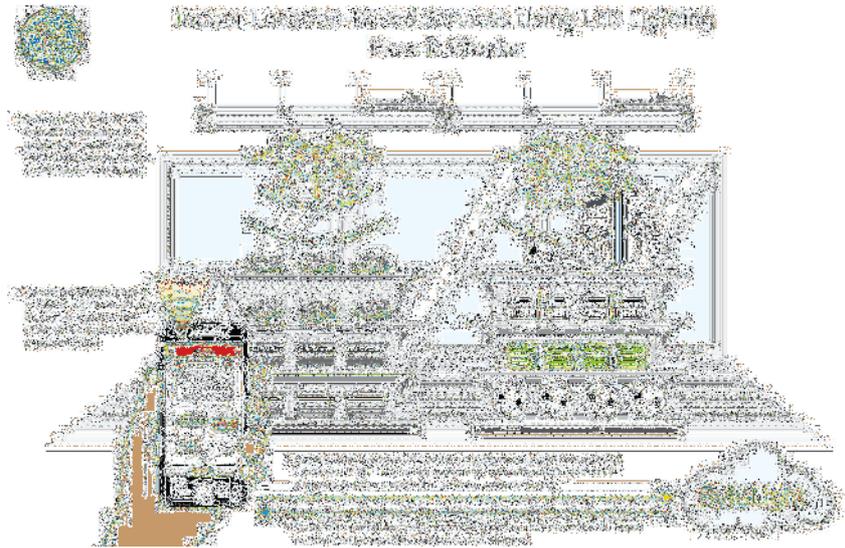


Figura 6. Caratteristiche generali della tecnologia Bluetooth Low Energy

I dispositivi più moderni già prevedono apparati interni per sfruttare la comunicazione BLE, quindi anche l'espansione di una rete ibrida BLE/VLC sarebbe meno frenata. Inoltre, dal punto di vista delle sorgenti di luce artificiale per la parte Tx della VLC, il precedente paradigma di dispositivi Tx/Rx entrambi presenti sul lampadario (per esempio), risulterebbe meno costrittiva, dato che il Rx in tecnologia BLE potrebbe essere collocato anche distante fisicamente dalla sorgente stessa, integrato nel circuito di pilotaggio del LED. Un approccio in tal senso è

stato già testato dalla GE Lightning [7] con il loro progetto ByteLight (fig. 7).

Figura 7. Progetto ByteLight della GE Lightning, in cui si sfrutta una tecnologia basata su BLE e VLC insieme per geolocalizzare un cliente e mandare sul suo smartphone indicazioni della merce esposta



3. VLC vs Internet

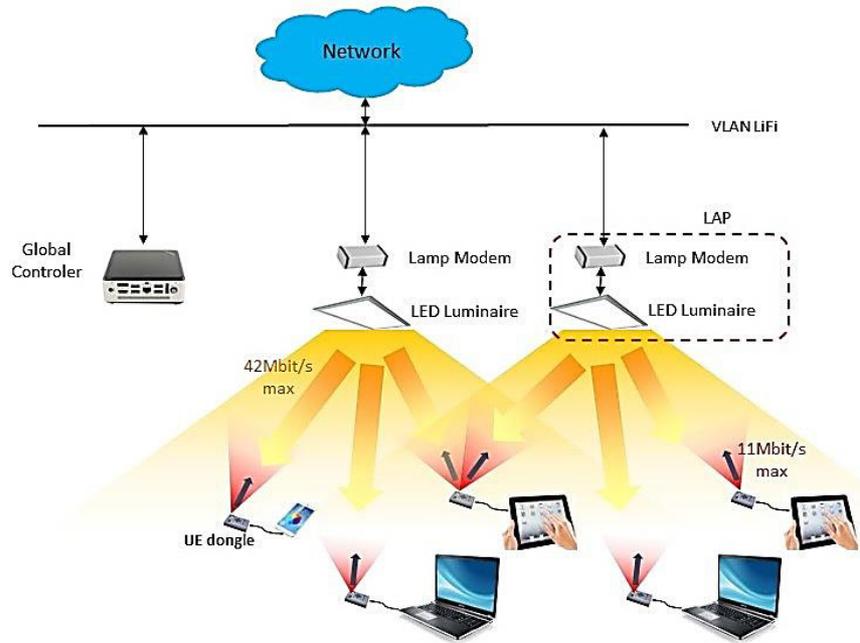
Come detto, la VLC rappresenta una tecnologia innovativa, già pronta per l'ampio ed eterogeneo mondo che sarà la rete 5G, grazie anche alle altissime prestazioni di velocità di trasferimento dati [8-10]. Tuttavia, come qualunque rete wireless, anche un link ottico VLC comporta l'utilizzo di un'altra tecnologia 'cablata' a supporto per garantirne l'accesso ad internet. Naturalmente, si può adattare il prodotto VLC, in particolare quello da installare in posizione fissa e che funga da server, ma essendo la tecnologia molto 'adattabile' a varie situazioni, si sono sviluppate anche altre realtà

3.1. PLC e PoE

Al momento la stragrande maggioranza delle realtà commerciali attive nel campo delle VLC applicate (Li-Fi), punta su una interfaccia VLC/internet basata su tecnologia PLC (Power-Line Communication), le quali sfruttano la rete elettrica (di alimentazione) per far viaggiare l'informazione. Possono essere sia esse stesse un ponte con un altro tipo di rete (telefonica o fibra ad un modem Ethernet/PLC), ma idealmente potrebbe essere direttamente connesso all'esterno (fig. 8), in analogia con l'approccio FTTC (Fiber-To-The-Cabinet) rispetto a quello FTTH (Fiber-To-The-Home).

una porta Ethernet standard (fig. 9) in modo da poter pilotare (modulare) la sorgente a LED del link VLC (down-link), e viceversa, mandare sulla porta Ethernet un segnale elettrico amplificato dal fotorelevatore (up-link). Unico inconveniente, in quest'ultimo caso, è la rigidità dei sistemi Ethernet, non disponibili ad un adattamento degli standard, dato il loro lungo e consolidato 'retaggio'.

Figura 9. Rete VLC interfacciata tramite Ethernet (VLAN) alla rete internet



In questo senso, risulta chiaro perché società come **pureLiFi** abbiano già implementato e commercializzato prodotti VLC che supportano nativamente PLC e/o PoE [3].

I campi di applicazione delle reti basate sulla tecnologia ibrida P/V-LC trovano l'esempio di punta nelle future reti ospedaliere. Infatti, gli ospedali più moderni cominciano ad adottare l'*E-Health*, termine con cui si indica il supporto al più generale *Healthcare* sfruttando processi e comunicazioni elettroniche a complemento dei tradizionali servizi di assistenza sanitaria (fig. 10), soprattutto in visione del concetto Smart-City. Un sistema E-Health deve quindi prevedere una rete a supporto che sia la meno invasiva e nociva per il paziente curato. Laddove una rete cablata sarebbe di difficile implementazione in strutture pre-esistenti, una PLC si integra per definizione, sfruttando la rete elettrica, per forza presente; e considerando che le radiazioni delle onde elettromagnetiche a radio-frequenza prodotte dalle attuali reti wireless possono andare ad interferire con i sistemi di monitoraggio e/o i macchinari di misura del paziente (per non parlare di problemi a dispositivi salva-vita, quali un pacemaker), un sistema VLC non comporta radiazioni nocive e/o aggiuntive al paziente (e l'ambiente chiuso prevede comunque l'uso di luci artificiali!).

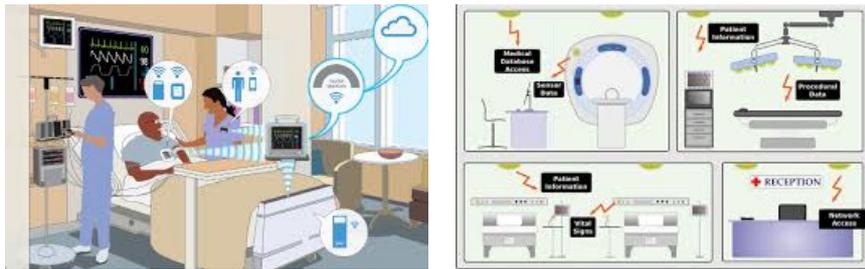


Figura 10. Scenario applicativo per E-Health con sistema di comunicazione ibrida PLC/VLC in ambiente ospedaliero. I dispositivi comunicano via VLC tra loro e con l'infrastruttura base, le aree ospedaliere (stanze) tramite PLC

3.2. VLC con Laser nel visibile

Altro possibile ed interessante spunto di realizzazione di una rete VLC è quello di sfruttare, anche solo per l'accesso della rete in casa, un canale ottico nel visibile, realizzato sfruttando i nuovi laser a basso costo e bassa potenza presenti ad oggi sul mercato, tipicamente usati per realizzare laser-punter (fig. 11). Questi puntatori, infatti, sfruttano sorgenti laser nel rosso (630-750nm) e vicino infrarosso (N-IR, tipicamente tra 800 e 1100nm), ormai tecnologia consolidata e perciò economica, sia tramite solo lenti di espansione e collimazione (nel caso del rosso), sia aggiungendo a queste dei cristalli di Nd:YVO₄ e KTP (cristalli con effetti non lineari, che trasformano l'emissione N-IR in verde). La testa laser è collegata ad una circuiteria di pilotaggio, anch'essa semplificata all'estremo.

Si può quindi immaginare uno scenario di utilizzo, in cui la sorgente laser viene utilizzata in spazio libero per entrare all'interno dell'abitazione, e da lì eventualmente riconvertita, ma mantenendo tutti gli apparati congrui alla tecnologia VLC. Altresì, si può pensare ad una integrazione su fibre ottiche plastiche (POF) della sorgente laser visibile, per far arrivare più facilmente ed economicamente il segnale fino all'abitazione (o ufficio), riconvertendo al Cabinet il segnale portato su fibra ottica 'normale' in 3° finestra (~1500nm) in quello visibile, più facilmente allineabile (core millimetrico) e attenuazione del segnale visibile molto basso (fig. 12).

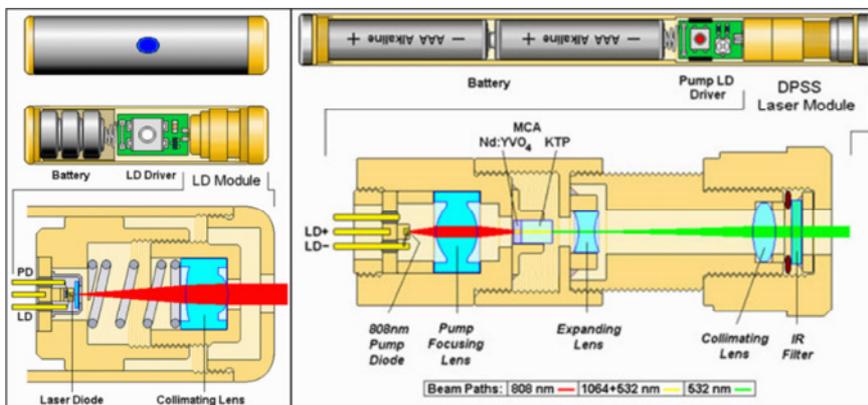
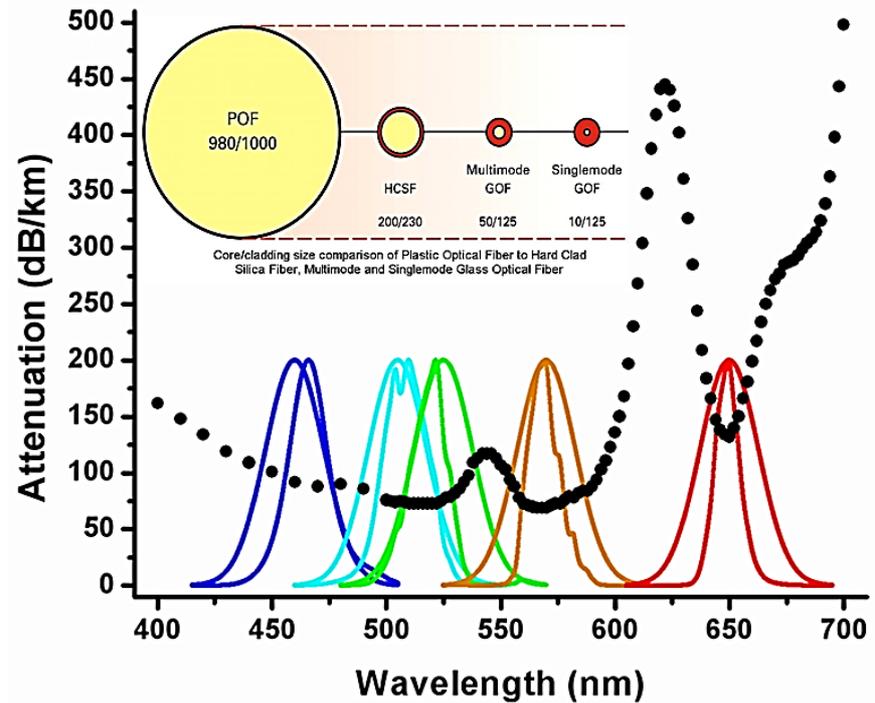


Figura 11. Schema di due laser-punter a basso costo, con emissione nel (sinistra) rosso e (destra) verde

Figura 12. Spettro di attenuazione di una fibra ottica plastica (POF) e comparazione del core rispetto alle fibre ottiche classiche



Bibliografia

- [1] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.7, "Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light", IEEE Std 802.15.7-2011, pp.1-309, 6 Sept. 2011. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195
- [2] R. Boubezari, H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, A. Bouridane, "Novel detection technique for smartphone to smartphone visible light communications", 2016 10th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. CSNDSP 2016. (2016) 8–12. doi:10.1109/CSNDSP.2016.7573915.
- [3] LiFi-XC di pureLiFi (<http://purelifi.com/lifi-products/>).
- [4] LED Panel e Lamp della VLNComm (http://vlncomm.com/#_products)
- [5] C. Gomez, J. Oller, J. Paradells, "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology", Sensors., vol. 12 (2012), pp. 11734–11753. doi:10.3390/s120911734.
- [6] Bluetooth SIG (<https://www.bluetooth.com/news/pressreleases/2009/12/17/>)
- [7] GE Lightning (<https://www.gelighting.com/>)

- [8] V. Sharma, S. Rajput, P.K. Sharma, "Light fidelity (Li-Fi): An effective solution for data transmission", in: AIP Conf. Proc., 2016: p. 020061. doi:10.1063/1.4942743.
- [9] A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury, and E. Ciaramella, "1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation", IEEE Photonics J., vol. 4, no. 5, pp. 1465–1473, Oct. 2012.
- [10] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. C. O'Brien, and H. Haas, "LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications", J. Light. Technol., vol. 34, no. 13, pp. 3047–3052, Jul. 2016.
- [11] HomePlug Alliance
(<http://www.homeplug.org/tech-resources/download-specs/>).
- [12] IEEE Standard Association
(<https://standards.ieee.org/findstds/standard/1901-2010.html>).

Giancarlo Butti
Europrivacy

Aziende resilienti

Resilient compaines

Sommario: *La capacità di un'azienda di resistere ad eventi avversi è condizionata da molteplici fattori fra i quali la crescente dipendenza dai propri interlocutori.*

Abstract: *An organization's ability to resist to adverse events is conditioned by multiple factors including increasing reliance on its stakeholders*

1. Essere resilienti

Il termine resilienza ha fatto di recente la sua comparsa all'interno di una delle normative più invasive ed estese, in quanto perimetro di applicazione, il REGOLAMENTO (UE) 2016/679 meglio noto come GDPR (Regolamento generale sulla protezione dei dati).

Il GDPR prevede infatti, fra le misure di sicurezza (Articolo 32), che i titolari ed i responsabili, garantiscano:

- a) *la capacità di assicurare su base permanente la riservatezza, l'integrità, la disponibilità e la **resilienza** dei sistemi e dei servizi di trattamento;*

oltreché:

- b) *la capacità di ripristinare tempestivamente la disponibilità e l'accesso dei dati personali in caso di incidente fisico o tecnico;*

Più in generale, per comprendere il concetto di RESILIENZA possiamo rifarci alle definizioni date dai maggiori dizionari, come il Treccani:

1. *Nella tecnologia dei materiali, la resistenza a rottura per sollecitazione dinamica, determinata con apposita prova d'urto: prova di r.; valore di r., il cui inverso è l'indice di fragilità.*
2. *Nella tecnologia dei filati e dei tessuti, l'attitudine di questi a riprendere, dopo una deformazione, l'aspetto originale.*
3. *In psicologia, la capacità di reagire di fronte a traumi, difficoltà, ecc.*

o il Garzanti:

1. *(fis.) proprietà dei materiali di resistere agli urti senza spezzarsi, rappresentata dal rapporto tra il lavoro necessario per rompere una barretta di un materiale e la sezione della barretta stessa*

2. capacità di resistere e di reagire di fronte a difficoltà, avversità, eventi negativi ecc.: resilienza sociale

Nel contesto di questo articolo consideriamo la RESILIENZA come la capacità di un'azienda di reagire di fronte ad un evento avverso.

Questo può essere causato da eventi naturali quali un terremoto, volontari quali un attacco terroristico, fortuiti quali un incidente.

In realtà un'azienda è resiliente se è in grado di affrontare qualunque tipo di evento avverso, quali il mutare della congiuntura economica, l'evoluzione del mercato, i cambiamenti tecnologici, l'interruzione della propria catena di fornitura, la crisi/perdita dei clienti strategici.

2. Il contesto

Prima di addentrarci nell'analisi dei possibili elementi da prendere in considerazione per valutare la resilienza di un'azienda, è opportuno considerare la sempre crescente interconnessione esistente fra l'azienda ed i propri interlocutori.

Questi comprendono ad esempio:

- clienti
- fornitori
- outsourcer
- utilities
- dipendenti/collaboratori
- oltretutto le infrastrutture.

Eventi che interessano i propri outsourcer IT o centri esterni di lavorazione così come la perdita di figure chiave, sono elementi che possono in qualche modo influire sulla capacità di un'azienda di continuare nella propria attività; questi possono comprendere fra gli altri:

- una interruzione prolungata di fornitura di servizi essenziali al funzionamento dell'azienda, quali alimentazione elettrica, gas, combustibile, acqua, comunicazioni...
- una interruzione prolungata di fornitura di materie prime/componenti/servizi essenziali per la continuità del business
- una interruzione di commesse da parte di un cliente strategico
- l'infortunio o perdita di collaboratori essenziali
- danneggiamenti a edifici o strutture nelle vicinanze dell'azienda che impediscono o riducono in modo significativo la fruibilità o l'accesso all'area produttiva
- il danneggiamento o la chiusura prolungata a infrastrutture che garantiscono i collegamenti limitando la possibilità di movimento di personale e merci

Edifici	Distruzione fisica di edifici, impianti, infrastrutture, magazzini	<ul style="list-style-type: none"> • Terremoti • Tsunami ed altri eventi naturali • Incendio • Ordigno esplosivo
	Temporanea indisponibilità degli edifici	<ul style="list-style-type: none"> • Sostanze contaminanti • Allarme bomba • Sciopero dei trasporti • Manifestazioni • Mancanza di energia
Personale	Soggetti chiave per l'azienda <ul style="list-style-type: none"> • Amministratori • Detentori di know how esclusivo • Soggetti che hanno privilegi particolari (amministratori di sistema...) • Soggetti in numero rilevante 	<ul style="list-style-type: none"> • Sequestro • Ferimento/uccisione • Ricatto (ad esempio in seguito a sequestro dei familiari o ad altri elementi) • Corruzione ad esempio ai fini di spionaggio o sabotaggio • Epidemia e simili
IT	<ul style="list-style-type: none"> • Distruzione di dati/informazioni e apparati • Furto di dati e informazioni con o senza perdita degli stessi • Alterazione di dati e informazioni • Interferenza nel funzionamento degli apparati e delle comunicazioni • Interferenza nel funzionamento degli impianti produttivi 	<ul style="list-style-type: none"> • Malware • Intrusione • Sabotaggio • Attacco • Incidenti • Malfunzionamento
Interruzione di fornitura/esistenza di un fornitore essenziale	Ambiti di fornitura <ul style="list-style-type: none"> • Materie prime/semilavorati • Lavorazioni • Servizi essenziali • Manutenzione software personalizzato essenziale • Manutenzione impianti • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Attacco subito • Motivi economici • Cessata produzione • Stato di crisi • Vincoli contrattuali di esclusiva da parte di altri clienti • Contenzioso
Utilities/Telco	Interruzione fornitura di: <ul style="list-style-type: none"> • Elettricità • Gas • Acqua • Comunicazioni • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Attacco/distruzione agli edifici/centrali • Attacco/guasto delle linee di distribuzione • Guasto temporaneo • Mancanza di materie prime • Contenzioso
Outsourcer	<ul style="list-style-type: none"> • Interruzione del servizio • Degrado del servizio a livelli inaccettabili • Interruzione delle connessioni 	<ul style="list-style-type: none"> • Attacco/distruzione agli edifici/centrali • Attacco/guasto delle linee di connessione • Guasto temporaneo
Infrastrutture	Interruzione di: <ul style="list-style-type: none"> • Vie di comunicazione • Linee elettriche • Trasporto di energia • Linee di comunicazione • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Attentati • Crollo/distruzione • Manifestazioni • Manutenzione straordinaria • ...

Tabella 1. Esempi di eventi avversi

Per ognuno di questi interlocutori l'azienda dovrebbe valutare i possibili scenari di crisi ed i possibili impatti, al fine di individuare e pianificare le possibili soluzioni.

Non necessariamente tali soluzioni devono essere fra loro omogenee e coerenti in quanto le singole macroaree ed all'interno di queste il singolo fornitore/outsourcer/cliente possono essere oggetto di specifiche soluzioni.

Ad esempio, per quanto attiene i fornitori è possibile individuare una serie di strategie preventive quali:

- la definizione di criteri di selezione del fornitore che consentano di valutare la sua resilienza
- la predisposizione di specifiche clausole contrattuali
- la verifica della priorità di fornitura nei confronti degli altri clienti
- la verifica della documentazione attestante la capacità di garantire la continuità operativa
- la verifica della documentazione dei test effettuati/della partecipazione ai test di terzi
- la verifica della documentazione in merito a precedenti incidenti e alla loro gestione
- la valutazione delle conseguenze di una interruzione di fornitura (in funzione della durata della interruzione)
- ...

e risolutive, quali ad esempio:

- l'individuazione di fornitori alternativi
- lo stoccaggio di materie prime e di componenti
- l'utilizzo di materiali/processi alternativi
- l'autoproduzione (ad esempio di energia elettrica)
- ...

Quello che conta è che l'azienda abbia effettuato una opportuna valutazione dei vari scenari di crisi ed individuato preventivamente le possibili soluzioni che possono comprendere, fra gli altri, il non mettere in atto alcuna azione preventiva.

L'importante è che l'azienda ne sia consapevole ed abbia valutato e continuamente monitorato l'evoluzione sia degli scenari di crisi, sia dei propri interlocutori a vario titolo.

L'insieme delle azioni che l'azienda può mettere in atto rientrano in quello che è il piano di continuità operativa, basato ad esempio su criteri suggeriti da standard e buone pratiche come quelle del BCI (Business Continuity Institute, <https://www.thebci.org/>).

Gli scenari e le possibili soluzioni prospettati da questi standard trovano un parziale recepimento anche in alcune normative, quali la Circolare 285 di Banca d'Italia (relativa al mondo finanziario), o nella vecchia versione del CAD (relativo alla pubblica amministrazione).

Pur essendo parziali, gli scenari e le soluzioni descritte all'interno di queste normative e le soluzioni proposte dai rispettivi organismi tecnici,¹ possono trovare una valida applicazione anche nelle organizzazioni diverse da quelle citate.

In particolare i documenti prodotti sono di norma di alta qualità e, quantomeno quelli rivolti alla P.A., liberamente e gratuitamente disponibili a tutti.

3. Valutare il rischio

Qual è la probabilità che un'azienda possa subire un evento avverso e quali sono i danni che può subire in questo caso?

Sebbene esistano numerose metodologie di analisi del rischio² queste si rifanno in genere a due formulazioni; la classica:

$$RISCHIO = PROBABILITÀ \times IMPATTO$$

o la più generica formula che introduce nella valutazione anche altri elementi quali le vulnerabilità e le minacce.

$$RISCHIO = f(\text{Probabilità, Danno, Vulnerabilità, Minacce})$$

È evidente che nel caso di eventi avversi naturali, quali un terremoto, questi sono legati essenzialmente alla collocazione geografica dell'azienda ed alla periodicità ed intensità nel tempo di tali eventi. Altri elementi che possono aumentare il livello di rischio legato alla posizione dell'azienda sono determinati anche da elementi non legati all'ambiente naturale, quali ad esempio la presenza di altre aziende che effettuano lavorazioni pericolose o che sono un probabile obiettivo di attacco terroristico (ad esempio le infrastrutture critiche).

Diverso è il caso di eventi che sono determinati, ad esempio, da azione volontarie di malintenzionati, siano questi esterni o interni all'azienda.

La probabilità di accadimento di tali eventi è determinata da un lato dall'appetibilità dell'azienda e dall'altro dalla facilità con cui un attaccante può portare avanti la propria azione.

Difficilmente è possibile intervenire sul livello di appetibilità di un'azienda, perchè questa è una sua caratteristica intrinseca.

È quindi necessario provvedere con delle opportune contromisure, alcuni esempi delle quali sono riportati nelle tabelle 2, 3, 5.

¹ Agenzia per l'Italia digitale: *Linee guida per il disaster recovery delle pubbliche amministrazioni*. ABILAB: *Metodologie varie, strumenti, gruppi di lavoro, osservatorio sulla business continuity*

² G. Butti, A. Piamonte: *Misurare la physical cyber security - La Comunicazione N.R.&N.* http://www.isticom.it/documenti/rivista/rivista2016/6_85-118_misurare_la_sicurezzaicom.pdf

È evidente che tale riflessione dovrebbe essere estesa alla catena dei propri interlocutori; più un soggetto appare appetibile, maggiori dovrebbero essere le misure di sicurezza e prevenzione in essere.

È significativo notare che le misure di prevenzione e sicurezza sono molto specifiche e coprono cioè ambiti di rischio ben definiti.

Ad esempio l'attivazione di un sito di disaster recovery per il proprio data center non è esaustivo rispetto a tutte le possibili minacce di natura informatica; un malware potrebbe contemporaneamente diffondersi sia presso il CED principale, sia presso il CED secondario.

Di fatto una soluzione costosa, quali un sito di DR, risolve situazioni di indisponibilità di larga parte del sistema informativo presso il CED primario o la mancanza/inagibilità del CED stesso. Situazioni più limitate di crisi, quali la mancanza di singole componenti del sistema informativo sono risolte con altre tecniche come illustrato nei successivi paragrafi.

Anche eventi apparentemente più banali, quali ad esempio il malfunzionamento prolungato di un'applicazione, potrebbero tuttavia portare ad una interruzione di un servizio essenziale per l'azienda ed è per questo che è fondamentale disporre di contratti di assistenza con tempi di intervento concordati e stringenti con i propri fornitori.

In considerazione della costante automazione ed interconnessione anche dei dispositivi di produzione, gli aspetti della sicurezza IT e della capacità di garantire la continuità del servizio, non vanno più limitati alle componenti tradizionali del sistema informativo, ma vanno estesi ai reparti produttivi dell'azienda.

Per quanto attiene eventuali attacchi cyber le misure di sicurezza devono comprendere sia interventi di natura preventiva, sia un costante monitoraggio degli eventi di sicurezza, attività quest'ultima estremamente onerosa e specialistica, che sicuramente non è alla portata della maggior parte delle aziende.

Il passaggio al cloud potrebbe essere in molti casi una soluzione, in quanto il ricorso a servizi di prevenzione e monitoraggio centralizzati rendono applicabile anche alle piccole e medie aziende strumenti e misure di sicurezza altrimenti fuori portata.

Indispensabile inoltre una cultura della sicurezza, sia per indirizzare tutti gli utenti verso comportamenti virtuosi nella gestione degli strumenti aziendali, sia per consentire loro di individuare e segnalare immediatamente le varie tipologie di attacco, che in molti casi si configurano con l'inoltro di una semplice mail.

Elementi di rischio della sede in base alla collocazione	<ul style="list-style-type: none"> – Zona sismica – Corsi d’acqua nelle vicinanze con rischio esondazione – Aziende con lavorazioni pericolose – Installazioni pericolose (aeroporti, depositi carburanti...) – Area degradata
Elementi di mitigazione in base alla vicinanza dei servizi	<ul style="list-style-type: none"> – Carabinieri o altre forze di polizia e vigilanza – Ospedali o altri presidi – Vigili del fuoco
Misure di sicurezza generali della sede	<p>Anti intrusione</p> <ul style="list-style-type: none"> – Antifurto – Vigilanza – Videosorveglianza – Controllo accessi – Recinzioni – Cancelli – Grate alle finestre – Porta blindata – Serratura di sicurezza <p>Antincendio</p> <ul style="list-style-type: none"> – Estintori – Idranti – Rilevatori – Allarmi – Porte taglia fuoco <p>Altre misure</p> <ul style="list-style-type: none"> – Antisismica – Anti allagamento – Eventi atmosferici (fulmini)
Altro	<p>Regolarità degli impianti</p> <ul style="list-style-type: none"> – Elettrico – Climatizzazione <p>Continuità elettrica</p> <ul style="list-style-type: none"> – UPS – Generatori <p>Altro</p> <ul style="list-style-type: none"> – Aree separate per ricevimento clienti/fornitori
Procedure	<ul style="list-style-type: none"> – Procedura di gestione degli accessi (comprese autorizzazioni, revoche, smarrimento badge...) – Procedura di gestione dei visitatori/manutentori

Tabella 2. Protezione di un edificio

Fonte: Sicurezza totale 4.0 L’ABC sulla physical cyber security per i DPO e le PMI (e non solo), G. Butti ITER

Misure di sicurezza CED	<ul style="list-style-type: none"> Anti intrusione <ul style="list-style-type: none"> – Adeguato posizionamento all'interno dell'edificio – Pareti soffitto/pavimento – Pareti di adeguato spessore e robustezza – Misure anti effrazione – Controllo accessi – Videosorveglianza – Antincendio <ul style="list-style-type: none"> – Rilevatori di fumo, calore, allagamento – Misure antincendio compatibili con le apparecchiature presenti – Porte antincendio di adeguata dimensione – Interruttore generale della alimentazione elettrica – Impianto di climatizzazione – Continuità elettrica <ul style="list-style-type: none"> – Gruppo di continuità (per lo spegnimento corretto) – Gruppo elettrogeno (per la continuità del servizio) – Coerenza fra i dispositivi di continuità e le normative VVFF – Apparecchiature e impianti <ul style="list-style-type: none"> – Pavimento galleggiante per l'adeguato posizionamento dei cavi – Corretto e ordinato posizionamento dei cavi elettrici – Corretto e ordinato posizionamento dei cavi di rete – Posizionamento ordinato delle apparecchiature nei rack – Spazio intorno ai rack adeguato alla movimentazione e manutenzione delle apparecchiature – Gestione remota delle apparecchiature
--------------------------------	---

Tabella 3. Protezione di un CED (Fonte: Sicurezza totale 4.0, G. Butti - ITER)

Altra fonte di rischio è rappresentata dalla mancata formalizzazione del know how aziendale e dell'eccessivo ricorso a figure chiave³.

Tali figure possono essere esse stesse oggetto di attacchi o ricatti analogamente ad altre tipologie di figure critiche per un'azienda quali gli amministratori, o dotate di particolari privilegi che possono mettere a rischio la resilienza dell'azienda, quali gli amministratori di sistema.

Perdita assoluta	Perdita di informazione che il collaboratore non aveva condiviso ed esplicitato e che quindi non sono state acquisite nel patrimonio informativo aziendale. Danno derivante dal passaggio del collaboratore alla concorrenza alla quale potrà 'vendere' le proprie specifiche competenze e le informazioni relative all'azienda di provenienza
Perdita parziale	Perdita di competenza e conoscenza in seguito a variazione di ruolo in azienda Degrado delle prestazioni in seguito ad insoddisfazione o 'stress'

Tabella 4. Perdita di un collaboratore

Fonte: La tutela del capitale intellettuale, G. Butti – www.sicurezzainternazionale.gov.it

³ G. BUTTI, *La tutela del capitale intellettuale*, Il Mondo dell'intelligence – Sistema di Informazione per la sicurezza della Repubblica, Roma 2016, <http://www.sicurezzainternazionale.gov.it/sisr.nsf/aziende-e-sicurezza/la-tutela-del-capitaleintellettuale.htm>

4. Implementare la comunità operativa

La continuità operativa di un'azienda è sempre più spesso condizionata dal corretto funzionamento del suo sistema informativo.

Riveste quindi un ruolo particolarmente importante la continuità dei servizi IT.

Al riguardo il settore bancario ha una specifica normativa dal 2004; in seguito altri settori, come la PA, hanno emesso specifiche normative sulla continuità operativa.

Adeguato posizionamento all'interno dell'edificio Uso del locale unicamente come CED
Pareti soffitto/pavimento senza discontinuità Pareti di adeguato spessore e robustezza
Misure anti effrazione Controllo accessi Videosorveglianza
Rilevatori di fumo, di calore, di allagamento Misure antincendio idonee all'uso con le apparecchiature presenti Interruttore generale dell'alimentazione elettrica Misure per la continuità elettrica Gruppo di continuità e stabilizzatore Gruppo elettrogeno Coerenza fra i dispositivi di continuità e le normative VVFF
Impianto di climatizzazione
Porte antincendio di adeguata dimensione Pavimento galleggiante per l'adeguato posizionamento dei cavi
Corretto ed ordinato posizionamento dei cavi di alimentazione Corretto ed ordinato posizionamento dei cavi di rete Identificazione dei cavi
Posizionamento ordinato delle apparecchiature nei rack Spazio intorno ai rack adeguato per la movimentazione e manutenzione delle apparecchiature
Gestione remota delle apparecchiature

Tabella 5a. Protezione di un CED (Fonte: Sicurezza totale 4.0, G.Butti – ITER)

VIRUS e PROGRAMMI PERICOLOSI Misure tecniche ed organizzative per la protezione del sistema informativo da software malevolo	Presenza di antivirus su tutte le postazioni Processo di aggiornamento Processo di scansione
	Aspetti organizzativi e gestionali Procedura in caso di allerta Procedura per la gestione di utility che possono bypassare le normali misure di sicurezza Istruzioni che vietano l'uso di file o software non autorizzati
FIREWALL Misure tecniche ed organizzative per la protezione del sistema informativo da intrusioni principalmente dalle reti esterne (internet, outsourcer, partner....)	Presenza di firewall centralizzato e/o personale, adeguatamente configurato
	Aspetti organizzativi e gestionali Procedura di aggiornamento Procedura di monitoraggio Procedura in caso di allerta
RETE COMUNICAZIONI Misure tecniche per la realizzazione	Uso di cablaggio adeguato Segmentazione fisica Protezione fisica dei cavi lungo tutto il loro percorso e di tutti gli apparati di rete Segmentazione logica Uso di protocolli sicuri Disabilitazione protocolli non sicuri Uso VPN Crittografia nella trasmissione Uso di certificati Creazione DMZ per server esposti Firewall opportunamente configurati
	Aspetti organizzativi e gestionali Revisione periodica della configurazione Monitoraggio delle prestazioni Monitoraggio dei tentativi di accesso fraudolenti Aggiornamento periodico del software Gestione delle vulnerabilità degli apparati di rete Gestione degli accessi esterni (VPN, RAS...)
MONITORAGGIO Strumenti disponibili per l'attività di monitoraggio	IDS IPS Sniffer Network scanner Content Filtering Correlazione di eventi
	Aspetti organizzativi e gestionali Verifica degli aspetti normativi per l'uso dei dispositivi di monitoraggio Sincronizzazione dei sistemi Registrazione dei log Raccolta e gestione dei log per fini interni Raccolta e gestione dei log per opponibilità a terzi Analisi dei log

Tabella 5b. Misure di sicurezza logica

VULNERABILITA' Misure tecniche ed organizzative per gestire le vulnerabilità dei sistemi	Vulnerability assessment periodico Hardening dei sistemi Attivazione di processi automatici di aggiornamento
	Aspetti organizzativi e gestionali Mappatura dei sistemi Definizione delle modalità di gestione delle vulnerabilità (manuale o automatica) Procedura di allertamento Procedura di valutazione Procedura di installazione o modifica configurazioni
(*) HARDENING Processo per la messa in sicurezza dei sistemi	Disattivazione delle funzionalità di servizi inutili Adeguata configurazione Revisione periodica
AGGIORNAMENTO SISTEMI Misure tecniche ed organizzative per gestire gli aggiornamenti dei sistemi non legati ad aspetti di sicurezza	Gestione patch
	Aspetti organizzativi e gestionali Mappatura dei sistemi Definizione delle modalità di gestione degli aggiornamenti (manuale o automatica) Procedura di allertamento Procedura di valutazione Procedura di installazione

Tabella 5c. Misure di sicurezza logica

Va precisato che entrambe le normative, pur dando larga enfasi alla continuità del sistema informativo, hanno come punto di attenzione la continuità della azienda nel suo complesso, anche per le parti non strettamente IT.

È in tale contesto che fanno la loro comparsa termini come Alta Affidabilità (alta disponibilità), *Disaster Recovery* (nel seguito *DR*) e *Business Continuity* (nel seguito *BC*) che pur esprimendo concetti molto diversi fra loro, sono tutti orientati a garantire la continuità di un servizio. È assolutamente fondamentale che questi termini siano condivisi nel loro significato fra tutti gli attori, siano essi interni o esterni, coinvolti nella progettazione, realizzazione e gestione di una soluzione atta a garantire la resilienza di un'azienda.

Tabella 6. Impatti diretti, indiretti e consequenziali
(Fonte: Sicurezza totale 4.0, G. Butti – ITER)

Descrizione del bene	Disco fisso
Impatto diretto	Rottura
Impatti indiretti	Perdita dati Interruzione del servizio
Impatti consequenziali	Perdite economiche Danno di immagine Rischio legale

5. Alta Affidabilità

Per Alta Affidabilità si intende la capacità di un sistema di resistere a situazioni locali, anche estese di guasto (perdita di un singolo componente di un server: disco, alimentatore, scheda di rete..., di un intero server, di un apparato di rete, di un intero locale CED), al fine di consentire la continuità nell'erogazione del servizio.

Le soluzioni normalmente adottate si basano sulla duplicazione degli elementi e sulla predisposizione di infrastrutture in grado di contrastare i rischi più comuni (mancanza di alimentazione, incendio, allagamento...). Si va dalla semplice ridondanza dei componenti, fino alla replica di un intero gruppo di server o alla replica di interi locali CED, collocandoli in posizioni tra loro più o meno geograficamente distanti.

La ridondanza può comprendere gli impianti di alimentazione elettrica, il cablaggio di rete, i sistemi di condizionamento e tutti gli altri apparati che servono a garantire il corretto funzionamento degli apparati IT, gli apparati di rete e la rete geografica (instradata su percorsi diversi e spesso di differenti operatori). Il tutto commisurato ovviamente al risultato che si desidera ottenere e al rapporto fra i costi e i benefici attesi.

In una piccola/media azienda è già molto se si vi è una ridondanza di server, mentre in una banca non è raro trovare duplicate intere stanze del CED, nello stesso edificio o in edifici vicini in un campus di dimensioni limitate (il confine fra Alta Affidabilità e *DR* in questi casi può essere molto labile e limitarsi alla semplice definizione). Questo consente ovviamente di mantenere con facilità un sincronismo dei dati, che sono duplicati o replicati nel continuo due o più volte sui vari dispositivi di storage.

La ridondanza dei vari apparati può essere molto costosa, ma è assolutamente indispensabile evitare che esistano componenti non ridondati il cui guasto possa compromettere tutta l'architettura.

Altro aspetto molto importante è la corretta progettazione e disposizione dei vari elementi (ad esempio è poco utile avere due router, di cui uno sia il backup dell'altro, posizionati nello stesso *rack*).

Altri errori da evitare sono ad esempio il posizionamento delle batterie tampone all'interno del CED, il posizionamento di apparecchiature elettriche sotto un condizionatore che potrebbe perdere liquidi, la mancanza di un accordo formalizzato con un fornitore per un rifornimento garantito di carburante anche nel week end, la mancata ridondanza dell'impianto di condizionamento ...

Mentre una grossa azienda dispone probabilmente di una propria autonoma sede, molte realtà anche significative hanno la loro sede in edifici condivisi con altre organizzazioni, il cui livello di sicurezza non è noto a priori. In un contesto di promiscuità con altre organizzazioni vanno quindi valutati molti altri fattori; ad esempio il fatto che il proprio CED possa essere allagato da infiltrazioni d'acqua dei locali soprastanti, o che il proprio personale debba essere sgombrato a causa di un incendio al piano sottostante (esperienza questa vissuta in prima persona dall'autore).

Il CED dovrebbe essere raggiungibile e gestibile il più possibile da remoto, onde evitare un'interruzione del servizio derivante dalla irraggiungibilità o inagibilità fisica dello stesso.

Chi progetta l'Alta Affidabilità pensa solitamente che sia sufficiente garantire che gli apparati del CED possano restare operativi anche in situazioni critiche.

Raro è infatti il caso che vengano posti sotto gruppo di continuità le postazioni utente o l'illuminazione degli uffici, con la conseguenza che i servizi del CED sono attivi, senza che però nessuno li possa utilizzare.

In fase di progettazione di una soluzione in Alta Affidabilità del proprio sistema informativo sarà quindi necessario prendere in considerazione l'intera catena degli elementi che possano garantire un servizio per l'utente finale.

Alta affidabilità	La capacità di un sistema di resistere a situazioni locali, anche estese di guasto (perdita di un singolo componente di un server: disco, alimentatore, scheda di rete..., di un intero server, di un apparato di rete, di un intero locale CED), al fine di consentire la continuità nell'erogazione del servizio.
Disaster Recovery	Il DR si occupa di garantire la continuità del servizio ICT in caso di guasto esteso/distruzione del sistema informativo o infrastruttura fisica che lo ospita.
Business Continuity	La business continuity si occupa della continuità del business. Si tratta di un tema più ampio e complesso della semplice capacità di ripristinare il sistema informativo di un'organizzazione.

Tabella 7. I termini della continuità operativa

6. Le soluzioni per il DR

L'Alta Affidabilità non è un'alternativa al DR e non va con questo confusa. Un danneggiamento esteso, che comprometta il corretto funzionamento del sito primario (o la sua agibilità), richiederà necessariamente la disponibilità di un sito alternativo dove poter ripartire. Una copia di dati, sistemi, applicazioni, configurazioni e relativa documentazione dovrà quindi essere sempre disponibile e utilizzabile, in un luogo adeguatamente lontano dal sito principale.

Tra la situazione estrema e quella di regolare erogazione dei servizi ci sono molti stadi intermedi, che andrebbero definiti e valutati a priori, in modo da non lasciare incertezze nella corretta gestione dei casi di emergenza.

L'attivazione del piano di DR è infatti un'attività molto rischiosa e spesso senza ritorno, che quindi va effettuata con le dovute cautele: si attivano le azioni di DR proprio quando non è possibile farne a meno.

Nella pratica esistono inoltre diverse situazioni di malfunzionamento del sistema informativo per le quali né l'Alta Affidabilità, né il DR costituiscono un rimedio.

Oltre alle problematiche che possono derivare da un attacco cyber, si è già citato come anche un semplice malfunzionamento di un applicativo può bloccare per ore l'erogazione di un servizio IT. Questo aspetto va adeguatamente valutato al fine di distinguere la vera emergenza dalla

normale operatività. Nelle due situazioni, anche se apparentemente simili come risultato finale (una mancata erogazione del servizio) posso valere regole operative e ruoli gerarchici diversi.

Per quanto attiene alle possibili soluzioni per il *DR*, queste variano moltissimo, in funzione delle architetture, dei tempi di ripristino richiesti, dei budget allocati.

Per una piccola/media azienda il *DR* può essere costituito dalla copia di dati, applicazioni, configurazioni e da un adeguato contratto di assistenza che consenta di ripristinare nel più breve tempo possibile l'uso di server e apparecchiature, installandovi le copie dei dati e del software precedentemente salvati.

La cosa più importante in questo caso è disporre dell'opportuna documentazione di tutte le configurazioni presenti.

Per massimizzare la possibilità di ripristino della operatività è utile in questi casi concentrare in un unico repository tutti i file vitali per l'azienda, siano essi costituiti da data base o archivi destrutturati, ivi inclusi tutti quelli creati con i *tool* di produttività individuale. La *policy* dell'azienda deve vietare agli operatori di poter salvare file indispensabili per lo svolgimento del proprio lavoro sulle proprie postazioni individuali (condizione questa che si può effettivamente verificare solo in fase di test). Le organizzazioni, anche le più grandi, fanno un larghissimo uso di applicazioni realizzate direttamente dagli utenti mediante strumenti di produttività individuale, di norma non censite e della cui importanza si ha evidenza solo quando non sono più disponibili.

Per le organizzazioni di grosse dimensioni, o meglio per l'azienda che hanno *Data Center* significativi, il problema è molto più articolato; sono infatti sufficienti pochi elementi non replicati o non aggiornati (e quindi non allineati) per rischiare di vanificare tutto il lavoro svolto o quantomeno per richiedere significative attività di analisi e operativa per riattivare il corretto funzionamento del CED. È al riguardo indispensabile un consistente e aggiornato apparato documentale, che consenta di avere sotto controllo tutti i componenti che costituiscono il CED, le loro configurazioni, le loro interdipendenze. Tale documentazione deve essere sempre accessibile e quindi non deve essere conservata sugli stessi server che è necessario ripristinare.

È pertanto necessario predisporre un vero e proprio piano di *DR* nel quale occorre specificare dettagliatamente gli strumenti da adottare e le azioni da eseguire in via preventiva (in fase di progettazione e implementazione) e in caso di incidente, sia da parte degli operatori incaricati di gestire l'ordinaria amministrazione, sia da quelli responsabili della riattivazione del sito secondario (questi ultimi è buona norma che non siano quelli che gestiscono il sito primario, in quanto potrebbero risultare non disponibili proprio in conseguenza dell'incidente che ha coinvolto tale sito). Il piano deve essere costantemente aggiornato e verificato, cosa che può risultare particolarmente onerosa e complessa.

7. La realizzazione del sito secondario

Se un'azienda ha deciso di attrezzarsi con due siti alternativi, deve seguire dei criteri ben definiti per il loro allestimento. Ad esempio, i siti

primario e secondario devono essere sufficientemente distanti per garantire il non coinvolgimento contemporaneo degli stessi da un evento distruttivo esteso, tipo un terremoto. La scelta del sito secondario dovrebbe inoltre tener conto anche della raggiungibilità del sito stesso da parte del personale che dovrà poi gestirlo.

I tempi di ripartenza dei sistemi in *DR* non sono infatti condizionati solo da aspetti tecnici, ma anche dalla disponibilità del personale incaricato della sua gestione. Di conseguenza, posizionare un sito di *DR* in una località difficilmente raggiungibile, o che richieda tempi di percorrenza molto elevati, può rivelarsi una pessima idea.

Una buona soluzione consiste nel prevedere la possibilità di gestione remota del sito dopo la sua attivazione, cosa che risulta molto favorita dalle scelte che puntano sull'outsourcing del servizio, includendovi anche il supporto del personale tecnico. In questo caso, particolare attenzione va data agli aspetti contrattuali e al tipo di servizio offerto. Molto spesso, infatti, l'outsourcer "vende" spazi e potenza elaborativa da utilizzare in caso di emergenza a più clienti contemporaneamente. Diventa quindi importante valutare quale sia l'effettiva garanzia di continuità offerta dai fornitori, in particolare nei casi in cui molti clienti della stessa area geografica siano interessati da uno stesso evento dannoso e richiedano contemporaneamente l'attivazione del proprio servizio di *DR*.

Le architetture sulle quali impostare il servizio sono numerose, per cui occorre valutare bene quelle che più si addicono alle proprie esigenze.

Si possono distinguere in funzione del fatto che presso il sito di *DR* siano disponibili solo spazi per accogliere i sistemi, che siano presenti sistemi spenti, che siano presenti sistemi attivi ma condivisi, che siano presenti sistemi attivi e continuamente allineati con il sistema di produzione. Per quest'ultima soluzione sono disponibili diverse varianti: ad esempio i sistemi nel sito di *DR* possono essere utilizzati contestualmente a quelli di produzione per bilanciare il carico, oppure possono essere utilizzati per svolgere altri compiti (ad esempio sviluppo e test).

Avere sistemi già attivi nel sito di *DR* garantisce di solito tempi di ripartenza più contenuti, ma soprattutto garantisce l'azienda circa l'effettivo funzionamento dei sistemi.

Un sito di *DR* può non contenere tutti gli elementi del sito primario, per un'evidente ragione di costi e opportunità. Per lo stesso motivo un'azienda può decidere di non garantire lo stesso livello di servizio quando questo è offerto dal sito primario o da quello secondario. Rimane tuttavia fondamentale, nella individuazione dei componenti che costituiranno il sito secondario, includere non solo i componenti più critici per l'attività della azienda, ma anche quelli architettonici a loro supporto. È infatti poco utile ripristinare un mainframe con relative applicazioni e dati, se non si ripristina il sistema che consente agli utenti di raggiungerlo (ad esempio il sistema di autenticazione e di instradamento).

LIVELLI DELLE SOLUZIONI (Tier LG)	PRINCIPALI INDICATORI			ELEMENTI DI MASSIMA DELLA SOLUZIONE TECNICA (SOLUZIONI ALMENO A 2 SITI)	
	RTO		RPO max	Modalità minime di copia/aggiornamento per il conseguimento dei valori max di RPO	Aspetti minimali connessi al sito di DR
	Min	Max			
Tier 1:	7g	>7 gg solari	max 7gg solari	Copia su supporti rimuovibili	Sito esistente ma da attrezzare con risorse elaborative/ server solo reperibili. Il sito di DR è predisposto ad accogliere personale e apparecchiature, ma rimane privo di risorse fino al momento di effettiva necessità. Di solito consiste solo di un ambiente fisico dotato di corrente elettrica e di rete dati con idonee misure di sicurezza (es: sistema antincendio ed antifumo; sistema antiallagamento; sistema di alimentazione in grado di garantire l'erogazione di energia elettrica anche a fronte di prolungate interruzioni di alimentazione nella cabina di fornitura; sistema d'aria condizionata per garantire temperatura ed umidità costante; impianto per il ricambio d'aria; sistema di accesso controllato).
Tier 2:	3g	max 7 gg	max 7 gg solari	Copia su supporti rimuovibili	Il sito dispone di hw e connettività già funzionante ma su scala inferiore rispetto al sito principale o a un sito alternativo sempre disponibile e con replica costante dei dati.
Tier 3:	1g	3g	Max 1 gg	Electronic vaulting: soluzione che comporta il backup dei dati presso il sito alternativo in maniera elettronica, con una riduzione del tempo necessario per il trasporto dei dati e la possibilità di un recovery time più veloce.	Il sito dispone di hardware e connettività già funzionante ma su scala inferiore rispetto al sito principale o ad un sito alternativo sempre disponibile e con replica costante dei dati. Il backup avviene in modalità elettronica e quindi sono necessari collegamenti fra i siti tenuto conto della tipologia, quantità e periodicità dei dati da backupare

Tabella 8a. Possibili soluzioni per il DR Fonte: Linee guida per il Disaster Recovery (DR) delle PA

Nella pratica più un sistema è complesso e più è difficile che la ripartenza avvenga senza problemi (salvo il caso in cui i due siti siano contemporaneamente attivi e allineati). Essendo infatti impossibile gestire una ripartenza in blocco di tutti i sistemi e applicazioni di un CED di medie dimensioni si possono generare dei disallineamenti fra i dati in quanto un'applicazione ripristinata potrebbe inoltrare (o aspettare) flussi di dati da applicazioni non ancora ripristinate. Va inoltre considerato che difficilmente un sistema informativo di una certa complessità non scambi flussi con applicazioni di outsourcer e fornitori, che devono essere raggiungibili anche dal sito di DR.

LIVELLI DELLE SOLUZIONI (Tier LG)	PRINCIPALI INDICATORI		ELEMENTI DI MASSIMA DELLA SOLUZIONE TECNICA (SOLUZIONI ALMENO A 2 SITI)		
	RTO		RPO max	Modalità minime di copia/aggiornamento per il conseguimento dei valori max di RPO	Aspetti minimali connessi al sito di DR
	Min	Max			
Tier 4:	4h	3gg	Max 4 h	Asincrono On line (risorsa storage accesa)	Il sito alternativo è solitamente "un duplicato" del sito originale con tutti i sistemi hardware e la quasi totalità dei backup di dati disponibile. Il sito alternativo può essere pronto ed operativo in alcune ore o meno. Nel caso in cui il personale deve essere spostato fisicamente presso il sito secondario, il sito risulterà operativo solo dal punto di vista del data processing. La piena operatività sarà raggiunta quando anche il personale avrà raggiunto il sito.
Tier 5:	1h	max 4 h	max 5 min	Aggiornamento Sincrono (risorsa storage accesa)	E' la soluzione che prevede due siti attivi ciascuno con capacità sufficiente a prendere in carico il lavoro dell'altro e in cui l'aggiornamento del dato avviene solo quando entrambi i siti hanno completato l'update (con perdita dei soli i dati che in quel momento stanno per essere processati). E' fondamentale, per questa tipologia di soluzione, valutare la distanza fra i siti.
Tier 6:	0m	1h	Zero min.	Aggiornamento Sincrono (risorsa storage accesa)	E' la soluzione che prevede due siti attivi, ognuno dei quali possiede capacità sufficienti a farsi carico del lavoro dell'altro; in questa soluzione il carico di lavoro da un sito all'altro si trasferisce immediatamente ed automaticamente. E' fondamentale, per questa tipologia di soluzione, valutare la distanza fra i siti.

Tabella 8b. Possibili soluzioni per il DR Fonte: Linee guida per il Disaster Recovery (DR) delle PA

8. Le soluzioni di business continuity

La *business continuity*, come il nome stesso porta a intuire, si occupa della continuità del *business*.

Si tratta di un tema più ampio e complesso della semplice capacità di ripristinare il sistema informativo di un'azienda.

Banca d'Italia ad esempio ha previsto, nella Circolare 285, che le banche debbano predisporre un piano di BC che:

prende in considerazione diversi scenari di crisi basati almeno sui seguenti fattori di rischio, conseguenti a eventi naturali o attività umana, inclusi danneggiamenti gravi da parte di dipendenti:

- distruzione o inaccessibilità di strutture nelle quali sono allocate unità operative o indisponibilità di personale essenziale per il funzionamento dei processi aziendali
- interruzione del funzionamento delle infrastrutture (tra cui energia elettrica, reti di telecomunicazione, reti interbancarie, mercati finanziari)
- alterazione o perdita di dati e documenti critici
- apparecchiature critiche
- indisponibilità di sistemi informativi critici.

Tali scenari interessano in realtà anche tutte le altre organizzazioni che erogano servizi o per le quali la gestione delle informazioni costituisce una componente essenziale per garantire la produzione. Per le aziende manifatturiere tali scenari andrebbero integrati aggiungendo, ad esempio, l'indisponibilità di una linea di produzione o la mancanza di semilavorati o materie prime.

In generale la capacità di continuare la propria attività è condizionata almeno dai seguenti fattori:

- disponibilità di strumenti
- disponibilità di informazioni
- disponibilità dei collaboratori (in particolare delle figure chiave)

ai quali si aggiungono per le aziende di produzione:

- disponibilità di materie prime, semilavorati, infrastrutture, impianti...

Deve essere inoltre disponibile un edificio con le opportune infrastrutture in cui collocare quanto sopra.

La disponibilità di un sito alternativo di produzione rispetto a quello principale si può configurare con varie modalità, analogamente a quanto avviene per le soluzioni di DR dei sistemi informativi.

È possibile disporre di un sito in cui si svolga effettivamente la produzione nel continuo (non necessariamente dello stesso prodotto), o

che sia semplicemente pronto a farla o che possa ospitare l'attività produttiva.

È anche possibile in alternativa ricorrere a terzi che possano subentrare temporaneamente all'attività mediante un contratto di appalto ovvero individuare i possibili fornitori (e monitorarli nel continuo) presso i quali acquisire in tempi rapidi tutto ciò che serva per far ripartire la produzione.

Quello che conta è che quanto sopra non sia lasciato al caso e che siano allocati i relativi budget.

Molte delle informazioni di cui è necessario disporre per predisporre soluzioni di continuità operativa dovrebbero già essere disponibili presso le organizzazioni in quanto necessarie per il rispetto di normative quali il GDPR che richiede la mappatura di:

- sistema informativo
- archivi elettronici
- documenti
- processi e attività
- struttura organizzativa
- controparti
- ...

Le verifiche effettuate nel corso della mia attività di consulenza presso numerosissime organizzazioni dei più disparati settori e dimensioni hanno di fatto evidenziano le seguenti carenze:

- mancanza di documentazione
- assenza di una mappatura e formalizzazione dei processi
- parti di processi chiave non documentate
- eccessivo ricorso a figure chiave, in particolare nelle organizzazioni medio piccole
- ampio uso di applicazioni di operatività individuale in aggiunta al sistema informativo dell'azienda
- dispersione nella archiviazione dei file, molto spesso collocati anche sui singoli pc in uso ai collaboratori
- assenza di un censimento della documentazione presente al di fuori del sistema informativo
- mancanza di qualunque classificazione delle informazioni.

Inoltre molte delle informazioni che servono a un'azienda sono ancora presenti unicamente al di fuori del sistema informativo; vi è ancora un largo uso di documenti, spesso per esigenze legali e contrattuali.

Tali documenti rivestono particolare rilevanza per un'azienda, ma nessuno si preoccupa di custodirne una copia in un luogo diverso dal sito principale (analogamente a quanto dovrebbe avvenire per le copie di *backup*), o di procedere a una loro digitalizzazione o meglio ancora alla loro eliminazione sostituendoli con documenti informatici di analoga valenza legale.

Anche nel caso di una adeguata documentazione quello che si riesce a mappare è comunque solo la componente esplicita del patrimonio informativo dell'azienda, la parte cioè formalizzata. La componente implicita, patrimonio molto spesso di singoli collaboratori, è esclusa da questo censimento, salvo poi costituire l'elemento chiave per consentire o no la ripresa dell'attività.

Anche il legislatore se ne è accorto e uno degli scenari previsti da Banca d'Italia è proprio l'indisponibilità di personale essenziale per il funzionamento dell'azienda.

Nell'accezione bancaria si tratta del personale che presiede i processi critici o vitali (molto spesso legati all'area finanza), che in un corretto piano di *business continuity* è sostituibile con altro personale che abbia le stesse competenze, che possibilmente utilizzi gli stessi strumenti e che possibilmente operi in un'altra località (in questo modo viene coperto anche lo scenario della indisponibilità di un sito, in quanto spesso i due eventi sono fra loro collegati).

Nel caso di una piccola azienda può essere difficile trovare un idoneo sostituto di una figura chiave ed è per questo motivo che, come precedentemente illustrato, i processi critici o vitali dell'azienda dovrebbero essere il più possibile documentati (il tutto da conciliare con le indispensabili esigenze di riservatezza).

Alcune tipologie di servizi conservano rilevanti quantità di documenti, quasi sempre in originale, che in caso di distruzione (incendio, alluvione...) comportano da un lato danni gravissimi per i clienti e dall'altro un costo enorme per la ricostruzione degli stessi (dove possibile) e per la ripresa dell'attività.

Nel caso specifico, un semplice accorgimento come la conservazione delle sole copie (lasciando ai clienti la responsabilità della conservazione degli originali) ridurrebbe drasticamente i rischi e consentirebbe una più agevole ripresa del lavoro.

Altro punto di difficile attuazione per una piccola e media azienda è la predisposizione di soluzioni relative a uno scenario come la distruzione o l'inaccessibilità di strutture nelle quali siano allocate unità operative o apparecchiature critiche. Per una società di servizi parte del problema può essere risolto localizzando i sistemi presso un outsourcer o facendo ricorso a soluzioni cloud e predisponendo come possibili fonti di accesso postazioni mobili o telelavoro.

Le soluzioni cloud costituiscono probabilmente oggi una delle soluzioni più percorribili per le piccole e medie organizzazioni, per aumentare considerevolmente la propria resilienza esternalizzando i propri sistemi informativi, con la possibilità di includere nel servizio anche la loro continuità operativa.

Non mancano anche esempi concreti di società manifatturiere che hanno saputo esternalizzare molte attività (dalla progettazione alla produzione) concentrando in spazi molto limitati le sole attività di coordinamento e marketing.

Esternalizzazione, diversificazione anche geografica delle unità produttive, così come diversificazione dei fornitori, costituiscono alcune delle possibili strategie di continuità anche per le aziende di produzione.

9. Le attività di test

Le attività di test dovrebbero avere la finalità di confermare il corretto funzionamento delle soluzioni implementate e di individuare le criticità al fine di risolverle. Per tale motivo dovrebbero essere svolte (gradualmente) anche in condizioni che rispecchino situazioni critiche reali, come i periodi di ferie o importanti attività di manutenzioni dei sistemi.

Le possibili attività di test sono molteplici e devono partire dalle verifiche dei singoli componenti di un sistema, sia quelli del sito primario, sia quelli del sito secondario (nel caso in cui sia attivo un sito di *DR*), quali apparati di elaborazione, apparati di archiviazione dati, configurazioni per la ripartenza, fino al test complessivo dell'intero sito.

Vanno testati tutti gli impianti (impianto elettrico, LAN e relativi componenti, connettività esterna, continuità elettrica, condizionamento, controllo accessi e videosorveglianza, antincendio, antiallagamento) e gli elementi ridondati. Tali attività vanno però eseguite con "intelligenza". Emblematico è il caso dei test dei gruppi elettrogeni, che si risolve nella maggior parte dei casi con una prova annuale del loro corretto funzionamento per un tempo molto limitato. La conseguenza di questa modalità di svolgimento del test è che il carburante permane nei serbatoi anche per anni, con effetti deleteri sulle valvole e sul galleggiante che misura il livello di carburante. Il risultato è che in una vera emergenza l'erogazione del carburante può bloccarsi per un malfunzionamento di uno di questi componenti del valore di pochi euro, vanificando così tutto il lavoro svolto.

L'esempio non è un caso isolato. Basta visitare un qualunque CED per trovare accatastati scatoloni di ogni genere in conseguenza delle costanti attività di manutenzione, spesso posizionati nelle vie di fuga o davanti agli ugelli del sistema antincendio.

È piuttosto raro che le organizzazioni, anche molto grandi, dispongano in autonomia di un sito di *DR*; molto più spesso ricorrono a servizi in outsourcing, nel qual caso la possibilità di effettuare dei test è condizionata dalla disponibilità dei tecnici del fornitore e dagli spazi dove allocare le proprie risorse presso l'outsourcer.

Il periodo per compiere i test è pertanto limitato a pochi giorni in un anno. Per ovviare a questo inconveniente è opportuno prevedere lo svolgimento di test anche presso la propria struttura. Ad esempio, la verifica puntuale della leggibilità e capacità di ripristino dei singoli componenti dei sistemi può essere fatta anche in locale, isolando opportunamente porzioni adeguate del sistema.

L'attività di test della continuità operativa per la parte non *IT* deve prevedere ad esempio l'indisponibilità di un edificio o di personale critico. In teoria in mancanza di un edificio sarebbe possibile utilizzare le stesse risorse spostandole in un'area appositamente attrezzata a tale scopo.

Questo tipo di soluzione, peraltro molto diffusa, ha il limite di non prendere in considerazione l'indisponibilità proprio delle risorse. Peraltro tale soluzione potrebbe risultare più costosa della effettiva dislocazione di risorse in luoghi diversi, essendo necessario mantenere

costantemente allineate alle postazioni principali le postazioni di riserva di solito inutilizzate, pagando comunque le relative licenze software e le relative attività di manutenzione. Pur non simulando un malfunzionamento del sistema informativo, l'esperienza ha evidenziato che un test di questo tipo comporta il coinvolgimento di diversi aspetti *ICT*. Come in precedenza accennato, solo durante i test è possibile scoprire se gli utenti utilizzano per la loro operatività strumenti di produttività individuale con cui hanno realizzato file salvati sulle proprie postazioni (spesso con macro e path assoluti), documenti, apparecchiature particolari (ad esempio telefoni con registrazione della chiamata).

Va inoltre considerato il fatto che un evento che comporta il ricorso, ad esempio, allo sgombero di un edificio e alla invocazione del piano di *BC* può accadere in qualunque momento e quindi il personale che dal sito alternativo prende in carico le varie attività troverà delle applicazioni aperte e dei file bloccati. L'*IT* dovrà quindi intervenire per sbloccare da remoto tali situazioni e per attribuire le corrette credenziali al personale subentrante.

Le modalità di svolgimento dei test di continuità operativa possono comprendere anche esercizi prettamente teorici, dedicati in particolare a verificare la preparazione del personale coinvolto e delle procedure di invocazione e gestione della crisi.

In considerazione della interconnessione con altri soggetti è inoltre necessario partecipare anche ai test di terzi e verificare, nel caso in cui due soggetti abbiano entrambi dei siti di *DR* che in situazioni di emergenza effettivamente funzioni tutte le possibili combinazioni di collegamento fra i siti (primario su *DR* e *DR* su *DR*).

Conclusioni

Garantire la resilienza di un'azienda richiede una attenta valutazione di numerosi fattori (secondo una logica di costi e benefici proporzionali agli obiettivi individuati), molti dei quali riguardano soggetti esterni all'azienda stessa.

Un esercizio complesso, per il quale le organizzazioni sono poco o per nulla attrezzate, ma sempre più necessario in una realtà sempre più interconnessa.

Note

Il testo di questo lavoro riprende stralci del contenuto degli articoli pubblicati dall'autore sulla rivista **Toolnews** (*BCI - Itware*):

- *Business Continuity, Alta Affidabilità, Disaster Recovery: limiti e confini*
- *Il Cloud Computing, soluzione ideale per il Disaster Recovery*
- *L'occhio dell'auditor sui piani di Business Continuity, per legge e necessità*