

**Dario De Leonardis**  
(Ricercatore  
dell'Università "La  
Sapienza" di Roma  
presso Istituto  
Superiore delle  
Comunicazioni e delle  
Tecnologie  
dell'Informazione)

**Frank Silvio  
Marzano**  
(Dipartimento di  
Ingegneria  
dell'Informazione,  
Elettronica e  
Telecomunicazioni  
dell'Università "La  
Sapienza" di Roma)

**Silvia Di Bartolo,  
Vincenzo Attanasio**  
(Istituto Superiore  
delle Comunicazioni e  
delle Tecnologie  
dell'Informazione)

## Collegamenti ibridi Free-Space Optics/Radio Frequency (FSO/RF) per rete di fronthaul all'interno del paradigma 5G

**Hybrid Free-Space Optics / Radio Frequency (FSO/RF) links for fronthaul network within 5G paradigm**

**Sommario:** I sistemi di trasmissione ibridi Free Space Optics / Radio Frequency (FSO/RF) sono emersi recentemente come una delle soluzioni ottimali di integrazione con le tratte in fibra ottica, per mantenere alti flussi-dati in quella sezione della rete, in letteratura tecnica nota come fronthaul, che realizza l'accesso al backhaul: queste due sezioni della rete costituiscono un ponte tra le stazioni radio-base e la rete centrale, il quale permette di superare il cosiddetto problema del collo di bottiglia in merito alla distribuzione del carico informativo tra le maglie del sistema radio-mobile. Ai progressi in termini di efficienza nell'impiego delle risorse, la soluzione ibrida FSO/RF aggiunge altri vantaggi, come quelli derivanti dalla riduzione del consumo energetico e dei costi di dispiegamento della rete e si candida pertanto come una delle più innovative forme di integrazione tecnologica all'interno del paradigma 5G attualmente in linea di sviluppo. Nel presente articolo verranno messi in luce, dal punto di vista prestazionale e del costo di rete, quali e quanti gradi di libertà permettano alla tecnica di trasmissione ibrida FSO/RF di migliorare il servizio complessivo laddove i collegamenti in spazio libero si rivelano necessari per affiancare la fibra ottica nelle odierne strutture di fronthauling.

**Abstract:** Hybrid Free-Space Optics / Radio Frequency (FSO/RF) systems have recently emerged as one of the most promising solutions integrating optical fiber segments that are able to keep high data-rates in that network section, known in technical literature as fronthaul, which provides the access to backhaul: these two network sections compose a bridge between the base stations and the core network that allows to overcome the so-called matter of bottleneck with respect to the distribution of information load among the links of the radio-mobile system. Hybrid FSO/RF solution can provide other advantages besides the improvement in terms of spectral efficiency, as the ones deriving by energy saving and the reduction of deployment network costs; thus, it becomes a serious and original candidate to be one of the main technological proposals for the developing 5G paradigm. In the present paper, how the employment of FSO/RF transmission technique may improve the overall service in the case that free space links show to be necessary to sustain optical fiber in today fronthauling architectures, will be highlighted from the perspective of link performance and average network cost analysis.

## 1. Introduzione

La nuova generazione di rete mobile (5G) è proiettata verso una gestione sempre più flessibile del servizio e non si limita a conservare o migliorare quello di base (fonia) e quelli già garantiti dai precedenti modelli sviluppati (3G e 4G), ma mira anzi a inglobare altri servizi, come ad esempio “Internet of Things”, in un panorama sempre più composito e multiforme dei sistemi di telecomunicazione. Le tecnologie dispiegate per un contesto di rete così eterogeneo devono necessariamente essere varie e duttili a possibili cambiamenti infrastrutturali o di assetto nel trasferimento delle informazioni; la ricerca sta muovendo pertanto verso l’integrazione di supporti già studiati in letteratura, ma considerati ad hoc per la nuova generazione, come ad esempio le Ultra-Dense Networks (UDNs) ed il Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) massivo, per incrementare l’efficienza spettrale delle comunicazioni mobili 5G e ridurre, al contempo, il consumo energetico come necessario nello sviluppo delle reti future [1].

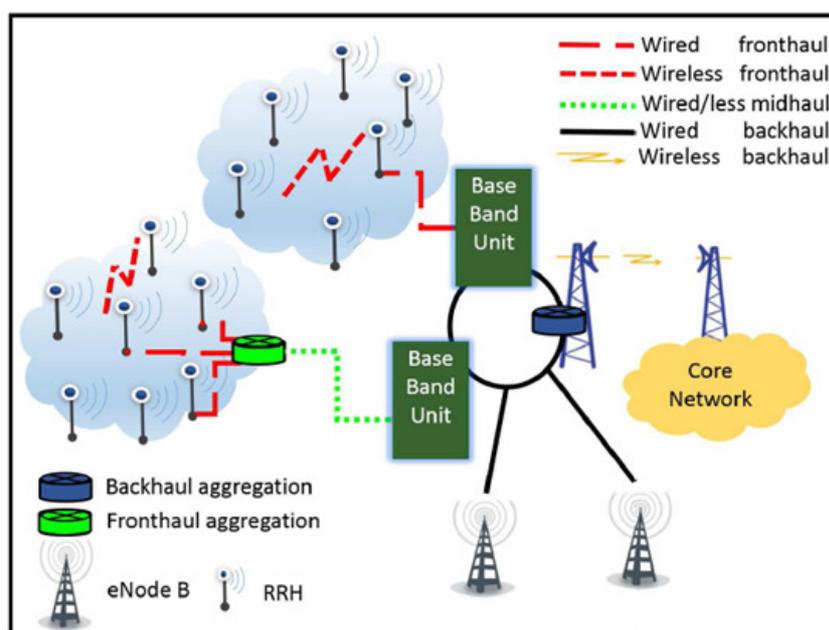


Figura 1. Esempio di rete mobile 5G, divisa in fronthaul, midhaul e backhaul:

- I) il fronthaul copre l'ultimo miglio (rete d'accesso);
- II) il midhaul riguarda il collegamento tra fronthaul e il backhaul;
- III) il backhaul connette le Base Band Units (BBUs) alla sezione centrale della rete.

Anche a livello fisico si prevede un’ampia gamma di soluzioni applicative, in particolare nel sistema costituito da fronthaul e backhaul (vedi Figura 1), quel duplice strato della rete di trasporto interna che media la comunicazione tra le stazioni radio-base (Base Transceiver Stations - BTSs), i nodi di rielaborazione del segnale noti in letteratura come Base Band Units (BBUs) e la sezione centrale della rete (core network), tradizionalmente caratterizzato da collegamenti in fibra ottica (OF) e wireless (microonde) e occasionalmente da doppino in rame o collegamenti satellitari. Uno studio condotto nel 2014 mostra che l’infrastruttura in fibra ottica per fronthaul/backhaul non è garantita in tutte le nazioni europee e il suo rimpiazzamento con collegamenti nelle microonde non sembra in grado di sostenere la crescita del traffico di

rete, per l'impiego delle tecnologie LTE, prevista nel biennio 2017-2018 [2]. E' opinione comune che un rinnovamento di questa doppia sezione della rete si rivela dunque necessario, specialmente se considerato in prospettiva del paradigma 5G. Tuttavia, bisogna aggiungere che, in Italia, la gestione delle risorse riguardanti il dimensionamento del segmento di rete del backhaul, in vista del piano 5G, verte piuttosto all'impiego massivo di soluzioni già consolidate, come la fibra ottica, in grado di creare collegamenti considerevolmente capaci per molti chilometri di distanza e garanti di affidabilità.

Diverso è il quadro relativo al segmento di rete del fronthaul, in cui la convivenza tra la fibra ottica e altre tecnologie di trasmissione come quelle in spazio libero sembra invece possibile, dal momento che la dimensione cellulare della copertura di servizio prevista dal sistema 5G risulta molto varia e dipende piuttosto dalle caratteristiche orografiche del terreno o dalla necessità di coprire solo aree geografiche ben circoscritte, nel raggio di pochi chilometri. In questo scenario, l'adozione di tecnologie di recente raffinamento quali le onde millimetriche (che, coprendo la banda compresa tra 70 e 80 GHz, possiamo considerare Radio Frequency – RF) [3] e i collegamenti ottici in spazio libero (Free Space Optics – FSO, che copre la parte dello spettro superiore ai 300 GHz) [4] permette di incrementare notevolmente la banda di trasmissione rispetto ai dispositivi che operano nelle microonde (la cui banda è compresa tra i 6 e i 60 GHz): infatti si possono sperimentare flussi-dati (throughput) di down-stream e up-stream che arrivano fino a 10 Gb/s (nelle microonde si raggiunge 1 Gb/s) anche per tratte in linea di visibilità di 3 km, senza dover cedere alle restrizioni di latenza (che resta minima) che sono tipiche dei collegamenti in spazio libero [2].

Ove non sia possibile implementare la fibra ottica per motivi orografici o di efficienza costi/benefici, la soluzione combinata delle due tecnologie (onde millimetriche e ottica di spazio libero), chiamata in letteratura sistema ibrido FSO/RF, garantirebbe persino una maggiore stabilità rispetto alla variazione delle condizioni atmosferiche e di puntamento, che rappresentano da sempre un vero tallone d'Achille per i collegamenti FSO, consentendo il recupero di segnale grazie ad una semplice commutazione.

## **2. Sistema Ibrido FSO/RF: Stato dell'Arte**

Nel contesto delle comunicazioni ottiche in spazio libero, i collegamenti ibridi FSO/RF sono al centro dell'interesse della ricerca contemporanea, specialmente per quanto attiene al dimensionamento di alcune sezioni della rete 5G (ad esempio con interventi occasionali a livello di fronthaul, come sopra osservato). Un motivo non indifferente che spinge in questa direzione riguarda non tanto la chiara possibilità di mantenere l'efficienza spettrale del collegamento, comunque garantita dai numeri di banda prima citati, ma la necessità di progettare reti a costi ridotti [5] e basso consumo energetico (meno impattanti sull'ambiente, cioè più "green" come da protocollo UE), per mezzo di

una soluzione che si mantiene purtuttavia attigua ai già collaudati impianti in fibra ottica. Oltretutto, se le tecnologie tradizionali del campo includono sistemi a radiofrequenza o in fibra ottica, è semplice intuire che un collegamento RF è più ridotto nei costi ma trasmette a più basse bit-rate rispetto ad uno OF. Pertanto, la scelta di impiegare un collegamento FSO, ridotto nei costi e potenzialmente capace in termini di bit-rate, risulta promettente, in special modo quando viene applicato in una soluzione ibrida con il sistema RF, combinazione che permette di consolidare i vantaggi di entrambe le tecniche trasmissive. Nella fattispecie, le comunicazioni ottiche in spazio libero sono molto sensibili al cambiamento delle condizioni atmosferiche e di puntamento: in particolare, la presenza di nebbia o di turbolenza (variazione dell'indice di rifrazione locale) come eventuali errori di puntamento della sorgente laser possono causare ampie fluttuazioni tanto nell'intensità quanto nella fase del segnale ricevuto e di conseguenza intaccare pesantemente le prestazioni del collegamento. Per aggirare il problema sono state proposte in letteratura diverse soluzioni, come, ad esempio, il "multi-hop relaying", che consiste nella mediazione di alcuni relays nella trasmissione dell'informazione fino a destinazione [6], e, appunto, l'ibrido FSO/RF, che accoppia due tecnologie sostanzialmente complementari, dato che FSO è sensibile a determinate condizioni atmosferiche come la nebbia, che non inficiano minimamente i dispositivi RF, i quali, di contro, risultano tuttavia molto sensibili alla caduta di forti piogge [7].

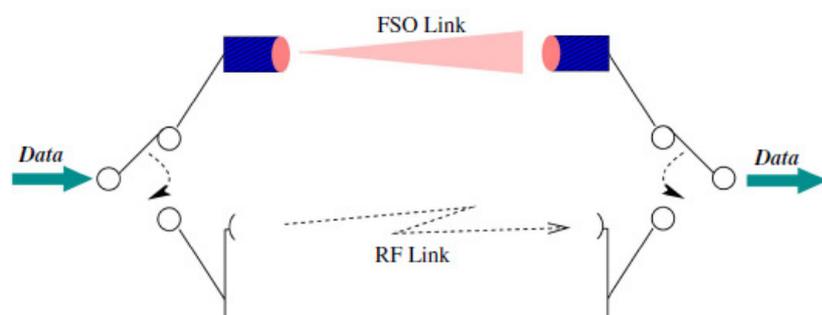


Figura 2. Diagramma a blocchi di un sistema FSO/RF ibrido con commutazione esclusiva (hard-switching)

Fondamentalmente esistono due configurazioni tipiche di sistema ibrido FSO/RF: i) a commutazione esclusiva (hard switching) - mostrato in Figura 2 - in cui, quando le condizioni atmosferiche sono perfette, il collegamento FSO è attivo ma non quello RF, viceversa altrimenti; ii) a commutazione inclusiva (soft switching), in cui i due collegamenti operano in parallelo attraverso la codifica di canale. In [8] viene mostrato un sistema di comunicazione ibrido FSO/RF basato su adaptive combining, una configurazione che permette di sfruttare al massimo le risorse spettrali: infatti, in questo scenario, finché il rapporto segnale-rumore istantaneo (Signal-to-Noise Ratio - SNR) misurato in ricezione resta al di sopra di una determinata soglia, il solo collegamento FSO resta attivo; quando tale rapporto scende al di sotto di questa, viene attivato il collegamento RF in parallelo a quello FSO e i segnali corrispondenti ai due canali di trasmissione vengono poi ricombinati in ricezione attraverso un sistema dual-branch Maximal Ratio Combining

(MRC). Questo schema permette di sommare al già considerato vantaggio del miglioramento dell'affidabilità in quanto al collegamento complessivo (che combina le caratteristiche complementari degli apparati FSO e RF) le seguenti migliorie rispetto alle configurazioni tipiche di cui sopra: i) una riduzione notevole della frequenza di commutazione (rispetto ad una configurazione tipica hard switching); ii) l'assenza di un dispositivo che irradia continuamente campo RF, che potrebbe interferire nell'ambiente circostante, oltre a causare un maggiore dispendio energetico (rispetto ad una configurazione soft switching); iii) i massimi benefici che si possono trarre da un collegamento FSO, come un alto data-rate, mantenuti per la maggior parte del tempo disponibile (sempre in relazione ad una configurazione soft switching, la quale prevede il livellamento del data-rate del collegamento FSO per poi ricombinarlo adeguatamente con il flusso parallelo proveniente dal collegamento RF). Si tratta di uno schema che rappresenta pertanto una soluzione di compromesso evidente tra le due configurazioni tipiche di switching.

### **3. Sistema Ibrido FSO/RF: Analisi delle Prestazioni**

Per quanto riguarda lo studio delle prestazioni del sistema ibrido FSO/RF, ci atteniamo alla valutazione di quei parametri che tradizionalmente vengono presi in considerazione per descrivere la qualità del collegamento, e, conseguentemente, dell'applicazione ad essa associata, cioè la probabilità di fuori servizio (outage probability), la Bit Error Probability (BER) e la capacità ergodica [9]. Procedendo secondo le assunzioni di un sistema ibrido FSO/RF standard, come quello illustrato in [10], in cui viene proposta un'architettura a bassa complessità (low-complexity) con schema di commutazione hard switching che impiega un collegamento FSO in combinazione con uno RF alle onde millimetriche (che trasmette alla frequenza di 60 GHz), ne ripercorriamo l'analisi, al fine di mostrare piuttosto chiaramente, a titolo di esempio, i vantaggi che derivano da una tecnica trasmissiva composita, nei confronti del solo collegamento ottico, a livello di prestazione.

In questo scenario di comunicazione, il collegamento FSO viene utilizzato finché il rapporto segnale-rumore istantaneo del canale ottico resta al di sopra di una data soglia  $\gamma_{th}^{FSO}$ . Quando l'SNR del collegamento FSO scende al di sotto della soglia, allora il sistema verifica la qualità del canale RF: se l'SNR di quest'ultimo è a sua volta al di sopra di una specifica soglia  $\gamma_{th}^{RF}$ , il collegamento RF viene attivato per la trasmissione. Ma se entrambi i rapporti segnale-rumore sono al di sotto delle rispettive soglie, il sistema dichiara di essere fuori servizio (outage). Gli autori di [10] definiscono  $\sigma_x$  come la varianza della distribuzione log-normale che descrive il comportamento delle fluttuazioni del segnale ottico dovute alla turbolenza e indicano con  $m$  lo shape parameter della variabile Nakagami che descrive l'andamento del canale RF.

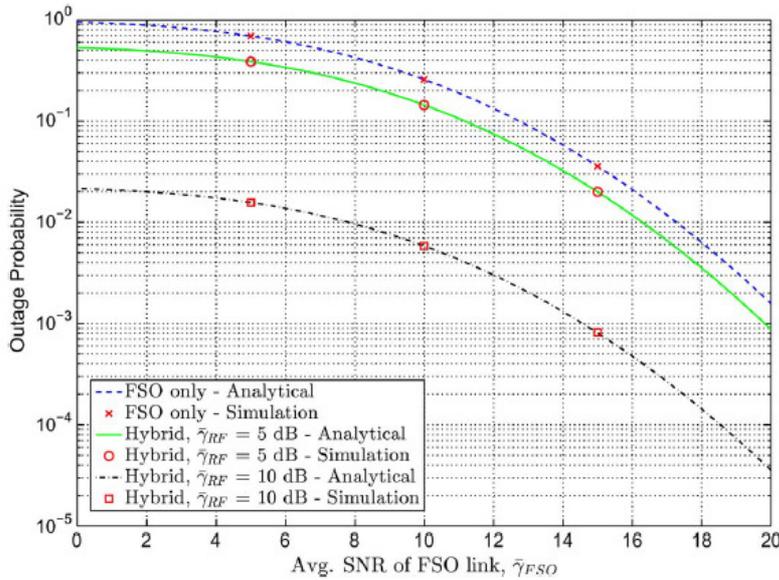


Figura 3. Probabilità di fuori servizio (outage probability) in funzione del rapporto segnale-rumore del collegamento FSO, quando le soglie  $\gamma_{th}^{FSO} = \gamma_{th}^{RF} = 5$  dB,  $m = 5$  e  $\sigma_x = 0.25$ .

La Figura 3 mostra l'andamento della probabilità di fuori servizio al variare del rapporto segnale-rumore del collegamento FSO ( $\gamma_{FSO}$ ) in tre differenti scenari applicativi: i) il solo collegamento FSO; ii) un collegamento ibrido FSO/RF con rapporto segnale-rumore del canale RF basso ( $\gamma_{RF} = 5$  dB); iii) un collegamento ibrido FSO/RF con SNR del canale RF alto ( $\gamma_{RF} = 10$  dB). Viene dimostrato (attraverso un modello analitico suffragato da risultati di simulazione) come un collegamento ibrido FSO/RF permetta di ridurre la probabilità di fuori servizio rispetto al solo sistema FSO: naturalmente, quanto più sarà alto il rapporto segnale-rumore del canale RF, tanto più sarà bassa la probabilità di outage che l'intera configurazione sperimenterà.

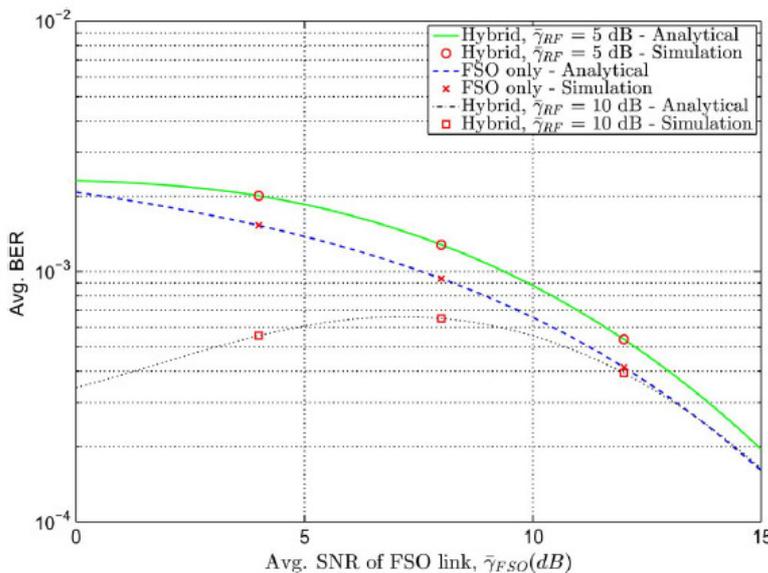


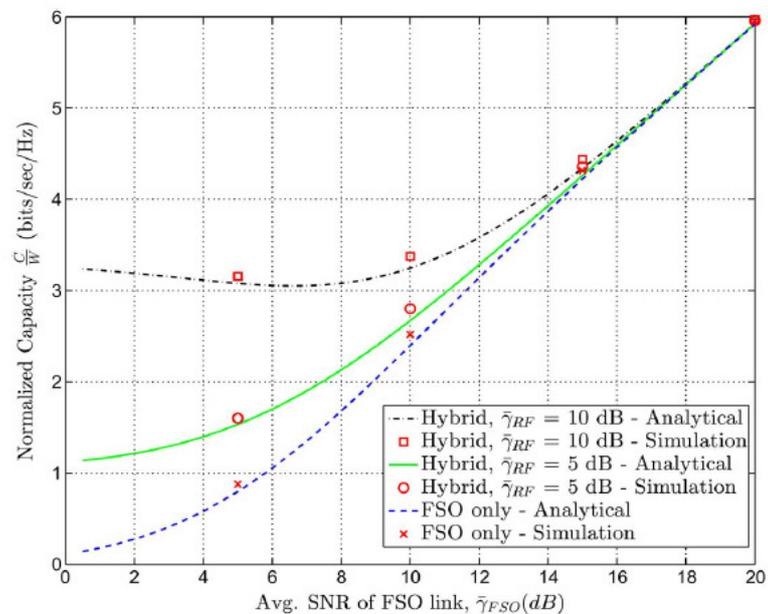
Figura 4. Probabilità d'errore (Bit Error Rate - BER) in funzione del rapporto segnale-rumore del collegamento FSO, quando le soglie  $\gamma_{th}^{FSO} = \gamma_{th}^{RF} = 5$  dB,  $m = 5$  e  $\sigma_x = 0.25$ .

La Figura 4 mostra le curve di BER al variare del rapporto segnale-rumore del collegamento FSO negli stessi scenari applicativi sopra descritti. Come si nota, in materia di probabilità d'errore, che viene

valutata sulla sezione dati in cui il collegamento è attivo (o in servizio), quando viene impiegato un collegamento ibrido FSO/RF con basso SNR per il canale RF (5 dB), si ha un leggero deterioramento nelle prestazioni rispetto al solo sistema FSO: questo accade perché il servizio non viene sospeso come nel caso del singolo FSO, ma nella trasmissione viene utilizzato il più delle volte un canale RF di bassa qualità che finisce per intaccare il livello medio di BER. Infatti, quando l'SNR del canale RF sale a 10 dB, le prestazioni complessive del collegamento ibrido FSO/RF migliorano notevolmente: in particolare, al crescere dell'SNR del canale FSO accade che, quando tale valore è ancora basso, laddove viene impiegato più frequentemente il canale RF ad alto SNR, si ha un deterioramento graduale delle prestazioni per il collegamento complessivo fintantoché il canale FSO non comincia ad essere utilizzato con maggiore frequenza (il sistema FSO diviene più affidabile: cresce il suo SNR) e il valore medio di BER corrispondente torna a scendere.

La Figura 5 rappresenta un confronto delle prestazioni dei tre sistemi prima considerati a livello di capacità ergodica: si nota come l'impiego di un collegamento ibrido FSO/RF permetta di migliorare la capacità complessiva del sistema rispetto al singolo canale ottico, in particolare per bassi valori di  $\gamma_{FSO}$ . Oltretutto, se la qualità del collegamento RF è alta ( $\gamma_{RF} = 10$  dB), la capacità complessiva, quando viene valutata per bassi valori dell'SNR del canale ottico, decresce leggermente fino a toccare un minimo, dal momento che in questo intervallo sono più frequenti le commutazioni al canale RF, per poi risalire, al crescere di  $\gamma_{FSO}$ .

Figura 5. Capacità ergodica in funzione del rapporto segnale-rumore del collegamento FSO, quando le soglie  $\gamma_{th}^{FSO} = \gamma_{th}^{RF} = 5$  dB,  $m = 5$  e  $\sigma_x = 0.25$



Gli autori di [10] propongono anche un modello di commutazione a due soglie per il collegamento FSO, onde abbassare la frequenza delle transizioni on/off [11], che riducono il tempo di vita del sistema di comunicazione ottico: in questa configurazione, il collegamento FSO

continua a trasmettere finché il suo SNR non scende al di sotto di una determinata soglia; poi resta inattivo fintantoché il suo SNR non supera una seconda soglia, più alta della prima. Il sistema RF verrà impiegato quando il suo SNR supererà la soglia corrispondente mentre il canale FSO risulta inattivo. E' semplice intuire che maggiore è la differenza tra le due soglie usate per il canale FSO, minore la frequenza di transizione on/off del sistema di trasmissione ottico. Gli autori di [10] dimostrano, svolgendo un'analisi comparativa delle prestazioni – sempre in termini di probabilità di outage, BER e capacità ergodica, che il comportamento del sistema ibrido FSO/RF a soglia doppia per il canale FSO non differisce sostanzialmente da quello a soglia singola e risulta dunque più vantaggioso da un punto di vista pratico-implementativo.

Gli autori di [12], d'altro canto, riprendono il medesimo percorso di studio del sistema ibrido FSO/RF analizzato in [10], con l'aggiunta di un diverso modello di turbolenza per il canale FSO (la distribuzione Gamma-Gamma al posto della log-normale) e di fading per il collegamento RF (Rice al posto di Nakagami), derivando un'espressione in forma chiusa del BER per il sistema FSO in presenza di attenuazione da turbolenza combinata agli errori di puntamento (ribattezzata come condizione di combined fading) e dimostrando infine come un apparato ibrido FSO/RF possa superare di gran lunga in prestazioni il singolo dispositivo ottico in uno scenario di forte turbolenza.

#### **4. Efficienza nei costi di dimensionamento del fronthaul**

In quanto ai vantaggi economici derivanti dall'impiego di una simile tecnologia all'interno di un sistema di comunicazione radiomobile (concettualmente estendibile ai sistemi 5G), gli autori di [5] considerano il problema della minimizzazione del costo di rete attraverso la scelta di collegamenti in fibra ottica o in spazio libero, della tipologia FSO/RF, come illustrato in Figura 6, arrivando a dimostrare come tale soluzione ibrida di trasmissione sia in grado di garantire una certa efficienza in termini di costo e rappresenti pertanto un buon candidato per l'aggiornamento di molti segmenti della rete attualmente in funzione. Infatti, la scelta di impiegare la tecnologia più adeguata nel contesto progettuale delle reti di fronthaul (nel caso di architetture 5G) o più genericamente di backhaul, risulta oggi, a livello internazionale, di grande interesse, in special modo per quanto attiene ai costi di dispiegamento, che, nel caso di architetture di rete 4G, possono ammontare approssimativamente fino al 50 % dei costi totali [5]; col dispiegamento di piccole celle multiple e capillarmente diffuse atteso nel paradigma 5G, è realistico credere che i costi di implementazione siano destinati a crescere.

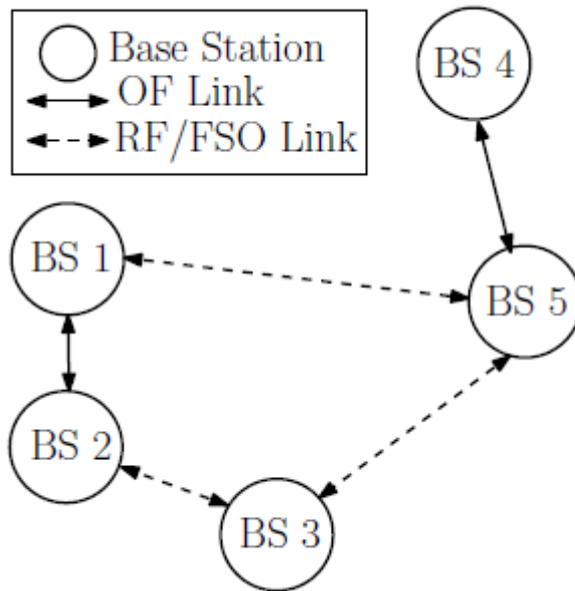


Figura 6. Esempio di rete composta da 5 stazioni radio-base connesse via fibra ottica (OF) o collegamenti ibridi FSO/RF.

Sempre attenendoci a [5] ma trasferendo il piano del discorso nel contesto 5G, come è possibile osservare dalla Figura 7, prendendo in considerazione tre sistemi di fronthaul, il primo ottimale ma interamente realizzato in cavo ottico (OF), il secondo derivante da una soluzione “euristica” (approssimazione analitica del caso ottimale) che può includere sia collegamenti OF che ibridi del tipo FSO/RF, il terzo ottenuto mediante algoritmo di ottimizzazione (che include, come il precedente, tanto segmenti di rete OF quanto collegamenti FSO/RF), notiamo che l’ammontare medio dei costi totali della rete si riduce quando i costi medi dei collegamenti FSO/RF risultano inferiori ( $\pi^{(h)} = 10000/20000$  dollari) al cosiddetto termine di cut-off ( $\pi^{(h)} = 40000$  dollari), il quale corrisponde al costo di un singolo collegamento in fibra ottica che soddisfa, a differenza di quelli in spazio libero, determinati requisiti di data-rate e affidabilità.

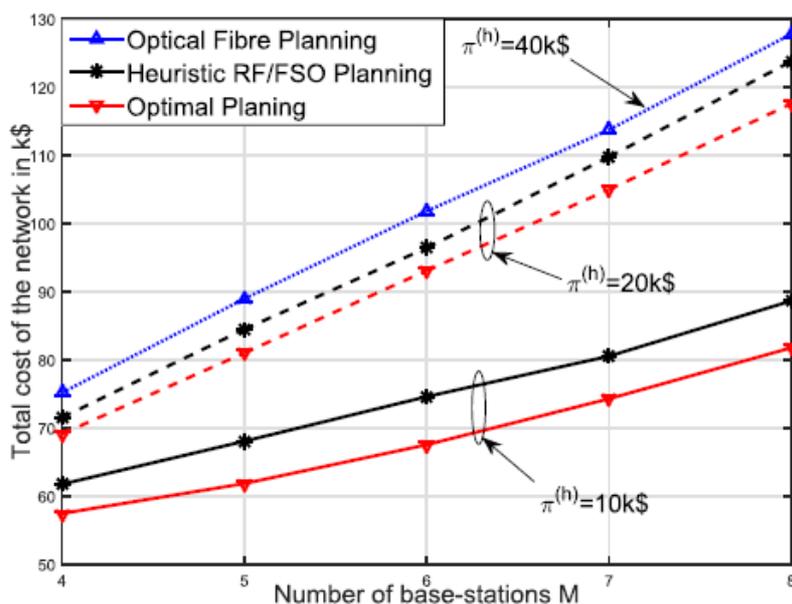


Figura 7. Costo medio della rete in funzione del numero delle stazioni radio-base M impiegate nella costruzione del fronthaul.

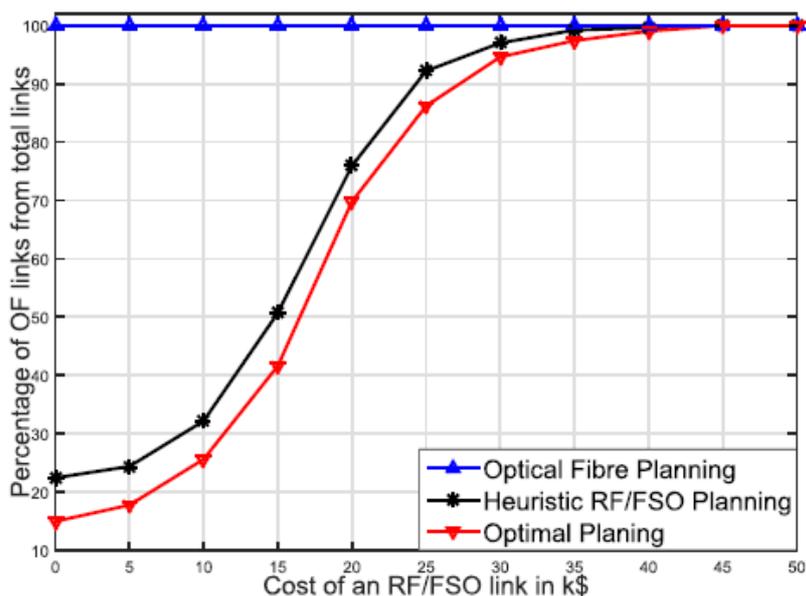
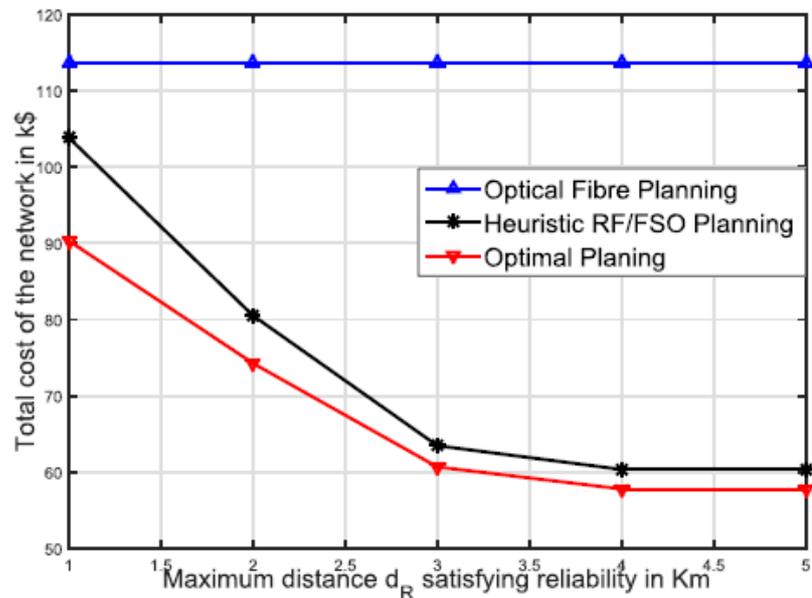


Figura 8. Percentuale di connessioni OF in funzione del costo dei collegamenti ibridi FSO/RF per una rete costituita da 7 nodi.

Dalla Figura 8 è possibile notare come la percentuale dei collegamenti OF all'interno di una rete ottimale di fronthaul composta da 7 nodi tende a crescere piuttosto rapidamente quando i costi medi dei collegamenti FSO/RF sono superiori ai 10000 dollari.

Figura 9. Costo medio della rete in funzione della massima distanza che soddisfi un requisito di affidabilità  $\alpha$  per un sistema costituito da 7 nodi.



La Figura 9 mostra invece come il costo medio della rete ottimale mista di fronthaul (seconda e terza soluzione prima elencate) decresce all'aumentare della distanza massima (espressa in Km) che soddisfa un determinato requisito di affidabilità  $\alpha$ .

Gli autori di [5] finiscono per dimostrare, in sostanza, che una rete come quella di fronthaul/backhaul, costituita da connessioni realizzate tramite sistemi ibridi FSO/RF e collegamenti in fibra, può trovare il suo assetto ottimale a seconda delle specifiche di progetto e certamente garantisce, laddove possibile, un più economico dispiegamento delle risorse. Questa, infatti, è una valutazione che tiene conto solo degli aspetti tecnico-economici relativi al dispiegamento di una architettura di fronthaul/backhaul; per una valutazione completa occorre tener presente anche i requisiti di rete imposti dalla tecnologia 5G che andranno valutati per ogni scenario applicativo.

## 5. Conclusioni

L'adozione dei sistemi ibridi FSO/RF può risultare vantaggiosa, alla luce dei risultati raggiunti in letteratura e qui riassunti per ragioni di spazio, all'interno del paradigma di rete che si sta profilando come di futura generazione, ovvero il sistema 5G. Infatti, tale complesso strutturale si articolerà attendibilmente, per soddisfare ad esempio determinati requisiti di data-rate e sostenere una gestione flessibile del carico di rete, in una forma di interconnessione varia tra le più disparate tecnologie che la ricerca va affinando da decenni. Un posto speciale è riservato all'integrazione dell'ottica di spazio libero in soluzione ibrida con RF, se non altro per la sua evidente compatibilità con la tecnologia più consolidata a livello di rete per le trasmissioni ad alto flusso-dati, ovvero la fibra ottica, la quale mantiene tuttavia il suo primato nelle percentuali di utilizzo. Come sopra dimostrato, a questo si aggiunge un altro importante vantaggio: il potenziale alleggerimento dei costi

infrastrutturali che si può ricavare nel dispiegamento di collegamenti ibridi FSO/RF all'interno di una sezione della rete come il fronthaul, aperta al dialogo di più tecnologie. E non bisogna dimenticare infine il pieno adempimento di questo dispositivo di trasmissione ai requisiti previsti negli accordi europei per quanto concerne le tratte in spazio libero, come quelli che stanno recentemente spostando il piano tecnologico verso una tipologia di rete radiomobile sempre meno impattante sull'ambiente e più "green".

## Bibliografia

- [1] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang, T. Han, "5G Ultra Dense Networks", IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 1, pp. 72-79, Feb. 2016.
- [2] M. Jaber, M. A. Imran, R. Tafazolli, A. Tukmanov, "5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey", IEEE Access, vol. 4, pp. 1743-1766, April 2016.
- [3] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, A. V. Vasilakos, "A Survey of millimeter Wave Communications (mmWave) for 5G: Opportunities and Challenges", Wireless Networks, vol. 21, no. 8, pp. 2657-2676, April 2015.
- [4] M. A. Khalighi, M. Uysal, "Survey on Free-Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, June 2014.
- [5] A. Douik, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, M. S. Alouini, "Hybrid Radio/Free-Space Optical Design for Next Generation Backhaul Systems", IEEE Transactions on Comm., vol. 64, no. 6, June 2016.
- [6] E. Zedini, M. S. Alouini, "Multihop Relaying Over IM/DD FSO Systems with Pointing Errors", J. Lightwave Technol., vol. 33, no. 23, pp. 5007-5015, 2015.
- [7] M. A. A. Ali, "Free Space Optical Wireless Communications under Turbulence Channel Effect", IOSR J. Electron. Commun. Eng., vol. 9, no. 3, pp. 1-8, 2014.
- [8] T. Rakia, H. C. Yang, M. S. Alouini, F. Gebali, "Outage Analysis of Practical FSO/RF System with Adaptive Combining", IEEE Comm. Letters, vol.19, no. 8, pp. 1366-1369, Aug. 2015.
- [9] S. Choudhury, J. D. Gibson, "Information Transmission over Fading Channels", IEEE GLOBECOM, pp. 3316-3321, 2007.
- [10] M. Usman, H. C. Yang, M. S. Alouini, "Practical Switching-Based Hybrid FSO/RF Transmission and Its Performance Analysis", IEEE Photonics Journal, vol. 6, no. 5, Oct. 2014.
- [11] H. Moradi, M. Falahpour, H. Refai, P. LoPresti, M. Atiquzzaman, "On the Capacity of Hybrid FSO/RF Links", Proc. IEEE GLOBECOM, pp. 1-5, Dec. 2010.
- [12] A. Touati, A. Abdaoui, F. Touati, M. Uysal, A. Bouallegue, "On the Effects of Combined Atmospheric Fading and Misalignment on the Hybrid FSO/RF Transmission", J. Opt. Comm. Net. , vol. 8, no. 10, Oct. 2016.