

Strategie di mitigazione di sistemi di comunicazione ottica nello spazio libero in presenza di turbolenze atmosferiche

Atmospheric turbulence mitigation strategies for free space optical communications systems

Gianpaolo Susanna^{◆□}, Andrea Reale[□]

◆ Direzione generale per le tecnologie delle comunicazioni e la sicurezza informatica - Istituto superiore delle comunicazioni e delle tecnologie dell'informazione (DGTCSI-ISCTI), Ministero dello Sviluppo Economico

□ Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli studi di Roma Tor Vergata

Sommario

La comunicazione ottica nello spazio libero (FSOC) è una valida alternativa non solo per la comunicazione a radiofrequenza ad alta capacità, ma, certamente, anche alla fibra ottica ed ai costi che questa richiede in termini di opere civili di scavo per la posa dei cavi ottici, soprattutto nelle aree rurali a scarsa densità abitativa e nelle aree a difficile accesso per la posa; senza contare l'elevato grado di sicurezza della trasmissione (*cyber security*) in relazione all'impossibilità di intercettazione senza immediato riscontro da parte del ricevente. È noto però, che la molteplicità delle turbolenze atmosferiche che possono generarsi nello spazio libero introducono fluttuazioni nelle prestazioni del collegamento FSOC, limitandone le possibilità di applicazione in uno scenario operativo. Al riguardo, diverse strategie di mitigazione sono state sperimentate. In questo articolo ne verranno analizzate alcune tra le più significative; manipolazioni del segnale in pre- e post-compensazione, insieme alle ottiche adattative (AO), sono tra le strategie più utilizzate per incrementare l'efficienza di accoppiamento (AE) di una comunicazione ottica FSO. I risultati sperimentali indicano la fattibilità e la stabilità di link ottici di questo tipo sia in termini di larga banda (>20Gbps) sia in termini di distanza (>20Km) come dimostrato in ultimo dal progetto TAARA di *Google X*.

Abstract

Free space optical communications (FSOC) is a valid alternative with respect to the well-known radio frequency communications for ultra-broadband links, and, indeed, also for optical fiber

communications, considering the costs they require for the deployment of the optical cables in terms of civil works, especially in low population density rural areas and in regions with difficult access; moreover, with respect to radio communications, FSOC has an intrinsic high degree of data communications security (*cyber security*), related to the impossibility of the signal being snipped without detection at the receiver. However, it is also known that the main flaw of FSOC stays in the multiplicity of atmospheric turbulences that can introduce optical power fluctuations that affect the performance of the FSOC link. A variety of strategies have been proposed, simulated and tested. Some of the most significant strategies will be analyzed in this paper; signal manipulation in pre- and post-compensation stage, along with adaptive optics (AO), are the most used strategies to increase the coupling efficiency (CE) of a FSO communications system. The experimental results display the feasibility and stability of this type of optical links both in terms of bandwidth (> 20Gbps) and in terms of link distance (>20Km), as recently demonstrated by the *Google X "TAARA"* project.

1 - Introduzione

Come ormai noto, le comunicazioni ottiche nello spazio libero (FSOC, *Free-Space Optical Communications*) possono offrire una valida alternativa alla più diffusa comunicazione a radiofrequenza. Nell'attuale scenario di comunicazioni senza fili (*wireless*); caratteristiche di rilievo sono: l'elevata velocità di trasmissione dei dati, l'elevata capacità di banda, l'ampio spettro di frequenze, non licenziate e quindi non soggette a pagamento, e l'eccellente sicurezza dal punto di vista di protezione dei dati trasmessi [1]. Tuttavia, lo sviluppo della FSOC è spesso limitato dalle turbolenze atmosferiche che ne degradano l'accoppiamento di efficienza (AE) punto-punto in due principali modi, ossia la fluttuazione in ampiezza (oscillazione in potenza) e di fase del segnale (distorsione del fronte d'onda). Le turbolenze atmosferiche combinate con la distanza di accoppiamento, disturbando il segnale, influenzano anche la qualità della trasmissione che viene comunemente espressa in BER (*bit-error-rate*) [2]. Per migliorarne le prestazioni ed ovviare alle perturbazioni, si è quindi svolta ampia ricerca

in soluzioni efficaci, principalmente riconducibili alle categorie di soluzioni in pre-compensazione ed in post-compensazione. La pre-compensazione è meno comune, ma più efficace in determinati scenari (ad es. applicazioni terra-satellite); la post-compensazione è invece stata ampiamente usata e dimostrata nel tempo in quanto più semplice come approccio, dal momento che interviene sul link ottico in maniera correttiva e continua. Le strategie utilizzate in post-compensazione sono mirate all'attenuazione della fluttuazione di ampiezza del segnale; le più comuni sono in mediazione sull'apertura ottica e sulla larghezza del fascio [3]. Viceversa, le applicazioni di pre-compensazione vengono ampiamente utilizzate per compensare la distorsione di fase del fronte d'onda causata dalla turbolenza atmosferica; le più comuni sfruttano delle ottiche adattative AO (*Adaptive Optics*) [4], le quali trovano ampio impiego nel campo dell'osservazione astronomica, che solitamente lavora di notte, in condizioni di debole turbolenza. Un sistema FSOC deve essere in grado di mantenere la trasmissione dati in tempo reale anche durante periodi di forte turbolenza, dall'alba al tramonto e in diverse condizioni climatiche, evitando interruzioni di segnale che, essendo nell'ordine del Gbit/s, possono generare milioni di errori di bit per singolo millisecondo, con conseguente perdita d'informazione; tale prestazione è compatibile con un sistema di comunicazione odierno ed è quindi necessario l'uso di AO di maggiore capacità di correzione e stabilità rispetto a quelle utilizzate per l'osservazione astronomica. Negli ultimi anni sono stati compiuti rapidi progressi negli studi sull'FSOC con l'AO in diverse condizioni di turbolenza atmosferica spaziale o temporale. In particolare, come vedremo in seguito, è stata verificata l'efficacia dell'AO per FSOC sia in via teorica che sperimentale; l'uso di AO può portare a una diminuzione del BER di almeno due ordini di grandezza [5,6] e ad un incremento in efficienza di accoppiamento dall'1,3% al 46,1% anche in condizioni di forte turbolenza [10]. In pratica però, sono poche le analisi che considerano sia le caratteristiche spaziali che quelle temporali di un sistema FSOC; la relazione quantitativa tra l'aberrazione residua del fronte d'onda dell'AO e le prestazioni di comunicazione per l'FSOC non è attualmente chiara. Pertanto, è stato necessario pensare ad un'analisi teorica e sperimentale per l'ottimizzazione dei

parametri AO, al fine di poter migliorare le prestazioni di FSOC in diverse condizioni sia spaziali che temporali della turbolenza atmosferica. Alcuni gruppi di ricerca sono stati in grado di ricavare una correlazione diretta tra questi, in termini riconducibili all'AE e AO in un sistema FSOC, trovando così delle basi solide su cui poter instaurare un link affidabile di trasmissione nonostante le perturbazioni [7-8]. Grazie a questi studi è ormai possibile definire il sistema FSO stabile anche in varie condizioni meteorologiche (foschia e pioggia leggera, media e intensa) mantenendo trasmissioni stabili oltre i 15 Gbps, fornendo qualità del segnale e BER al di sotto di 1×10^{-20} [9]. Un esempio importante è il progetto "TAARA" di *X Development Alphabet*, comunemente nota come *Google X*, che fa uso di fasci laser tra due testine FSO per veicolare una banda ultra-larga, fino a circa 20 Gbps e per distanze superiori ai 20 Km [10].

2 – Tecniche di mediazione di apertura e larghezza di fascio in un sistema FSO

La mediazione di apertura (AA, *Aperture Averaging*), insieme con la variazione della larghezza di fascio laser (BW, *Beam Width*) sono tra le tecniche più utilizzate per la correzione del segnale FSO in post-compensazione, sia per la loro semplicità d'impiego sia per il basso costo di implementazione. Nell'AA un'apertura di raccolta del fascio laser viene posta alla fine del collegamento FSO dal lato del ricevitore per combattere gli effetti negativi dell'attenuazione (*fading*) indotta dalla turbolenza atmosferica mentre nella tecnica BW si lavora sullo "spessore" del fascio mediante lenti e specchi per far viaggiare più comodamente i pacchetti fotonici trasportatori d'informazione. Al ricevitore, una lente di focalizzazione concentrerà poi la maggior parte del flusso radiativo in ingresso al fotorivelatore. L'AA e la BW di conseguenza agiscono virtualmente come un ricevitore a dimensioni finite. La combinazione dei due metodi risulta essere molto efficace soprattutto per applicazioni terrestri su lunga distanza, compensando i danni da perdita atmosferica, turbolenza ed errori di puntamento. Al riguardo, nel lavoro del team del Prof. *Ghassemlooy* dell'Università di *Newcastle* [3] è stata presa in esame la propagazione di un'onda a fascio gaussiano spazialmente e parzialmente coerente attraverso un mezzo a media turbolenza casuale, tenendo conto delle proprietà di divergenza

e di focalizzazione del raggio ottico insieme agli effetti di scintillazione e deviazione del raggio, viene dimostrato un notevole miglioramento in AE e nella capacità media di raccolta del canale. Il sistema ad ingresso ed uscita singolo SISO (*Single Input Single Output*) utilizzato è mostrato in figura 1.

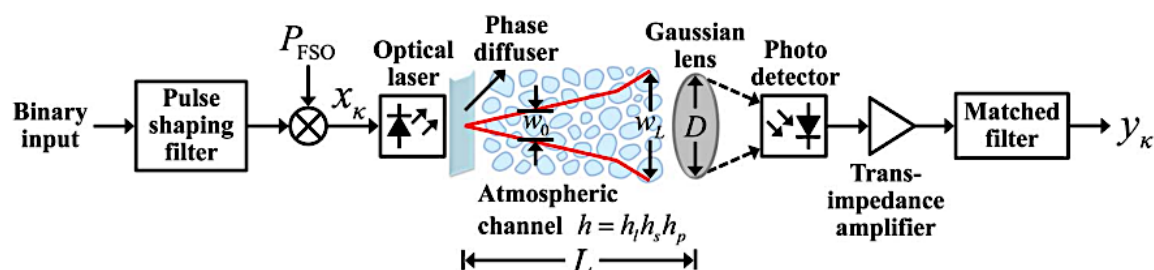


Figura 1 – Diagramma a blocchi del sistema SISO per comunicazioni FSO [3].

Il guadagno ottenibile può essere ulteriormente incrementato estendendo l'apertura del ricevitore in modo tale da compensare fluttuazioni in presenza di turbolenze di media intensità lungo il collegamento, anche senza conoscere le informazioni sullo stato del canale; in particolare, si osserva che la larghezza ottimale del fascio può essere ridotta per migliorare la capacità del canale, nonostante la presenza di scintillazione e di perdite da errori di puntamento, dal momento che uno o entrambi di questi effetti avversi sono meno dominanti. Invece, in condizioni di forte turbolenza, la larghezza del fascio aumenta linearmente (se gli errori di puntamento sono minimi) con la varianza di Rytov [11], ma cambia in modo esponenziale se questi diventano molteplici. Risulta chiaro che il fascio ottimale espresso in termini di larghezza dipenda dagli effetti combinati della turbolenza e degli errori di puntamento e questo parametro deve essere regolato in base alle diverse condizioni atmosferiche del canale. Pertanto, si conclude che il canale massimo in capacità prestazionali si ottiene al meglio attraverso l'introduzione di un'apertura del ricevitore più ampia e un'ottimizzazione della larghezza del raggio con apertura mediata.

3 – Ottiche adattive per FSO

Le ottiche adattive sfruttano un tipo di pre-compensazione sul segnale inviato e trovano largo utilizzo nelle applicazioni per la comunicazione ottica tra la Terra e i satelliti geostazionari. Nel lavoro di *Leonhard et al.* [4] è stata costruita una *breadboard* di prototipazione a controllo rapido con un angolo di puntamento regolabile in cui *downlink* e *uplink* possano funzionare sia a 1064 nm che a 1550 nm di lunghezza d'onda (seconda e terza finestra per applicazioni laser). Viene dimostrato come, in tempo reale, la deviazione del raggio (deviazione per *wandering*), risultante dalla turbolenza artificiale, venga ridotta in modo tale che il raggio ottico raggiunga il satellite almeno il 66% delle volte (in più) rispetto a solo il 3% iniziale privo di correzione. Nello scenario di base, un satellite invia un raggio *downlink* che viene utilizzato presso la stazione di ottica a terra (OGS, *Optical Ground System*) per misurare le distorsioni del fronte d'onda causate dalla turbolenza (fig. 2a).

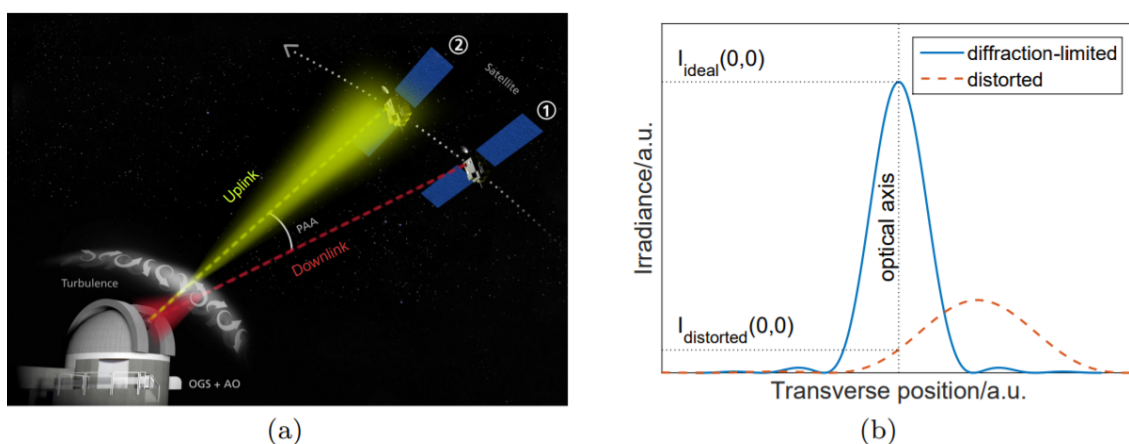


Figura 2 – (a) Scenario di trasmissione ottica FSO terra-satellite; **(b)** Rapporto di Strehl.

La stazione invia al satellite un raggio di *uplink* precompensato dal sistema AO. L'OGS deve incorporare un angolo di puntamento (PAA) ottenuto dalla differenza angolare tra il segnale *up* e *down*. In questo modo si ottiene un aumento di sette volte del rapporto *Strehl* medio, definito come il rapporto tra l'irradiamento centrale del fascio distorto e l'irradiamento

centrale del fascio limitato dalla diffrazione (fig. 2b); ciò comporta inoltre una notevole riduzione della dissolvenza del segnale.

Nei lavori di Tyson et al. [5-6] viene effettuata invece una misurazione diretta del BER di un sistema di comunicazione laser AO composto da due assi di correzione di inclinazione (fig. 3);

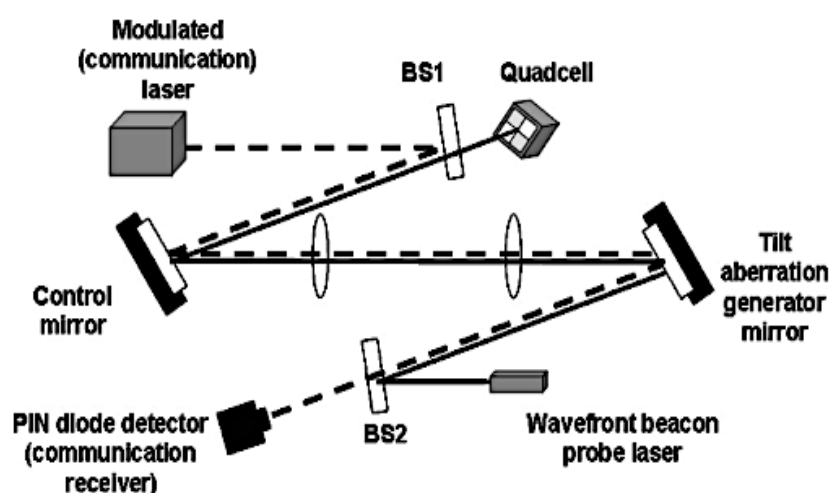


Figura 3 – Sistema chiuso adattivo [5].

Il sistema adattativo a ciclo chiuso è composto da uno specchio generatore di aberrazione, un sensore di inclinazione che si attiva mediante un *beam splitter*, uno specchio di controllo e l'elettronica di diagnostica per misurare e registrare il BER. Con questo tipo di controllo, il segnale in uscita viene recuperato notevolmente; inoltre il sistema AO riduce la sovrapposizione con il rumore elettronico e ne riduce il BER di un incremento pari a 42 volte.

Un altro esempio di applicazione di AO nei sistemi di comunicazione ottica in spazio libero ad alta velocità, ma in fibra monomodale SMF (*Single Mode Fiber*), è stato dato da *Chen Mo et al.*, i quali hanno studiato l'influenza della turbolenza atmosferica sull'AE in varie condizioni utilizzando la correzione AO. Il metodo permette di aumentare l'efficienza di accoppiamento anche in condizioni di turbolenza relativamente forte con, in primo luogo, l'implementazione

di un accoppiamento preliminare utilizzando uno specchio mobile rapido per correggere l'aberrazione di punta e di inclinazione. In secondo luogo, viene applicato il sistema AO, con uno specchio deformabile (DM) a 137 elementi e un particolare sensore del fronte d'onda (*Hartmann-Shack*), che viene utilizzato per compensare l'aberrazione di fase di ordine superiore, problematica che non deve essere ignorata in condizioni di forte turbolenza. Mediante correzione AO è stato dimostrato un aumento di AE dall'1,3% al 46,1% di media in condizioni di forte turbolenza e fino ad un massimo del 67% in condizioni più favorevoli [10]. In figura 4 sono mostrate le distribuzioni di intensità e baricentro del campo lontano per il fascio di luce sperimentale.

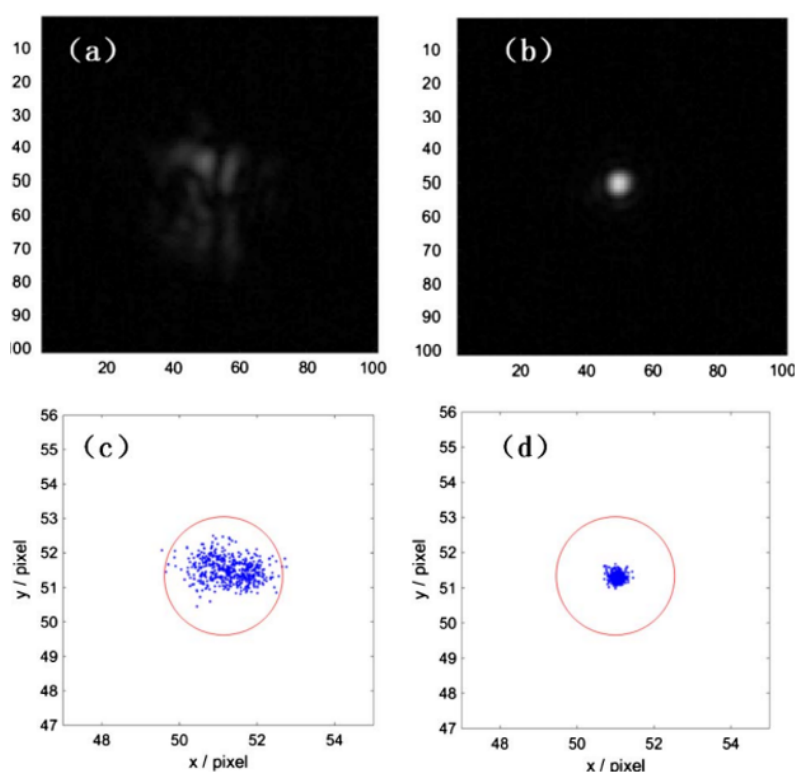


Figura 4 – Distribuzioni di intensità e baricentro del campo lontano per il fascio di luce sperimentale, **(a)** e **(c)** senza correzione AO; **(b)** e **(d)** con AO [10].

Quando il sistema AO è spento (fig. 4a e 4c), a causa dell'influenza della turbolenza, le distribuzioni di intensità e baricentro sono dispersive. Al contrario, quando il sistema AO è

funzionante (fig. 4b e 4d), la distribuzione dell'intensità del campo lontano si avvicina al limite di diffrazione e la distribuzione del centroide diviene focalizzata. Il sistema AO compensa efficacemente la distorsione di fase del fronte d'onda della turbolenza atmosferica.

Un altro importante contributo sulla tecnica AO è stato dato da *Wang et al*, i quali sono stati in grado di ricavare per la prima volta una correlazione diretta tra AE e AO in un sistema FSOC [7]. Ciò è stato possibile basandosi sulla frequenza di Greenwood f_G (Greenwood Frequency), ovvero la frequenza (o larghezza di banda) richiesta per la correzione ottimale di un sistema AO; la f_G in pratica rappresenta le caratteristiche temporali di un sistema FSO e quindi dipende dalla velocità del vento trasversale e dalla forza di turbolenza nell'atmosfera. Viceversa il rapporto tra diametro di apertura del ricevitore e la lunghezza coerente atmosferica (D/r_0) costituisce la caratteristica spaziale del sistema. Basandosi sul rapporto che c'è tra questi, è stato possibile derivarne il rapporto diretto con l'efficienza di accoppiamento (AE) ed i parametri delle ottiche adattative (AO); ciò determina più facilmente le prestazioni del sistema FSOC, in particolare perché possibile esprimerlo come il numero e la larghezza di banda corretti secondo i modi di *Zernike* (fig. 5a).

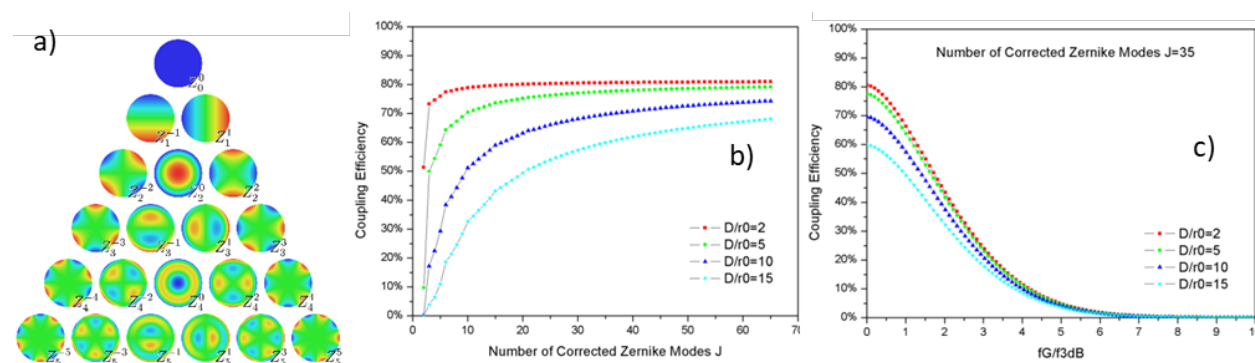


Figura 5 – (a) Polinomi di accoppiamento di *Zernike* utilizzati in optometria per descrivere i fronti d'onda di aberrazione delle lenti ottiche; **(b)** relazione tra AE e numero di modi corretti *Zernike* "J" sotto diversi rapporti D/r_0 ; **(c)** curve di efficienza di accoppiamento (AE) per f_G/f_{3dB} al variare di D/r_0 [7].

Sono state condotte simulazioni ed esperimenti per analizzare l'influenza dei parametri AO sulle prestazioni FSOC sotto diverse f_G e diversi rapporti D/r_0 ; la simulazione e i risultati

sperimentali mostrano che, per condizioni di turbolenza comuni, il numero di modi *Zernike* corretti può essere fissato a 35 e la larghezza di banda del sistema AO dovrebbe essere maggiore della f_G . Misure del BER per condizioni di turbolenza moderata ($D/r_0=10$, $f_G=60\text{Hz}$) mostrano che quando la larghezza di banda è due volte quella della f_G , il BER medio risulta diminuito di due ordini di grandezza rispetto al rapporto $f_G/f_{3\text{dB}}=1$ dove $f_{3\text{dB}}$ è la larghezza di banda ad anello chiuso (*closed-loop control bandwidth, CLCB*) (fig. 5b e 5c).

In un altro recente *paper* sono state analizzate le prestazioni di un sistema FSOC sulla base di dati sperimentali per diverse f_G , insieme al rapporto tra il diametro dell'apertura del ricevitore e la lunghezza coerente atmosferica (D/r_0) [8]; i loro risultati mostrano che l'influenza delle caratteristiche temporali atmosferiche sulle prestazioni del FSOC è leggermente più forte di quella delle caratteristiche spaziali. Questo risultato fornisce un riferimento per la progettazione di un sistema FSOC coerente; inoltre le prestazioni possono essere ulteriormente migliorate ingrandendo il CLCB attraverso l'aumento del campionamento e della frequenza di risonanza (fig. 6).

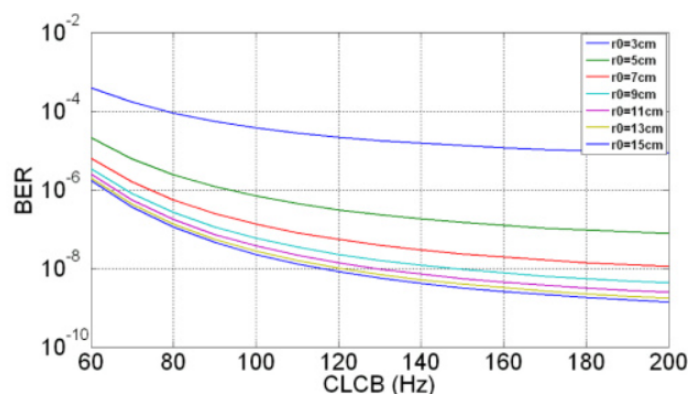


Figura 6 – Analisi del BER al confronto con CLCB ($f_{3\text{dB}}$) al variare di r_0 [8]

Come mostrato in figura 6, ad un r_0 di 3 cm, il BER è superiore a 10^{-5} con il CLCB compreso tra 60 Hz e 200 Hz. Quando r_0 è 15 cm, il BER è inferiore a 10^{-8} con CLCB maggiore di 120 Hz. In pratica, è necessaria una larghezza di banda maggiore per garantire la qualità della comunicazione all'aumentare della f_G . Questi risultati rendono la post-compensazione AA e

BW insieme con la pre-compensazione AO, delle tecniche praticabili e comunque necessarie per migliorare la comunicazione ottica terra-terra e terra-satellite, nonché per fornire una guida importante nella progettazione di un sistema FSOC.

4 - Il progetto TAARA

Un esempio importante di connessione FSOC attualmente in sperimentazione d'uso è il progetto "TAARA" di *X Development Alphabet*, comunemente nota come Google X, che può sostenere una banda ultra larga di oltre 20 Gbps su distanze superiori ai 20 km [10]. Principio alla base del sistema sono due testine FSO che comunicano tra loro sfruttando gli automatismi di correzione descritti in questo articolo (fig 7a); il progetto



Figura 7 – Testine FSO utilizzate nel progetto "TAARA" di Google X: **(a)** layout in linea di vista (LOS), **(b)** installazione fisica del sistema [10].

TAARA appartiene a quel gruppo di tecnologie di ricerca che avevano come capostipite il progetto LOON, ovvero i palloni aerostatici di Google che avrebbero dovuto portare internet dal cielo utilizzando lo stesso principio; LOON è stato poi dismesso all'inizio di questo anno 2021, ma ha lasciato in eredità la tecnologia FSOC che avrebbe dovuto garantire il collegamento mediante fasci laser dei palloni di LOON. La FSOC è quindi stata recuperata nel

progetto TAARA, avviato recentemente da *Google X* per fornire connettività in India ed in Kenya. L'ultimo test effettuato in Africa ha permesso di aggirare il fiume Congo risparmiando circa 400 Km di opere per la posa di cavi ottici (fig. 7b); il test è stato svolto tra Brazzaville e Kinshasa, nella Repubblica Democratica del Congo, dove è presente questo lunghissimo corso d'acqua di 4.374 Km a scorrimento molto veloce e molto profondo, quindi arduo da poter aggirare se non appunto impiegando centinaia di chilometri di cavo, comportando dei costi altissimi. Viceversa con l'FSOC è stato tutto molto semplificato la connessione è stata in grado di trasmettere 700 TB di dati in 20 giorni tra le due testine FSO poste ad una distanza di circa 5 Km in LOS (*Line of Sight* o linea d'aria).

5 - Conclusioni

I recenti sviluppi mostrati nella tecnologia FSOC e la validità delle strategie prese in esame per la mitigazione dei danni indotti dalle turbolenze atmosferiche pongono le FSOC come valida alternativa per fornire connettività a banda ultra larga a costi ridotti di implementazione, per implementazioni in cui la posa della fibra ottica è di difficile ritorno economico sull'investimento, come ad esempio nel caso delle aree rurali a bassa densità di popolazione. In aggiunta, il recente esperimento di *Google X*, evidenzia in modo concreto come le FSOC siano il candidato ideale per fornire connettività ad elevata capacità in scenari geografici dal difficile accesso con tecnologie cablate, evitando al contempo il ricorso alla tecnologia radio che ha maggiori problemi a garantire l'elevata capacità di trasmissione all'aumentare della distanza del collegamento. In quest'ambito possono essere inclusi anche scenari come le aree montane e le isole, in cui le tecniche di pre- e post- compensazione sopradescritte per la mitigazione dei fenomeni meteo, legati tanto agli eventi atmosferici in quota quanto agli effetti del mare, si rendono del tutto necessarie. Tali strategie descritte nel presente articolo, hanno reso la tecnologia FSO affidabile, laddove invece si pensava non vi fossero soluzioni alle turbolenze atmosferiche.

6 – Bibliografia

- [1] - Majumdar, A. K., Ricklin, J. C., "Introduction", *Free-space laser communications: principles and advances*, 5–10, 2010
- [2] - N. Lazer and Y. P. Arul Teen, "Free Space Optical Communication and Laser Beam Propagation through Turbulent Atmosphere: A Brief Survey," 2019 International Conference on Recent Advances in Energy-efficient Computing and Communication (ICRAECC), 1-6, 2019.
- [3] - Lee, I.E., Ghassemlooy, Z., Ng, W.P., Khalighi, M.A., Liaw S. K., "Effects of aperture averaging and beam width on a partially coherent Gaussian beam over free-space optical links with turbulence and pointing errors", *Applied Optics*, Vol. 55, 1–9, 2016
- [4] - Leonhard, N., Berlich, R., Minardi, S., "Real-time adaptive optics testbed to investigate point-ahead angle in pre-compensation of Earth-to-GEO optical communication", *Optics Express*, Vol. 24, 13157–13172, 2016
- [5] - Tyson, R. "Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications.", *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 19, 753–758, 2002
- [6] - Tyson, R. "Principles of adaptive optics", CRC Press, 4th edition, 2016.
- [7] - Wang, Y., Xu, H., Li, D. *et al.*, "Performance analysis of an adaptive optics system for free-space optics communication through atmospheric turbulence", *Nature Sci. Rep.* Vol. 8, 1-11, 2018
- [8] - Cao, J., Zhao, X., Liu, W., Gui, H., "Performance analysis of a coherent free space optical communication system based on experiment", *Optics Express* Vol. 25, 15299–15312, 2017
- [9] - Kaur P., Singh M., Sharma M., Kumar R., "Analysis of Novel 15Gbps WDM–FSO System Employing Hybrid Amplifier Under Various Weather Conditions", *Advances Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1370, 447-455, 2020
- [10] - <https://x.company/projects/taara/>