

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

Gianpaolo Susanna^{◆□}, Aliah El Astal Quirós^{◆□}, Alberto Schiavoncini[◆], Andrea Reale[◆]

◆ Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli studi di Roma "Tor Vergata"

□ DGTCISI – ISCTI Ministero delle Imprese e del Made in Italy

Sommario

Le comunicazioni, fino ad oggi, hanno dovuto soddisfare le richieste sempre crescenti da parte degli utenti attuali, connessi con i loro dispositivi. In un futuro prossimo, in cui altri 3 miliardi di utenti saranno in procinto di connettersi, non sarà scontato riuscire a garantire la banda necessaria per sostenere le comunicazioni. Già oggi lo spettro ampiamente usato delle radiofrequenze (RF) risulta complesso da gestire. Una delle soluzioni più immediate risulta essere l'impiego delle frequenze ottiche, con una banda enormemente più ampia rispetto alle RF, mediante tecnologie denominate OWC (*Optical Wireless Communication*). Sia sul corto (ambienti pubblici e domestici) che sul lungo raggio (città e satelliti), le OWC offrono una vasta gamma di soluzioni perfettamente integrabili con le tecnologie già in uso. Nel presente articolo verranno esposte alcune soluzioni promettenti per entrambi gli scenari.

Abstract

Communications today have barely managed the requests from current users, connected with their devices, but in the near future, in which another 3 billion users will be about to connect, it will not be easy to guarantee the necessary bandwidth to sustain communications for all. Today the largely engaged spectrum of radio frequency (RF), is already very complicated to manage. One of the most immediate solutions, is the usage of optical bands and frequencies, enormously larger than the RF, through technologies called OWC (Optical Wireless Communication). Both on the short range (public and domestic environments) and long range (cities and satellites), the OWCs offer a wide range of solutions that can be perfectly integrated

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

with the technologies already in use. Some interesting solutions will be presented in this article for both scenarios.

Keyword

OWC, Optical Wireless Communication, VLC, Visible Light Communication, FSO, Free-Space Optics.

1 - Introduzione

Grazie all'avanzare della tecnologia degli ultimi anni, la crescita di domanda di dispositivi elettronici wireless è cresciuta esponenzialmente, creando un problema imponente ai servizi di comunicazione. Domotica, 5^a generazione di comunicazione wireless, aumento di utenti e dispositivi nuovi, hanno tutti in comune l'insistente richiesta di banda per la comunicazione. Lo spettro RF usato fino a questo momento è riuscito a malapena a soddisfare le richieste da parte degli utenti e dei dispositivi ma in un futuro prossimo, in cui gli ultimi 3 miliardi di utenti, non ancora connessi in rete, riusciranno a collegarsi a internet, non si riuscirà più a garantire lo spettro necessario per le comunicazioni. Già oggi lo spettro RF allocato (3kHz-300GHz) risulta molto affollato e congestionato; di seguito un esempio di studi fatti su di una piccola nazione (Papua Nuova Guinea) a confronto con grandi (UK e USA) (figura 1, 2 e 3) [1-2-3].

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

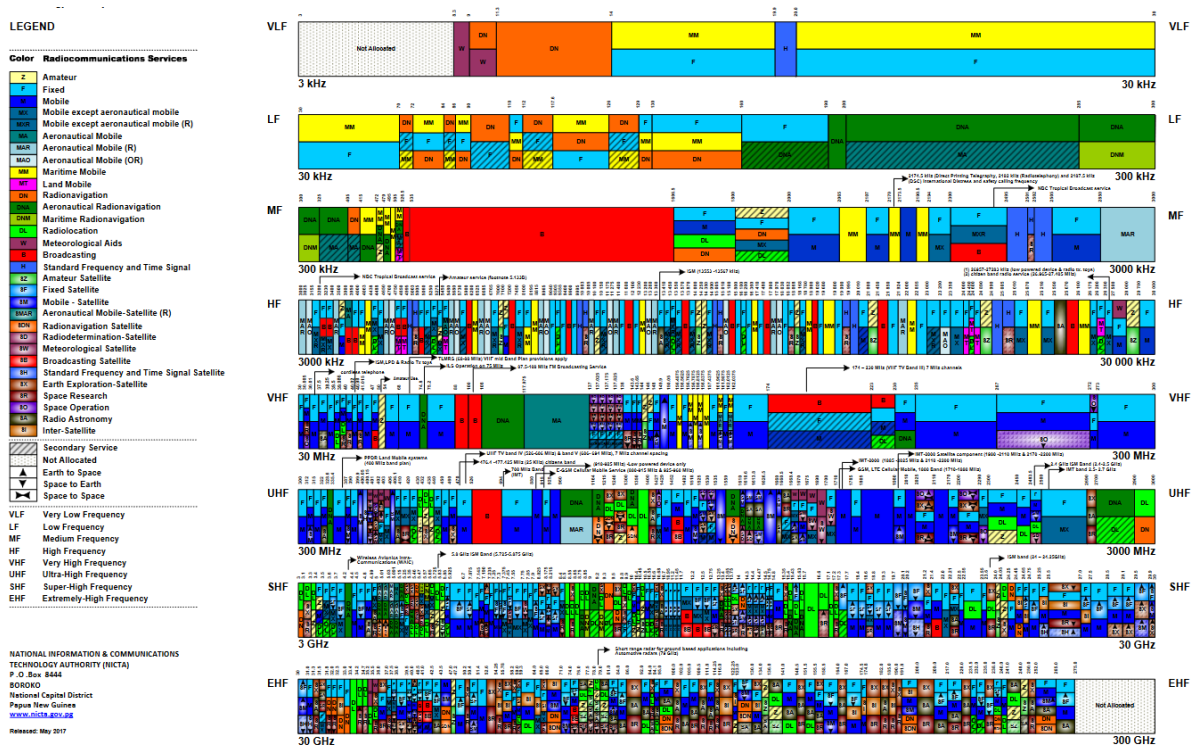


Figura 1 – Papua New Guinea frequency allocations chart 2017 con legenda [1]

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

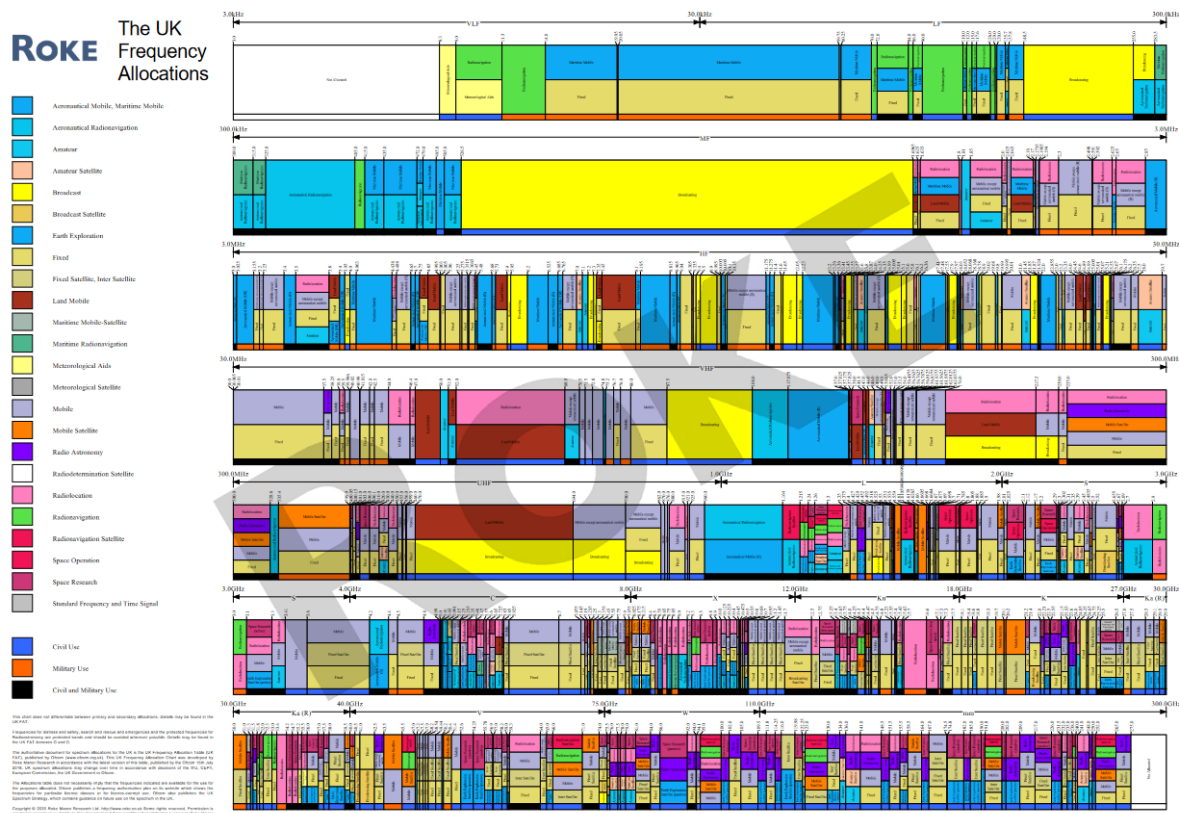


Figura 2 – UK frequency allocations chart 2018 con legenda [2]

Negli ultimi anni l'agenzia governativa statunitense "DARPA" (Defense Advanced Research Projects Agency) è intervenuta provando a dare una soluzione alla mancanza dello spettro RF incentivando ingegneri e ricercatori ad utilizzare tecnologie emergenti, come il "machine learning" o le bande ottiche, per ottimizzare l'utilizzo delle frequenze disponibili: "DARPA asked engineers and researchers to design a new type of communication device that doesn't broadcast on the same frequency every time. Instead, it uses a machine-learning algorithm to find the frequencies that are immediately available, and different devices' algorithms work together to optimize spectrum use." [3].

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

UNITED
STATES
FREQUENCY
ALLOCATIONS
THE RADIO SPECTRUM

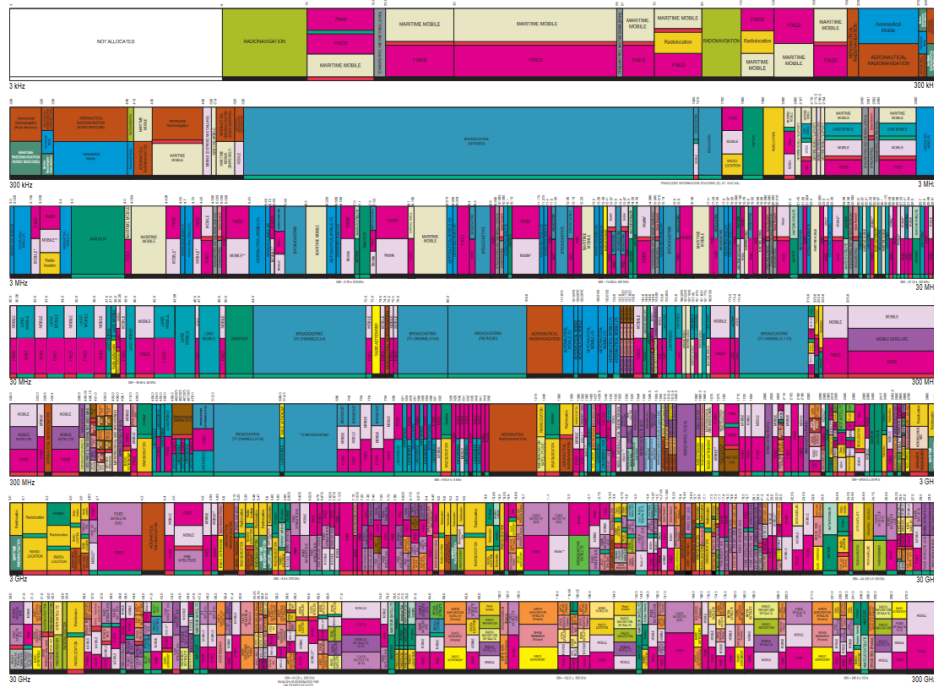
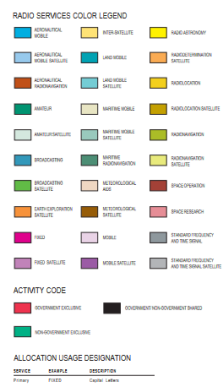


Figura 3 – The US spectrum allocation chart [3]

Una soluzione elegante e efficace è stata presentata già da qualche anno dal Prof. Harald Haas [4]: suggerisce infatti lo sfruttamento di bande completamente diverse da quelle RF, quelle ottiche, libere da costi di utilizzo, regolamentazione e congestione.

La banda spettrale dell'ottico, inoltre, offre una larghezza decisamente più elevata (400-800 THz) rispetto a quelle RF (3kHz-300GHz). Il suggerimento di Haas non ha solo carattere lucrativo nei confronti di una banda libera, ma grazie ad alcuni accorgimenti, può essere sfruttata anche come sistema di efficientamento grazie alla riduzione del consumo energetico con l'utilizzo di lampade led ad alta efficienza e celle solari come rivelatori di luce [5-6].

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

Anche il Prof. Mohamed-Slim Alouini, in un recente seminario, “*A light in digital darkness: FSO to connect the unconnected*”, tenutosi alla facoltà di ingegneria dell’università di Tor Vergata, ha presentato una soluzione simile per quanto riguarda le comunicazioni satellitari e intra-satellitari: per connettere ad internet gli ultimi 3 miliardi di persone, suggerisce la costruzione di una costellazione di HAPs (*High Altitude Platforms*) come ponte ottico tra gli utenti e i satelliti per limitare turbolenze e disturbi atmosferici a bassa quota [7].

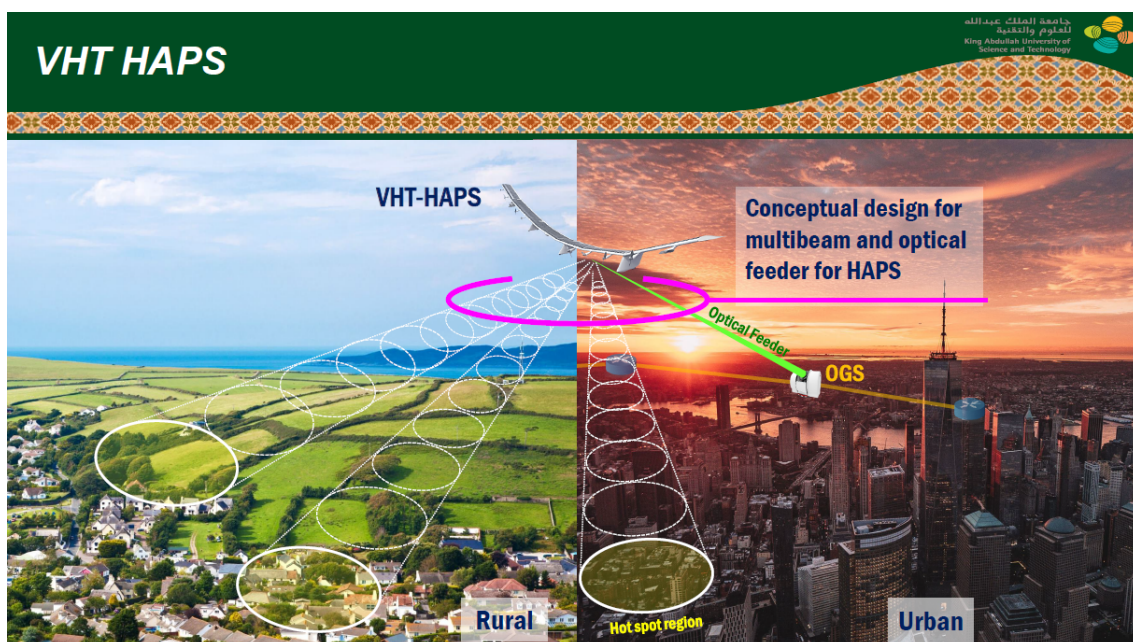


Figura 4 – Very High Throughput-High Altitude Platforms (VHT-HAPS) [7].

Le OWC (*Optical Wireless Communication*) possono essere utilizzate grazie all’applicazione della teoria dei colori e alla divisione delle lunghezze d’onda CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*); in questo lavoro, in particolare, vedremo come un link di comunicazione nel visibile VLC (*Visible Light Communication*) possa essere implementato passando da una singola sorgente a più sorgenti luminose sfruttando meglio lo spettro a disposizione e aumentando le possibilità di comunicazione.

I benefici che derivano dai sistemi VLC sono molteplici, infatti permettono: sicurezza del passaggio di informazioni, l'indoor GPS, il "sensing" biomedicale, l'uso di sorgenti ottiche efficienti e distribuite nella maggior parte di dispositivi elettronici e abitazioni [4] e tanto altro, risparmiando in termini ambientali.

2 - I sistemi VLC

Con il termine VLC, si indica un ramo della famiglia dei sistemi OWC: sono sistemi che utilizzano la luce per veicolare le informazioni senza l'aiuto di un mezzo di trasmissione "fisico". Questi sistemi, infatti, non usano nessuna tipologia di cavo a fibra ottica, per la trasmissione delle informazioni, ma utilizzano l'aria, l'acqua, lo spazio libero o il vuoto come mezzo di propagazione. È una soluzione molto efficace perché permette la trasmissione di informazioni senza dover costruire una rete fisica di connessione tra i punti da collegare, il tutto nello spettro visibile [8].

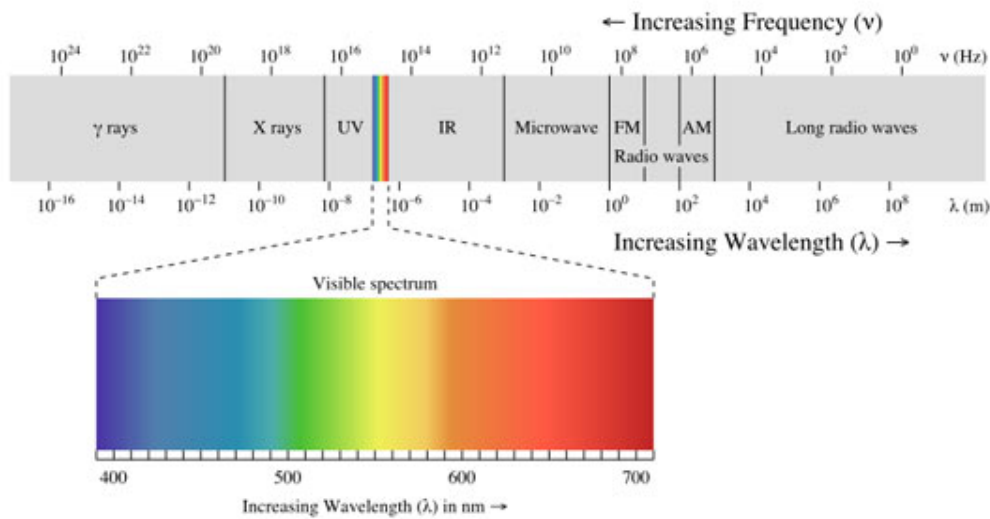


Figura 5 – Lo spettro elettromagnetico visibile e non [8].

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

La grande famiglia delle OWC è divisibile in 3 macro-insiemi con caratteristiche differenti tra loro: FSO, VLC e UVC.

- *FSO - Free Space Optics*

Soluzione per lunga distanza, utilizzano normalmente un fascio laser, più frequentemente trasmettono nell'infrarosso, arrivano a velocità oltre il Tb/s, richiedono però allineamento sorgente-ricevitore senza oggetti frapposti (LOS - *Line Of Sight*).

- *VLC - Visible Light Communication*

Funzionano per le medie e piccole distanze, possono usare diverse sorgenti luminose (LASER, RCLED, LED), le sorgenti emettono nello spettro visibile e sono integrabili con ogni sorgente di illuminazione, possono arrivare a velocità del Gb/s a brevi distanze, possono funzionare anche in ambienti outdoor, richiedono però allineamento sorgente-ricevitore senza oggetti frapposti (LOS - *Line Of Sight*).

- *UVC - Ultra Violet Communication*

Funzionamento buono in ambienti outdoor, utilizzano luce ultravioletta, sono implementabili anche con sorgenti LED, buon funzionamento anche senza corretto allineamento sorgente-ricevitore (NLOS - *Non Line Of Sight*).

I sistemi VLC presentano caratteristiche che li rendono molto interessanti nel panorama delle comunicazioni wireless.

1. Possono essere implementati attraverso delle comuni lampadine LED a basso consumo energetico: questi sistemi non aumentano il consumo energetico anche se il led viene modulato, cioè utilizzato per la trasmissione d'informazione; risulta pertanto una sorgente di informazioni "gratuita" dal punto di vista ambientale. Possono anche essere usati come sistemi di trasmissione di energia come descritto dal prof. Haas [6]. Inoltre come

documentato da Hussain et al. [9] la modulazione non causa un calo di luminosità in dispositivi CC LED (*Costant Current LED*), ma solo in quelli CV LED (*Constant Voltage LED*).

2. Potendo utilizzare lampade a LED, questi sistemi non richiedono enormi investimenti in quanto questa tecnologia è ampiamente diffusa e soprattutto ha dei costi di fabbricazione molto bassi. In un recente studio è stato dimostrato anche la possibilità di utilizzare i led per illuminazione come fotorivelatori con caratteristiche elettriche interessanti [10].
3. Sfruttando la tecnologia LED è possibile anche sfruttare più colori per l'invio di informazioni realizzando quindi canali completamente separati l'uno dall'altro senza interferenze tra loro (questo aspetto è attualmente in lavorazione e verrà pubblicato in un prossimo lavoro).
4. Data l'impossibilità di comunicazione al di fuori della *Line Of Sight* (LOS), queste comunicazioni risultano anche molto sicure, in quanto impossibile, per un soggetto estraneo, intercettare la comunicazione se non interponendosi fisicamente tra sorgente e ricevitore [11]. Inoltre, un raggio luminoso è intrinsecamente confinato dalle mura e pareti divisorie degli ambienti, rendendo così oltremodo sicura la comunicazione delle informazioni all'interno dello stesso ambiente che è ciò che differenzia le comunicazioni radio (es. Wi-Fi) da quelle ottiche (es. Li-Fi).

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

5.

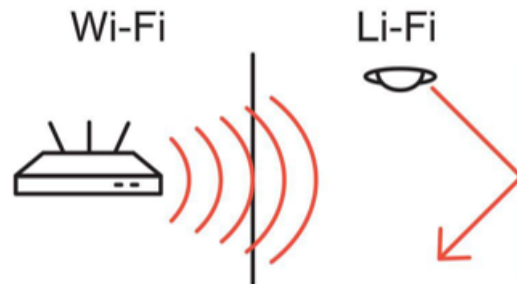


Figura 6 – Differenza tra Wi-Fi e Li-Fi.

6. È possibile costruire questi sistemi anche ibridi (con la sola sorgente o il ricevitore organici) o totalmente organici andando così a costruire un link di OVLC (*Organic VLC*).

La semplicità di questi sistemi di comunicazione si riflette anche sui circuiti con cui si possono implementare: bastano infatti dei led (o laser) e un circuito di modulazione della loro intensità come circuito di trasmissione, un fotorivelatore (o una cella solare), un amplificatore e un demodulatore come circuito di ricezione. Yu et al [12] e Tsonev et al [13] hanno dimostrato anche la possibilità di aggiungere circuiti di pre/post distorsione per garantire un aumento di banda di funzionamento non indifferente: nei loro lavori infatti sono riusciti ad arrivare anche a diversi Gb/s di trasmissione dati coprendo distanze di uso comune (5 metri).

L'utilizzo di questi sistemi semplici, oltre a favorire un alleggerimento delle richieste dello spettro RF, può essere di grande supporto in situazioni molto particolari, dove le comunicazioni radio possono essere disturbate o pericolose:

- all'interno degli aeromobili

Le comunicazioni possono essere fatte con l'illuminazione dell'abitacolo senza andare a interferire le comunicazioni tra piloti e i controllori di terra;

- in prossimità di raffinerie o distributori di carburanti

In questi luoghi molto pericolosi è spesso sconsigliato usare sistemi RF per la probabilità di generare scariche elettriche che possono creare scintille e innescare incendi o esplosioni;

- nei sistemi sottomarini

Come confermato da Cossu et al.[14] anche in un ambiente particolare come quello sottomarino è possibile l'uso dei sistemi VLC, semplificando la comunicazione tra sub, palombari o sottomarini di ricerca (*Project SUNRISE*);

- all'interno degli ospedali

Molto spesso, nei reparti specialistici come quelli di radiologia, medicina nucleare, terapia intensiva o unità coronariche, è proibito l'uso di apparecchiature RF per non interferire con apparati elettromedicali fondamentali per la diagnosi o la cura dei pazienti. L'utilizzo dei sistemi VLC potrebbe quindi abilitare comunicazioni veloci all'interno di queste aree ospedaliere;

- nell'*automotive*

In un crescente sviluppo delle tecnologie di guida semiautonoma/autonoma, l'impiego della comunicazione ottica tra i veicoli, *Vehicle-to-Vehicle* (V2VLC) o con le infrastrutture (V2X-VLC) potrebbe risultare fondamentale per la segnalazione delle emergenze, di pericoli, di pedoni sulla carreggiata o in casi di frenata d'emergenza [15-16].

L'intero sistema può fungere come supporto a lungo termine per i sistemi di guida autonoma [17], come l'impostazione della velocità attuale del veicolo sulle "smart road", segnalazione di immissione o di uscita su strade ad alta velocità. Qin et al [18] hanno dimostrato la possibilità di avere questo sistema "gratuito" dal punto di vista energetico senza andare ad intaccare apprezzabilmente i sistemi di accumulo dell'energia del veicolo;

- nell'indoor GPS (IPS - *Indoor Positioning Systems*)

Permette il posizionamento 3D di persone e/o oggetti all'interno degli edifici. È possibile così facilitare la navigazione o il lavoro di robot addetti, per esempio, al trasporto di oggetti, bevande, ecc...

Tutti questi sistemi risentono però di alcuni problemi comuni che scaturiscono dall'ambiente in cui sono utilizzati. I sistemi *outdoor*, ad esempio, soffrono molto delle condizioni atmosferiche, come pressione, altitudine, presenza di polveri, presentando spesso attenuazioni o distorsioni, significativamente importanti a grandi distanze rispetto l'allineamento sorgente/ricevitore; tale problematica è stata ampiamente affrontata negli anni precedenti dallo stesso Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI) [19-21].

I sistemi indoor possono invece soffrire della luce riflessa dalle pareti: questa può incidere sul ricevitore dopo aver percorso un tratto più lungo rispetto la luce diretta. È il fenomeno del "*multipath*" che può creare così una sovrapposizione di informazioni sfasate e ritardate tra loro. Anche l'illuminazione in background può essere dannosa perché può saturare il ricevitore causando l'interpretazione di un segnale in modo errato; inoltre, come nei sistemi *outdoor*, il pronunciato disallineamento sorgente-ricevitore incide drasticamente sulla bontà e velocità del *link* ottico (fig. 7).

Una possibile mitigazione di questi problemi è l'uso di sistemi basati su luce diffusa.

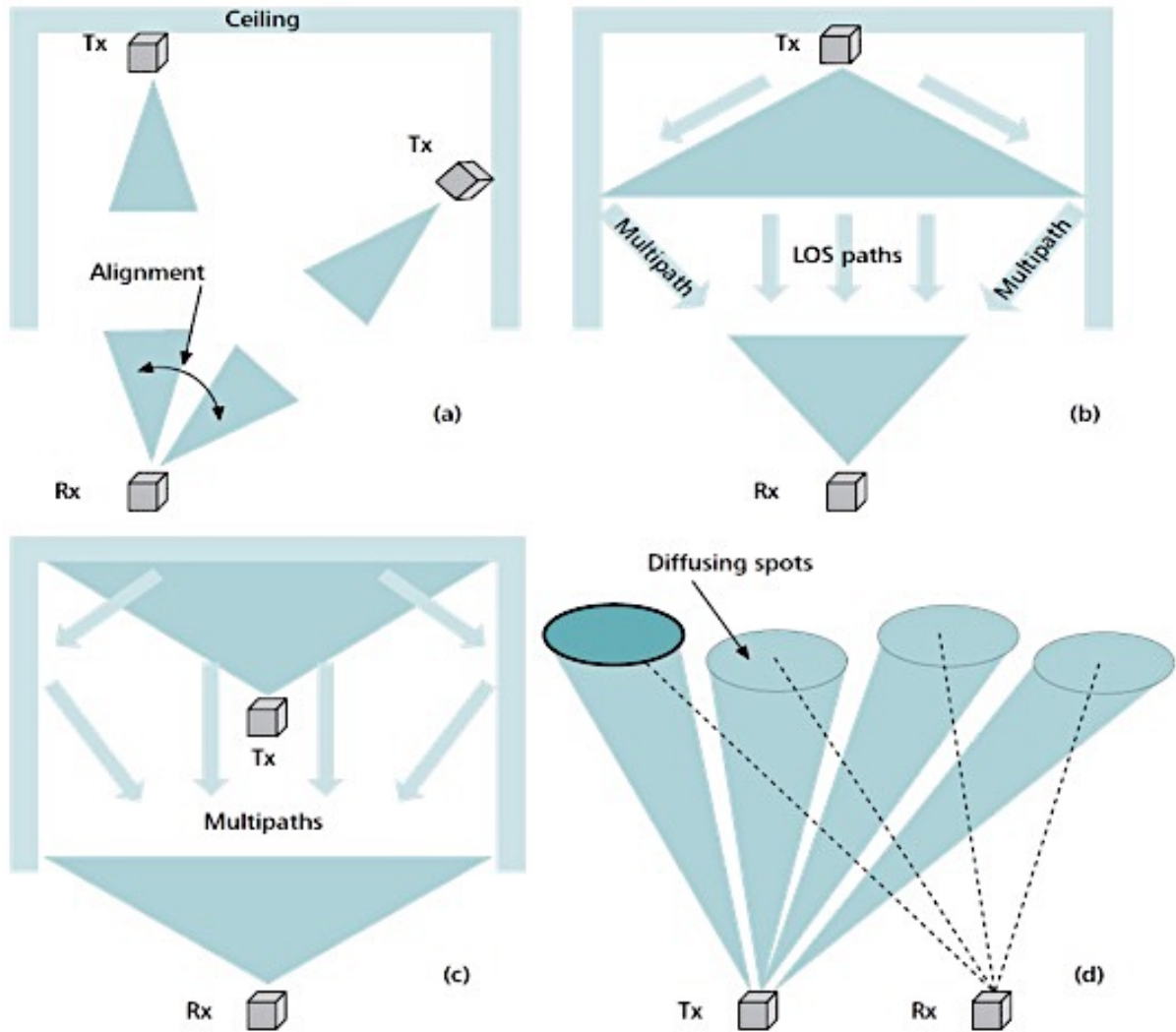


Figura 7 – Problematiche di riflessioni e allineamento in sistemi indoor: a) allineamento, b) riflessioni dirette, c) riflessioni indirette, d) illuminazione

3 – LI-FI – Light-Fidelity

Sul mercato è già possibile trovare qualche prima applicazione di questi sistemi di comunicazione: la *Disney*, già da anni, ha effettuato ricerche sulla possibilità di integrare questi sistemi IoT nei giochi per bambini [22].

L'azienda che più di tutte si sta muovendo in questa direzione è la *Purelifi*, co-fondata proprio dal Prof. Herald Haas: questa ha annunciato il lancio sul mercato della loro "Light Antenna ONE" [23]. Questo dispositivo permetterà la connessione tramite lo standard 802.11bb, in fase di approvazione finale, le cui operazioni di *uplink* e *downlink* sono posizionate nel vicino infrarosso, tra gli 800nm e i 1000nm [25].

Lo standard 802.15.7 definisce invece le comunicazioni ottiche veloci attraverso l'OCC (*Optical Camera Communications*) che utilizzano le lunghezze d'onda comprese tra i 190 nm e i 10000 nm, dall'UV al profondo IR: saranno capaci di trasmettere fino a 100Mb/s in sistemi punto-punto o broadcast [25].

Nella tabella seguente vediamo la comparazione delle due tecnologie, Li-Fi(VLC) e Wi-Fi(RF), argomento trattato anche in precedenti lavori dell'ISCTI [26-27]:

Tabella 1. Differenza nelle specifiche tra Li-Fi e Wi-Fi.

	LI-FI	WI-FI
SPEED	1-3.5 Gbps	54-250 Mbps
RANGE	10 meters	20-100 meters
IEEE STANDARD	802.15.7	802.11b
SPECTRUM RANGE	10000 times than WI-FI	Radio spectrum range
NETWORK TOPOLOGY	Point-to-Point	Point-to-Multi Point
DATA TRANSFER MEDIUM	Use light as a carrier	Use radio spectrum
FREQUENCY BAND	100 times of THz	2.4 GHz

Nel corso degli anni, oltre a questo dispositivo, la *Purelifi* ha commercializzato altri apparati molto interessanti tra cui veri e propri modem li-fi, “Li-Fi X”. Altre società si sono spinte verso l’integrazione di questa tecnologia negli apparati portatili, come per esempio negli smartphone, realizzando il sistema “WYSIPS Glass”. Questo ingegnoso sistema permette non solo di abilitare la ricezione dei dati trasmessi con la luce, ma anche la ricarica del dispositivo portatile attraverso lo stesso dispositivo fotovoltaico: questo sistema non è altro che un *layer* aggiuntivo integrato nel vetro dei display dello *smartphone* [28]. Con lo stesso accorgimento si sta lavorando per ricaricare le batterie dello *smartphone* con l’energia solare (fig. 8) [28].

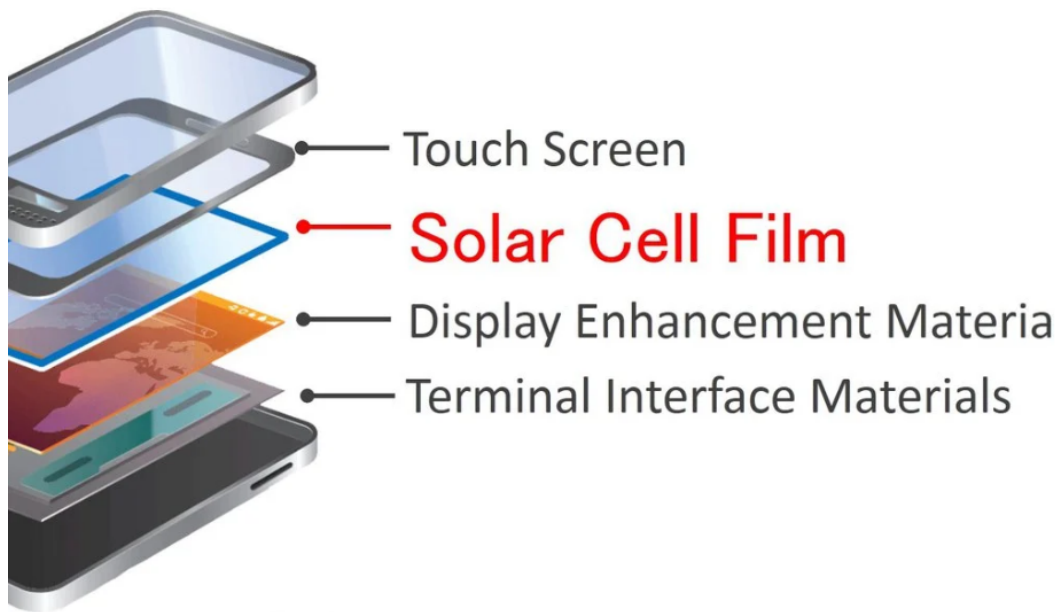


Figura 8 – Possibilità d’integrazione di un layer fotovoltaico per la ricarica dello smartphone [28]

Un altro campo di ricerca molto interessante è quello che è stato intrapreso dall’ISCTI in collaborazione con il CHOSE (*Centre for Hybrid and Organic Solar Energy*) di Tor Vergata negli scorsi anni: questi partners hanno collaborato nello studio di sistemi VLC ibridi. Sono stati implementati e caratterizzati sistemi VLC con dei fotorilevatori basati su tecnologie organiche e a perovskite, lavoro presentato anche alla XIV edizione di ECME (*European Conference on Molecular Electronics*) [29-30].

OWC (Optical Wireless Communication): una soluzione per il futuro

OWC (Optical Wireless Communication): a solution for the future

G. Susanna, A.E.A. Quirós, A. Schiavoncini, A. Reale

La scelta è ricaduta su questi dispositivi organici per le proprietà favorevoli rispetto una fabbricazione più “green” ed “ecofriendly” pur rinunciando ad alcune caratteristiche elettriche tipiche dei materiali inorganici.

4 – Conclusioni (sviluppi futuri)

Si sta attualmente lavorando nell’ISCTI per proseguire lo studio dell’argomento che offre tanti aspetti potenzialmente svilupparli e di rilevante interesse. Nel prossimo lavoro verranno analizzati i LED come sorgente, ed in particolare i LED per illuminazione *indoor* della Osram “*Off the shelf*” per dimostrare la possibilità di trasformare, con pochi accorgimenti, una qualunque lampada moderna in un sistema di comunicazione. Come ricevitori verranno usati dei fotorivelatori basati su semiconduttori organici, realizzati in collaborazione con il CHOSE, dimostrando come si possano raggiungere risultati interessanti, per la IoT, preservando i costi e rinunciando ad alcune caratteristiche elettriche dei semiconduttori inorganici.

Dopo delle misure di caratterizzazione delle sorgenti e dei ricevitori, verrà studiato il comportamento del singolo link VLC, quindi il suo comportamento anche quando in parallelo ad esso sono presenti altri link VLC a diverse lunghezze d’onda, simulando il contesto pratico di utilizzo di un sistema di illuminazione multicanale a luce bianca sostenuta da sorgenti RGB o anche a 6 colori.

Ne conseguono, infine, le possibili applicazioni che i tanti gruppi di ricerca stanno suggerendo alla comunità scientifica e come queste possano impattare gli utenti per un migliore utilizzo e soprattutto una sicura esperienza dell’IoT, dell’automotive, dell’*indoor* GPS e di dispositivi *wearable*.

5 - Bibliografia

- [1] Papua New Guinea frequency allocations chart (RF Spectrum Chart), 2017.
<https://www.nicta.gov.pg/regulatory/spectrum-radio-communications/radiofrequency-spectrum-allocation-chart/>
- [2] UK frequency allocations chart, 2018. <https://roke.co.uk/expertise/sensors-and-communications/the-roke-united-kingdom-frequency-allocation-table>
- [3] MIT Technology Review, 2019.
<https://www.technologyreview.com/2019/10/25/102492/5g-ai-darpa-next-generation-of-wireless-devices/>
- [4] Harald Haas "Wireless data from every light bulb", 2011.
https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
- [5] H. Haas, L. Yin, Y. Wang and C. Chen, "What is LiFi?," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, 2016.
doi: [10.1109/JLT.2015.2510021](https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2510021)
- [6] Harald Haas, "Forget Wi-Fi. Meet the new Li-Fi Internet", 2015.
https://www.ted.com/talks/harald_haas_forget_wi-fi_meet_the_new_li-fi_internet
- [7] Q. Huang, M. Lin, W. -P. Zhu, J. Cheng and M. -S. Alouini, "Uplink Massive Access in Mixed RF/FSO Satellite-Aerial-Terrestrial Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 4, pp. 2413-2426, 2021.
doi: [10.1109/TCOMM.2021.3049364](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3049364)
- [8] <https://www.nikonschool.it/experience/colore-melis.php>
- [9] B. Hussain, C. Qiu and C. P. Yue, "A Universal VLC Modulator for Retrofitting LED Lighting and Signage," *2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Osaka, Japan, 2019, pp. 1008-1009.
doi: [10.1109/GCCE46687.2019.9015255](https://doi.org/10.1109/GCCE46687.2019.9015255)
- [10] Asif, H.M.; Affan, A.; Tarhuni, N.; Raahemifar, K., "Deep Learning-Based Next-Generation Waveform for Multiuser VLC Systems", *Sensors* 2022, 22, 2771.

doi.org/10.3390/s22072771

[11] Rubén Boluda-Ruiz, Antonio García-Zambrana, Beatriz Castillo-Vázquez, and Khalid Qaraqe, "Secure communication for FSO links in the presence of eavesdropper with generic location and orientation," *Opt. Express* 27, 34211-34229 (2019).

[12] Z. Yu, C. Gong, J. Wei, N. Huang and Z. Xu, "3-Gb/s Visible Light Communication over 5 m Distance Based on Imaging System with Low Transmission Power and Off-the-Shelf LEDs", *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Harbin City, China, 2021, pp. 2109-2114.

[doi: 10.1109/IWCMC51323.2021.9498692](https://doi.org/10.1109/IWCMC51323.2021.9498692)

[13] D. Tsonev *et al.*, "A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride [Math Processing Error]," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 7, pp. 637-640, April 1, 2014.

[doi: 10.1109/LPT.2013.2297621](https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2297621)

[14] G. Cossu, A. Sturniolo, A. Messa, S. Grechi, D. Scaradozzi, A. Caiti, and E. Ciaramella, "Sea-trial of an Ethernet-based Underwater VLC Communication System," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online), Optica Publishing Group, 2018, paper Tu2I.2.

[15] Y. H. Kim, W. A. Cahyadi and Y. H. Chung, "Experimental Demonstration of VLC-Based Vehicle-to-Vehicle Communications Under Fog Conditions," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1-9, Dec. 2015, Art no. 7905309.

[doi: 10.1109/JPHOT.2015.2499542](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2499542)

[16] L. Danys, R. Martinek, R. Jaros, J. Baros, P. Simonik *et al.*, "Enhancements of sdr-based fpga system for v2x-vlc communications," *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, no.3, pp. 3629–3652, 2021.

[17] <https://it.motor1.com/features/461050/guida-autonoma-assistita-differenze-livelli/>

[18] Qin, L., Zhang, Y., Song, K. *et al.* "Visible light communication system based on spread spectrum technology for intelligent transportation", *Opt Quant Electron* 49, 252 (2017).

[doi: 10.1007/s11082-017-1086-4](https://doi.org/10.1007/s11082-017-1086-4)

[19] G. Susanna, S. Di Bartolo, D. Carleo, S. Penna, S. Betti, A. Reale, “*Weather influence on performance of a Seamless Free Space Optic (FSO) link in a PON scenario*”, ICTON2019, poster.

[20] G. Susanna, V. Lucli, V. Attanasio, S. Di Bartolo, L. Salamandra, A. Pizzoleo, D. Carleo, A. Reale, “*Influenza meteorologica sui sistemi di trasmissione in spazio libero FSO*”, La comunicazione, 2018.

[21] G. Susanna, A. Reale, “*Strategie di mitigazione di sistemi di comunicazione ottica nello spazio libero in presenza di turbolenze atmosferiche*”, La comunicazione, 2021.

[22] <https://la.disneyresearch.com/publication/enlighting>

[23] <https://purelifi.com/light-antenna-one-mwc>

[24]

[https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm#:~:text=The%20IEEE%20802.11bb%20Task,for%20Standards%20Development%20\(CSD\)](https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm#:~:text=The%20IEEE%20802.11bb%20Task,for%20Standards%20Development%20(CSD))

[25] <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.7/6820>

[26] L. Salamandra, C. Fazolo, V. Attanasio, G. Susanna, S. Penna, A.S. Michelangeli, “*Comunicazioni Ottiche con Luce Visibile da dispositivi Organici*”, La Comunicazione, 2017.

[27] Organic Visible Light Communication, “*the CreActive Network*”, Atti Conferenza GARR 2016.

[28]

<https://sunpartnertechnologies.com/wysips-crystal-to-be-tested-in-kyocera-smartphones>

[29] L. Salamandra, L. La Notte, C. Fazolo, M. Di Natali, S. Penna, L. Mattiello, L. Cinà, R. Del Duca, A. Reale, “*A comparative study of organic photodetectors based on P3HT and PTB7 polymers for visible light communication*”, Organic Electronics, Volume 81, 2020.

doi: [10.1016/j.orgel.2020.105666](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105666)

[30] L. Salamandra, G. Susanna, C. Fazolo, V. Attanasio, S. Di Bartolo, A. Pizzoleo, E. Manca, A. Reale, “*Polymer Bulk-Heterojunction Organic Photo-Detector for application in Visible Light Communication systems*”, Atti conferenza ECME 2017.