

Dario De Leonardis

Ricercatore dell'Università
Sapienza di Roma presso
Istituto Superiore delle
Comunicazioni e delle
Tecnologie
dell'Informazione –
ISCOM

Frank Silvio Marzano,

Saverio Mori

Dipartimento di
Ingegneria
dell'Informazione,
Elettronica e
Telecomunicazioni de La
Sapienza di Roma

Silvia Di Bartolo,

Vincenzo Attanasio

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

Ultraviolet Communications (UV-C): potenzialità e applicazioni di una tecnica di comunicazione ottica in spazio libero (FSO) a corto raggio

***Ultraviolet Communications (UV-C): potentials and applications
of a short-range Free Space Optics (FSO) communication
technique***

Sommario: Il proliferare e lo sviluppo, negli ultimi decenni, tanto dei paradigmi protocollari quanto dei sistemi elettronici a supporto delle comunicazioni wireless ha portato le diverse linee di ricerca del settore ad esplorare continuamente alternative per ovviare ai problemi legati all'infrastruttura, alla licenza o ai costi implementativi e della manutenzione. Nell'ambito delle reti ottiche sono state recentemente avanzate soluzioni integrative con l'attuale assetto in pianta stabile: ad esempio, segmenti della rete che sfruttano tecnologie ibride, nei quali si alternano la fibra e i collegamenti ottici in spazio libero (Free Space Optics – FSO), nella porzione di spettro dell'infrarosso e in rapporto di visibilità diretta. Nel presente articolo verrà illustrata una tecnica di comunicazione a corto raggio già nota in letteratura come UV-C (Ultraviolet Communication), che è possibile dispiegare anche nella configurazione Non-LOS (Non-Line-Of-Sight): se ne argomenteranno vantaggi e svantaggi, potenzialità e applicazioni nell'attuale panorama delle telecomunicazioni.

Abstract: The proliferation and development, in the last decades, of both protocol paradigms and electronic systems supporting wireless communications has led the various lines of ICT (Information and Communications Technology) research to continuously explore options to solve the problems related to infrastructure, license and implementation or maintenance costs. Under the sphere of optical networks, solutions integrating in the current established layout have been recently promoted: e.g., segments of the network that exploit hybrid technologies, where fiber and Free Space Optics (FSO) links alternate, in the portion of Infrared spectrum and in Line-Of-Sight (LOS) configuration. In the present paper a short-range communication technique well-known in literature as UV-C (Ultraviolet Communication), which can be also deployed in Non-LOS configuration is shown: its pros and cons, potentials and applications in the today telecommunications scenario are discussed.

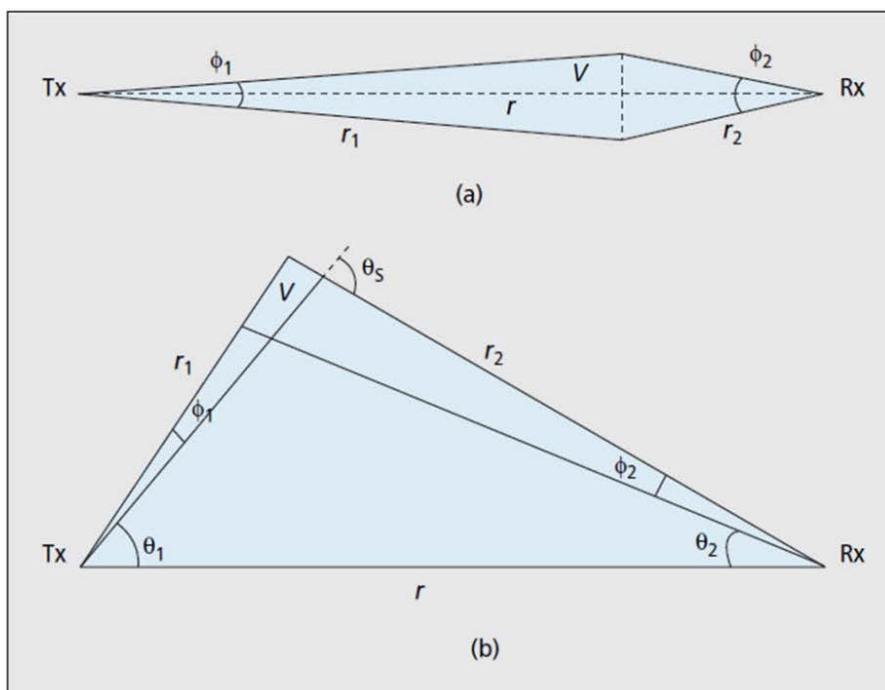
1. Introduzione

Le comunicazioni ottiche in spazio libero (note sotto l'acronimo FSO: Free Space Optics) vengono usualmente impiegate laddove, per meglio distribuire traffico e risorse di rete, si rendono necessari collegamenti punto-punto ad alto data-rate che possano raggiungere anche distanze di diversi chilometri. Rispetto alla controparte in RF (Radio Frequenza), un collegamento FSO garantisce maggiore disponibilità di banda (la porzione di spettro superiore ai 300 GHz non è sottoposta a licenza), sicurezza interna, robustezza all'interferenza da campi elettromagnetici esterni e quel confinamento spaziale il quale consentirebbe un alto fattore di riuso nelle reti cellulari. Tali sistemi di comunicazione gravitano idealmente intorno alle zone periferiche della rete, se non direttamente lungo il perimetro che la circonda, in collegamenti puntuali tra nodi del backhaul come nell'ultimo miglio, per semplificare l'accesso all'infrastruttura in fibra senza ridurre le prestazioni di carico. Le applicazioni FSO spaziano dalla connessione di reti locali all'interno di aziende o campus universitari al backhaul per sistemi cellulari, dalle connessioni per il recupero dati in stato di emergenza (disaster recovery) alla sicurezza di enti civili e statali come in reti temporanee occasionalmente dispiegate per funzioni militari [1].

2. Tecnologia UV-C

Nell'ambito FSO, le comunicazioni nell'ultravioletto (UV-C) occupano attualmente un posto non meno rilevante di quello riservato all'infrarosso. Infatti, all'interno dell'intera banda dell'ultravioletto (4-400 nm), UV-C sfrutta la porzione compresa tra i 200 e 280 nm, che è solar-blind [2] per i collegamenti di terra, rendendosi di fatto trascurabile la radiazione solare, a causa dell'assorbimento da ozono negli strati più alti dell'atmosfera: il che incoraggia l'impiego di un photo-detector ad ampio campo-visuale (Field-Of-View - FOV), in grado di incrementare l'energia ricevuta a fronte di un minore rumore di fondo. Inoltre, a queste lunghezze d'onda, il fenomeno di diffusione (scattering) dovuto all'interazione tra i fotoni e le molecole o altre particelle di diametro maggiore come quelle del pulviscolo atmosferico (aerosols), è molto pronunciato e un'alta percentuale di energia viene diffusa nello spazio senza alcuna correlazione con l'angolo d'incidenza del raggio sulla particella (è in altri termini buona approssimazione del fenomeno una funzione isotropica), generando diversi percorsi di comunicazione tra la sorgente e il destinatario. Di conseguenza, tanto i

collegamenti Non-LOS quanto quelli LOS possono essere implementati in un sistema di comunicazione nell'ultravioletto (Fig. 1).



D'altro canto, la significativa percentuale di assorbimento atmosferico in questa banda, pur limitando il raggio di copertura della comunicazione, permette una più agevole gestione dell'accesso multiplo, riducendo l'interferenza multi-user. Ma occorre ricordare che la potenza di trasmissione di tali tecnologie deve essere ulteriormente temperata rispetto ai limiti di esposizione per gli occhi e la pelle, previsti dall' ICNIRP [3] (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) e dall'IEC [4] (International Electrotechnical Commission). Nella banda di operatività dell'UV-C (tra i 200 e i 280 nm) l'esposizione continua minima permessa nell'intervallo d'un secondo corrisponde a un livello di 3 mJ/cm^2 alla lunghezza d'onda di 270 nm, ma sale a 100 mJ/cm^2 in corrispondenza dei 200 nm mentre finisce per attestarsi intorno ai $3,4 \text{ mJ/cm}^2$ muovendo verso i 280 nm [5]. Oltretutto, il NIOSH [6] (National Institute for Occupational Safety and Health) prescrive che la durata dell'esposizione ad una intensità di $100 \mu\text{W/cm}^2$ su una lunghezza d'onda di 254 nm non ecceda il minuto. Se si media sulle otto ore di una giornata lavorativa, il valore diviene $0,2 \mu\text{W/cm}^2$. Tuttavia, anche per una sorgente ottica UV ad ampio spettro (broad-band) è possibile fornire una relazione esemplare, come quella che vede a confronto l'Irradianza Effettiva (W/m^2) e la Massima Esposizione Ammissibile (MPE: Maximum Permissible Exposure), ovvero il parametro che definisce la massima durata d'esposizione ad

Figura 1. Collegamenti ottici LOS (a) e Non-LOS (b).

una radiazione UV perché il suo impatto possa essere ritenuto non dannoso (Tab. 1).

Irradianza Effettiva (W/m²)	MPE
0.001	8 h
0.008	1 h
0.05	10 m
0.5	1 m
3	10 s
30	1 s
300	0.1 s

Di particolare interesse risulta pertanto la configurazione del collegamento UV-C, al fine di una riduzione sensibile dell'impatto sulla salute e sull'ambiente circostante. Nelle condizioni di comunicazione Non-LOS, ad esempio, il canale si affida esclusivamente alla radiazione diffusa: le particelle costitutive dell'atmosfera si comportano, in tal caso, come una moltitudine di microscopici scatterers distribuiti nello spazio. L'attenuazione dovuta a questa tipologia di canale è alta e il fenomeno di dispersione può limitare il data-rate a centinaia di kb/s e il raggio di copertura a poche centinaia – se non decine – di metri, nonostante il canale si dimostri di contro robusto rispetto alla variazione delle condizioni atmosferiche. Infatti, la riduzione di visibilità dovuta all'incremento della concentrazione particellare nell'atmosfera, si traduce in un notevole aumento dell'energia diffusa nello spazio e conseguentemente, in mancanza di un cammino diretto, in un miglioramento netto della qualità del collegamento. La costruzione del canale fisico in tale configurazione (noto in letteratura come sistema UV-C Non-LOS) è stata studiata ed è ancora in corso di approfondimento da parte della comunità scientifica del settore e risulta particolarmente significativo per la ricerca di un modello numerico o di uno analitico che siano in grado di coprire con buona approssimazione il complesso fenomeno della propagazione dei fotoni.

Tabella 1. Irradianza Effettiva vs MPE (durata di esposizione)

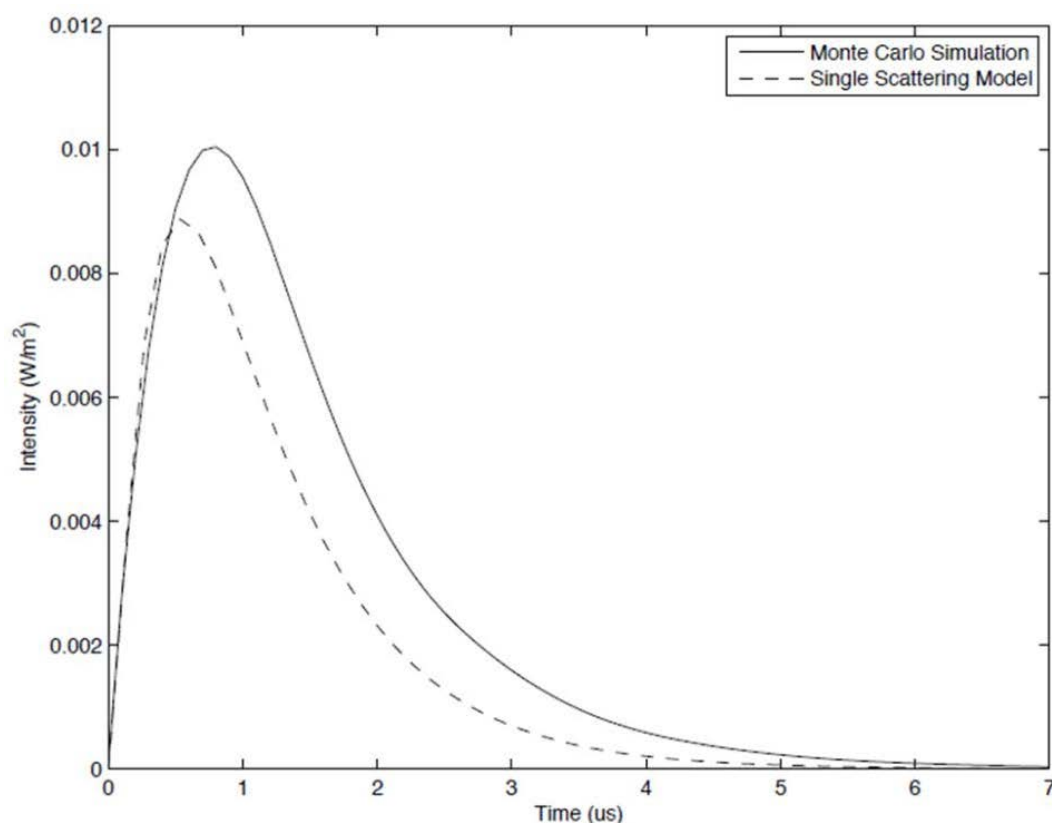
3. Stato dell'arte: modello teorico del canale UV-C Non-LOS

In quanto al modello teorico del canale del sistema UV-C Non-LOS precedentemente menzionato, allo stato attuale degli studi è possibile individuare caratteristiche comuni tra le diverse strade percorse dai ricercatori. Guardando da vicino il fenomeno della propagazione dei fotoni, il mezzo atmosferico da questi attraversato in una molteplicità di cammini può essere considerato, nella banda UV, omogeneo e isotropico; i fotoni vengono modellati come quanti d'energia (photon packets), una parte dei quali può essere assorbita dal mezzo prima di giungere a destinazione (secondo una legge di probabilità), mentre la rimanente è diffusa nello spazio circostante secondo una funzione di fase che descrive il profilo di distribuzione energetica per angolo di diffusione [7].

I modelli numerici proposti sfruttano il metodo Monte Carlo per calcolare la risposta impulsiva del mezzo alla sollecitazione ottica UV e inquadrano il fenomeno in modo esaustivo, in quanto permettono di calcolare anche più ordini di diffusione energetica (multi-scattering), ma risultano strutturalmente complessi, se si escludono semplificazioni algoritmiche, dal punto di vista computazionale [8].

I modelli analitici semplificano, al contrario, il calcolo della risposta impulsiva di canale, ma non sono in grado di coprire il fenomeno della diffusione energetica in modo completo, sfruttando una costruzione geometrica ellittica dello scenario di propagazione, utile solo quando è possibile, con buon grado di approssimazione, fermarsi al primo ordine di diffusione (single-scattering)[9].

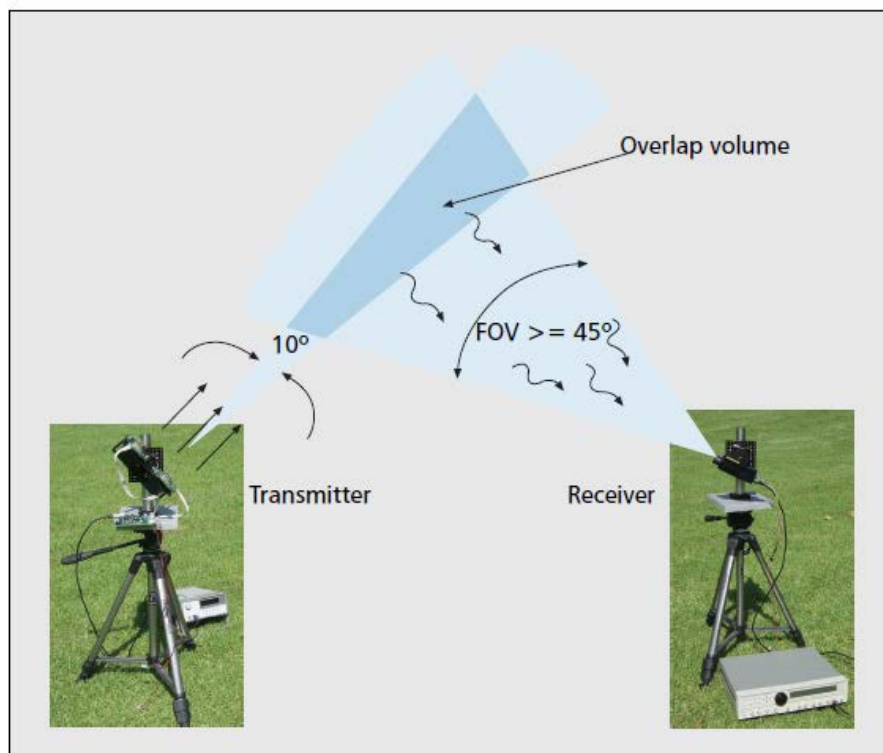
La Fig. 2 mostra come il modello a singola diffusione fornisca sostanzialmente una sottostima della risposta impulsiva di canale (tanto in termini d'intensità quanto nella durata temporale), non tenendo nel conto complessivo quel "recupero" dell'energia dispersa nello spazio dovuto al fenomeno della diffusione multipla. Dalla risposta impulsiva è possibile poi risalire direttamente all'attenuazione di canale (path-loss), un parametro fondamentale per realizzare un confronto immediato con i dati sperimentali.



4. Stato dell'arte: applicazione sperimentale del sistema UV-C Non-LOS

Dal lato sperimentale, il sistema UV-C Non-LOS è stato esplorato in dettaglio solo attraverso le tecnologie dell'ultima generazione. Un caso esemplare può essere individuato nel test-bed recentemente messo in piedi all'Università della California di Riverside (UCR) [10]: il trasmettitore utilizza un generatore di funzione per produrre il segnale digitale e un circuito di modulazione OOK (On-Off Keying) per pilotare i led di sorgente (disposti in configurazione di array, della tipologia UVTOP250 e UVTOP280, con lunghezze d'onda nominali di 250 e 280 nm rispettivamente), mentre il ricevitore impiega un filtro solar-blind a 255 nm (o 271 nm), che precede la finestra di incameramento del photo-detector (un apparato PMT: Photo-Multiplier Tube), come mostrato in Fig. 3.

Figura 1. Modello a singola diffusione e simulazione Monte Carlo a multi-diffusione.



Le misure e i risultati ottenuti in tale scenario di comunicazione dimostrano come varia il compromesso tra raggio di copertura e BER (Bit Error Probability) e gli effetti di alcuni parametri chiave sulla qualità del collegamento, come, ad esempio, gli angoli di elevazione (zenitale) e azimutale di trasmettitore e ricevitore, nonché l'impatto dei filtri e dell'apparato di ricezione PMT sulle prestazioni complessive della trasmissione. In conclusione, il sistema UV-C Non-LOS si rivela, come atteso, una forma di tecnologia capace di migliorare le prestazioni laddove il mezzo atmosferico risulti largamente dispersivo (alta percentuale di scattering particellare) e pertanto ideale per collegamenti a corto o medio raggio. La diffusione multipla diventa il fenomeno dominante nel caso in cui i campi-visuale di sorgente e photo-detector si sovrappongano su un volume esteso. Con l'aumento della distanza tra i due dispositivi, crescono però anche gli effetti di un altro fenomeno di perturbazione atmosferica: la turbolenza (o scintillazione), dovuta al cambiamento dell'indicedi rifrazione locale nel mezzo trasmissivo, in presenza di vento, mulinelli o altre mutazioni, come quelle di carattere termico [11, par. 3.3.6]. Risulta chiaro, alla luce di quanto osservato finora, che ricostruire il canale per il sistema UV-C Non-LOS, in modo tale da ottenere un modello di comparazione esauriente con i risultati numerici e di misura ricavati sul campo, è estremamente delicato per la molteplicità di fattori e variabili da tenere in considerazione, sebbene il fenomeno della propagazione dei fotoni sia per definizione semplificato dalla riduzione alle leggi dell'ottica.

Figura 3. Sistema UV-C Non-LOS realizzato dall'Università della California di Riverside.

Conclusioni

Dunque, la tecnologia UV-C offre indubbiamente i vantaggi della riduzione del consumo energetico (utile soprattutto in ambiente Green-Networking) e dei costi d'implementazione (o di manutenzione), requisiti di puntamento meno stringenti rispetto ai sistemi che lavorano nell'infrarosso e maggiore sicurezza, in special modo laddove le specifiche di banda e raggio di copertura sono modeste e quindi con agio può essere dispiegata una configurazione Non-LOS (ma un discorso analogo vale per i sistemi UV-C LOS). Tuttavia bisogna osservare, di contro, che si tratta di una forma di tecnologia ancora in fieri, attualmente ferma allo stadio di prototipo o di applicazione elitaria (in ambito aziendale e militare), senza dimenticare il recente studio teorico, che dimostra la forte sensibilità del dispositivo rispetto al canale di propagazione, sul quale, come precedentemente osservato, la variazione delle condizioni meteorologiche ha un impatto notevole e può piuttosto orientare l'interesse scientifico verso soluzioni ibride FSO/RF [12]. D'altro canto, il campionario delle possibili applicazioni per sistemi di comunicazione in banda UV è decisamente vasto e spazia dalle reti di sensori distribuite [13] ai sensori a circuito integrato applicati alla medicina, dal telerilevamento del particolato (in tipologia, forma e distribuzione) al fine di monitorare il livello dell'inquinamento atmosferico alle reti ad hoc mobili, dal dispiegamento in eventi temporanei o negli stati d'emergenza (disaster recovery) alle reti di sensori UGS (Unattended Ground Sensor) o che connettono strumentazione ed unità di una base militare [14].

Bibliografia:

[1] – 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.

[2] – L. R. Koller, “Ultraviolet Radiation”, 2nd ed., John Wiley and Sons, 1965.

[3] – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) – “Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)”, Health Physics, vol. 49, pp. 331-340, 1985; vol. 56, pp. 971-972, 1989; vol. 71, pp. 978, 1996; vol. 87, no. 2, pp. 171-186, 2004.

[4] – International Electrotechnical Commission (IEC) – IEC 60825-12, “Safety of Laser Products – Part 12: Safety of Free Space Optical Communication System Used for Transmission of Information”, 2005.

[5] – Z. Xu, B. M. Sadler, “Ultraviolet Communications: Potential and State-of-the-Art”, IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 5, pp. 67-73, May 2008.

[6] - National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) - www.cdc.gov.

[7] - H. Ding, G. Chen, A. K. Majumdar, B. M. Sadler, Z. Xu, “Modeling of Non-Line-of-Sight Ultraviolet Scattering Channels for Communication”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27, no. 9, pp. 1535-1544, Dec. 2009.

[8] – R. J. Drost, T. J. Moore, B. M. Sadler, “Monte-Carlo based multiple-scattering channel modeling for non-line-of-sight ultraviolet communications”, Proc. SPIE 8038, Atmospheric Propagation VIII, 803802, May 2011.

[9] – M. A. Elshimy, S. Hranilovic, “Impact of finite receiver-aperture size in a non-line-of-sight single-scatter propagation model”, J. Opt. Soc. Am. A, vol. 28, no. 12, pp. 2568-2576, Dec. 2011.

[10] – Z. Xu, G. Chen, F. Abou-Galala, M. Leonardi, “Experimental Performance Evaluation of Non-Line-of-Sight Ultraviolet Communication System”, Proc. SPIE Photonics and Optics, Free Space Laser Commun. VII, vol. 6709, pp. 67090Y1–12, San Diego, CA, Aug. 2007.

[11] - Z. Ghassemloy, W. Popoola, S. Rajbhandari, “Optical Wireless Communications – System and Channel Modeling with Matlab”, CRC Press, 2012.

[12] – M. Usman, H.– C. Yang, M.–S. Alouini, “Practical Switching-Based Hybrid FSO/RF Transmission and Its Performance Analysis”, IEEE Photonic Journal, vol. 6, no. 5, 7902713, Oct 2014.

[13] – D. Kedar, S. Arnon, “*Non-Line-of-Sight Optical Wireless Sensor Network Operating in Multiscattering Channel*”, Applied Optics, vol. 45, no. 33, pp. 8454-8461, Nov. 2006.

[14] – D. M. Reilly, D. T. Moriarty, J. A. Maynard, “*Unique Properties of Solar Blind Ultraviolet Communication Systems for Unattended Ground Sensor Networks*”, Proc. SPIE, vol. 5611, pp. 244-254, Oct. 2004.