



## Impacto de la Relación PAOPR en Sistemas de Comunicaciones Ópticas Atmosféricas

**Jurado-Navas, Antonio; Garcia-Zambrana, A.; Puerta-Notario, Antonio**

*Published in:*

XXI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio

*Publication date:*

2006

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Jurado-Navas, A., Garcia-Zambrana, A., & Puerta-Notario, A. (2006). Impacto de la Relación PAOPR en Sistemas de Comunicaciones Ópticas Atmosféricas. In *XXI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio* (pp. 1018-1021)

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Impacto de la Relación PAOPR en Sistemas de Comunicaciones Ópticas Atmosféricas

A. Jurado Navas, A. García Zambrana, A. Puerta Notario  
 Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga  
 Campus de Teatinos s/n, E-29071 Málaga, Spain  
 e-mail: {navas,agz,apn}@ic.uma.es

**Abstract**—In free-space optical communication links, atmospheric turbulence causes fluctuations in both the intensity and the phase of the received light signal, impairing link performance. In this paper, the very good performance of a simple rate-adaptive transmission scheme based on the use of variable silence periods and OOK formats with memory is corroborated in free space optical links. OOK formats with memory have revealed a greater increase of the peak-to-average optical power ratio (PAOPR). This fact is also corroborated with a new technique of triangular interleaving. As a conclusion, PAOPR has shown to be a very efficient parameter in order to evaluate the suitability of different rate-adaptive transmission techniques to the peculiar characteristics of optical wireless communications.

## I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones ópticas en espacio libre permiten el establecimiento de enlaces de visión directa (LOS) de alta capacidad susceptibles de ser utilizados en multitud de aplicaciones. Las elevadas tasas binarias que se pueden conseguir son una consecuencia directa del enorme ancho de banda disponible. Además, estos sistemas son prácticamente invulnerables a las interferencias, aspecto que no se produce en los sistemas homólogos de radiofrecuencia. Finalmente, su carácter inalámbrico les confiere un interés relevante como importante alternativa a los sistemas de radio en el acceso de alta capacidad en el segmento de la última milla fundamentalmente en zonas rurales donde la diseminación no justifique el despliegue de enlaces cableados.

Sin embargo, las prestaciones de este tipo de comunicaciones pueden verse seriamente afectadas por el desvanecimiento de la señal ocasionado por la turbulencia atmosférica. Ésta se ocasiona principalmente por microvariaciones de presión y temperatura que conllevarán a fluctuaciones locales del índice de refracción. A consecuencia de este fenómeno, la señal que se propague sufrirá fluctuaciones en su intensidad y fase, fenómeno conocido como escintilación.

Diversos autores se han encargado de estudiar el fenómeno de la turbulencia atmosférica, y han desarrollado varios modelos teóricos que permitan su descripción [1]-[3]. De estos estudios, han surgido algunas propuestas de canal [4]-[6] que permiten modelar el efecto de las inhomogeneidades atmosféricas sobre la señal transmitida.

A partir del modelo de canal atmosférico propuesto por los autores en [6], en el que se incluyen efectos adversos que degradarán a la señal óptica propagada tales como la intensidad de la turbulencia o la velocidad del viento, se

estudiarán las prestaciones de los esquemas de señalización on-off keying (OOK) con pulsos gaussianos de reducido ciclo de trabajo (OOK-GS) acompañados de tasa adaptativa basada en la inserción de períodos de silencio variable y memoria. Ambas estrategias fueron definidas inicialmente en [7] para ambiente interior y van encaminadas a maximizar la relación de potencia óptica pico a promedio (PAOPR) de los pulsos transmitidos ya que, tal y como se inició en [8], el PAOPR constituye una figura de mérito adecuada para evaluar el comportamiento de distintos esquemas de transmisión en estos entornos.

En esta comunicación se introduce por primera vez en ambientes turbulentos un esquema de transmisión OOK-GS que evita la presencia de un pulso en al menos tres intervalos de bit consecutivos (OOK-GScc). Sus prestaciones serán comparadas con el esquema OOK-GSc estudiado en [8], al que se dotará de técnicas tales como codificación de bloque y diferentes técnicas de entrelazado destinadas a minimizar la probabilidad de error.

## II. COMUNICACIÓN ÓPTICA EN ATMÓSFERA TURBULENTA

La turbulencia atmosférica puede ser descrita físicamente por la teoría de cascadas propuesta por Kolmogorov [1]-[3]. La masa de aire turbulento está compuesta por un conjunto de torbellinos de diferentes tamaños donde se asume que cada uno de ellos es homogéneo, aunque con un índice de refracción,  $n$ , diferente al de sus vecinos. La energía procedente del movimiento de las masas de aire irá siendo transportada a torbellinos cada vez más pequeños hasta que se termine disipando en calor por viscosidad. El tamaño de estos torbellinos está comprendidos entre  $L_0$  o macroescala de la turbulencia, y  $l_0$  o microescala. Estas microvariaciones en el índice de refracción de la atmósfera ocasionarán fluctuaciones en la irradiancia de la señal óptica transmitida, fenómeno conocido como escintilación atmosférica.

Si se asume, como en [9], que la macroescala  $L_0$  y la microescala  $l_0$  de la turbulencia satisfacen la condición

$$L_0 \gg \sqrt{\lambda L} \text{ and } l_0 \ll \sqrt{\lambda L}, \quad (1)$$

se obtiene la más sencilla de las expresiones dadas para la función de estructura de las fluctuaciones del índice de refracción,  $\Phi_n(\kappa)$ , dada por

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2(z) \kappa^{-\frac{11}{3}}, \quad (2)$$

que suele denominarse también como espectro de Kolmogorov. En él,  $C_n^2$  es el parámetro de estructura de las fluctuaciones del índice de refracción mientras que  $\kappa$  es el número de onda espacial.

El empleo de la aproximación de Rytov [3][4] junto a la aplicación del teorema del límite central permiten describir la expresión de la intensidad recibida,  $I$ , de la forma [10]:

$$I = I_0 \exp(2\chi - 2E[\chi]), \quad (3)$$

siendo  $I_0$  la intensidad de la señal en ausencia de turbulencia y  $\chi$  la fluctuación de la log-amplitud de la señal óptica, que puede ser modelada como una variable aleatoria gaussiana de media  $E[\chi]$  y covarianza  $\sigma_\chi^2$ , dependiente tanto de  $C_n^2$  como de la longitud del vano  $L$ . Por tanto, la función densidad de probabilidad que describirá a la irradiancia,  $I$ , es lognormal, de varianza  $\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_\chi^2) - 1$ .

### III. MODELO DE CANAL ATMOSFÉRICO

Debido a que el esquema de transmisión-recepción implementado se basa en un esquema modulación en intensidad y detección directa (IM/DD), serán las fluctuaciones de intensidad que sufra la señal óptica las que más afecten a las prestaciones del sistema. Por ello, el modelo de canal atmosférico que se presenta en esta sección simulará tales fluctuaciones de intensidad. En particular, se adoptará la propuesta que ya fue desarrollada por los autores en [6], consistente en el esquema multiplicativo mostrado en Fig. 1, donde  $\alpha_{sc}(t) = \exp(2\chi(t) - 2E[\chi])$  representa a los coeficientes de escintilación, mientras que  $n(t)$  hace referencia al ruido blanco Gaussiano de naturaleza aditiva cuya componente principal será el ruido shot de alta intensidad procedente de la luz ambiental.

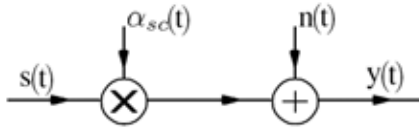


Fig. 1. Modelo de canal óptico atmosférico.

De forma más detallada, se presenta en la Fig. 2 la generación de los coeficientes  $\alpha_{sc}(t)$ . Puesto que la mayoría de los trabajos que se han venido desarrollando hasta la fecha se han centrado en las fluctuaciones de la perturbación de la log-amplitud,  $\chi$ , y favoreciéndose de su naturaleza Gaussiana, es posible aplicar el método de Clarke en la obtención de tales coeficientes de escintilación. La forma en que se lleva a cabo consiste en filtrar una señal aleatoria Gaussiana,  $z(t)$ , de forma que la salida del filtro siga manteniendo esa distribución Gaussiana, pero con la forma deseada para su densidad espectral de potencia, y que ha venido impuesta por  $H_{sc}(f)$ . El espectro de potencia del filtro fue obtenido en [6] y responde a la expresión:

$$|H_{sc}(f)|^2 = \sigma_\chi^2 \tau_0 \sqrt{\pi} e^{-(\pi \tau_0 f)^2}, \quad (4)$$

siendo  $\tau_0 = \sqrt{(\lambda L)}/u_\perp$  el tiempo de coherencia atmosférica,  $\lambda$  la longitud de onda óptica,  $L$  la distancia del enlace y  $u_\perp$

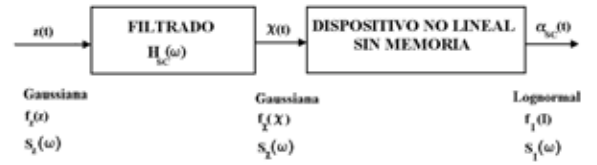


Fig. 2. Diagrama de bloques de la técnica propuesta por Gujar y Kavanagh [11].

la componente de la velocidad del viento perpendicular a la dirección de propagación del haz de luz.

La salida del filtro,  $\chi(t)$ , es la fluctuación de la log-amplitud de la señal óptica transmitida. Posteriormente,  $\chi(t)$  atraviesa un dispositivo no lineal sin memoria que convierte su función densidad de probabilidad de Gaussiana a log-normal, característica de las fluctuaciones de intensidad en regímenes de turbulencia débil. La transformación empleada, propuesta en [11], responde a la expresión

$$f_\chi\left(\chi - \frac{\delta\chi}{2}\right) |\delta\chi| = f_{\alpha_{sc}}\left(\alpha_{sc} - \frac{\delta\alpha_{sc}}{2}\right) |\delta\alpha_{sc}|. \quad (5)$$

Consecuentemente, para cualquier punto  $(\chi, \alpha)$  de la transformación, la probabilidad de que  $\chi(t)$  esté dentro del intervalo  $(\chi - \delta\chi)$  es igual a la probabilidad de que  $\alpha(t)$  esté dentro del intervalo  $(\alpha - \delta\alpha)$ .  $\delta\chi$  y  $\delta\alpha$  son pequeños incrementos alrededor de los puntos de estudio  $\chi_o, \alpha_o$  en cada momento.

### IV. MODELO DE SISTEMA

En la Fig. 3 se muestra el escenario de simulación implementado para evaluar las prestaciones de los esquemas OOK-GScc y OOK-GSc en ambientes de turbulencia débil. Los principales bloques que componen dicha figura son los siguientes: de un lado, el modelo de canal óptico atmosférico, correspondiente al esquema multiplicativo presentado en la Fig. 1. Junto a él, se ha incluido una etapa de filtrado de Bessel de tres polos y naturaleza paso alto con una frecuencia de corte -1 dB de 500 kHz, que mitigará el efecto de las posibles señales de iluminación interferentes. Esta etapa de filtrado se acompaña de otra, también de Bessel, de cinco polos y naturaleza paso bajo, que hace la función de filtro adaptado. Por último, todo lo anterior podrá verse opcionalmente acompañado de una etapa de codificación de bloque que permitirán corregir un número determinado de bits de cada palabra código transmitida; y de otra de entrelazado con el fin de combatir las ráfagas de error producidas por el desvanecimiento ocasionado por la turbulencia atmosférica.

En concreto, los esquemas de codificación que se utilizarán serán un Hamming (7,4) y un Hamming (15,11) sistemático, cuyas matrices de control de paridad,  $H$ , son respectivamente:

$$H_{(7,4)}^t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6a)$$

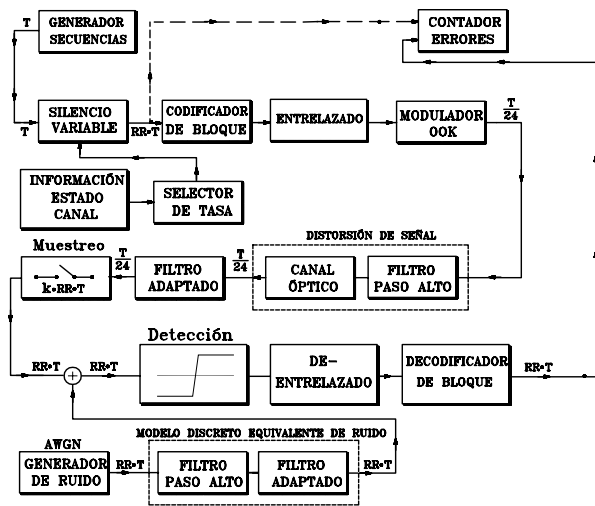


Fig. 3. Diagrama de bloques de la estructura de receptor considerada en el proceso de simulación.

$$H_{(15,11)}^t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6b)$$

Respecto a la etapa de entrelazado, esta podrá ser doble: una primera etapa convencional columna-fila, y/o otra etapa triangular que, mediante la inserción de bits de relleno a cero, permite aumentar la relación de potencia pico a promedio del sistema al tiempo que se barajan los bits, tal y como indica el diagrama que se muestra en Fig. 4.

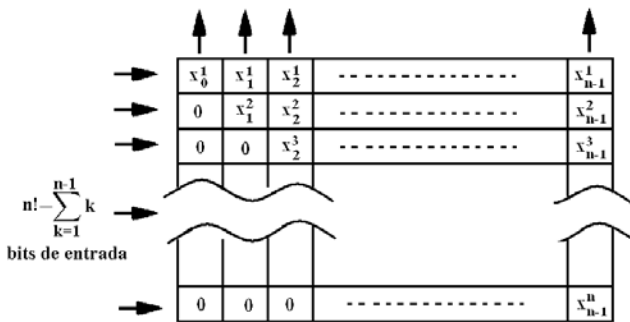


Fig. 4. Diagrama de bloques de la estructura de entrelazado triangular que permite aleatorizar los errores ocasionados por el desvanecimiento al tiempo que se aumenta la relación PAOPR.

Por otra parte, la superioridad del esquema de tasa adaptativa basada en la inserción de  $RR - 1$  periodos de silencio justo a continuación del bit de información fue estudiada para entorno exterior en [8]. De esta manera, se permite reducir en un factor  $RR$  la tasa binaria de transmisión acomodándola en cada momento al grado de adversidad que introduzca el canal turbulento. Como se ha comentado, la referencia que se asume para establecer un análisis comparativo de prestaciones de los distintos esquemas de transmisión viene marcada por el empleo de un nivel de potencia promedio constante.

Sin embargo, se pueden obtener mejores prestaciones si además de implementar esta técnica de tasa adaptativa se utiliza un esquema de señalización con memoria en función de la posición del pulso transmitido. En [8] se probó el esquema OOK-GSc que evitaba la aparición de un pulso en al menos dos periodos de símbolo consecutivos. En esta comunicación se muestran las prestaciones del esquema OOK-GSc, que evita la aparición de un pulso en al menos tres intervalos de bit consecutivos, trasladándose a entornos turbulentos el buen comportamiento obtenido en [7] para ambiente interior. La disminución del número de pulsos transmitidos redundará en un aumento del factor PAOPR de manera que se mantenga constante la potencia óptica promedio. Los factores de adaptabilidad,  $RR$ , para OOK-GSc y OOK-GScC tienen un valor de 2 y 4 respectivamente.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se presentan las simulaciones numéricas que se han llevado a cabo con la finalidad de evaluar las prestaciones de las técnicas de señalización anteriormente descritas. En concreto, se asume un esquema de modulación en intensidad y detección directa (IM/DD), operando a una tasa de 50 Mbps. En recepción, se ha implementado un esquema de detección de secuencia de máxima verosimilitud (MLSD) basado en el algoritmo de Viterbi, para los casos OOK-GSc y OOK-GScC, mientras que se ha empleado un detector por umbrales (TH) de máxima verosimilitud (ML) para el formato OOK con forma de pulso gaussiana (OOK-GS). El ciclo de trabajo de los pulsos en todas las señalizaciones se ha establecido al 25%. Por simplicidad, se ha asumido constante el parámetro de estructura del índice de refracción,  $C_n^2$ , correspondiente a un enlace horizontal. El valor de la longitud de onda del láser es de 830 nm y la longitud del vano 250 m.

En Tabla I, se muestran los diferentes entornos que se han probado. Como referencia se han incluido las prestaciones que se desprenden del esquema OOK-GS de pulso gaussiano de ciclo de trabajo (25%) sin tasa adaptativa ( $RR=1$ ) ni memoria.

En la Fig. 5 se muestran los resultados obtenidos en los entornos que se han propuesto. En todos los casos, se ha asumido que la intensidad de la turbulencia tiene un valor de  $\sigma_\chi = 0.14$ ; mientras que la componente de la velocidad del viento perpendicular a la dirección de propagación óptica,  $u_\perp$ , es de 2 m/s, esto es, una velocidad del viento de aproximadamente 20 m/s, de acuerdo a la expresión  $u_\perp = 0.1u_\parallel$  [3], siendo  $u_\parallel$  la componente de la velocidad del viento paralela a la dirección de propagación.

A la vista de los resultados se puede observar como, en ambientes turbulentos, el empleo de estrategias de entrelazado convencional columna-fila acompañado de un código de bloques Hamming capaz de corregir 1 bit en palabras de 7 bits (Hamming (7,4)) o 15 bits (Hamming(15,11)), mejora las prestaciones del sistema. Prestaciones que pueden mejorarse aún más si se sustituye la etapa de código de bloque y entrelazado convencional, por el entrelazado triangular propuesto donde, nuevamente, se pone de manifiesto cómo el

TABLE I  
ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PROBADOS

| Codif. Convolut. | Codif. Hamming | Entrelazado | Entrelazado Triangular | RR   |
|------------------|----------------|-------------|------------------------|------|
| NO (OOK-GS)      | NO             | NO          | NO                     | 1.00 |
| NO (OOK-GS)      | NO             | NO          | SÍ (orden 4)           | 1.60 |
| OOK-GSc          | NO             | NO          | NO                     | 2.00 |
| OOK-GSc          | SÍ (15,11)     | SÍ (128,15) | NO                     | 2.72 |
| NO (OOK-GS)      | SÍ (7,4)       | SÍ (128,7)  | SÍ (orden 4)           | 2.80 |
| OOK-GSc          | NO             | NO          | SÍ (orden 4)           | 3.20 |
| OOK-GSc          | SÍ (7,4)       | SÍ (128,7)  | NO                     | 3.50 |
| OOK-GSc          | SÍ (7,4)       | SÍ (512,7)  | NO                     | 3.50 |
| OOK-GSc          | NO             | NO          | SÍ (orden 16)          | 3.76 |
| OOK-GSc          | NO             | NO          | SÍ (orden 32)          | 3.88 |
| OOK-GSc          | NO             | NO          | NO                     | 4.00 |
| OOK-GSc          | SÍ (7,4)       | SÍ (128,7)  | SÍ (orden 4)           | 5.60 |
| OOK-GSc          | SÍ (7,4)       | SÍ (128,7)  | SÍ (orden 32)          | 6.79 |
| OOK-GSc          | SÍ (7,4)       | SÍ (512,7)  | SÍ (orden 32)          | 6.79 |

aumento del factor PAOPR va íntimamente ligado a un mejor comportamiento global del sistema. Esto es posible verlo en la Fig. 5 donde, por ejemplo, se puede apreciar una mejora de 1.25 dB para una tasa de error de  $2 \times 10^{-6}$  en el caso de utilizar un codificador Hamming (7,4) y una etapa de entrelazado convencional acompañando a la codificación convolucional OOK-GSc, respecto de utilizar solamente OOK-GSc; mientras que el empleo de la etapa de entrelazado triangular junto a OOK-GSc provoca que la mejora sea de 2 dB respecto a la curva de OOK-GSc. Mejora en prestaciones que además se acompaña de un menor factor de adaptabilidad para este último caso ( $RR = 3.2$ ), si se compara con el valor de  $RR = 3.5$  que se obtiene con el empleo del codificador Hamming y entrelazado columna fila cuyo empleo es habitual en estos

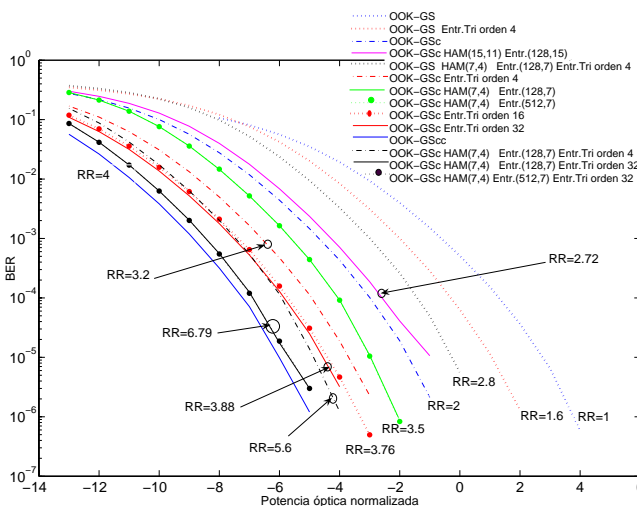


Fig. 5. Probabilidades de error obtenidas para los pulsos OOK-GSc con o sin codificación de bloques Hamming, y/o acompañado de etapa de entrelazado, comparada con la curva obtenida para OOK-GSc. En la gráfica también se incluye las prestaciones del formato OOK-GS sin memoria ni adaptabilidad.

entornos. Sin embargo, es la curva correspondiente a OOK-GSc la que mejores prestaciones presenta, ya que en ella se minimiza la presencia de pulsos en hasta tres intervalos de bits consecutivos, lo que redundaría en la importancia de maximizar el factor PAOPR para obtener mejores rendimientos en ambientes turbulentos.

VI. CONCLUSIONES

En esta comunicación, se ha estudiado el efecto del factor PAOPR en entornos de comunicaciones ópticas en espacio libre, mostrándose como una figura de mérito totalmente adecuada para obtener el mejor rendimiento de un enlace óptico atmosférico. En este sentido, se ha mostrado cómo el esquema OOK-GSc, debido a la minimización de pulsos transmitidos que lleva implícito, consigue las mejores prestaciones en estos entornos, con un valor de reducción de tasa binaria comparable al resto de esquemas propuestos. Entre estos esquemas, se puede destacar el comportamiento del entrelazador triangular en entornos turbulentos, que mejora las prestaciones que se obtendrían respecto a usar una técnica de codificación Hamming acompañada de una etapa de entrelazado columna-fila. El uso de este entrelazador triangular puede verse justificado por la menor complejidad que acompaña a su implementación, en comparación con el esquema OOK-GSc, mostrándose como una alternativa válida en el diseño de enlaces atmosféricos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido íntegramente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia bajo el proyecto TIC2003-05012.

REFERENCES

- [1] L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, *Laser Beam Scintillation with Applications*, Bellingham, MA:SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 2001.
- [2] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation Through Random Media*, Bellingham, MA:SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1998.
- [3] V. I. Tatarskii, *The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation*, Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1971.
- [4] E. Brookner, *Atmosphere Propagation and Communication Channel Model for Laser Wavelengths*, IEEE Trans. on Communication Technology, vol. 18, no. 4, pp. 396 – 416, 1970.
- [5] R. Kennedy, *On the Atmosphere as an Optical Communication Channel*, IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. 14, no. 5, pp. 716–724, Sept. 1968.
- [6] A. Jurado Navas, A. García Zambrana and A. Puerta Notario, *Efficient Channel Model for Free Space Optical Communications*, aceptado para su publicación en The 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Málaga, 23-25 May. 2006.
- [7] A. García-Zambrana and A. Puerta-Notario, *Novel Approach for Increasing the Peak-to-Average Optical Power Ratio in Rate-Adaptive Optical Wireless Communication Systems*, IEE Proc. Optoelect.: Special Issue on Optical Wireless Communications, vol.150, no. 5, pp. 439–444, 2003.
- [8] A. Jurado Navas, A. García Zambrana and A. Puerta Notario, *Wind Influence on Rate-Adaptive Transmission Techniques in Free Space Optical Communications*, aceptado en el Proc. IEEE Int. Conference on Communications, 2006 (ICC 2006), Istanbul, Turkey, 11-15 Jun. 2006.
- [9] A. Ishimaru, *Temporal Frequency Spectra of Multifrequency Waves in Turbulent Atmosphere*, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 20, no. 1, pp. 10–19, Jan. 1972.
- [10] X. Zhu and J.M. Kahn, *Free Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence Channels*, IEEE Trans. on Communications, vol. 50, no. 8, pp. 1293 – 1300, Aug. 2002.
- [11] U.G. Gujar and R.J. Kavanagh, *Generation of Random Signals with Specified Probability Density Functions and Power Density Spectra*, IEEE Trans. on Autom. Control, vol. 13, no. 6, pp. 716–719, Dec. 1968.