



Evaluación de prestaciones de esquemas OOK-GS en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas

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

Published in:
Proceedings of XX Simposium Nacional de la URSI (URSI 2005)

Publication date:
2005

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Jurado-Navas, A., Garcia-Zambrana, A., & Puerta-Notario, A. (2005). Evaluación de prestaciones de esquemas OOK-GS en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas. In *Proceedings of XX Simposium Nacional de la URSI (URSI 2005)*

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.

Evaluación de prestaciones de esquemas OOK-GS en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas

A. Jurado Navas, A. García Zambrana, A. Puerta Notario
Departamento de Ingeniería de Comunicaciones
Universidad de Málaga
e-mail: {navas,agz,apn}@ic.uma.es

Abstract—Free-space optical communication systems represent one of the most promising approaches for addressing the emerging broadband access market and its ‘last mile’ bottleneck. However, atmospheric turbulence may cause fluctuation in both intensity and phase of the received light signal, impairing the link performance. In this paper, a novel model for the atmosphere as an optical communication channel is presented, taking into account the turbulence effects due to the refractive index variation caused by microthermal fluctuations. Additionally, the very good performance of on-off keying (OOK) formats with Gaussian pulses (OOK-GS), previously achieved in indoor unguided optical links at high bit rates, is also corroborated in free-space optical links. The above conclusion is validated by the corresponding bit-error rate (BER) computation using Monte-Carlo simulations.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el interés por las comunicaciones ópticas no guiadas en espacio libre. La saturación del espectro radio o el hecho de ser una tecnología más barata que la involucrada en tender fibra para comunicar dos puntos en línea directa han propiciado dicho interés. Además, resulta especialmente interesante para resolver el problema de la *última milla* fundamentalmente en zonas urbanas densamente pobladas.

A causa de la complejidad asociada a la tecnología óptica coherente, los sistemas de comunicaciones ópticas típicos para espacio libre suelen utilizar modulación en intensidad y detección directa (IM/DD). Sin embargo, la turbulencia atmosférica, ocasionada entre otros factores por microvariaciones de presión y temperatura que conllevarán a fluctuaciones en el índice de refracción, podrá degradar las prestaciones de estos enlaces ópticos. Como resultado de este fenómeno, la señal que se está propagando sufrirá fluctuaciones en su intensidad y fase que provocarán un aumento de la probabilidad de error del enlace. Diversos autores se han encargado de estudiar el fenómeno de la turbulencia atmosférica, desarrollando varios modelos teóricos que permitan su descripción [1]-[2]. En este sentido, se han propuesto algunos modelos de canal [3]-[6] que permiten modelar el efecto de las inhomogeneidades atmosféricas sobre la señal transmitida.

En esta comunicación, recogiendo las ideas de estos autores y adoptando la técnica propuesta por Gujar [7], se propone un nuevo modelo de canal óptico atmosférico. A partir de este nuevo modelo, se corroboran las favorables prestaciones de los esquemas de señalización OOK con pulsos gaussianos

de reducido ciclo de trabajo (OOK-GS), ya anteriormente verificadas en enlaces ópticos no guiados en ambiente interior [9]-[12]. De este modo, se comprueba la superioridad de estos esquemas en relación a los convencionalmente más empleados NRZ, examinando la robustez frente a diferentes niveles de severidad en cuanto al efecto de la turbulencia atmosférica.

II. COMUNICACIÓN ÓPTICA EN ATMÓSFERA TURBULENTA

Cuando un flujo de fluido viscoso como la atmósfera excede el número de Reynolds, el flujo cambia de un régimen inicial laminar a un estado más caótico denominado turbulencia. 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. El tamaño de estos torbellinos está comprendido entre L_o o macroescala de la turbulencia, y l_o o microescala. De acuerdo a la teoría de las cascadas de turbulencias propuesta por Kolmogorov, la energía irá siendo transportada a torbellinos cada vez más pequeños hasta que se termine disipando en calor, aspecto que ocurrirá cuando el número de Reynolds alcance un valor cercano a la unidad. 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 muy grande el valor de la macroescala L_o , mientras que se aproxima el valor de la microescala l_o por un valor casi despreciable, se obtiene la más sencilla de las expresiones dadas para la función de estructura de las fluctuaciones del índice de refracción $\phi_n(\kappa)$

$$\phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2(z)\kappa^{-\frac{11}{3}} \quad (1)$$

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, variante con la altura de la forma [2]

$$C_n^2(h) = C_{no}h^{-\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{h}{h_o}\right) \quad (2)$$

siendo C_{no} un parámetro que describe la fortaleza de la turbulencia, mientras que h_o es la altura efectiva de la atmósfera turbulenta. Normalmente, se elige un valor de C_{no} de forma que se tengan condiciones de turbulencia equivalentes a las que habrían cuando se considera una propagación horizontal [3]. Se considera un régimen de turbulencia fuerte para valores de

$C_{no}^2 \geq 5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$, mientras que se habla de régimen de turbulencia débil cuando $C_{no}^2 \leq 5 \times 10^{-16} m^{-2/3}$ [3].

En un sistema OOK de comunicaciones ópticas en espacio libre, donde se ignora el efecto de la interferencia intersimbólica (ISI), el receptor sólo recibirá luz a través de la turbulencia cuando se transmita un estado on. La intensidad recibida en cada caso podrá ser expresada como

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

siendo I_o la intensidad de la señal en ausencia de turbulencia y χ 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 σ_χ^2 , dependiente de C_n^2 . Por tanto, su función densidad de probabilidad responderá a la expresión

$$f_\chi(\chi) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\chi^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\chi - E[\chi])^2}{2\sigma_\chi^2}\right) \quad (4)$$

o lo que es lo mismo, la función densidad de probabilidad de I seguirá una distribución log-normal de la forma

$$f_I(I) = \frac{1}{2I} \frac{1}{(2\pi\sigma_I^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\ln I - \ln I_o)^2}{8\sigma_I^2}\right) \quad (5)$$

en la que la varianza de la intensidad σ_I^2 responde a una expresión del tipo [1]

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_\chi^2) - 1 \quad (6)$$

cuyo valor puede aproximarse por $4\sigma_\chi^2$ para regímenes de turbulencia débil ($\sigma_\chi^2 \ll 1$).

III. MODELO DE CANAL ATMOSFÉRICO

A lo largo de esta sección, se presentará el modelo de canal atmosférico propuesto para simular las fluctuaciones de amplitud que sufrirá toda señal óptica que se propague por la atmósfera. Más en concreto, basándonos en el modelo multiplicativo propuesto por Kennedy [4], se adoptarán las propuestas de Kanavos [5] y Satorius [6] en las que se generaban los coeficientes de escintilación mediante filtrado de ruido blanco gaussiano. Sin embargo, se ofrecerá un modelo más completo que permitirá reproducir más fielmente las perturbaciones introducidas por la atmósfera turbulenta.

Satorius [6] proponía un modelo gaussiano para representar los coeficientes de escintilación que afectan a la señal en UHF. Esta aproximación puede ser aceptable según el teorema del límite central, aunque insuficiente si la distancia de propagación no es suficientemente grande o no se produce un scattering acusado. Por tanto, se hace necesario cambiar los estadísticos gaussianos del ruido de escintilación presentado en [6] a estadísticos log-normal, ampliamente utilizados en regímenes de turbulencia débil, tal y como se propone en [5].

Kanavos [5] también implementaba una etapa de filtrado análoga a la de Satorius. Sin embargo, el tipo de filtro propuesto, Chebychev de orden tres, se puede considerar poco flexible al no ofrecer ningún tipo de ajuste en función de las condiciones atmosféricas. Por ello, en este trabajo se

sustituirá la etapa de filtrado de Kanavos por la implementada por Satorius, aunque trasladándola a longitudes ópticas, ya que éste sí que elabora más el tipo de filtrado. De hecho, siendo todavía una aproximación al modelo de Kolmogorov, sí permitirá la modificación de su forma en función de las condiciones de turbulencia establecidas, con la incorporación de los parámetros tiempo de coherencia τ_o y el ya mencionado σ_χ .

En Fig. 1 se presenta el modelo escalar del canal óptico turbulento que describirá el efecto multiplicativo que tendrá la turbulencia atmosférica en la señal a transmitir [4]-[6].

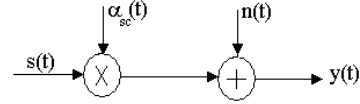


Fig. 1. Modelo de canal óptico atmosférico

En este modelo, $\alpha_{sc}(t)$ hará referencia a los coeficientes de escintilación, mientras que $n(t)$ será un ruido blanco gaussiano de naturaleza aditiva, que aglutinará los términos de ruido de fondo procedente de la luz ambiental, más el ruido shot de alta intensidad. Para simular la naturaleza variante en el tiempo de $\alpha_{sc}(t)$, se adaptará la técnica desarrollada en [7], tal y como se muestra en Fig. 2

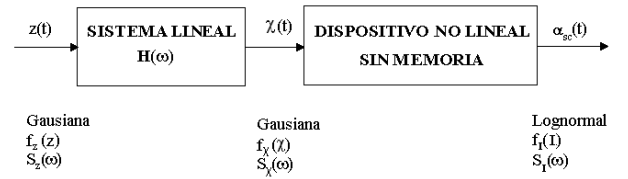


Fig. 2. Diagrama de bloques de la técnica propuesta por Gujar y Kavanagh [7]

Según Fig. 2, el principio de funcionamiento consiste en hacer pasar a una señal aleatoria $z(t)$ de distribución blanca gaussiana por un filtro paso bajo lineal. De esta manera, la señal de salida $\chi(t)$ seguirá manteniendo la distribución gaussiana, pero adoptará la forma deseada impuesta por $H(\omega)$ para la densidad espectral de potencia. La señal $\chi(t)$ será la fluctuación de la log-amplitud de la señal transmitida. Posteriormente, $\chi(t)$ atravesará un dispositivo no lineal que convertirá a lognormal la distribución de probabilidad que a la entrada de dicho dispositivo seguía siendo gaussiana.

De acuerdo al razonamiento realizado en [6], se asumirá un modelo estadístico de segundo orden gaussiano de la forma

$$R_{sc} = E[\chi(t)\chi^*(t - \tau)] = \sigma_\chi^2 \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\tau_o}\right)^2\right] \quad (7)$$

siendo

$$\sigma_\chi^2 = E[\chi^2(t)] \quad (8)$$

donde τ_o hace referencia al tiempo de coherencia de la señal. Si se aplica la suposición ya comentada de L_o muy grande y l_o muy pequeño, entonces se cumplirá [8]

$$l_o < \sqrt{\lambda L} < L_o \quad (9)$$

donde λ es la longitud de onda y L es la distancia de propagación. Bajo la suposición dada en la ecuación (9), será posible aproximar el valor del parámetro de Fried r_o a

$$r_o \simeq \sqrt{\lambda L} \quad (10)$$

siendo dicho parámetro una medida de la longitud de coherencia atmosférica. Por tanto, se podrá calcular el parámetro tiempo de coherencia como el cociente entre el parámetro de Fried y la componente perpendicular a la dirección de propagación de la velocidad del viento u_{\perp} , de la forma

$$\tau_o = \frac{r_o}{u_{\perp}} \quad (11)$$

Aplicando el teorema de Wiener-Khinchine, podemos calcular el espectro de potencia de la ecuación (7), que quedará de la forma [6]

$$|H_{sc}(f)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} R_{sc}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \sigma_{\chi}^2 \tau_o \sqrt{\pi} e^{-(\pi\tau_o f)} \quad (12)$$

De esta última ecuación se obtendrá el filtro lineal que se introducirá en el primer bloque de Fig. 2. Previo a obtener $\chi(t)$, la señal resultante tras pasar por el filtro $H_{sc}(f)$ será multiplicada por un factor [6] que permita que la varianza de $\chi(t)$ coincida con la varianza de escintilación que se ha introducido σ_{χ}^2 . Así pues, y en conclusión, se habrá asumido por sencillez una forma gaussiana para la función de autocorrelación, tal y como propone Satorius [6], ya que la función de autocorrelación correspondiente al espectro de Kolmogorov (1) es mucho más compleja de tratar de manera directa. Posteriormente, se dotará de una distribución lognormal a la señal resultante con el dispositivo no lineal, sin más que realizar la transformación propuesta por Gujar [7]

$$f_{\chi} \left(\chi - \frac{\delta\chi}{2} \right) |\delta\chi| = f_{\alpha} \left(\alpha - \frac{\delta\alpha}{2} \right) |\delta\alpha| \quad (13)$$

Consecuentemente, para cualquier punto (χ, α) 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 χ_o, α_o en cada momento.

IV. ESCENARIO DE SIMULACIÓN

A continuación se describirá el modelo de transmisión y recepción implementado. Previamente se expondrán las hipótesis realizadas para el desarrollo del mismo.

A. Características del escenario de simulación

En todas las simulaciones realizadas se supondrá una modulación de intensidad acompañada de un esquema de detección directa (IM/DD). En particular, se adoptará un esquema de modulación OOK con formas de pulso rectangular y gaussiana.

Por otra parte, se supondrá que las señales transmitidas siempre se propagan a través de un enlace horizontal, de manera que no existirá dependencia del valor C_n^2 con la altura. El valor de la longitud de onda λ de la señal óptica a transmitir será de 830 nm. La distancia de propagación a cubrir será 250 metros, por lo que, de la ecuación (10), el tiempo de coherencia tendrá un valor de 14.40486 ms. Se adoptará también, un valor u_{\perp} de 1 m/s. En todas las simulaciones, el régimen binario de funcionamiento se ha establecido en 50 Mbps. Por último, las probabilidades de error que se obtendrán habrán sido calculadas mediante esquemas de simulación de Montecarlo.

B. Simulación del receptor óptico

En este apartado, se trasladarán a comunicaciones ópticas no guiadas en exteriores, los buenos resultados publicados en trabajos previos [9]-[12] en enlaces no guiados para interiores. En concreto, se adoptará el empleo de una modulación RZ con pulso gaussiano. Las ventajas de adoptar este tipo de modulación fueron abordadas adecuadamente en [9]-[10] pese a necesitar el doble de ancho de banda que el formato NRZ. En concreto, se aprovechará la ventajosa relación de potencia pico a promedio de los pulsos RZ en enlaces IM/DD [11].

El esquema adoptado para realizar las simulaciones se muestra en Fig 3. En este caso, el canal óptico será representado por el conjunto de coeficientes $\alpha_{sc}(t)$ de Fig. 2, añadiéndose de manera multiplicativa a la señal a transmitir. Se asume un filtro de Bessel paso bajo de 5 polos como filtro adaptado, así como un filtro, también de Bessel, aunque en este caso paso alto con frecuencia de corte a 500 kHz, para la supresión de posibles señales interferentes procedentes tanto de la iluminación del sol como, llegado el caso, de posibles sistemas de iluminación artificial que pudieran afectar al receptor. El tipo de decisor incorporado está basado en un detector de umbrales, mientras que el tipo de codificador elegido ha sido uno sin memoria.

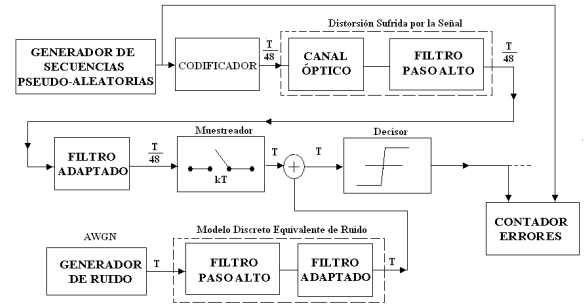


Fig. 3. Diagrama de bloques de la estructura de receptor considerada en el proceso de simulación

C. Resultados

En Fig. 4 se presentan las tasas de error que se han obtenido tras la simulación. Se han utilizado valores de σ_{χ} de 0.1 y 0.15, lo que aproximadamente equivale a valores de 0.2 y 0.31 de σ_I , de acuerdo a la ecuación (6). En cuanto a las formas de pulso, se han realizado pruebas con pulso rectangular y

ciclo de trabajo (c.t.) del 25%; pulso gaussiano e idéntico c.t.(OOK-GS); y pulso gaussiano y c.t. nuevamente del 25%, pero en este caso, incluyendo la técnica de "Combinación de Igual Ganancia" (EGC) como estrategia de diversidad espacial. Esta diversidad espacial ha sido implementada con cuatro receptores, asumiendo éstos suficientemente alejados entre sí como para considerar completamente incorrelados cada uno de los ruidos de escintilación que afectarán a las señales que viajen por cada uno de los cuatro caminos de propagación posibles. Como referencia, se adjuntan los resultados que se han obtenido simulando la propagación de pulsos NRZ.

La principal conclusión que puede extraerse es el buen comportamiento que se desprende del uso de pulsos gaussianos de ciclo de trabajo reducido. Si bien los resultados que se obtienen empeoran conforme se hacen más severas las condiciones de turbulencia, sin embargo, es cierto que siguen mejorando a los resultados ofrecidos por NRZ. La mejora puede hacerse más apreciable aún si se dota al sistema de alguna técnica de diversidad, que aporte una mayor robustez a la transmisión, incluso al aumentar la fortaleza del ruido escintilante.

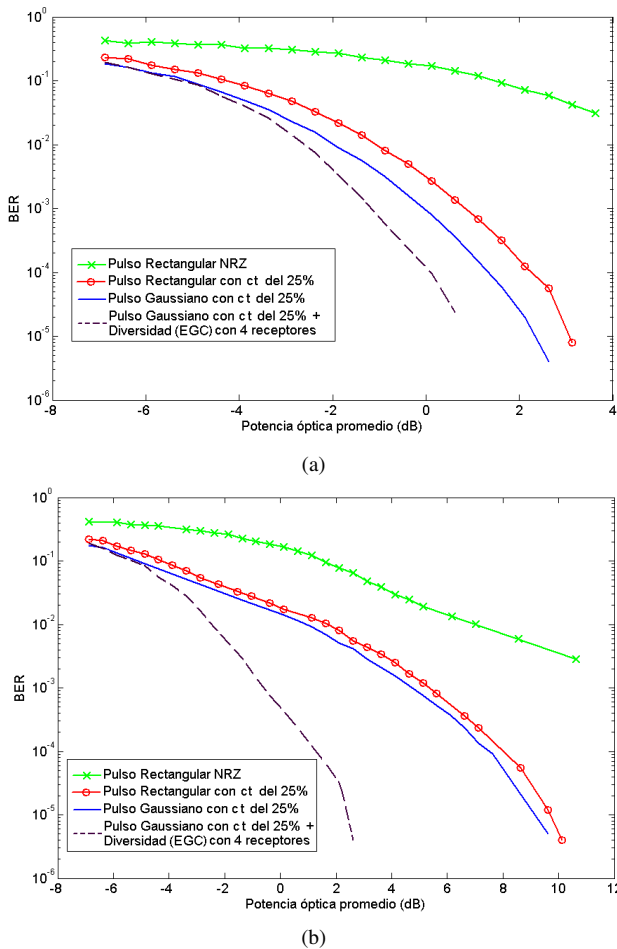


Fig. 4. Probabilidades de error obtenidas para las diferentes formas de pulso y σ_χ de valores 0.1 (a) y 0.15(b) a 50 Mbps. El punto de referencia (0 dB) se ha tomado cuando la curva de pulso gaussiano de c.t. de 25% cruce por 10^{-3} en $\sigma_\chi = 0.1$. El decisor implementado en ambos casos, es un decisor por umbrales sin memoria.

V. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio del fenómeno físico de la turbulencia atmosférica, y cómo ésta degrada los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas. Partiendo de las ideas propuestas en [3]-[7], se ha desarrollado un nuevo modelo de canal que permita simular el efecto producido en las señales transmitidas. Introduciendo ese canal en un enlace a 50 Mbps, se han probado con éxito las prestaciones que ofrecen las señalizaciones OOK-GS. Se ha dejado abierta la posibilidad de incluir algún tipo de estrategia de diversidad que permita mejorar aún más los resultados, como se ha podido corroborar también a la vista de los resultados ofrecidos tras la simulación de un enlace con diversidad espacial y EGC. Como conclusión final, se ha demostrado que el formato OOK-GS se muestra como una clara alternativa en la implementación de sistemas ópticos no guiados en espacio libre, corroborándose las favorables características de señalizaciones con elevada relación pico a promedio de la potencia óptica empleada.

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] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, Academic Press, Inc. Vol. 1-2, 1978.
- [3] E. Brookner, *Atmosphere Propagation and Communication Channel Model for Laser Wavelengths.*, IEEE Trans. on Communication Technology, vol. 18, no. 4., pp. 396 – 416 ,1970.
- [4] R. Kennedy, *On the Atmosphere as an Optical Communication Channel.*, IEEE Trans. on Information Theory, vol. 14, no. 5., pp. 716 – 724 , Sept. 1968.
- [5] J. Kanavos, *The Effects of Atmospheric Turbulence on an Air-to-Air Optical Communication Link.*, NAECON 1985: Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference, vol. 2, pp. 1174 – 1182, Dayton, Ohio, May 20-24, 1985.
- [6] E. Satorius and Z. Ye, *Scintillation and Fading Channel Modeling and Simulation for Mobile User Objective System(MUOS) – Part I: Flat Fading.*, IEEE International Conference on Communications, vol. 5, pp. 3503 – 3510 , May 11-15, 2003.
- [7] U.G. Gujar and R.J. Kavanagh, *Generation of Random Signals with Specified Probability Density Functions and Power Density Spectra.*, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 13, no. 6., pp. 716 – 719, Dec. 1968.
- [8] 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.
- [9] A. García-Zambrana and A. Puerta-Notario, *Feasibility of OOK Modulation with RZ Pulses of Variable Duty Cycle in Indoor Unguided Optical Links at High Bit Rates.*, Proc. IEEE Int. Conf. on Commun (ICC'98), pp. 821 – 825, June 7-11, 1998.
- [10] A. García-Zambrana and A. Puerta-Notario, *Performance Evaluation of RZ Signaling in Indoor Unguided Optical Links Operating Beyond 50 Mbps.*, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'98), pp. 1626 – 1630, Ottawa (Canada), May 18-21, 1998.
- [11] A. García-Zambrana and A. Puerta-Notario, *RZ-Gaussian Pulse Reduce the Receiver Complexity in Wireless Infrared Links at High Bit Rates.*, IEEE Elect. Letters, vol 35, no. 13, pp. 1059 – 1061, 1999.
- [12] 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. Optoelectron.: Special Issue on Optical Wireless Communications, vol 150, no. 5, pp. 439 – 444, 2003.