



## Esquema de tasa adaptativa en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas

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

*Published in:*  
XV Jornadas Telecom I+D 2005

*Publication date:*  
2005

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Jurado-Navas, A., Garcia-Zambrana, A., & Puerta-Notario, A. (2005). Esquema de tasa adaptativa en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas. In *XV Jornadas Telecom I+D 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.

# Esquemas de tasa adaptativa en sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas

A. Jurado Navas, A. García Zambrana, A. Puerta Notario

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, ETS de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Málaga

Campus de Teatinos, 29071 Málaga

Telf: 952132851, Fax: 952132406

e-mail: {navas,agz,apn}@ic.uma.es

## Resumen

*Los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas se presentan hoy día como una importante solución alternativa a los sistemas de radiofrecuencia en el acceso de banda ancha. Sin embargo, en los enlaces ópticos la turbulencia atmosférica, que se considera el principal agente perturbador en el canal, ocasiona fluctuaciones tanto en la intensidad como en la fase de la señal recibida, que deterioran las prestaciones alcanzables en condiciones ideales. En esta comunicación, mediante la utilización de un modelo novedoso para el canal atmosférico, desarrollado previamente por los autores, se incorpora un esquema específico de tasa adaptativa, que permite mejorar las prestaciones globales conseguidas en este tipo de sistemas.*

## 1. 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. No ocurriendo así en los sistemas homólogos de radiofrecuencia. Por otra parte, a pesar de que en los enlaces ópticos atmosféricos, tal como se verá, las condiciones del canal son extraordinariamente más adversas que en las comunicaciones ópticas por fibra, 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. Su aplicación puede tener un gran interés tanto en zonas urbanas densamente pobladas como 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. Así, a la fluctuación de intensidad se la denomina escintilación log-normal de intensidad por su descripción estadística y equivale a un desvanecimiento de la señal. La escintilación degrada notablemente las prestaciones de un sistema de comunicaciones ópticas atmosféricas. Esta degradación sufrida depende tanto de la intensidad de la turbulencia como de la longitud del vano del enlace.

Han sido varios los autores que han estudiado el fenómeno físico de la turbulencia atmosférica, llegando a proponer diversos modelos teóricos que faciliten su descripción [1]-[4]. A partir de sus planteamientos teóricos, se han llevado a cabo algunas realizaciones analíticas del canal [5]-[8] que permiten modelar con mayor o menor fidelidad el efecto adverso que introducen las no-homogeneidades atmosféricas sobre la señal transmitida.

En esta comunicación se propone la incorporación de un esquema específico de tasa adaptativa sobre un modelo novedoso para el canal atmosférico desarrollado y contrastado por los autores en [9], sobre el que se realiza una somera descripción previa para enmarcar el resto del trabajo. Para ello, se va a utilizar un sistema de señalización OOK con pulsos gaussianos de reducido ciclo de trabajo (OOK-GS), cuyas prestaciones favorables ya han sido puestas de manifiesto en enlaces ópticos no guiados para ambiente interior [10]-[12] y exterior [9]. En concreto, se evaluarán las prestaciones alcanzadas con estos pulsos cuando son transmitidos con tasa adaptativa, como una técnica de codificación que permitirá mejorar las prestaciones del enlace.

La adopción de estos esquemas resulta muy conveniente en el entorno descrito ya que, mediante su uso, se puede acomodar la tasa binaria a la relación señal a ruido disponible en cada situación, hasta conseguir una probabilidad de error considerada como aceptable.

## 2. Comunicación Óptica Atmosférica en Presencia de Turbulencias

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. De acuerdo a la teoría de las cascadas de turbulencias propuesta por Kolmogorov [1]-[4], la energía irá siendo transportada a torbellinos cada vez más pequeños hasta que se termine disipando en calor. El tamaño de estos torbellinos está comprendido entre una macroescala de la turbulencia,  $L_o$ , y una microescala,  $l_o$ . Las microvariaciones en el índice de refracción de la atmósfera ocasionarán fluctuaciones en la irradiancia de la señal óptica transmitida. Si se asume muy grande el valor de la macroescala  $L_o$ , mientras que la microescala  $l_o$  se supone prácticamente despreciable, se obtiene la expresión más sencilla posible para la función que describe la estructura de las fluctuaciones del índice de refracción  $\phi_n(\kappa)$ . Esta expresión, que es la densidad espectral de potencia de dichas fluctuaciones, sigue una relación:

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

que suele denominarse también como espectro de Kolmogorov [1]. En ella,  $\kappa$  es la frecuencia espacial y  $C_n^2$  es el parámetro de estructura de las fluctuaciones del índice de refracción variante con la altura.

En un sistema OOK de comunicaciones ópticas en espacio libre, donde en una primera aproximación 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 óptica recibida en cada caso podrá ser expresada, de acuerdo a [15], como:

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

siendo  $I_o$  la intensidad de la señal en ausencia de turbulencia, mientras que  $\chi$  es la fluctuación de la log-amplitud de la señal óptica, que puede ser modelada como una variable aleatoria gaussiana de media  $E[\chi]$  y varianza  $\sigma_\chi^2$ , dependiente de  $C_n^2$ . Si se considera una propagación a través de un elevado número de torbellinos atmosféricos, cada uno induciendo en la señal un retardo de fase aleatorio, de acuerdo al teorema del límite central la función densidad de probabilidad de la log-amplitud responderá a la expresión [1]

$$f_\chi(\chi) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\chi^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\chi - E[\chi])^2}{2\sigma_\chi^2}\right), \quad (3)$$

o lo que es lo mismo, la función densidad de probabilidad de  $I$  seguirá una distribución log-normal de la forma [15]:

$$f_I(I) = \frac{1}{2I} \frac{1}{(2\pi\sigma_\chi^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\ln I - \ln I_o)^2}{8\sigma_\chi^2}\right), \quad (4)$$

en la que la varianza de la intensidad,  $\sigma_I^2$ , responde a una expresión del tipo

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_\chi^2) - 1, \quad (5)$$

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

### 3. Modelo de Canal Atmosférico

El modelo para el canal atmosférico aquí utilizado consiste en un esquema de ruido multiplicativo que describe el efecto de la turbulencia atmosférica sobre la señal a transmitir, tal y como propuso Kennedy [6]. En la Fig. 1 se reproduce tal esquema.

En ella,  $\alpha_{sc}(t) = \exp(2\chi(t) - 2E[\chi])$  hace referencia a los coeficientes de escintilación, mientras que  $n(t)$  es un ruido blanco gaussiano de naturaleza aditiva que aglutinará los términos de ruido shot de fondo procedente de la luz ambiental, más el ruido térmico del sistema receptor.

Diversos autores [7]-[8] han desarrollado modelos que implementan los coeficientes  $\alpha_{sc}(t)$ . Todos ellos proponen un mismo esquema de funcionamiento: el filtrado lineal de una señal aleatoria gaussiana. Basándose en sus investigaciones, se propone un modelo más completo, indicado en la Fig. 2, que permita reproducir de forma más fiel el efecto de la turbulencia en la señal transmitida. Según esto, en esta comunicación se propone una mejora de los modelos que han sido desarrollados en [7]-[8], con la inclusión de una distribución lognormal que permita modelar de forma más fiel la naturaleza estadística de las fluctuaciones de la irradiancia. Esto puede verse en la segunda etapa de la Fig. 2. Además, como se detallará más adelante, el modelo se completa con la inclusión del efecto negativo que tiene sobre la señal transmitida la velocidad del viento, siendo este aspecto una gran novedad respecto al resto de modelos existentes en la bibliografía.

Desde siempre se ha realizado un estudio más

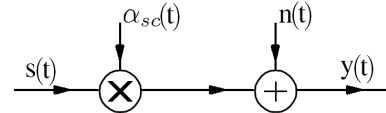


Fig. 1. Modelo de canal óptico atmosférico

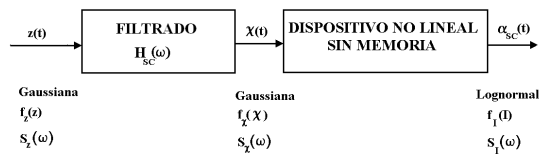


Fig. 2. Diagrama de bloques que permite la generación de los coeficientes de escintilación, incorporando la técnica de Gujar [13] para realizar el cambio de estadísticos, tal y como es presentado en [9]

pormenorizado en la escintilación de log-amplitud,  $\chi$ . Por ello, se partirá de  $\chi$  y se aprovechará su naturaleza Gaussiana para poder aplicar el método de simulación de Clarke [14] que tan frecuentemente ha sido usado en la simulación de canales de radiofrecuencia afectados por desvanecimientos.

El principio de funcionamiento consiste en realizar un filtrado lineal de una señal aleatoria  $z(t)$  de distribución gaussiana. De esta manera, la señal de salida  $\chi(t)$  seguirá manteniendo la distribución gaussiana, pero adoptará la forma impuesta por el filtro  $H_{sc}(\omega)$  para la densidad espectral de potencia. La señal  $\chi(t)$  será la fluctuación de la log-amplitud de la señal transmitida. Posteriormente,  $\chi(t)$  atraviesa un dispositivo no lineal que transforma la distribución de probabilidad de gaussiana a log-normal.

Se asumirá un régimen de turbulencia débil dado por  $\sigma_\chi^2 \ll 1$ , para el que se cumple que la covarianza normalizada de la irradiancia de la onda óptica,  $b_I(\rho)$ , coincide con la covarianza normalizada de la escintilación de amplitud,  $b_\chi(\rho)$ , según se indica en [3].

Partiendo de esta última aproximación se puede ver como coincidirán las formas de los espectros de potencia de las fluctuaciones de intensidad y de las fluctuaciones de la log-amplitud. Por tanto, volviendo al modelo presentado en la Fig. 2, es perfectamente válido introducir en la etapa de filtrado de dicha figura, al tipo de filtro correspondiente a las fluctuaciones de la log-amplitud. En las siguientes subsecciones se detallarán tanto la implementación del filtro como la conversión estadística de gaussiana a log-normal.

### 3.1. Espectro Temporal Gaussiano para la Irradiancia

Considérese el desarrollo más simple de todos los presentados en [2], donde no son tenidos en cuenta los efectos de la microescala en el cálculo del espectro temporal de las fluctuaciones de la irradiancia. Se puede apreciar que, aún en este caso más simple, la complejidad matemática inherente a dicho desarrollo es muy elevada. En esta comunicación se propone un análisis mucho más sencillo en el que, a partir de la idea presentada en [8], se adapta su modelo de UHF a frecuencias ópticas y se mejora con la inclusión del efecto de la velocidad del viento, siendo el estudio de la misma una novedosa contribución en esta comunicación. Así, se asumirá un modelo estadístico de segundo orden gaussiano de la forma

$$R_{sc} = E[\chi(t)\chi^*(t-\tau)] = \sigma_\chi^2 \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\tau_o}\right)^2\right], \quad (6)$$

donde  $\tau_o$  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, de acuerdo con

[15] se cumplirá:

$$l_o < \sqrt{\lambda L} < L_o, \quad (7)$$

en la que  $\lambda$  es la longitud de onda y  $L$  es la distancia de propagación. Bajo la suposición dada en la ecuación (7) será posible aproximar el valor del parámetro de Fried,  $r_o$ , a [15]

$$r_o \simeq \sqrt{\lambda L}, \quad (8)$$

siendo dicho parámetro una medida de la longitud de coherencia atmosférica. Considérese ahora el modelo de *turbulencia congelada* [3]. Si se asume la propagación de un haz estrecho, las fluctuaciones del índice de refracción en la dirección de propagación serán promediadas y por consiguiente, su efecto será mucho más débil que aquéllas que se producen en el sentido transversal a la dirección de propagación. Por tanto, sólo es necesario tener en cuenta la componente de la velocidad del viento en el sentido perpendicular a la dirección de propagación,  $u_\perp$ . Fante, en [17], ya observó que el ancho de banda de la densidad espectral de potencia para las fluctuaciones de intensidad en régimen de turbulencia débil respondía a una relación del tipo

$$f_c = \frac{1}{\tau_o} = \frac{u_\perp}{\sqrt{\lambda L}}, \quad (9)$$

obtenida como consecuencia directa de los movimientos de las masas de aire turbulentas. De esta manera, se podrá calcular el parámetro tiempo de coherencia directamente a partir de la expresión anterior como el cociente entre el parámetro de Fried y la componente perpendicular a la dirección de propagación de la velocidad del viento, de la forma

$$\tau_o = \frac{r_o}{u_\perp}. \quad (10)$$

Aplicando el teorema de Wiener-Khintchine, se puede calcular, tal y como se hace en [8], el espectro de potencia de la ecuación (6), que quedará como:

$$\begin{aligned} |H_{sc}(f)|^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{sc}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\ &= \sigma_\chi^2 \tau_o \sqrt{\pi} e^{-(\pi\tau_o f)^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

De esta última ecuación se obtendrá el filtro lineal que se introducirá en el primer bloque de Fig. 2. En Fig. 3 se justifica el empleo de esta aproximación gaussiana, debido a su gran parecido con la expresión teórica del espectro de Kolmogorov dada en [2].

Para diseñar la naturaleza de la fase que acompañará al filtro, se asume un comportamiento causal del canal de forma que la respuesta en frecuencia

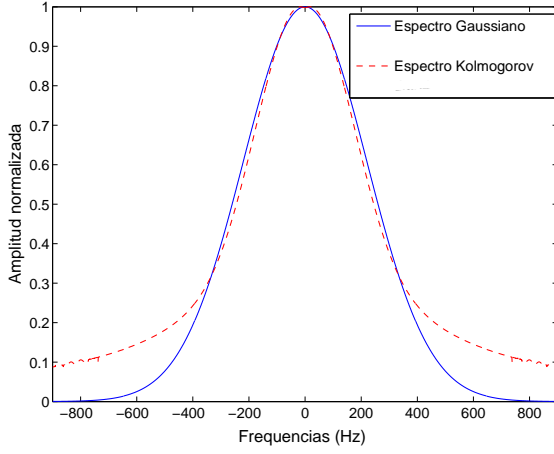


Fig. 3. Comparación de los espectros de amplitud correspondiente al obtenido mediante el espectro de Kolmogorov propuesto en [2], en el que se desprecian los efectos de la microescala, frente al obtenido al realizar la aproximación gaussiana para la autocorrelación de la escintilación.

del filtro se diseña para que tenga una fase lineal del tipo  $H_{sc}(f) = |H_{sc}(f)|e^{-j\Omega T\alpha}$ . Por tanto, el comportamiento final del filtro viene dado por:

$$H_{sc}(f) = (\sigma_{\chi}^2 \tau_o \sqrt{\pi})^{1/2} e^{-\frac{1}{2}(\pi\tau_o f)^2} e^{-j\Omega T\alpha}, \quad (12)$$

donde  $\Omega = 2\pi f = \omega/T$  es la frecuencia en rad/s,  $\omega$  es la frecuencia en rads,  $T$  es el período de muestreo y  $\alpha$  es el retardo introducido por el sistema.

### 3.2. Cambio de la Descripción Estadística

Con lo expuesto hasta ahora se ha podido modelar la log-amplitud de la escintilación,  $\chi$ , de función densidad de probabilidad  $f_{\chi}(\chi)$  dada en la ecuación (3) y de naturaleza gaussiana. Es turno ahora de realizar un cambio en su distribución estadística de forma que ésta se adapte a la naturaleza log-normal que caracteriza a las fluctuaciones de intensidad,  $I$ , en régimen de turbulencia débil.

El cambio de estadísticos se realiza con el bloque no lineal sin memoria que ya fue especificado en la Fig. 2. El procedimiento consiste en adoptar la técnica propuesta por Gujar y Kavanagh en [13]. De esta forma, el dispositivo no lineal se convierte simplemente en una transformación uno a uno entre  $\chi$  y  $\alpha_{sc}$  de la forma:

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

siendo  $f_{\alpha_{sc}}(\alpha_{sc})$  la función densidad de probabilidad log-normal que caracterizará a los coeficientes de escintilación que se están generando. Esta función densidad de probabilidad,  $f_{\alpha_{sc}}(\alpha_{sc})$ , será idéntica a la función densidad de probabilidad,  $f_I(I)$ , que caracterizan a los desvanecimientos que se producen en la intensidad de luz transmitida,  $I$ , inducidos por la turbulencia atmosférica, y cuya expresión fue dada en (4).

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

Se elegirán como puntos iniciales conocidos los valores medios de las distribuciones de las secuencias  $\chi$  y  $I$ , cuyas magnitudes son [15] [18]:

$$\begin{aligned} \chi_o &= -\sigma_{\chi}^2, \\ I_o &\equiv \alpha_{sc_o} = e^{(-0.5\sigma_I^2)}; \end{aligned} \quad (14)$$

siendo  $\sigma_I^2$  la varianza de la irradiancia tal y como fue presentada en (5).

## 4. Técnica Adaptativa basada en la Inserción de Períodos de Silencio Variable

En [12] se propuso, para un ambiente de interiores, una técnica alternativa original de modulación de tasa adaptativa. En concreto, la adaptabilidad que se propone en esta comunicación se basa, no en la repetición de bits de información, sino en la inserción de  $RR - 1$  periodos de silencio de bit incluidos justo a continuación del bit de información que permite, a su vez, el empleo de pulsos de mayor amplitud manteniendo, sin embargo, la potencia media. De este modo, cuanto más severa es la reducción de tasa, mayor es el período de silencio intercalado en la transmisión y mayor la potencia de pico por pulso, incrementándose la relación de potencia óptica de pico a potencia óptica promedio. El procedimiento que se propone se ilustra en la Fig. 4.

Las ventajas de la utilización de esta técnica original de transmisión con tasa adaptativa con respecto al esquema clásico de repetición de bits propuesto y especificado en el estándar de *Advanced Infrared (Air)* por la *Infrared Data Association (IrDA)* fueron contempladas en [11].

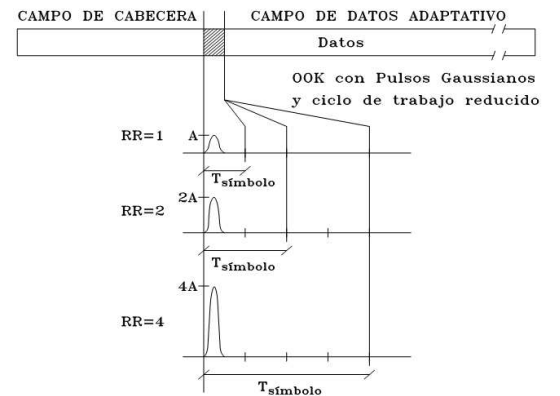


Fig. 4. Estructura de trama ilustrando el proceso de tasa adaptativa basado en la inserción de períodos de silencio en la transmisión.

Debido a la superioridad de esta transmisión con tasa adaptativa basada en la inserción de silencios propuesta para ambiente de interiores, se ha adoptado en esta comunicación para un entorno de comunicaciones ópticas atmosféricas esperando que se puedan mantener sus buenas prestaciones en este nuevo escenario.

Para el esquema de tasa adaptativa propuesto mediante señalización OOK-GS, se parte de un régimen binario de 50 Mbps que se reducirá en función de las condiciones del canal, aunque es previsible alcanzar con esta técnica regímenes binarios del orden de Gbps.

Si se considera una función truncada  $s_T(t)$  que represente a la señalización para  $|t| < T/2$ , siendo  $T = (2K+1)D$  tal que el límite cuando  $T \rightarrow \infty$  se corresponde con  $K \rightarrow \infty$ . Entonces, para  $K \gg 1$ ,

$$s_T(t) = \sum_{k=-K}^{k=K} RR \cdot a_k p(t - kD). \quad (15)$$

Aquí, la variable aleatoria  $a_k$  toma los valores de 0 para el bit "0" (ausencia de pulso), y 1 para el bit "1" (presencia de pulso). El parámetro  $D$  representa el período de símbolo resultante de la reducción de tasa (RR) correspondiente al esquema propuesto, tal que se puede escribir  $D = RR \cdot T_b$ , siendo  $r_b = \frac{1}{T_b}$  la tasa de bit inicialmente empleada. De este modo, considerando la función  $s_T(t)$  como potencia óptica instantánea, la potencia óptica promedio transmitida sin reducción de tasa ( $RR = 1$ ) está dada por:

$$P_t \Big|_{D=T_b} = p(a_k = 1) P_{pulso} = \frac{1}{2} P_{pulso}, \quad (16)$$

siendo  $P_{pulso}$  la potencia óptica promedio evaluada en  $T_b$ , correspondiente a la forma de pulso empleada. Por tanto, cuando  $RR > 1$ , se puede justificar el incremento de potencia óptica como sigue

$$\begin{aligned} P_t \Big|_{D=RR \cdot T_b} &= p(a_k = 1) \frac{1}{RR} P_{pulso} = \\ &= \frac{1}{2RR} P_{pulso} = \frac{1}{RR} P_t \Big|_{D=T_b}. \end{aligned} \quad (17)$$

Con lo anteriormente expuesto, es inmediato deducir que la potencia óptica ha de ser multiplicada por RR con el fin de mantener constante la potencia óptica promedio. De este modo, se logra una relación de potencia de pico a potencia promedio tanto más elevada cuanto más severa sea la reducción de tasa binaria.

## 5. Escenario de Simulación

En Fig 5 se muestra el modelo de sistema adoptado para estimar las prestaciones de la tasa adaptativa con el formato OOK-GS, y la comparación con

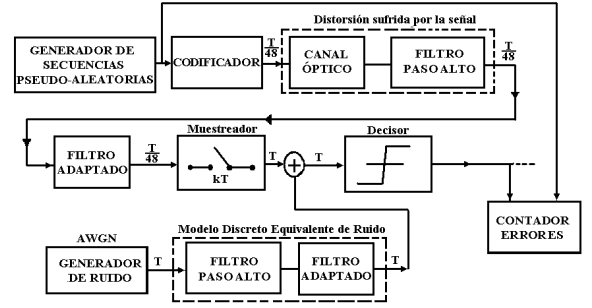


Fig. 5. Escenario de simulación del sistema de comunicaciones ópticas junto a la implementación del sistema de Montecarlo para la estimación de la tasa de error de bit.

las prestaciones obtenidas para pulsos NRZ y con pulsos gaussianos en formato PPM (GPPM).

El modelo de canal incluido se corresponde al modelo multiplicativo presentado en la Fig. 1, donde los coeficientes de escintilación,  $\alpha_{sc}[n]$  se han generado de acuerdo a la aproximación del modelo gaussiano de la correlación desarrollado a lo largo de la Sec. 3 de esta comunicación. Junto a él, se ha incluido una etapa de filtrado de Bessel de tres polos y naturaleza paso alto con una 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. Por último, se completa el sistema con otra etapa de filtrado también de Bessel de cinco polos y de naturaleza paso bajo, que hace la función de filtro adaptado.

Por otra parte, 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 sistema de modulación OOK con formas de pulso gaussiana de reducido ciclo de trabajo (OOK-GS). En concreto, este ciclo de trabajo será fijado al 25%. De esta manera, se intentará trasladar a comunicaciones ópticas en exteriores los buenos resultados obtenidos con el formato OOK-GS para interiores [12]. El tipo de detector utilizado en esta comunicación será un detector por umbrales, propuesto por la IrDA debido a su gran simplicidad.

Se supondrá que las señales transmitidas siempre se propagan a través de un enlace horizontal. Por consiguiente, no existirá dependencia del valor de  $C_n^2$  con la altura. Además, al asumir muy grande el valor de la macroescala,  $L_o$ , el proceso de escintilación se verá solamente como un efecto a pequeña escala, despreciándose la variabilidad que sufriría la media de la escintilación de amplitud con el tiempo. De esta manera, se supondrá una media de  $\chi$  constante, así como la media de la irradiancia,  $I$ , e independiente de las horas del día. Tal como se vio en la Sec. 3.2, el valor medio de la escintilación de amplitud,  $E[\chi]$ , será fijado a  $-\sigma_\chi^2$  [15]. Lógicamente, a la vista de lo desarrollado, se asumirá un régimen

de turbulencia débil para el cuál tienen validez las expresiones presentadas en la Sec. 2. Dentro de este régimen de turbulencia débil se presentarán, en esta comunicación, los resultados obtenidos para tres valores diferentes de intensidad de turbulencia:  $\sigma_\chi = 0.1$ ,  $\sigma_\chi = 0.14$  y  $\sigma_\chi = 0.2$ .

El valor de la longitud de onda,  $\lambda$ , de la señal óptica a transmitir será de 830 nm. La distancia de propagación a cubrir serán 250 metros. Se adoptarán dos valores para estudiar el efecto de la velocidad del viento sobre las prestaciones del sistema. En concreto, la componente que va a afectar es, como ya se ha comentado, la que tiene un sentido perpendicular a la dirección de propagación,  $u_\perp$ . Los valores elegidos para esta magnitud serán de 2 y 3 m/s, para los que las secuencias de escintilación que se obtienen en el dominio del tiempo y para  $\sigma_\chi = 0.1$  se muestran en la Fig. 6. Junto a estas dos magnitudes, se adjunta también la forma que tendría la secuencia de escintilación para un hipotético caso en que la velocidad del viento en su componente transversal alcanzara los 100 m/s. Por simplicidad, se asumirá el modelo gaussiano de la autocorrelación como aproximación para la generación del espectro temporal de las fluctuaciones de la irradiancia. Posteriormente, tal y como se vio en la Sec. 3.2, se realizará el correspondiente cambio de estadísticos de gaussiano a log-normal.

En todas las simulaciones, el régimen binario de funcionamiento se ha establecido en 50 Mbps. Por último, las probabilidades de error que se obtendrán fueron calculadas mediante esquemas de simulación de Montecarlo, tal y como se muestra en Fig. 5.

## 6. Resultados Numéricos

En Fig. 7 se presentan las tasas de error obtenidas tras la simulación. Como se ha mencionado, se han utilizado valores de  $\sigma_\chi$  de 0.1, 0.14 y 0.2, lo que aproximadamente equivale a valores para  $\sigma_I$  de 0.2, 0.29 y 0.42, de acuerdo a la ecuación (5). Dichos valores corresponden a un perfil medio dentro de un régimen de turbulencia débil. Por otra parte, tales valores de turbulencia se han acompañado del efecto adverso que también ocasiona el viento sobre la señal a transmitir. En concreto, los valores elegidos para la componente perpendicular de la velocidad del viento han sido de 2 m/s en Fig. 7(a), y de 3 m/s en Fig. 7(b), es decir, los correspondientes a una velocidad del viento en su componente longitudinal,  $u_\parallel$ , de aproximadamente 20 y 30 m/s respectivamente si se acepta la hipótesis de  $u_\perp = 0.1u_\parallel$  dada en [19].

En cuanto a las formas de pulso elegidas, como se ha comentado anteriormente, se han realizado pruebas con pulsos OOK-GS y ciclo de trabajo del 25%, y se han comparado con las prestaciones que se obtendrían al simular la propagación de pulsos NRZ.

Por otra parte, y para poner de manifiesto las bue-

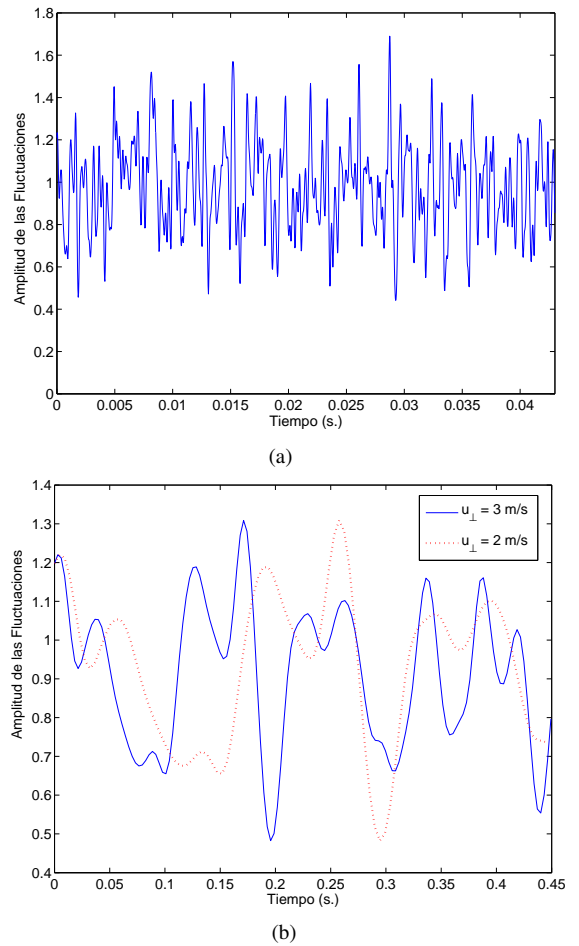
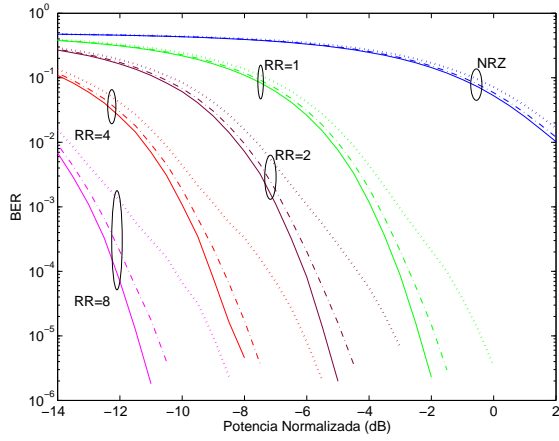


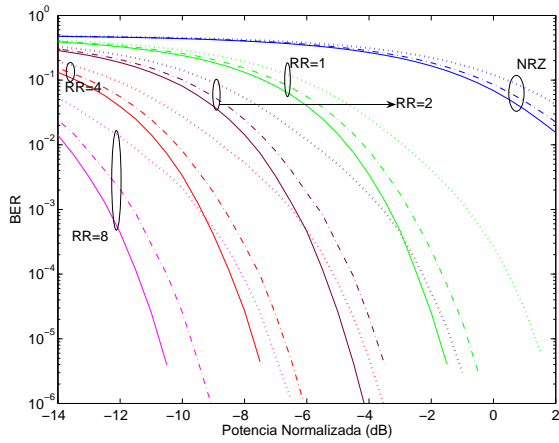
Fig. 6. (a) Coeficientes de escintilación  $\alpha_{sc}$  generados para una velocidad del viento  $u_\perp$  de 100 m/s. (b) Coeficientes de escintilación  $\alpha_{sc}$  generados con una velocidad del viento  $u_\perp$  de 2 m/s (trazo punteado) y 3 m/s (trazo continuo).

nas prestaciones del formato OOK-GS acompañado de una técnica adaptativa de inserción de silencios, se incluye en la Fig. 8 las curvas de error que se obtendrán si, para las mismas condiciones que en la Fig. 7, se transmitieran los mismos pulsos gaussianos de reducido ciclo de trabajo, aunque acompañados por la técnica de repetición clásica que propone la IrDA.

A la vista de Fig. 7 (a) y (b) y Fig. 8 (a) y (b), se puede observar que el fading inducido por la turbulencia causa una notable degradación en las prestaciones del sistema traduciéndose en unas curvas de probabilidad de error tanto más abiertas cuanto mayor (más adversas) sean los valores de intensidad de turbulencia y velocidad del viento que participen en la simulación. Sin embargo, se obtiene una notable reducción en los requerimientos de potencia óptica promedio para cada tasa de error escogida conforme se hace más aguda la reducción de tasa binaria. Por último, las mejores prestaciones de OOK-GS sobre NRZ, y de la tasa adaptativa mediante inserción de silencios respecto a la clásica propuesta por la IrDA mediante repetición de bits, se acentúan más cuando la relación señal a ruido se hace más alta, lo que induce a pensar que los errores



(a)



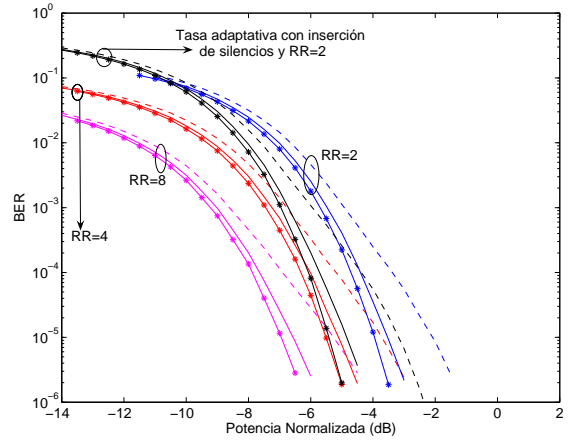
(b)

Fig. 7. Probabilidades de error obtenidas para los pulsos OOK-GS con diferentes valores de tasa adaptativa y comparación con el formato NRZ.  $\sigma_\chi = 0.1$  (trazado continuo), 0.14 (discontinuo) y 0.2 (punteado) para (a)  $u_\perp = 2$  m/s y (b)  $u_\perp = 3$  m/s.

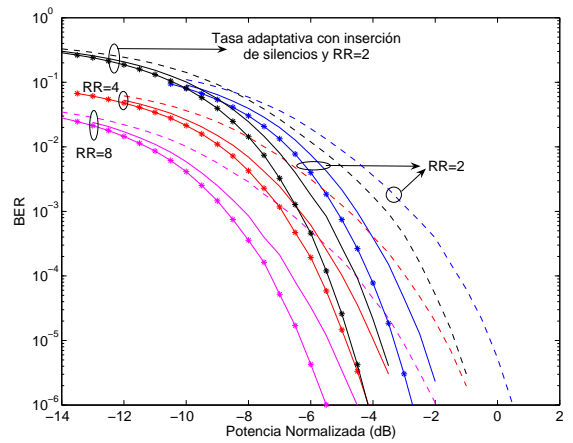
son causados principalmente por la escintilación y no por el ruido aditivo que se pueda añadir.

## 6. 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 [5]-[8] y [13], se ha desarrollado un nuevo modelo de canal que permita simular el efecto producido en las señales ópticas transmitidas. Dentro del modelo de canal propuesto no sólo se ha considerado el efecto negativo que provoca la intensidad de la turbulencia,  $\sigma_I^2$ , sino que también se ha añadido, como gran novedad, el efecto adverso de la intensidad del viento sobre la señal que se propaga. Por otra parte, se ha rescatado el modelo propuesto por Gujar y Kavanagh en [13] de forma que se pueda realizar una implementación sencilla y modular, donde se separan en dos etapas perfectamente diferenciadas 1) el contenido espectral que debe acompañar a la secuencia de escintilación, de 2) la naturaleza estadística que deba tener tal secuencia. Así, se facilitará de una manera inmediata el cambio de la descripción estadística que se necesitaría en el caso de querer un modelo de canal que



(a)



(b)

Fig. 8. Probabilidades de error obtenidas para el pulso OOK-GS con tasa adaptada basada en inserción de silencios y  $RR = 2$  (en negro), tomado de la Fig. 7, comparado con las probabilidades de error que se obtendrían si se transmitieran los mismos pulsos gaussianos pero con la adaptación clásica propuesta por la IrDA de repetición de bits, con factor de repetición  $RR=2$  (azul),  $RR=4$  (rojo) y  $RR=8$  (magenta).  $\sigma_\chi = 0.1$  (trazo continuo y '\*'), 0.14 (trazo continuo) y 0.2 (trazo discontinuo). Las velocidades de viento se han fijado a: (a)  $u_\perp = 2$  m/s (b)  $u_\perp = 3$  m/s.

sirva para intensidades de turbulencia moderadas a fuertes, y que es diferente a la log-normal adoptada que caracteriza a los regímenes de turbulencia débil. Finalmente, se han adoptado algunas de las ideas propuestas por Kanavos [7] y Ye y Satorius [8] que han permitido reducir notablemente la complejidad operacional respecto al modelo exacto presentado en [2], al mismo tiempo que se comprueba su validez para frecuencias de rango óptico, tal y como ha quedado reflejado en Fig. 3.

Introduciendo ese canal en un enlace a 50 Mbps, se han probado con éxito las prestaciones que ofrecen las señalizaciones OOK-GS. En concreto, otra de las conclusiones relevantes que se extrae de esta comunicación es el buen comportamiento que se desprende del uso de estos pulsos OOK-GS en comunicaciones ópticas atmosféricas cuando se incorpora una técnica de modulación de tasa adaptativa como la que se ha presentado, en regímenes de turbulencia débil acompañados de velocidades de viento moderadas a fuertes. Esta adaptabilidad del régimen binario



permite mantener la operatividad de los enlaces ante condiciones del canal fuertemente fluctuantes.

La superioridad del esquema de tasa adaptativa no se basa sólo en su destacable mejora en prestaciones, sino también en su significativa baja complejidad de implementación, comparado con los esquemas propuestos por el IrDA, tal y como se indica en [11].

### 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, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, *Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum*, *Waves in Random Media*, vol. 10, no. 1, pp. 53 – 70, Jan. 2000.
- [3] V. I. Tatarskii, *The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation*, Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1971.
- [4] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, Academic Press, Inc. Vol. 1-2, 1978.
- [5] E. Brookner, *Atmosphere Propagation and Communication Channel Model for Laser Wavelengths*, *IEEE Trans. on Communication Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 396 – 416, 1970.
- [6] R. Kennedy, *On the Atmosphere as an Optical Communication Channel*, *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 14, no. 5., pp. 716 – 724, Sept. 1968.
- [7] J. Kanavos, *The Effects of Atmospheric Turbulence on an Air-to-Air Optical Communication Link*, *NAECON 1985: Proc. of the National Aerospace and Electronics Conference*, vol. 2, pp. 1174 – 1182, Dayton, Ohio, May 20-24, 1985.
- [8] 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.
- [9] A. Jurado Navas, A. García Zambrana and A. Puerta Notario, *Evaluación de Prestaciones de Esquemas OOK-GS en Sistemas de Comunicaciones Ópticas Atmosféricas*, aceptado en el XX Simposium Nacional de la URSI, Gandía, 2005.
- [10] 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.
- [11] A. García-Zambrana and A. Puerta-Notario, *Large Change Rate-adaptive Indoor Wireless Infrared Links Using Variable Silence Periods*, *IEEE Elect. Letters*, vol. 37, no. 23, pp. 1409 – 1411, 2001.
- [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.
- [13] 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.
- [14] T. S. Rappaport, *Wireless Communications - Principles and Practice*, Upper Saddle River, N. Jersey, Prentice Hall, 1996.
- [15] 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.
- [16] A. V. Oppenheim, *Discrete-Time Signal Processing*, New Jersey, Prentice-Hall, 2<sup>a</sup> ed. cop. 1999
- [17] R. L. Fante, *Electromagnetic Beam Propagation in Turbulent Media*, *Proc. of the IEEE*, vol. 63, no. 12, pp. 1669–1692, Dec. 1975.
- [18] W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka, and M. Nakagawa, *Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation*, *Trans. of IEICE*, vol. E76-B, no. 9, pp. 1169 – 1176, Sep. 1993.
- [19] R. Lawrence and J. W. Strohbehn, *A Survey of Clear-Air Propagation Effects Relevant to Optical Communications*, *Proc. of the IEEE*, vol. 58, no. 10, pp. 1523–1545, Oct. 1970.