

Protocolo de Cooperación Adaptativo para Sistemas de Comunicaciones Ópticas Atmosféricas

Rubén Boluda Ruiz, Antonio García Zambrana
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga.
Campus de Teatinos s/n, E-29071 Málaga, España.
E-mail: {rbr,agz}@ic.uma.es

Abstract—In this paper, we analyze an adaptive cooperative protocol using Detect-and-Forward (DF) over atmospheric turbulence channels with pointing errors. Novel closed-form asymptotic bit error-rate (BER) expressions are obtained for a 3-way FSO communication setup when the irradiance of the transmitted optical beam is susceptible to either a wide range of turbulence conditions (weak to strong), or pointing errors. This adaptive cooperative protocol uses a criterion based on selection whose optical path, S-D or S-R, with a greater value of fading gain. This has shown to be able to extract diversity for different distances and different relay locations as well as providing a better performance compared with other alternatives.

I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones ópticas atmosféricas (FSO) han generado un interés especial entre la comunidad investigadora debido a las ventajas que presentan respecto a la tecnología de radiofrecuencia (RF), pudiéndose utilizar en multitud de aplicaciones. Las elevadas tasas binarias que se generan son consecuencia de su gran ancho de banda disponible, además de una excelente seguridad, bajo coste y fácil desarrollo. Los sistemas FSO se presentan como una alternativa a los sistemas cableados por fibra óptica debido a su naturaleza inalámbrica en aquellas zonas donde el despliegue de enlaces cableados no esté justificado. Sin embargo, el rendimiento de estos sistemas se ve seriamente afectado por la turbulencia atmosférica, provocando fluctuaciones en la irradiancia de las señales ópticas transmitidas como consecuencia de las microvariaciones de presión y temperatura que conllevan a cambios locales del índice de refracción. Este fenómeno se conoce como escintilación atmosférica [1]. Otro efecto indeseable es el posible desalineamiento entre el transmisor y el receptor como consecuencia del posible balanceo de los edificios. Todas las investigaciones realizadas en este contexto se centran en como aliviar el efecto de la turbulencia atmosférica. Recientemente, se ha propuesto una nueva alternativa para mejorar el rendimiento de los sistemas FSO que consiste en emplear comunicaciones cooperativas y superar así algunas limitaciones que presentan las técnicas MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output). Una transmisión cooperativa puede mejorar el rendimiento de un sistema FSO creando diversidad espacial utilizando transceptores disponibles en otros nodos de la red. Diversos autores se han encargado de estudiar esta técnica en el contexto de los sistemas FSO [2]–[7].

En esta comunicación se analiza un protocolo de cooperación adaptativo, basado en la selección de camino óptico

con mayor valor de desvanecimiento (irradiancia). Dada la no negatividad de las señales transmitidas se obtienen mejores resultados utilizando un criterio basado en el máximo valor de irradiancia frente a otros criterios como el propuesto en [3]. El análisis aquí realizado se presenta como una mejora de otros trabajos ya publicados [3], [7] presentando una mayor ganancia de diversidad y robustez frente a la distancia del enlace fuente-destino y la localización del nodo retransmisor.

II. MODELO DE SISTEMA COOPERATIVO FSO

El sistema cooperativo analizado está formado por 3 nodos separados mediante enlaces ópticos atmosféricos, tal como se muestra en Fig. 1, donde el esquema de transmisión-recepción implementado se basa en un esquema de modulación de intensidad y detección directa (IM/DD). En el protocolo de

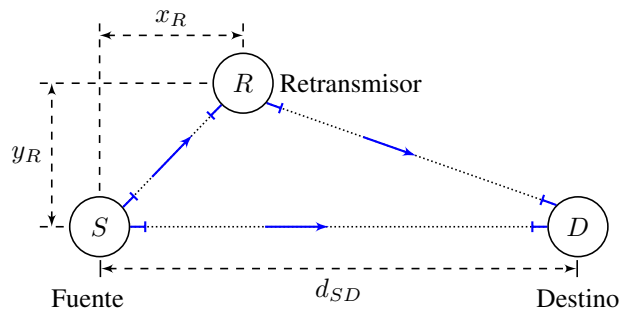


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema formado por 3 enlaces ópticos atmosféricos, donde d_{SD} es la distancia del enlace S-D y (x_R, y_R) representa la localización del nodo R.

cooperación adaptativo (ADF), el nodo S selecciona transmisión directa cuando el valor de la irradiancia del enlace fuente-destino (I_{SD}) es mayor que el valor de la irradiancia del enlace fuente-retransmisor (I_{SR}), en caso contrario se realiza una transmisión cooperativa basada en el protocolo de cooperación Bit Detect and Forward (BDF) analizado en [7]. Este protocolo de cooperación trabaja en dos fases o slot de transmisión. En la primera fase el nodo S envía la misma información tanto al nodo D como al nodo R, y en la segunda fase el nodo R reenvía la información recibida en la primera fase hacia el nodo D con la nueva potencia independientemente de si ha habido acierto o no en la detección. Para realizar la selección, se asume conocida la información de estado del canal (CSI) en el transmisor del nodo S. El conocimiento

del CSI en transmisión es factible en sistemas FSO dado que la escintilación atmosférica es un proceso de variación temporal lenta en comparación con las altas tasas de símbolos. Un ejemplo de operación de este protocolo de cooperación adaptativo se muestra en la Tabla I, donde en los slots t_2 y t_5 el nodo S selecciona transmisión directa frente a transmisión cooperativa basada en el protocolo de cooperación BDF como consecuencia de que se cumple que $I_{SR} < I_{SD}$. Hay que resaltar que en este protocolo de cooperación adaptativo no hay reducción de tasa de información debido a que los slots de transmisión están superpuestos.

TABLE I. Esquema del protocolo de cooperación ADF cuando se transmite un mensaje $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$.

Enlace	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	...	t_n	t_{n+1}
S→D	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	...	s_n	–
S→R	s_1	–	s_3	s_4	–	s_6	...	s_n	–
R→D	–	s_1^*	–	s_3^*	s_4^*	–	...	s_{n-1}^*	s_n^*

III. MODELO DE CANAL ÓPTICO ATMOSFÉRICO

Para cada uno de los tres enlaces FSO del sistema cooperativo, la señal eléctrica recibida está dada por

$$Y_m = \eta I_m X_m + Z_m, \quad (1)$$

donde η es la responsividad del fotodetector. X_m representa la potencia óptica transmitida al medio por el transmisor. I_m es la irradiancia del camino óptico entre el transmisor y el receptor, y Z_m es el ruido AWGN aditivo de media cero, varianza $\sigma^2 = N_0/2$ e independiente del estado on/off del bit recibido cuya componente principal es el ruido shot de alta intensidad procedente de la luz ambiental $Z_m \sim N(0, N_0/2)$. La irradiancia I_m es el producto de tres factores y puede expresarse como $I_m = L_m I_m^{(a)} I_m^{(p)}$. Siendo L_m un factor determinista que modela las pérdidas por propagación y se calcula a través de la fórmula de Beers-Lambert como $L_m = e^{-\Psi d}$, donde d es la distancia del enlace y Ψ es el coeficiente de atenuación. Este coeficiente de atenuación se calcula a partir de la siguiente expresión $\Phi = (3.91/V(km)) (\lambda(nm)/550)^{-q}$, donde V es la visibilidad en kilómetros, λ la longitud de onda en nanómetros y q es un parámetro relacionado con la visibilidad siendo $q = 1.3$ cuando $6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$. $I_m^{(a)}$ representa la atenuación debida a la turbulencia atmosférica, e $I_m^{(p)}$ la atenuación debida al desalineamiento. Para considerar un amplio rango de niveles de turbulencia atmosférica utilizamos el modelo estadístico gamma-gamma propuesto en [1], [8]. Esta función está caracterizada a través de los parámetros α y β . Asumiendo el modelo de propagación de onda plana, los parámetros α y β están directamente relacionados con parámetros físicos del enlace a través de la varianza de Rytov [8]. Siendo la varianza de Rytov $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} d^{11/6}$, la cual mide la fuerza de la turbulencia atmosférica. Donde $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda espacial, y d es la distancia del enlace en metros. C_n^2 es el parámetro de estructura

de las fluctuaciones del índice de refracción y varía desde $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ para turbulencia fuerte hasta $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ para turbulencia débil [1]. Resaltar, que en el modelo de propagación de onda plana la relación $\alpha > \beta$ siempre se cumple y ambos parámetros no pueden ser seleccionados de forma arbitraria. Para modelar el desalineamiento entre el transmisor y el receptor se usa el modelo general descrito en [9] donde los efectos de ancho de haz, tamaño del detector y varianza de jitter son considerados. En este modelo se asume un haz Gaussiano cuyo ancho de haz es ω_z en el plano del receptor a una distancia z del transmisor, y una apertura de detección circular de radio r , y $\varphi = \omega_{z_{eq}}/2\sigma_s$ es la relación entre la ancho de haz equivalente en el receptor y la desviación estándar del desplazamiento del desapuntamiento (jitter) en el receptor. El parámetro $\omega_{z_{eq}}$ puede ser calculado usando las relaciones, $v = \sqrt{\pi}r/\sqrt{2}\omega_z$, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$ y $\omega_{z_{eq}}^2 = \omega_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)/2v \exp(-v^2)$, donde $\text{erf}(\cdot)$ es la función error [10, eqn. (8.250)]. Una expresión cerrada para la función densidad de probabilidad (PDF) de I_m fue obtenida en [11] en términos de funciones Meijer's G [10, eqn. (9.301)]. Esta PDF aparece muy incomoda de tratar matemáticamente para obtener expresiones de probabilidad de error de bit en el análisis de sistemas FSO. Para superar este inconveniente, la PDF es aproximada por un simple polinomio de la forma $f_{I_m}(i) \approx a_m i^{b_m-1}$, basándonos en el hecho de que el rendimiento de estos sistemas a altos valores de SNR está dominado por la PDF cerca del origen [7]. Por tanto, la PDF de I_m puede ser aproximada suponiendo que $\varphi_m^2 > \beta_m$ por

$$f_{I_m}(i) \approx \frac{\varphi_m^2 (\alpha_m \beta_m)^{\beta_m} \Gamma(\alpha_m - \beta_m) i^{\beta_m-1}}{(A_0 L_m)^{\beta_m} \Gamma(\alpha_m) \Gamma(\beta_m) (\varphi_m^2 - \beta_m)}, \quad i \geq 0 \quad (2)$$

En las siguientes secciones, los coeficientes I_m para los enlaces S-D, S-R, y R-D están indicados por I_{SD} , I_{SR} e I_{RD} , respectivamente. En esta comunicación se asume que todos los coeficientes son estadísticamente independientes.

IV. ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE BIT

En esta comunicación se asume que la potencia óptica promedio enviada al aire por cada transmisor es P_{opt} , donde se adopta una modulación on-off keying (OOK) basada en una constelación de dos símbolos equiprobables en un espacio unidimensional separados una distancia Euclídea $d_E = 2P_{opt}\sqrt{T_b\xi}$, donde T_b es el periodo de bit y ξ representa el cuadrado del incremento de la distancia Euclídea debido al uso de una forma de pulso con alta potencia óptica pico a promedio (PAOPR).

A. Transmisión Directa (TD)

Este escenario se estudia por dos motivos, el primero es debido a que el protocolo de cooperación adaptativo selecciona TD cuando se cumple que $I_{SD} > I_{SR}$, y el segundo motivo es debido a que una TD establece la línea base de comparación de prestaciones. Por tanto, siguiendo el análisis realizado en [7], la solución asintótica para la bit error-rate (BER) correspondiente al enlace S-D puede expresarse como

$$P_b^{SD}(E) \doteq \frac{a_{SD} \Gamma(\frac{\beta_{SD}+1}{2}) (\gamma\xi)^{-\frac{1}{2}\beta_{SD}}}{2\sqrt{\pi}\beta_{SD}}, \quad (3)$$

donde $\gamma = P_{\text{opt}}^2 T_b / N_0$ representa la SNR eléctrica recibida en ausencia de turbulencia.

B. Bit Detect and Forward relaying (BDF)

Este protocolo de cooperación fue analizado en detalle en [7]. La correspondiente solución asintótica para la BER del protocolo de cooperación BDF es $P_b^{BDF_0}(E)$ cuando ha habido acierto en el nodo R, y $P_b^{BDF_1}(E)$ cuando ha habido error en el nodo R, y pueden ser escritas como

$$P_b^{BDF_0}(E) \doteq \frac{a_{SD} a_{RD} \Gamma(\beta_{SD}) \Gamma(\beta_{RD}) (\gamma \xi)^{-\frac{1}{2}(\beta_{SD} + \beta_{RD})}}{2^{\frac{1}{2}(\beta_{RD} - \beta_{SD})} 2 \Gamma(\frac{1}{2}(\beta_{SD} + \beta_{RD} + 2))}, \quad (4)$$

$$P_b^{BDF_1}(E) \doteq \int_0^\infty \int_0^{2i_2} f_{I_{SD}}(i_1) f_{i_{RD}}(i_2) di_1 di_2. \quad (5)$$

Teniendo presente el comportamiento asintótico de estas expresiones, $P_b^{BDF}(E) \doteq P_b^{BDF_0}(E)$ cuando $\beta_{SD} + \beta_{RD} < \beta_{SR}$, y $P_b^{BDF}(E) \doteq P_b^{BDF_1}(E) \cdot P_b^{SR}(E)$ cuando $\beta_{SD} + \beta_{RD} > \beta_{SR}$. donde $P_b^{SR}(E)$, es la BER correspondiente al enlace S-R

$$P_b^{SR}(E) \doteq \frac{a_{SR} 2^{(\beta_{SR}-1)} \Gamma(\frac{\beta_{SR}+1}{2}) (\gamma \xi)^{-\frac{1}{2}\beta_{SR}}}{\sqrt{\pi} \beta_{SR}}. \quad (6)$$

C. Adaptive Detect and Forward relaying (ADF)

La señal recibida en el nodo D correspondiente al protocolo de cooperación ADF depende de la relación entre I_{SD} e I_{SR}

$$Y_{ADF}^0 = \frac{1}{2} X I_{SD} + X^* I_{RD} + Z_T, \quad I_{SR} > I_{SD} \quad (7a)$$

$$Y_{ADF}^1 = X I_{SD} + Z_{SD}, \quad I_{SR} < I_{SD} \quad (7b)$$

siendo $X^* = X$ cuando hay acierto en el nodo R, $X^* = d - X$ cuando hay error, y $Z_T \sim N(0, N_0)$. La expresión de la BER para ADF haciendo uso de resultados previos está dada por

$$\begin{aligned} P_b^{ADF}(E) &= P_b^{BDF_0}(E) P_b^{SR_0}(E) \\ &+ P_b^{BDF_1}(E) P_b^{SR_1}(E) + P_b^{SDADF}(E) \\ &= P_b^{BDF_0}(E) \int_0^\infty [1 - P_b^{SR}(E|I_{SR})] F_{I_{SD}}(i) f_{I_{SR}}(i) di \\ &+ P_b^{BDF_1}(E) \int_0^\infty P_b^{SR}(E|I_{SR}) F_{I_{SD}}(i) f_{I_{SR}}(i) di \\ &+ \int_0^\infty P_b^{SD}(E|I_{SD}) F_{I_{SR}}(i) f_{I_{SD}}(i) di, \end{aligned} \quad (8)$$

donde $F_{I_n}(i)$ es la función de distribución (CDF), dada por $F_{I_n}(i) = \text{Prob}(I_n \leq i)$, y mediante la cual se computa la probabilidad de $I_{SD} > I_{SR}$, y de $I_{SR} > I_{SD}$, al ser ambas estadísticamente independientes. Por tanto, tenemos que resolver la siguiente expresión genérica para la BER correspondiente a los enlaces S-R y S-D

$$\int_0^\infty Q(\sqrt{k\gamma\xi i}) F_{I_n}(i) f_{I_m}(i) di, \quad k \in \mathbb{R}^+ \quad (9)$$

siendo $F_{I_n}(i) \approx (a_n/b_n)i^{b_n}$. Por tanto, si particularizamos para $k = 2$ en Eq. (9), estamos computando la BER correspondiente al enlace S-D cuando se cumple que $I_{SD} > I_{SR}$,

$P_b^{SDADF}(E)$ está dada por

$$P_b^{SDADF}(E) \doteq \int_0^\infty P_b^{SD}(E|I_{SD}) F_{I_{SR}}(i) f_{I_{SD}}(i) di, \quad (10)$$

y si particularizamos para $k = 1/2$ en Eq. (9), estamos computando la BER correspondiente al enlace S-R cuando se cumple que $I_{SR} > I_{SD}$, $P_b^{SR_1ADF}(E)$ está dada por

$$P_b^{SR_1ADF}(E) \doteq \int_0^\infty P_b^{SR}(E|I_{SR}) F_{I_{SD}}(i) f_{I_{SR}}(i) di. \quad (11)$$

Para evaluar Eq. (10) y Eq. (11), hacemos uso de la relación entre la función $Q(\cdot)$ y la función de error complementario $\text{erfc}(\cdot)$ a través de $\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$ [10, eqn. (6.287)], y haciendo uso también de $\int_0^\infty \text{erfc}(x)x^{a-1} dx = \Gamma((1+a)/2)/(\pi^{1/2}a)$ [10, eqn. (6.281)]. Las correspondientes soluciones asintóticas para la BER aparecen en Eq. (12) y Eq. (13), respectivamente, como puede verse al principio de la siguiente página. Finalmente, computando la probabilidad de acierto correspondiente al enlace S-R cuando se cumple que $I_{SR} > I_{SD}$, $P_b^{SR_0ADF}(E|I_{SR}) = 1 - P_b^{SR_1ADF}(E|I_{SR})$, y teniendo en cuenta que la función Gaussiana $Q(\cdot)$ tiende a 0 cuando $\gamma \rightarrow \infty$, nos queda

$$P_b^{SR_0ADF}(E) \doteq \int_0^\infty F_{I_{SD}}(i) f_{I_{SR}}(i) di. \quad (14)$$

Destacar que el comportamiento asintótico de $P_b^{SR_0ADF}(E)$ es independiente de la SNR γ resultando un valor positivo, y siendo resuelta numéricamente mediante integración Monte Carlo. La BER correspondiente al protocolo de cooperación ADF es $P_b^{ADF}(E) \doteq P_b^{BDF_0}(E) \cdot P_b^{SR_0ADF}(E)$ cuando $\beta_{RD} < \beta_{SR}$ y $P_b^{ADF}(E) \doteq P_b^{BDF_1}(E) \cdot P_b^{SR_1ADF}(E) + P_b^{SDADF}(E)$ cuando $\beta_{RD} > \beta_{SR}$. Teniendo en cuenta estas expresiones, se puede obtener la ganancia de diversidad G_d del protocolo de cooperación aquí analizado respecto a una TD cuando no existe cooperación. Por lo que G_d^{ADF} puede ser escrita como

$$G_d^{ADF} = 1 + \min(\beta_{RD}, \beta_{SR}) / \beta_{SD}. \quad (15)$$

Además, se compara la ganancia de diversidad aquí obtenida con la que se obtuvo en [7], cuya expresión obtenida fue

$$G_d^{BDF} = \min(\beta_{SD} + \beta_{RD}, \beta_{SR}) / \beta_{SD}. \quad (16)$$

V. RESULTADOS NUMÉRICOS Y CONCLUSIONES

En esta sección se presentan los resultados numéricos obtenidos con la finalidad de evaluar las prestaciones del protocolo de cooperación adaptativo descrito en anteriores secciones junto con las conclusiones. En concreto, se ha analizado un sistema de comunicaciones cooperativas formado por 3 enlaces FSO con retransmisión DF usando IM/DD sobre canales con turbulencia atmosférica y desalineamiento entre el transmisor y el receptor. Se han evaluado las prestaciones de un protocolo de cooperación adaptativo basado en la selección de camino óptico con mayor valor de irradiancia. En primer lugar, para entender mejor cuál es el impacto del escenario analizado en esta comunicación, se representa la ganancia de diversidad,

$$P_b^{SR_{ADF}}(E) \doteq \frac{a_{SR} a_{SD} 2^{(\beta_{SR} + \beta_{SD})} \Gamma\left(\frac{1}{2}(1 + \beta_{SR} + \beta_{SD})\right)}{2\sqrt{\pi}(\beta_{SR} + \beta_{SD})\beta_{SD}} (\gamma\xi)^{-\frac{1}{2}(\beta_{SR} + \beta_{SD})}. \quad (12)$$

$$P_b^{SD_{ADF}}(E) \doteq P_b^{SR_{ADF}}(E) \cdot \frac{\beta_{SD}}{\beta_{SR}}. \quad (13)$$

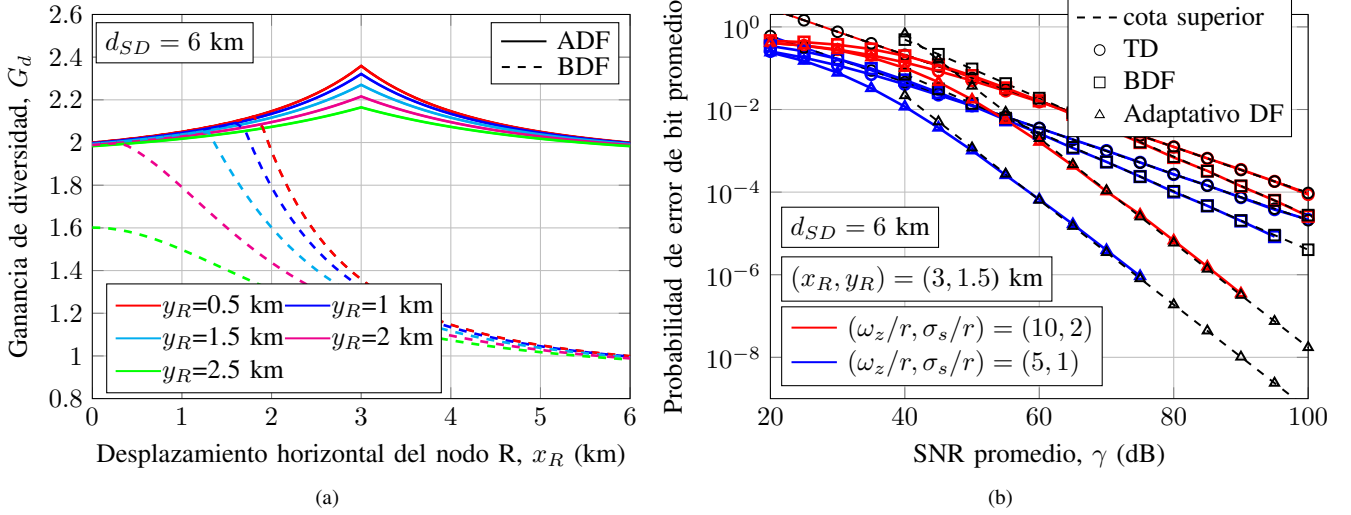


Fig. 2. (a) Ganancia de diversidad G_d en función de la localización del nodo R. (b) BER para una localización del nodo R de $(x_R, y_R) = (3, 1.5)$ y valores normalizados de anchura de haz y jitter de $(\omega_z/r, \sigma_s/r) = \{(10, 2), (5, 1)\}$.

G_d , tanto para el protocolo de cooperación adaptativo (ADF) aquí analizado, como para el protocolo de cooperación analizado en [7]. Por tanto, Eq. (15) y Eq. (16) se representan en la Fig. 2a en función del desplazamiento horizontal del nodo R, x_R . Los parámetros α y β son calculados a partir de sus respectivas expresiones [8], para valores de $\lambda = 1550$ nm y $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$. El factor de pérdidas de propagación determinista se ha calculado asumiendo condiciones meteorológicas claras con una visibilidad de 16 km. Se puede concluir diciendo que la ganancia de diversidad obtenida para el protocolo de cooperación adaptativo aquí analizado es independiente de la localización del nodo R, y de la distancia del enlace S-D, presentando una ganancia de diversidad mayor que 1 en todos los casos, y una mayor robustez, siendo la ganancia de diversidad igual o superior a la obtenida en el escenario MIMO equivalente con dos transmisores láseres en transmisión. Además, presenta un máximo cuando $d_{SR} = d_{RD}$, y esto se cumple cuando $x_R = d_{SD}/2$. Los resultados correspondientes a las soluciones asintóticas de la BER adoptando una forma de pulso rectangular con ciclo de trabajo del 100% ($\xi=1$) son representados en la Fig. 2b junto con diferentes valores normalizados de anchura de haz y jitter. Los resultados mediante simulación Monte Carlo son incluidos para confirmar la precisión de los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad bajo el proyecto TEC2012-32606.

REFERENCES

- [1] L. Andrews, R. Phillips, and C. Hopen, *Laser beam scintillation with applications*. Bellingham, WA: SPIE Press, 2001.
- [2] M. Safari and M. Uysal, "Relay-assisted free-space optical communication," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 12, pp. 5441–5449, December 2008.
- [3] M. Karimi and M. Nasiri-Kenari, "BER analysis of cooperative systems in free-space optical networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 24, pp. 5639–5647, dec.15, 2009.
- [4] —, "Outage analysis of relay-assisted free-space optical communications," *IET Communications*, vol. 4, no. 12, pp. 1423–1432, 13 2010.
- [5] C. Abou-Rjeily, "Performance analysis of selective relaying in cooperative free-space optical systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 18, pp. 2965–2973, 2013.
- [6] N. D. Chatzidiamantis, D. S. Michalopoulos, E. E. Kriezis, G. K. Karagiannidis, and R. Schober, "Relay selection protocols for relay-assisted free-space optical systems," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 92–103, 2013.
- [7] A. Garcia-Zambrana, C. Castillo-Vazquez, B. Castillo-Vazquez, and R. Boluda-Ruiz, "Bit detect and forward relaying for FSO links using equal gain combining over gamma-gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors," *Opt. Express*, vol. 20, no. 15, pp. 16394–16409, Jul 2012.
- [8] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, and R. L. Phillips, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Opt. Eng.*, vol. 40, p. 8, 2001.
- [9] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, July 2007.
- [10] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series and products*, 7th ed. Academic Press Inc., 2007.
- [11] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, and G. K. Karagiannidis, "Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 20, pp. 4440–4445, 2009.