

Análisis de la capacidad ergódica en sistemas cooperativos de comunicaciones ópticas no guiadas

Rubén Boluda Ruiz¹, Antonio García Zambrana¹, Beatriz Castillo Vázquez¹ y Carmen Castillo Vázquez²

¹Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga

²Dpto. de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Málaga

Campus de Teatinos s/n, E-29071 Málaga, España.

E-mail: {rbr,agz,bcv}@ic.uma.es y carmelina@uma.es

Abstract—Ergodic capacity for the bit-detect-and-forward (BDF) cooperative protocol over gamma-gamma fading channels with pointing errors is here analyzed. Novel closed-form approximate ergodic capacity expression is here obtained for a 3-way free-space optical (FSO) communication system using the well-known inequality between arithmetic and geometric means of positive random variables (RV) in order to derive an approximate closed-form expression of the sum of gamma-gamma with pointing errors variates. It can be concluded that a greater and robust capacity strongly dependent on the relay location is achieved compared to a direct transmission.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas (SCONG) es un tema muy interesante entre la comunidad investigadora desde hace años. Estos sistemas presentan numerosas ventajas que incitan a su investigación, como por ejemplo las elevadas tasas binarias que pueden ser generadas así como su excelente seguridad. Sin embargo, las prestaciones de los SCONG se ven seriamente perjudicadas por el efecto de la turbulencia atmosférica, lo que provoca fluctuaciones en la irradiancia de las señales ópticas transmitidas. Hace unos años se propuso en la literatura una alternativa a las técnicas MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) para mejorar las prestaciones de los SCONG que consiste en emplear comunicaciones cooperativas, y de esta forma superar así algunas limitaciones que presentan los sistemas MIMO. Los sistemas cooperativos pueden mejorar las prestaciones de un SCONG creando diversidad espacial a partir del uso de transceptores disponibles en otros nodos de la red [1], [2].

Numerosos autores en años recientes se han encargado de estudiar la capacidad ergódica en enlaces ópticos no guiados [3], [4]. Como es bien sabido, la capacidad ergódica define la máxima tasa de datos que puede ser transmitida por un canal de comunicaciones sin errores, sin retraso ni restricciones de complejidad. Últimamente, el estudio de la capacidad ergódica para SCONG cooperativos ha cobrado cierto protagonismo [5], [6]. La principal contribución de este trabajo se centra en obtener por primera vez en SCONG cooperativos, una expresión aproximada en forma cerrada para la capacidad ergódica correspondiente a la estrategia de cooperación bit-detect-and-forward (BDF) analizada en [1], [2] sobre canales con turbulencia atmosférica modelada con distribución gamma-gamma y desalineamiento entre transmisor y receptor. Dicha expresión para la capacidad ergódica se obtiene para

un SCONG cooperativo formado por tres nodos. Además, en este trabajo se presenta una expresión asintótica a alta relación señal-ruido (SNR) para la capacidad ergódica correspondiente a la estrategia de cooperación BDF. Se puede concluir que una mayor capacidad ergódica puede ser conseguida dependiente no solo de la ubicación del nodo retransmisor sino también del desalineamiento entre transmisor y receptor comparado con una transmisión directa cuando no existe cooperación.

II. MODELO DE SISTEMA Y DE CANAL

El SCONG cooperativo considerado en este trabajo 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). La estrategia de cooperación BDF trabaja en dos fases [2]. En

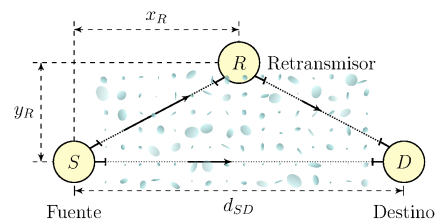


Fig. 1. Diagrama de bloques donde d_{SD} es la distancia del enlace fuente-destino y (x_R, y_R) es la ubicación del nodo R.

la primera fase, el nodo fuente S envía sus propios datos tanto al nodo retransmisor R como al nodo destino D. En la segunda fase, el nodo R envía los datos recibidos procedentes del nodo S en la primera fase hacia el nodo D. El nodo R detecta cada bit “0” o “1” y lo envía con la nueva potencia hacia el nodo D, independientemente de si este bit es detectado correcta o incorrectamente. A continuación, los bits procedentes tanto del enlace S-D como del enlace S-R-D son detectados en el nodo D mediante una técnica de combinación de igual ganancia. La señal eléctrica recibida en términos estadísticos para cada uno de los tres enlaces está dada por $Y_m = \eta I_m X_m + Z_m$, 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 enlace óptico entre el transmisor y el receptor, Z_m es ruido AWGN aditivo de media cero y varianza $\sigma^2 = N_0/2$, i.e. $Z_m \sim N(0, N_0/2)$, e Y_m es

la fotocorriente instantánea de salida del fotodetector. Se ha asumido un esquema de señalización on-off keying (OOK) donde X es 0 o $2P_{opt}\sqrt{T_b\xi}$, siendo P_{opt} la potencia óptica promedio transmitida por cada nodo, T_b el periodo de bit, y ξ el cuadrado del incremento debido al uso de pulsos con una alta relación potencia óptica pico a promedio (PAOPR) [7, apéndice]. La SNR instantánea recibida, γ , puede ser escrita como $\gamma = d_E^2 I_m^2 / 2\sigma_n^2 = 4\gamma_0 \xi I_m^2$, donde d_E es la distancia Euclidea y γ_0 representa la SNR recibida en ausencia de turbulencia. La irradiancia de cada enlace óptico atmosférico I_m es modelada como $I_m = L_m I_m^{(a)} I_m^{(p)}$. El factor determinista L_m modela las pérdidas por propagación. L_m se calcula a partir 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 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 [8]. Las variables aleatorias $I_m^{(a)}$ e $I_m^{(p)}$ modelan la atenuación debida a la turbulencia atmosférica y la atenuación debida al desalineamiento entre transmisor y receptor respectivamente. Para considerar un amplio rango de niveles de turbulencia atmosférica usamos el modelo estadístico gamma-gamma propuesto en [9]. La función densidad de probabilidad (FDP) asociada a este modelo estadístico está caracterizada a través de los parámetros α y β . Asumiendo un modelo de propagación de onda plana, los parámetros α y β están directamente relacionados con parámetros físicos del enlace óptico a través de la varianza de Rytov [9]. Para modelar el desalineamiento entre transmisor y receptor se usa el modelo estadístico descrito en [10] 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, además de una apertura de detección circular de radio r . El parámetro $\varphi = \omega_{z_{eq}}/2\sigma_s$ es definido como la relación entre la ancho de haz equivalente en el plano del receptor y la desviación estándar del desplazamiento del desapuntamiento (jitter) en el receptor. Por tanto, $\omega_{z_{eq}}$ 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 [11, eqn. (8.250)]. Una expresión en forma cerrada para la FDP de I_m fue obtenida en [12] como

$$f_{I_m}(i) = \frac{\varphi^2 i^{-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta i}{A_0 L_m} \middle| \begin{matrix} \varphi^2 + 1 \\ \varphi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right), \quad (1)$$

donde $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ es la función Meijer's-G [11, eqn. (9.301)]. 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 este trabajo se asume que todos los coeficientes son estadísticamente independientes.

III. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD ERGÓDICA

En esta sección se analiza en detalle la capacidad ergódica de un SCONG cooperativo. En primer lugar, se obtiene la capacidad ergódica correspondiente a una transmisión directa

(TD). Asumiendo conocida la información de estado del canal en recepción, la capacidad ergódica C_{TD} es definida como

$$C_{TD} = \frac{B}{2\ln(2)} \int_0^\infty \ln(1 + 4\gamma_0 \xi i^2) f_{I_{SD}}(i) di, \quad (2)$$

donde B es el ancho de banda del canal, $\ln(\cdot)$ es el logaritmo neperiano [11, eqn. (1.511)], y $f_{I_{SD}}(i)$ es la correspondiente FDP dada por Eq. (1). El factor de 1/2 hace referencia a que el nodo fuente está operando en modo half-duplex. Para resolver la integral en Eq. (2) expresamos el logaritmo en términos de una función Meijer-G como $\ln(1+z) = G_{2,2}^{1,2}(z|_{1,0}^{1,1})$ [13, eqn. (8.4.6.5)] y, a continuación, usamos [13, eqn. (2.24.1.1)]. Por tanto, la expresión en forma cerrada de la capacidad ergódica correspondiente a una transmisión directa puede ser vista al comienzo de la siguiente página en Eq. (3). Una expresión asintótica para esta capacidad ergódica puede ser obtenida de forma muy precisa como en [4]

$$C_{TD}^H \doteq \frac{B}{\ln(4)} \left. \frac{\partial \mathbb{E}[(4\gamma_0 \xi I_{SD}^2)^n]}{\partial n} \right|_{n=0}, \quad (4)$$

donde $\mathbb{E}[\cdot]$ es el operador esperanza y $\mathbb{E}[(4\gamma_0 \xi I_{SD}^2)^n]$ es el enésimo momento de la SNR instantánea recibida. Realizando algunas manipulaciones algebraicas en Eq. (4), la expresión asintótica a alta SNR para la capacidad ergódica de una transmisión directa puede ser expresada como

$$C_{TD}^H \doteq \frac{B \ln(4\gamma_0 \xi)}{\ln(4)} + \frac{B}{\ln(2)} \times \left(\psi(\alpha_{SD}) + \psi(\beta_{SD}) - \frac{1}{\varphi_{SD}^2} - \ln \left(\frac{\alpha_{SD} \beta_{SD}}{A_{SD} L_{SD}} \right) \right), \quad (5)$$

donde $\psi(\cdot)$ es la función psi (digamma) [11, eqn. (8.360.1)]. A continuación, se analiza la capacidad ergódica correspondiente al SCONG cooperativo siguiendo la estrategia de cooperación BDF. Dos casos son considerados para evaluar la capacidad ergódica de este sistema dependiendo de si el bit procedente del nodo fuente S es detectado correcta o incorrectamente en el nodo retransmisor R. La capacidad ergódica correspondiente al protocolo de cooperación BDF es definida como

$$C_{BDF} = C_0 \cdot (1 - P_b^{SR}) + C_1 \cdot P_b^{SR} = C_0 + (C_1 - C_0) \cdot P_b^{SR}, \quad (6)$$

donde P_b^{SR} es la probabilidad de error de bit (PEB) correspondiente al enlace S-R y, C_0 y C_1 son las capacidades ergódicas cuando el bit procedente del nodo fuente es detectado correcta o incorrectamente en el nodo retransmisor respectivamente. La SNR recibida en el nodo destino cuando hay acierto en la detección en el nodo R es definida como $\gamma_{BDF}^0 = (1/2)\gamma_0 \xi (I_{SD} + 2I_{RD})^2$, y la SNR recibida cuando hay error en la detección en el nodo R es definida como $\gamma_{BDF}^1 = (1/2)\gamma_0 \xi (I_{SD} - 2I_{RD})^2$. Debe ser mencionado que la capacidad ergódica correspondiente al protocolo de cooperación BDF puede ser aproximada de forma muy precisa como $C_{BDF} \approx C_0$, ya que C_0 y C_1 son del mismo orden de magnitud y P_b^{SR} tiende a cero conforme la SNR tiende a infinito. Esta aproximación ha sido numéricamente corroborada mediante

$$C_{TD} = \frac{B\varphi_{SD}^2 2^{\alpha_{SD} + \beta_{SD} - 4}}{\pi \ln(2)\Gamma(\alpha_{SD})\Gamma(\beta_{SD})} G_{8,4}^{1,8} \left(\left(\frac{8A_{SD}L_{SD}}{\alpha_{SD}\beta_{SD}} \right)^2 \gamma_0 \xi \left| \begin{array}{l} 1, 1, \frac{1-\alpha_{SD}}{2}, \frac{2-\alpha_{SD}}{2}, \frac{1-\beta_{SD}}{2}, \frac{2-\beta_{SD}}{2}, \frac{1-\varphi_{SD}^2}{2}, \frac{2-\varphi_{SD}^2}{2} \\ 1, 0, -\frac{\varphi_{SD}^2}{2}, \frac{1-\varphi_{SD}^2}{2} \end{array} \right. \right). \quad (3)$$

simulación Monte Carlo y, por tanto, será corroborado en las siguientes secciones. Luego, C_{BDF} es aproximada como

$$C_{BDF} \approx \frac{B}{2\ln(2)} \int_0^\infty \ln \left(1 + \frac{\gamma_0 \xi}{2} i^2 \right) f_{I_T}(i) di, \quad (7)$$

donde $I_T = I_{SD} + 2I_{RD}$. En este punto, es necesario destacar que la obtención de la FDP de I_T es intratable desde el punto de vista matemático. Por tanto, una cota inferior (CI) para la suma I_T puede ser obtenida usando la conocida desigualdad entre la media aritmética (MA) y la media geométrica (MG) dada por $MA \geq MG$, donde $MA = (I_{SD} + 2I_{RD})/2$ y $MG = \sqrt{I_{SD} \cdot 2I_{RD}}$. Esta cota inferior para la suma I_T es expresada como $I_{SD} + 2I_{RD} \geq \sqrt{8I_{SD}I_{RD}} = \sqrt{8I_T^{CI}}$. Debe ser mencionado que $f_{I_T^{CI}}(i)$ permite un tratamiento matemático más sencillo que $f_{I_T}(i)$ y puede ser aplicada al análisis de SCONG de forma eficiente. Realizando algunas manipulaciones algebraicas en Eq. (7), la capacidad ergódica correspondiente al protocolo de cooperación BDF es aproximada como

$$C_{BDF} \leq \frac{B}{\ln(4)} \int_0^\infty \ln(1 + 4\gamma_0 \xi F i) f_{I_T^{CI}}(i) di. \quad (8)$$

La FDP de $f_{I_T^{CI}}(i)$ ha sido obtenida en forma cerrada mediante la transformada inversa de Mellin, la cual es una herramienta esencial en el estudio de distribuciones de productos de variables aleatorias independientes [14], y puede ser vista al comienzo de la siguiente página en Eq. (9). Para resolver la integral en Eq. (8) expresamos el logaritmo en términos de una función Meijer-G como en Eq. (2) y, a continuación, usamos [13, eqn. (2.24.1.2)]. La expresión de la capacidad ergódica correspondiente al protocolo cooperativo BDF puede ser vista en Eq. (10) al comienzo de la siguiente página. El parámetro F en Eq. (8) es un factor de corrección obtenido a partir de la desigualdad entre la MA y la MG . Este factor de corrección se obtiene en términos estadísticos cuando la desigualdad se convierte en igualdad. Para que esto ocurra es necesario añadir un factor de corrección y forzar que el promedio de I_T y el promedio de $\sqrt{F8I_T^{CI}}$ sean iguales y, de esta manera poder obtener una mayor precisión en el análisis de la capacidad ergódica. Por tanto, el factor de corrección F es expresado como $F = \mathbb{E}[I_T]^2 / 8 \cdot \mathbb{E}[\sqrt{I_T^{CI}}]^2$. En el proceso de obtención del parámetro F , primero se obtiene la esperanza de I_T como $\mathbb{E}[I_T] = \mathbb{E}[I_{SD}] + 2\mathbb{E}[I_{RD}]$ ya que las variables aleatorias I_{SD} e I_{RD} son estadísticamente independientes. La esperanza de una variable aleatoria I_m genérica puede ser calculada con la ayuda de [13, eqn. (2.24.2.1)] y, por tanto, $\mathbb{E}[I_m]$ es expresada como $\mathbb{E}[I_m] = A_m L_m \varphi_m^2 / (1 + \varphi_m^2)$. Seguidamente, se obtiene la esperanza de la raíz cuadrada positiva de I_T^{CI} con la ayuda de [13, eqn. (2.24.2.1)]. Los resultados de las

expresiones de $\mathbb{E}[I_T]$ y $\mathbb{E}[\sqrt{I_T^{CI}}]$ han sido omitidos, mostrando únicamente la expresión final del factor de corrección F como

$$F = \left(\frac{A_{SD}L_{SD}\varphi_{SD}^2}{1 + \varphi_{SD}^2} + \frac{2A_{RD}L_{RD}\varphi_{RD}^2}{1 + \varphi_{RD}^2} \right)^2 \times \frac{\alpha_{SD}\beta_{SD}(1 + 2\varphi_{SD}^2)^2 \Gamma(\alpha_{SD})^2 \Gamma(\beta_{SD})^2}{128A_{SD}L_{SD}\varphi_{SD}^4 \Gamma(\alpha_{SD} + 1/2)^2 \Gamma(\beta_{SD} + 1/2)^2} \times \frac{\alpha_{RD}\beta_{RD}(1 + 2\varphi_{RD}^2)^2 \Gamma(\alpha_{RD})^2 \Gamma(\beta_{RD})^2}{A_{RD}L_{RD}\varphi_{RD}^4 \Gamma(\alpha_{RD} + 1/2)^2 \Gamma(\beta_{RD} + 1/2)^2}. \quad (11)$$

Similar a Eq. (4), se puede obtener la capacidad ergódica asintótica para el protocolo de cooperación BDF, C_{BDF}^H , como

$$C_{BDF}^H \doteq \frac{B \ln(4\gamma_0 \xi F)}{\ln(4)} + \frac{B}{\ln(4)} \left(-\frac{1}{\varphi_{SD}^2} - \frac{1}{\varphi_{RD}^2} \right) + \frac{B}{\ln(4)} (\psi(\alpha_{SD}) + \psi(\beta_{SD}) + \psi(\alpha_{RD}) + \psi(\beta_{RD})) - \frac{B}{\ln(4)} \left(\ln \left(\frac{\alpha_{SD}\beta_{SD}\alpha_{RD}\beta_{RD}}{A_{SD}L_{SD}A_{RD}L_{RD}} \right) \right). \quad (12)$$

Este análisis es extendido para obtener un punto donde la capacidad ergódica asintótica corta al eje γ_0 . Este punto puede ser interpretado como una SNR umbral, i.e. γ_{BDF}^{th} , a partir del cual la capacidad ergódica comienza a incrementar de forma significativa. Por tanto, γ_{BDF}^{th} está dado por

$$\gamma_{BDF}^{th}[dB] = \frac{10}{\ln(10)} \left(\frac{1}{\varphi_{SD}^2} - \psi(\alpha_{SD}) - \psi(\beta_{SD}) \right) + \frac{10}{\ln(10)} \left(\frac{1}{\varphi_{RD}^2} - \psi(\alpha_{RD}) - \psi(\beta_{RD}) \right) + \frac{10}{\ln(10)} \left(\ln \left(\frac{\alpha_{SD}\beta_{SD}\alpha_{RD}\beta_{RD}}{F4A_{SD}L_{SD}A_{RD}L_{RD}} \right) \right). \quad (13)$$

Similar a Eq. (13), se puede obtener la SNR umbral para una transmisión directa, γ_{TD}^{th} , como

$$\gamma_{TD}^{th}[dB] = -\frac{20}{\ln(10)} \left(\ln(2\sqrt{\xi}) - \ln \left(\frac{\alpha_{SD}\beta_{SD}}{A_{SD}L_{SD}} \right) \right) - \frac{20}{\ln(10)} \left(\psi(\alpha_{SD}) + \psi(\beta_{SD}) - \frac{1}{\varphi_{SD}^2} \right). \quad (14)$$

Finalmente, puede ser deducido del análisis asintótico a alta SNR de la capacidad ergódica que tanto la Eq. (5) como la Eq. (12) presentan la misma pendiente pero diferente desplazamiento lateral. Este desplazamiento puede ser interpretado como una mejora en términos de SNR para conseguir la misma capacidad con menor SNR. A partir de las Eqs. (13) y (14) se puede obtener esta mejora o ganancia, i.e. $G[dB]$, como $G[dB] = \gamma_{TD}^{th}[dB] - \gamma_{BDF}^{th}[dB]$.

Teniendo en cuenta el análisis realizado en este trabajo, se puede deducir fácilmente que el principal aspecto a considerar para optimizar la capacidad ergódica en un SCONG cooperativo es la ubicación del nodo retransmisor. En este sentido,

$$f_{I_T^{C_I}}(i) = \frac{\varphi_{SD}^2 \varphi_{RD}^2 i^{-1}}{\Gamma(\alpha_{SD})\Gamma(\beta_{SD})\Gamma(\alpha_{RD})\Gamma(\beta_{RD})} G_{2,6}^{6,0} \left(\frac{\alpha_{SD}\beta_{SD}\alpha_{RD}\beta_{RD}}{A_{SD}L_{SD}A_{RD}L_{RD}} i \mid \begin{matrix} \varphi_{SD}^2 + 1, \varphi_{RD}^2 + 1 \\ \varphi_{SD}^2, \alpha_{SD}, \beta_{SD}, \varphi_{RD}^2, \alpha_{RD}, \beta_{RD} \end{matrix} \right). \quad (9)$$

$$C_{\text{BDF}} \simeq \frac{B \ln(4)^{-1} \varphi_{SD}^2 \varphi_{RD}^2}{\Gamma(\alpha_{SD})\Gamma(\beta_{SD})\Gamma(\alpha_{RD})\Gamma(\beta_{RD})} G_{4,8}^{8,1} \left(\frac{\alpha_{SD}\beta_{SD}\alpha_{RD}\beta_{RD}}{\gamma_0 \xi 4 F A_{SD} L_{SD} A_{RD} L_{RD}} \mid \begin{matrix} 0, 1, \varphi_{SD}^2 + 1, \varphi_{RD}^2 + 1 \\ \varphi_{SD}^2, \alpha_{SD}, \beta_{SD}, \varphi_{RD}^2, \alpha_{RD}, \beta_{RD}, 0, 0 \end{matrix} \right). \quad (10)$$

los resultados correspondientes a este estudio de la capacidad se han mostrado en Fig. 2(a) para diferentes ubicaciones del nodo retransmisor, considerando una distancia fuente-destino de $d_{SD} = 3$ km y forma de pulso rectangular $\xi = 1$. Además, se ha adoptado un valor de $\lambda = 1550$ nm junto con un valor de $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ asumiendo una visibilidad de 16 km. Por otro lado, ha sido considerado un valor de ancho de haz normalizado de $\omega_z/r = 5$ y valores de jitter normalizado de $\sigma_s/r = \{1, 3\}$ para cada enlace. La ganancia, $G[\text{dB}]$, es mostrada en Fig. 2(b) como una función del desplazamiento horizontal del nodo retransmisor para diferentes valores de y_R . Dicha ganancia presenta un máximo en $x_R = d_{SD}$, el cual está relacionado con la mínima distancia retransmisor-destino. En primer lugar, podemos concluir que la capacidad ergódica se ha visto notablemente incrementada con respecto a una transmisión directa cuando el protocolo de cooperación BDF es implementado, mostrando una gran robustez tanto a la ubicación del nodo retransmisor como al desalineamiento entre transmisor y receptor. En segundo lugar, puede ser observado que la capacidad ergódica se ve seriamente degradada por la presencia del desalineamiento. Por último, las simulaciones de Monte Carlo son incluidas como referencia (Eq. (2) para transmisión directa y Eq. (6) para BDF), confirmando la fidelidad de los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] F. Benkhelifa, Z. Rezki, and M. Alouini, "Low SNR capacity of FSO links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels," *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, no. 6, pp. 1264–1267, June 2013.
- [4] I. Ansari, F. Yilmaz, and M. Alouini, "A unified performance of free-space optical links over gamma-gamma turbulence channels with pointing errors," *submitted to IEEE Transactions on Communications, technical report available at <http://hdl.handle.net/10754/305353>*, 2015.
- [5] K. P. Peppas, A. N. Stassinakis, H. E. Nistazakis, and G. S. Tombras, "Capacity analysis of dual amplify-and-forward relayed free-space optical communication systems over turbulence channels with pointing errors," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 9, pp. 1032–1042, 2013.
- [6] S. Anees and M. R. Bhatnagar, "On the capacity of decode-and-forward dual-hop free space optical communication systems," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*. IEEE, 2014, pp. 18–23.

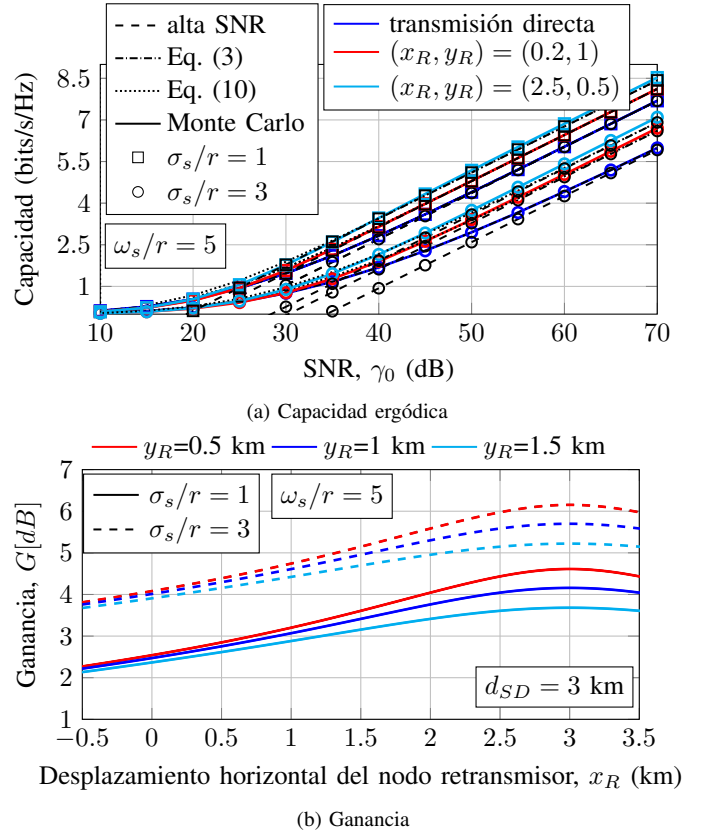


Fig. 2. (a) Capacidad ergódica C_{BDF} , y (b) ganancia $G[\text{dB}]$.

- [7] A. García-Zambrana, C. Castillo-Vázquez, and B. Castillo-Vázquez, "Outage performance of MIMO FSO links over strong turbulence and misalignment fading channels," *Opt. Express*, vol. 19, no. 14, pp. 13480–13496, Jul 2011.
- [8] I. I. Kim, B. McArthur, and E. J. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," in *Information Technologies 2000*. International Society for Optics and Photonics, 2001, pp. 26–37.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series and products*, 7th ed. Academic Press Inc., 2007.
- [12] 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.
- [13] A. P. Prudnikov, Y. A. Brychkov, and O. I. Marichev, *Integrals and series Volume 3: More Special Functions*. Gordon and Breach Science Publishers, 1999, vol. 3.
- [14] J. Galambos and I. Simonelli, *Products of Random Variables: Applications to Problems of Physics and to Arithmetical Functions*. CRC Press, 2004.