Optimización de sistemas ópticos de difusión multipunto mediante receptores de canal único

Optimization of spot-diffusing wireless optical systems by single-channel receivers

M. Castillo-Vazquez^(*), A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, A. Puerta-Notario

Dpto. Ingeniería de Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071 Málaga, Spain.

^(*) Email: miguelc@ic.uma.es

Recibido / Received: 13/09/2011. Revisado / Revised: 01/12/2011. Aceptado / Accepted: 09/12/2011.

RESUMEN:

En este artículo, presentamos criterios de diseño que optimizan las prestaciones de sistemas ópticos de difusión multipunto mediante receptores de canal único. En concreto, proponemos diversas pautas para escoger conjuntamente los parámetros de transmisores multispot y de dos receptores de canal único propuestos por los autores. Mediante simulaciones numéricas, aplicamos los criterios propuestos a dos sistemas de difusión multipunto que operan en un recinto con iluminación natural, obteniendo excelentes resultados en términos de eficiencia de potencia y ancho de banda.

Palabras clave: Receptores Ópticos, Difusión, Infrarrojo, Diversidad Angular, Canal Único, Multihaz, Simulación, Comunicaciones Ópticas no Guiadas.

ABSTRACT:

In this paper, we present design criteria optimizing the performance of spot-diffusing wireless optical systems by single-channel receivers. In particular, we propose different rules to jointly choose multispot transmitter and single-channel receivers parameters. By numerical simulations, we apply the proposed criteria to two systems operating in a room with natural light, obtaining excellent results in terms of power efficiency and channel bandwidth.

Key words: Optical Receivers, Spot, Diffuse, Infrared, Angle-Diversity, Single-Channel, Multibeam, Simulation, Wireless, Optical Communications.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. F. R. Gfeller, U. Bapst, "Wireless in-house data communications via diffuse infrared radiation", *P. IEEE* **67**, 1474–1486 (1979).
- [2]. J. M. Kahn, J. R. Barry, "Wireless infrared communications", *P. IEEE* **85**, 265–298 (1997).
- [3]. J. B. Carruthers, J. M. Kahn, "Angle diversity for nondirected wireless infrared communications", *IEEE T. Commun.* **48**, 960–969 (2000).
- [4]. S. T. Jivkova, M. Kavehrad, "Multispot diffusing configuration for wireless infrared access", *IEEE T. Commun.* **48**, 970–978 (2000).
- [5]. P. Djahani, J. M. Kahn, "Analysis of infrared wireless links employing multibeam transmitters and imaging diversity receivers", *IEEE T. Commun.* **48**, 2077–2088 (2000).
- [6]. S. Jivkova, M. Kavehrad, "Receiver designs and channel characterization for multi-spot high-bit-rate wireless infrared communications", *IEEE T. Commun.* **49**, 2145–2153 (2001).
- [7]. K. Akhavan, M. Kavehrad, S. Jivkova, "High-speed power-efficient indoor wireless infrared communication using code combining-Part I", *IEEE T. Commun.* **50**, 1098–1109 (2002).

- [8]. F. Delgado, R. Perez-Jimenez, J. Rabadan, M. A. Bacallado, F. J. Lopez-Hernandez, "Experimental characterization of a low-cost fast frequency-hopping spread-spectrum system for wireless in-house optical communications", *IEEE T. Consum. Electr.* **48**, 10–16 (2002).
- [9]. M. Castillo-Vazquez and A. Puerta-Notario, "Self-orienting receiver for indoor wireless infrared links at high bit rates", *IEEE Vehicular Technology Conference* **3**, 1600–1604 (2003).
- [10]. V. Jungnickel, A. Forck, T. Haustein, U. Kruger, V. Pohl, C. von Helmolt, "Electronic tracking for wireless infrared communications", *IEEE T. Wirel. Commun.* **2**, 989–999 (2003).
- [11]. S. Jivkova, B. A. Hristov, M. Kavehrad, "Power-efficient multispot-diffuse multiple-input-multiple-output approach to broad-band optical wireless communications", *IEEE T. Veh. Technol.* **53**, 882–889 (2004).
- [12]. A. G. Al-Ghamdi, J. M. H. Elmirghani, "Analysis of diffuse optical wireless channels employing spotdiffusing techniques, diversity receivers, and combining schemes", *IEEE T. Commun.* **52**, 1622–1631 (2004).
- [13]. S. T. Jivkova, M. Kavehrad, "Transceiver design concept for cellular and multispot diffusing regimes of transmission", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* **1**, 30–38 (2005).
- [14]. M. Castillo-Vázquez, A. Puerta-Notario, "Single-channel imaging receiver for optical wireless communications", *IEEE Commun. Lett.* **9**, 897–899 (2005).
- [15]. O. Gonzalez, R. Perez-Jimenez, S. Rodriguez, J. Rabadan, A. Ayala, "OFDM over indoor wireless Optical channel", *IET Optoelectron.* **152**, 199–204 (2005).
- [16]. M. Castillo-Vázquez, A. Puerta-Notario, "Análisis comparativo de receptores monocanal y multicanal en enlaces ópticos con diversidad angular", libro de actas, XXI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, 10360–1039 (2006).
- [17]. B. R. Mendoza, S. Rodriguez, R. Perez-Jimenez, O. Gonzalez, E. Poves, "Considerations on the design of sectorized receivers for wireless optical channels using a Monte-Carlo-based ray-tracing algorithm", *IET Optoelectron.* **1**, 226–232 (2007).
- [18]. M. Castillo-Vázquez, *Receptores con Diversidad Angular para Sistemas de Comunicaciones Ópticas no Guiadas*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga, Málaga, Spain (2008).
- [19]. F. E. Alsaadi, J. M. H. Elmirghani, "High-speed spot diffusing mobile optical wireless system employing beam angle and power adaptation and imaging receivers", *J. Lightwave Technol.* **28**, 2191–2206 (2010).
- [20]. K. Wang, A. Nirmalathas, C. Lim, E. Skafidas, "12.5 Gbps indoor optical wireless communication system with single channel imaging receiver", OSA European Conference and Exhibition on Optical Communication (2011).

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la aspiración por lograr enlaces inalámbricos de alta velocidad ha venido impulsando el desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas de interior [1–20]. En estos sistemas, el diseño de transmisores y receptores está fuertemente condicionado por las hostiles condiciones que impone el canal, que se caracterizan por unas enormes pérdidas de propagación, un elevado nivel de ruido ambiental y una dañina distorsión por multitrayecto [2]. En este contexto, diferentes autores han investigado estructuras que tratan de mitigar estos inconvenientes [3–19]. Así, hasta la fecha, la configuración que ha dado lugar a mayor número de publicaciones se basa en el uso combinado de transmisores

multispot (Tx-MS) y receptores con diversidad angular (Rx-DA). En esta configuración, los Tx-MS proyectan sobre una gran superficie, como puede ser el techo de una sala, un gran número de haces de extremada directividad, creando, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 1(a), una malla de pequeñas regiones circulares denominadas spots. Las señales procedentes de dichos spots son recogidas, posteriormente, por los múltiples elementos que forman los Rx-DA creándose, de este modo, un sistema de difusión multipunto.

Hasta la fecha, se ha publicado una gran variedad de estructuras de Rx-DA [3–10,14], de entre las que destacan por sus buenos resultados las estructuras conocidas como receptores de canal único (Rx-CU). Estos receptores, a

diferencia de los Rx-DA convencionales, están constituidos por un único cabezal óptico que está dotado de capacidad de orientación propia. Con esta novedosa capacidad y un algoritmo de búsqueda de máximos, los Rx-CU pueden apuntar automáticamente hacia la zona de la sala óptima en términos de iluminación, lo que les permite reducir espectacularmente los tres factores limitadores mencionados con anterioridad, es decir, las pérdidas del canal, el ruido ambiental y la distorsión multitrayecto [9,14].

Existen dos alternativas para construir Rx-CU. En la Fig. 1(b) se muestra la primera alternativa, denominada receptor de canal único convencional (Rx-CUC) [9]. Como se puede observar, en este receptor el apuntamiento se consigue mediante el movimiento angular en acimut φ_r y elevación θ_r de su cabezal óptico. Para obtener este movimiento, el receptor emplea un sistema electro-mecánico de apuntamiento diseñado específicamente con esta finalidad. En la segunda alternativa, que se ha representado en la Fig. 1 (c) y que se conoce como receptor de canal único formador de imagen (Rx-CUF) [14], el apuntamiento se logra mediante el movimiento de un fotodetector a lo largo de los ejes ortogonales que definen el plano de imagen de un sistema de lentes de gran apertura. Este segundo esquema también requiere del uso de un mecanismo de posicionamiento para poder desplazar el fotodetector a cualquier posición (x_{det}, y_{det}) dentro del plano de imagen del receptor. Los parámetros de diseño de los Tx-MS y de los Rx-CU que se acaba de describir tienen una enorme influencia sobre la relación señalruido (SNR) y el ancho de banda (BW) de los sistemas ópticos en los que operan.

En este artículo, investigamos esta influencia y proponemos diferentes criterios de diseño que sirven para escoger de forma conjunta los parámetros de los Tx-MS y Rx-CU que optimizan el funcionamiento de los sistemas de difusión multipunto. Mediante simulaciones numéricas, analizamos la aplicación de dichos criterios a dos sistemas que operan en una sala con iluminación natural, obteniendo excelentes resultados en términos de eficiencia de potencia y BW. El análisis de estos resultados permite, además,

comparar las prestaciones de los dos Rx-CU examinados.

Fig. 1. (a) Transmisor multispot. (b) Receptor de canal único convencional. (c) Receptor de canal único formador de imagen. (d) Campos de visión de los receptores.

2. Optimización de sistemas de difusión multipunto

En esta sección se describen los criterios a seguir para diseñar los Rx-CU y Tx-MS que maximizan los principales indicadores de calidad de los sistemas ópticos de interior: la SNR y el BW del canal.

2.1. Parámetros de los receptores de canal único

Los principales parámetros de los receptores de canal único son dos: el campo de visión (FOV) parcial, que viene definido por el diseño del cabezal óptico y el FOV_{total} , que depende de la libertad de movimientos del sistema de apuntamiento electro-mecánico. Ambos campos de visión se han representado esquemáticamente en la Fig. 1(d).

En los dos Rx-CU el FOV parcial óptimo será aquel que permita rechazar la mayor cantidad de luz ambiental, maximizando, al tiempo, la potencia de señal recibida. En el caso del Rx-CUC, este FOV se puede obtener geoméricamente a partir de la separación entre el receptor y el techo, h , y del diámetro de los spots, D_{spot} , como:

$$\text{FOV} = \tan^{-1} \left(\frac{D_{\text{spot}}}{2h} \right). \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que los recintos de oficina suelen tener alturas inferiores a 3 m y que los receptores suelen estar situados en mesas a alturas de 80 cm, se puede asumir que el valor de h es de aproximadamente 2 m. Además, si como se verá más adelante suponemos que el diámetro de los spots es de 10 cm, entonces mediante la Ec. (1) se obtiene un FOV parcial de aproximadamente 1.5°. Para obtener dicho FOV, hay que dimensionar adecuadamente el conjunto lente-fotodetector del receptor. Así, el diámetro del fotodetector se calcula con la siguiente expresión:

$$D_{\text{det}} = 2D f/\# \tan(\text{FOV}), \quad (2)$$

donde $f/\#$ es el número- f de la lente y D su diámetro. Para escoger los valores de D y $f/\#$ hay que tener en cuenta varios factores. En primer lugar, D debe ser lo suficientemente grande como para captar un nivel apropiado de potencia de señal y, al mismo tiempo, lo suficientemente pequeño como para no comprometer el volumen del cabezal. En este sentido, un diámetro comprendido entre 1 cm y 2 cm se considera adecuado para cumplir ambos objetivos. Por otro lado, la lente empleada debe ser lo bastante simple como para no encarecer el coste del cabezal, por ello su número- f no podrá ser demasiado pequeño. Teniendo en cuenta estos criterios, se puede asumir para el Rx-CUC una lente positiva de $f/2$ y $D=2$ cm, lo que junto con la Ec. (2) da lugar a un diámetro para el fotodetector de aproximadamente 2 mm.

Por otra parte, a diferencia del Rx-CUC que se acaba de explicar, en el caso del Rx-CUF el cabezal óptico está constituido por varias lentes que actúan como un sistema formador de imágenes, creando sobre el plano de imagen del receptor una copia reducida e invertida de la región del techo dentro del FOV_{total}. Por ello, en el Rx-CUF el tamaño óptimo de fotodetector será aquel que coincida con el tamaño de las imágenes de los spots proyectados. Dicho tamaño se puede obtener a partir de la ganancia lateral del sistema M_T como:

$$D_{\text{det}} = |M_T| D_{\text{spot}}, \quad (3)$$

donde $|M_T| = d_{\text{img}}/h$. Aquí d_{img} es la distancia comprendida entre el sistema de lentes y el

plano de imagen que, para las separaciones habituales, es aproximadamente la distancia focal. En cuanto al diseño de este sistema de lentes, se va a trabajar con uno muy similar al empleado por Djahani y Jivkova en [5] y [11], respectivamente, con un diámetro de unos 3 cm y un $f/\#$ próximo a la unidad. En estas condiciones y empleando la Ec. (3), se obtiene un diámetro del fotodetector $D_{\text{det}}=1.52$ mm. La posición y el tamaño de este fotodetector en el plano de imagen del receptor produce un cono de aceptación de sección elíptica cuyo valor máximo viene dado por:

$$\text{FOV} \approx \frac{D_{\text{det}}}{2 \sqrt{d_{\text{img}}^2 + x_{\text{det}}^2 + y_{\text{det}}^2}}, \quad (4)$$

donde $(x_{\text{det}}, y_{\text{det}})$ representan las coordenadas de posición del fotodetector, como se indica en la Fig. 1(c).

Por otro lado, tal como se adelantó al inicio del apartado, el FOV_{total} de los Rx-CU viene impuesto por el movimiento del sistema de apuntamiento. Así, en el Rx-CUC, el FOV_{total} lo fija la elevación mínima del cabezal, mientras que en el Rx-CUF, lo fija la distancia de separación máxima entre el fotodetector y el eje de simetría del sistema de lentes. Para el Rx-CUC el valor del FOV_{total} se ha limitado a 45°, de forma que se eviten en la medida de lo posible los bloqueos del haz escogido. Por otro lado, para el Rx-CUF, el FOV_{total} se ha elegido de 30°, algo menor que en el receptor anterior. Existen dos razones que justifican esta elección. La primera es la dificultad para obtener filtros ópticos de gran FOV, ya que la respuesta de éstos se degrada al aumentar el campo de visión [2]. La segunda razón viene impuesta por las aberraciones provocadas por sistema de lentes, que son más acusadas para grandes ángulos de aceptación. El diámetro del plano de imagen del Rx-CUF para obtener el FOV_{total} de 30° debe ser de aproximadamente 35 mm. Con este tamaño de plano de imagen, el ángulo de aceptación máximo del Rx-CUF variará, de acuerdo con la Ec. (4), desde 1.42°, para $(x_{\text{det}}, y_{\text{det}}) = (0,0)$ mm, con el fotodetector en el centro del plano de imagen, hasta aproximadamente 1.23°, para $(x_{\text{det}}, y_{\text{det}}) = (0,17.5)$ mm, con el fotodetector situado en el límite del plano.

Por último, en lo que respecta a la realizabilidad práctica de la mecánica de orientación de ambos receptores, hay que indicar que en la actualidad es posible encontrar en el mercado de la electrónica posicionadores de variación continua [20] y, por tanto, sin límite práctico de resolución, que permiten precisiones de apuntamiento muy superiores a las requeridas por los receptores descritos.

2.2. Parámetros de los transmisores multispot

De entre las diversas geometrías propuestas en la bibliografía de patrones multispot [4,12,13], sin duda, la que resulta más adecuada para operar junto con los Rx-CU es la de patrón uniforme. Un esquema de patrón con esta geometría se muestra en la Fig. 2. Como se puede apreciar, en este Tx-MS los parámetros a determinar son tres: el diámetro de los spots, D_{spot} , su separación, ΔD , y el número total de spots, M .

En lo que respecta al primero de los parámetros, el tamaño de los spots, en principio, interesa trabajar con diámetros lo más pequeños posibles, ya que al reducir el tamaño se mejora tanto la SNR como el BW del sistema óptico. En concreto, nuestros estudios indican que cada vez que se divide por dos el diámetro de los spots, el BW aproximadamente se dobla y la SNR aumenta cerca de 6 dB [18]. Sin embargo, esta mejora de BW y de SNR se obtiene a costa de empeorar la seguridad ocular y de complicar el proceso de búsqueda del algoritmo de apuntamiento del receptor que, de hecho, necesita aproximadamente cinco veces más tiempo para encontrar el spot óptimo [18]. Por tanto, habrá que alcanzar una solución de compromiso. En este sentido, tras realizar diferentes simulaciones con diámetros de spots comprendidos entre 5 y 25 cm, se ha optado por fijar para los transmisores un tamaño de spot de 10 cm, que permite obtener BW superiores a 1 GHz, con tiempos de búsqueda razonables.

Por otra parte, en lo que respecta a la elección de la separación ΔD , el principal criterio a seguir consiste en garantizar la robustez del sistema frente a bloqueos. Esta robustez se consigue siempre que existan al menos dos spots

dentro del FOV_{total} de los receptores. Esta condición se cumple siempre que:

$$\Delta D \leq h \tan(FOV_{total}) - \frac{D_{spot}}{2}, \quad (5)$$

como se puede observar a partir de la geometría de la Fig. 2. De acuerdo con esta expresión, en el caso del Rx-CUC con un FOV_{total} de 45° , la máxima separación entre spots es de 1.95m, mientras que en el Rx-CUF con un FOV_{total} de 30° , ΔD es de aproximadamente 1.1 m. Finalmente, conocida la separación ΔD y el tamaño del recinto de trabajo, el número total de spots del Tx-MS se obtiene con la siguiente expresión:

$$M = ([X/\Delta D] + 1)([Y/\Delta D] + 1), \quad (6)$$

donde $[]$ representa la función parte entera y X e Y son las dimensiones de la superficie de la sala.

Fig. 2. Proyección sobre el techo del patrón de radiación de un transmisor multispot convencional de 36 haces.

3. Análisis de sistemas

Con el fin de analizar el resultado de aplicar los criterios de diseño descritos en la sesión anterior en los parámetros SNR y BW de los sistemas de difusión multipunto, se han simulado dos sistemas que operan en una sala cuadrada de $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ de planta, en la que un gran ventanal ocupa completamente una de sus paredes. Este ventanal es la fuente de luz natural de la sala. El primer sistema está formado por un Tx-MS de 16 haces y un Rx-CUC y el segundo lo

forman un Tx-MS de 36 haces y un Rx-CUF. En ambos transmisores el valor de la separación ΔD y el número de haces M se ha obtenido a partir de la Ecs. (5) y (6) para un tamaño de spot $D_{spot}=10$ cm.

En total, se han simulado 10^3 enlaces para cada uno de estos sistemas. En estas simulaciones, los transmisores multispot se han mantenido fijos en el centro del recinto a una altura de 1 m, mientras que los receptores se han ido cambiando de posición (x_r, y_r) a lo largo de la sala, de forma aleatoria, pero manteniendo una distancia del techo $h=2$ m. A efectos de cálculo, el origen de coordenadas se ha fijado en una de las esquinas de la sala, tal como se muestra en la Fig. 2.

En los cálculos de SNR, se ha asumido que el ruido shot causado por la luz ambiental es el ruido dominante en los receptores. Dado que los Rx-CU son capaces de rechazar completamente la luz procedente de fuentes de artificiales [9,14], en las simulaciones sólo se ha considerado el efecto de la luz natural. Para ello, se ha modelando cada superficie elemental del techo, ds , como un emisor secundario de luz con patrón Lambertiano de primer orden. La excitancia, $S_n(x, y)$, de cada una de estas superficies se ha supuesto que varía linealmente desde $0.03 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ para $x = 0$ m (ventana), hasta $0.01 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ en $x = 6$ m (extremo opuesto de la sala) [5]. En estas condiciones, la potencia de luz ambiental detectada por el Rx-CUC se obtiene a partir de la geometría de la Fig. 3(a), calculando la integral:

$$P_{n,CUC} = \int_{(x,y) \in R_{FOV}} \frac{AhS_n(x,y)B_0 \cos(\psi)}{\pi d^3(x,y)} ds, \quad (7)$$

donde R_{FOV} denota la región del techo dentro del FOV del receptor, d es la distancia de separación entre el receptor y cada superficie elemental ds , A es el área de apertura de la lente, ψ es el ángulo de recepción medido respecto a la normal del cabezal y B_0 en la anchura del filtro óptico del cabezal, que se ha tomado igual a 50 nm. De forma análoga, la potencia de luz ambiental captada por el Rx-CUF se obtiene, a partir de la geometría de la Fig. 3(b) resolviendo en este caso la expresión:

$$P_{n,CUF} = \int_{(x,y) \in R_{FOV}} \frac{Ah^2S_n(x,y)B_0}{\pi d^4(x,y)} ds, \quad (8)$$

donde todos los parámetros son los mismos que los descritos para la Ec. (7), pero particularizados para el Rx-CUF. El valor de B_0 también se ha tomado de 50 nm en este receptor. A partir de los valores de P_n obtenidos de las Ecs. (7) y (8), la varianza de ruido shot en cada receptor se calcula como:

$$\sigma^2 = 2qrB_nP_n, \quad (9)$$

donde q representa la carga del electrón, $r=0.6$ es la respuesta del fotodetector y $B_n=500$ MHz es el ancho de banda equivalente de ruido del receptor.

Fig. 3. (a) Geometría empleada en los cálculos de SNR de enlaces basados en el Rx-CUC, (b) Geometría empleada en los cálculos de SNR de enlaces basados en el Rx-CUF.

Una vez obtenido el nivel de ruido, la SNR eléctrica se calcula como:

$$SNR = \frac{(P_{tx} r H(0))^2}{\sigma^2}, \quad (10)$$

donde P_{tx} es la potencia del transmisor y $H(0)$ representa la ganancia en continua del canal [2]. Para obtener $H(0)$ se ha considerado que el techo se comporta como un reflector difuso de primer orden. Es importante resaltar que esta consideración es sólo válida para ángulos de incidencia menores de 65° , ya que para ángulos mayores, especialmente por encima de 70° , las reflexiones muestran una componente especular muy acusada [1]. Esta condición limita el tamaño máximo de las salas iluminadas por un único Tx-MS. Así, para una distancia de separación entre el Tx-MS y el techo de $h_t=2$ m, la máxima diagonal de la sala es de $2h_t \tan(65^\circ)=8.6$ m [6]. Por tanto, la sala escogida de $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ de planta cumple con esta condición. Asimismo, debido a la extremada directividad de los haces de los Tx-MS y a los reducidos FOV de ambos Rx-CU, para calcular $H(0)$ se ha considerado únicamente la primera reflexión [7]. Así, los valores de $H(0)$ para los receptores Rx-CUC y Rx-CUF vienen dados por las Ecs. (11) y (12), respectivamente, ambas obtenidas a partir de la geometría de la Fig. 3:

$$H(0)_{CUC} = \int_{(x,y) \in R_{spot}} \frac{4\rho h A \cos(\psi)}{\pi^2 M D_{spot}^2 d^3(x,y)} ds, \quad (11)$$

$$H(0)_{CUF} = \int_{(x,y) \in R_{spot}} \frac{4\rho h^2 A}{\pi M D_{spot}^2 d^4(x,y)} ds. \quad (12)$$

En ambos casos, R_{spot} denota la región del techo ocupada por el spot al que apunta el receptor (spot seleccionado) y $\rho=0.7$ es el coeficiente de reflexión del techo. Finalmente, para obtener el BW de los dos sistemas multipunto, se ha calculado en primer lugar la respuesta al impulso $h(t)$ de cada enlace siguiendo el procedimiento descrito en [18]. Posteriormente, se ha obtenido la respuesta en frecuencia $H(f)$ y a partir de ésta el BW de 3 dB.

Con los cálculos realizados en las 10^3 posiciones del receptor en el interior de la sala, se ha estimado la función de distribución acumulativa complementaria de la SNR y el BW

de cada sistema multispot. Dichas funciones se han usado generar los resultados finales que aparecen representados en la Fig. 4 y en la Fig. 5.

La Fig. 4 muestra los primeros resultados obtenidos en las simulaciones. En concreto, en esta primera figura se muestra la potencia requerida por los Tx-MS para obtener una $SNR > 15.6$ dB, en función del porcentaje de ubicaciones del receptor. Téngase en cuenta que, asumiendo transmisión OOK equiprobable y depreciando el efecto del multitrayecto esta SNR equivale a una $BER < 10^{-9}$ [2].

A partir de la observación de Fig. 4, podemos extraer los siguientes comentarios. En primer lugar, se puede apreciar que las potencias requeridas por ambos sistemas ópticos son bastante bajas. Así, para el 95% de las ubicaciones, el transmisor del sistema basado en el Rx-CUC sólo necesita transmitir 17.5 dBm, mientras que el transmisor del sistema basado en Rx-CUF necesita una potencia de 17.8 dBm. Es decir, en términos de eficiencia de potencia, la configuración que emplea el Rx-CUC es ligeramente mejor que la basada en el Rx-CUF. Esto es debido a que, al trabajar con menos haces, se aprovecha mejor la potencia disponible. No obstante, para poner en contexto estos resultados, es importante resaltar que en otros sistemas multispot basados en Rx-DA publicados en la bibliografía se requieren potencias superiores a 20 dBm en condiciones similares de ruido [5,14]. Nótese que pese a que el sistema basado en el Rx-CUC es más eficiente en términos de potencia, el sistema con el Rx-CUF puede trabajar con haces de potencias más reducidas (1.67 mW frente a 3.5 mW) lo que es más interesante en términos de diseño pues presenta menos problemas de seguridad ocular, lo que es un aspecto crítico de estos sistemas.

Por otro lado, en la Fig. 5 se han representado los resultados de BW superados correspondientes a los dos sistemas analizados. Como se puede observar, los valores de BW obtenidos para ambos sistemas son enormes. Así, por ejemplo, para el 95% de las ubicaciones, el sistema óptico basado en el Rx-CUF alcanza un BW de 1.3 GHz, mientras que en el basado en el Rx-CUC, el BW es de 1.1 GHz. Es decir, a partir de la Fig. 5 se desprende que los Rx-CUF son

Fig. 4. Potencia transmitida necesaria para obtener una $BER < 10^{-9}$ con transmisión OOK equiprobable, para distintos porcentajes de ubicaciones del receptor.

Fig. 5. Ancho de banda eléctrico excedido para distintos porcentajes de ubicaciones del receptor.

superiores a los Rx-CUC en términos de BW. Este resultado era esperable, pues al operar con más haces, los Rx-CUF disponen de spots más cercanos que proporcionan mayores BW.

Hay que destacar que estos resultados de BW son muy superiores a los obtenidos por otros Rx-DA publicados en la bibliografía que, en los mejores casos, empleando combinación MRC apenas alcanzan los 200 MHz [14,16].

Por último, es importante resaltar que los resultados mostrados en la Fig. 4 y Fig. 5 deben interpretarse como resultados potenciales obtenidos en ausencia de errores de apuntamiento entre los receptores y los spots escogidos. En la práctica, la existencia de dichos errores daría lugar a un incremento de la potencia transmitida necesaria para mantener la SNR fijada, y a un aumento del ancho de banda del canal. No obstante, dado que la SNR es un parámetro crítico en estos sistemas, los algoritmos de búsqueda de los receptores deberán diseñarse para minimizar este problema.

4. Conclusiones

En este artículo se han propuesto diferentes criterios de diseño para escoger los parámetros de los Tx-MS y de los Rx-CU que optimizan las prestaciones de sistemas de difusión multipunto en términos de SNR y BW. Mediante simulaciones numéricas se han aplicado los criterios propuestos a dos sistemas de difusión multipunto en un recinto con iluminación natural, obteniendo excelentes resultados en términos de eficiencia de potencia y ancho de banda. Además, del análisis de estos resultados se desprende que los Rx-CUC son ligeramente mejores en términos de SNR, mientras que los Rx-CUF obtienen mayores BW.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto TEC2008-06598.