

SISTEMA OCDMA PARA COMUNICACIONES EN EL ESPECTRO VISIBLE BASADO EN CÓDIGOS ÓPTICOS ALEATORIOS

Borja Rojas Guillama⁽¹⁾, Marcos F. Guerra Medina⁽¹⁾, Oswaldo González⁽¹⁾,
Jesús A. Martín González⁽²⁾, Francisco Delgado⁽³⁾, Silvestre Rodríguez⁽¹⁾,
mfguerra@ull.es, oghdez@ull.es, jesus.martin@tfo.upm.es, fdrajo@dit.ulpgc.es, srdguezp@ull.es

⁽¹⁾Dpto. Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas, Universidad de La Laguna
Avda. Astrof. Fco. Sánchdez, S/N, 38203 La Laguna, Tenerife, Islas Canarias

⁽²⁾CENIEH, Paseo Sierra de Atapuerca S/N, 09002 Burgos

⁽³⁾Dpto. Ingeniería Telemática, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Campus de Tafira, 35017 Las Palmas, Gran Canaria, Islas Canarias

Resumen—An optical code-division multiple access system (OCDMA) is presented for visible light communications (VLC). The OCDMA scheme is based on the recently proposed random optical codes (ROC), which do not present optimal correlation properties but are characterized by their ease of generation when large number of simultaneous users are considered. The synchronism mechanism when using ROCs is an important issue which is adequately addressed and solved by the designed system. An experimental prototype has been developed which allows us to transmit medium-quality audio data from several emitting sources simultaneously through different channels (using different codes), obtaining a practically error-free reception (imperceptible by the human ear) which perfectly agrees with the theoretical analysis.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las comunicaciones en el espectro visible conocidas como VLC (por su siglas en inglés, *Visible Light Communications*), en las que se hace uso de lámparas de LED, han despertado un enorme interés en los investigadores [1], [2], [3]. Su principal ventaja radica en que estas lámparas pueden utilizarse para simultáneamente transmitir información a la vez que se ilumina una habitación. Asimismo, otro aspecto muy importante es que, además de presentar las ventajas comunes a los sistemas ópticos inalámbricos (robustez frente a las interferencias electromagnéticas, ausencia de restricciones para el uso del espectro electromagnético y seguridad en las comunicaciones al estar confinada al interior de la habitación), son seguras para el ojo humano, ya que utilizan el espectro visible. Así, la posibilidad de utilizar este tipo de dispositivos de iluminación de bajo coste para transmitir información hace que esta tecnología sea muy atractiva.

Una de las principales aplicaciones de la tecnología VLC es la difusión de información, tales como vídeo, audio o multimedia, en ambientes domésticos o simplemente en aquellos donde existen restricciones de compatibilidad electromagnética (hospitales, plantas industriales o nucleares, aeronaves, etc.) [3]. Igualmente, esta tecnología puede aplicarse a la difusión de información en exteriores desde farolas o semáforos. Hasta la fecha, todas las propuestas se han centrado en la transmisión de la misma información desde una única fuente hacia uno o varios receptores. Sin embargo, en este trabajo se plantea el uso de esquemas OCDMA

(*Optical Code-Division Multiple Access*) para la transmisión simultánea de información desde varios transmisores hacia distintos receptores utilizando para ello los conocidos como códigos ópticos aleatorios o ROC (*Random Optical Codes*) [4]. Los códigos ROC fueron diseñados originalmente con la idea de aplicarlos a entornos con un elevado número de usuarios. Así, se tiene que sus características de correlación no son tan óptimas como las de otras familias de códigos, pero su facilidad de generación y la poco significativa pérdida de rendimiento en comparación a otros códigos más óptimos, como los OOC (*Orthogonal Optical Codes*) [5], [6], cuando se trabaja con un número grande de usuarios los hace muy atractivos para este tipo de aplicaciones.

Este trabajo se estructura como sigue: en la sección II se presentan las principales características de los códigos ROC [4], describiendo igualmente un mecanismo de sincronismo adecuado para trabajar con este tipo de códigos [7]. La sección III se centra en el prototipo experimental desarrollado, mientras que los resultados obtenidos con el mismo se detallan en la sección IV. Por último, las conclusiones más importantes son resumidas en la sección V.

II. CÓDIGOS ÓPTICOS ALEATORIOS

A. Rendimiento en transmisión

En OCDMA, a cada usuario se le asigna una secuencia de código distinta, de tal forma que el período de transmisión T es dividido en L intervalos de tiempo (*chips*) de duración T_c , de tal forma que $T = LT_c$. El parámetro L es la longitud del código y, durante el intervalo de señalización, sólo w pulsos o chips son realmente transmitidos, teniendo que $w \ll L$. El parámetro w se denomina peso del código y, para el caso de los ROC, la posición de estos w pulsos es establecida de manera aleatoria a lo largo de L . Hay que tener en cuenta que la secuencia de código sólo se transmite cuando el dato a enviar es un '1'. Así, no se transmite nada cuando el dato se corresponde con un '0'. De esta forma, en el receptor sólo se considerará que se ha recibido un dato '1' cuando las w posiciones relativas al código están ocupadas con pulsos. En caso contrario, se considera que se ha recibido un cero. Dado que el canal óptico es no negativo y aditivo, la transmisión de un dato '1' nunca puede ser interferida

por otros usuarios, porque en todo caso se reforzarían los niveles de señal recibidos. Así, la interferencia sólo es posible cuando se transmite un cero, aunque ésta no será efectiva a menos que las w posiciones esperadas del código del receptor sean completamente iluminadas con pulsos debidos a otros usuarios. En [4] se demostró que la probabilidad de que se produzca un error en la transmisión, debido a la interferencia de otros $s - 1$ usuarios que compartan también el canal óptico y para valores de la relación señal a ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) superiores a 20 dB [8], converge a:

$$P_e = \frac{1}{2^s} \sum_{i=0}^{s-1} \binom{s-1}{i} \left[1 - \left(1 - \frac{w}{L} \right)^i \right]^w \quad (1)$$

Obsérvese que la probabilidad de error en transmisión P_e (que coincide con la tasa de error de bit) sólo depende del número total de usuarios s y de los parámetros del código (su longitud L y su peso w).

B. Mecanismo de sincronismo

A continuación se describirá el mecanismo de sincronismo implementado para llevar a cabo la sincronización de trama (mensaje) entre el usuario transmisor y su correspondiente receptor en base a las consideraciones dadas en [7]. Para este modelo, asumiremos que el sistema ya dispone de sincronismo de chip, lo cual puede obtenerse mediante métodos bien conocidos para la sincronización de reloj como los bucles de enganche de fase digitales (DPPL, *Digital Phase-Locked Loop*), la transmisión de señales de reloj de referencia, etc. Sin embargo, la sincronización de trama resulta vital pues es la que permite realmente establecer la comunicación entre transmisor y receptor. Además, ésta debe ser capaz de contrarrestar las más que deficientes características de correlación de los códigos ROC.

El método propuesto consiste básicamente en lo siguiente: el transmisor envía un dato ‘1’ haciendo uso de su secuencia de código, mientras que el receptor escucha el canal a la espera de la llegada de los pulsos ópticos con el desplazamiento relativo entre ellos definido por dicho código. En el momento en que se reciben los w pulsos correspondientes a dicha secuencia, el transmisor y el receptor estarán sincronizados, lo que se conoce como un “evento de sincronismo”. Este método simple funcionaría siempre que sólo existiese un usuario transmisor. Sin embargo, la existencia de varios usuarios transmisores puede llevar a que aparezcan pulsos interferentes que cumplan las características de desplazamiento relativas marcadas por el código de un receptor dado, de tal forma que lo confundan, provocando un sincronismo erróneo o “falsa alarma”.

Una posible mejora podría consistir en enviar m bits ‘1’, en lugar de tan solo uno, para establecer el sincronismo, haciendo más difícil la interferencia de los restantes usuarios. Sin embargo, esto no sería suficiente puesto que nada impediría que éstos repitieran m veces el patrón de interferencia, sobre todo si están intentando sincronizarse con sus receptores y, por tanto, enviando también m bits de sincronismo, dando lugar nuevamente a una “falsa alarma”. Así, resulta mucho más efectivo introducir un desplazamiento circular de los chips del código entre los distintos bits de sincronismo, siendo dicho desplazamiento diferente para cada usuario. De esta forma, si

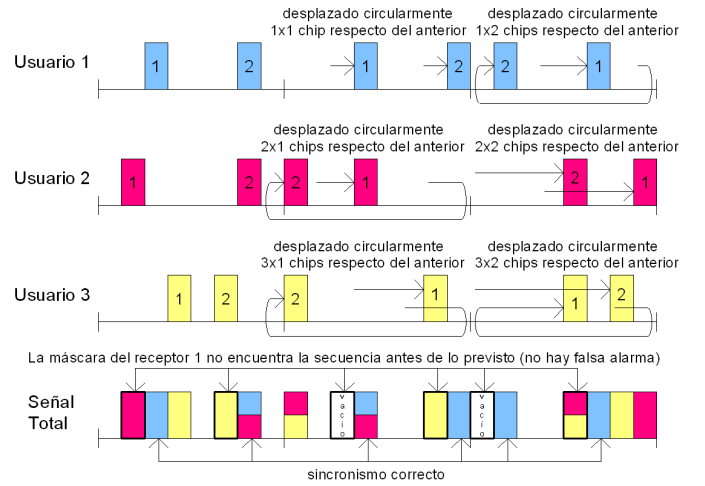


Fig. 1. Ilustración del método de desplazamiento circular propuesto y su eficacia para evitar “falsas alarmas” (ejemplo para $s = 3$ usuarios, $m = 3$ bits de sincronismo y parámetros de los códigos $L = 8$ y $w = 2$)

el patrón de interferencia se produce en un determinado bit de la secuencia de sincronismo, la reordenación de los chips en cada bit de la misma hace muy improbable que ésta vuelva a producirse en los bits subsiguientes, más aún cuando se exige que se dé en m bits consecutivos. En nuestro esquema, tras el envío del primer bit de sincronismo, el cual no se desplaza, los restantes $m - 1$ bits son desplazados circularmente $i \times l$ chips con respecto a su precedente, para el usuario i -ésimo y el l -ésimo bit de sincronismo ($1 \leq l \leq m - 1$, el índice $l = 0$ se refiere al primer bit de sincronismo). De esta forma, para el primer usuario, el segundo bit de sincronismo se desplazaría circularmente un chip respecto al primero, el tercer bit de sincronismo dos chips respecto del segundo, y así sucesivamente (véase el ejemplo en la Fig. 1). Para el segundo usuario transmisor serían dos y cuatro chips los desplazamientos del segundo y tercer bit respecto de su precedente, etc. Con este esquema de desplazamiento circular variable, se evitan también las denominadas “auto-colisiones” para $m \geq 3$ [7].

Así, para el mecanismo de sincronismo anterior, se puede determinar un límite superior para la probabilidad de “falsa alarma”, considerando el peor escenario para establecer la sincronización, esto es, cuando todos los usuarios están intentando sincronizarse al mismo tiempo. En ese caso, el valor esperado de la probabilidad de falsa alarma puede estimarse mediante la siguiente expresión [7]:

$$E[P_{FA}] = \sum_{j=0}^{L-w} \sum_{k=j}^{L-w} (-1)^{k+j} \binom{L}{k} \binom{k}{j} \left[\frac{\binom{L-k}}{w} \right]^s \times \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\binom{L-j}}{w} \right)^m \right]^{L-1} \right\} \quad (2)$$

Obsérvese que $E[P_{FA}]$ depende nuevamente sólo del número de usuarios s y los parámetros del código (L y w), además del número de bits de sincronismo a utilizar (m).

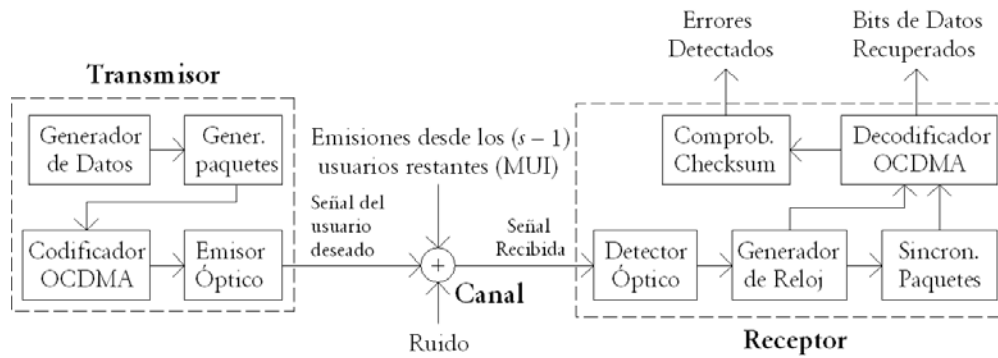


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema desarrollado

III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques del sistema OCDMA diseñado. En el transmisor, los datos a enviar a través del canal óptico son, en primer lugar, empaquetados añadiendo un preámbulo de sincronización al inicio del mensaje y un campo de comprobación de errores (*checksum*) al final del mismo (ver el formato de los mensajes en la Fig. 3). Por último, antes de enviar el mensaje a través del canal, éste es codificado mediante el código específico del usuario transmisor. Asimismo, no debemos olvidar que cada bit del preámbulo tiene que ser adecuadamente desplazado según las pautas dadas en la sección II-B, al contrario que los campos de datos y de *checksum*, que son codificados sin desplazamiento alguno, y acorde a lo indicado en la sección II-A.

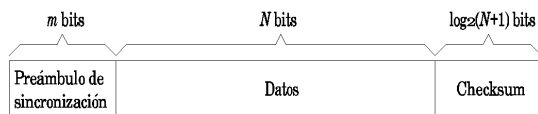


Fig. 3. Formato de los mensajes

Una vez el circuito detector convierte en señales eléctricas los pulsos ópticos recibidos, el bloque generador de reloj sincroniza la señal de reloj del receptor con los pulsos recibidos, dando lugar al “sincronismo de chip”. El sincronizador de paquetes consiste en un registro de desplazamiento que espera continuamente la recepción de la secuencia de sincronización con las características descritas en la sección II-B. Este dispositivo debe encontrar, entre la maraña de mensajes recibidos, aquél que venga destinado a él y proporcionar el sincronismo de bit a partir de un sinfín de chips recibidos, habilitando de esta forma la decodificación del resto de bits del paquete. Finalmente, el decodificador OCDMA suministra los bits demodulados al detector de errores para que éste compruebe la integridad de los mismos. Recuérdese que éste decodificador sólo considerará que un bit ‘1’ ha sido recibido si las w posiciones específicas del código están ocupadas por pulsos, asumiendo, en caso contrario, que lo que se recibió fue un dato ‘0’.

En este primer prototipo desarrollado (véase la Fig. 4), el enlace óptico fue implementado haciendo uso de un diodo LED infrarrojo fabricado por Siemens (SFH4350) y un fotodiodo PIN (SFH225) junto con amplificadores de transimpedancia y comparadores digitales. En cuanto a la lógica digital de los transmisores y receptores (codificadores

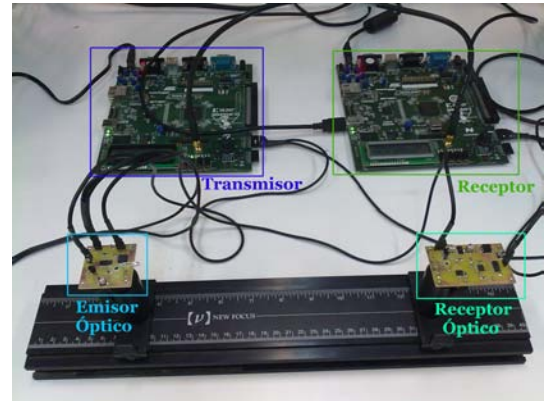


Fig. 4. Prototipo experimental

y decodificadores OCDMA, sincronizadores, empaquetadores de mensajes, detectores de errores, interfaces de comunicación serie con los ordenadores, etc.), ésta ha sido implementada en dispositivos FPGA Spartan-3A de la marca Xilinx®. El prototipo permite emular comunicaciones ópticas haciendo uso del esquema OCDMA propuesto y evaluar diferentes parámetros de la comunicación (tasas de error de sincronismo, bit o *checksum*). En la Fig. 5 se muestra una instantánea de algunas señales en el prototipo obtenidas con un analizador lógico durante una comunicación. Podemos observar cómo el receptor detecta la cabecera de un mensaje, generando el evento de sincronismo y demodulando adecuadamente los datos recibidos.

IV. RESULTADOS

Se han llevado a cabo numerosas pruebas a fin de evaluar el rendimiento del prototipo desarrollado. Los códigos usados tenían una longitud $L = 100$ y un peso $w = 10$, siendo $s = 8$ el número total de usuarios. La tasa de chips fue $R_{\text{chip}} = 1$ Mchip/s, lo que lleva a una tasa de bit de $R = 10$ kbps ($R = 1/T = R_{\text{chip}}/L$). A la hora de evaluar la tasa de errores de sincronismo (SER, *Synchronism Error Rate*) se consideró un caso extremo, en el que los usuarios interferentes transmitían datos ‘1’ continuamente y mandaban mensajes aleatoriamente pero en intervalos de tiempo inferiores a un bit entre paquete y paquete, de tal forma que el canal estaba absolutamente colapsado. A pesar de ello, el esquema de sincronismo funcionó adecuadamente, tal como podemos observar en la tabla I, donde además se comprueba que los

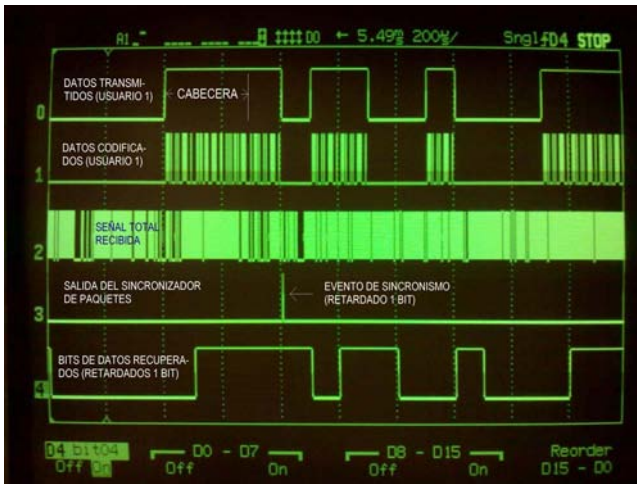


Fig. 5. Señales más significativas en el prototipo durante una comunicación: bits de datos transmitidos y codificados del usuario de interés, señal recibida total (combinación de las distintas señales transmitidos por todos los usuarios), eventos de sincronismo y bits de datos recuperados en el receptor.

estimadores teóricos ofrecen una muy buena aproximación sobre lo que nos vamos a encontrar en la práctica (entiéndase que los estimadores nos dan valores esperados ante un sinnfín de situaciones, mientras que en este ejemplo estudiábamos uno de los peores casos posibles). Es importante destacar que para $m = 4$ no se observaron errores de sincronismo puesto que en las pruebas se transmitían hasta un máximo de 10^7 mensajes, mientras que las tasas esperadas de fallo rondan 10^{-8} . Por último, las tasas de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) fueron estudiadas para $m = 3$ y 4, donde los fallos de sincronismo son despreciables, observándose valores similares a lo esperado teóricamente (en estas pruebas, los datos enviados por los distintos usuarios eran aleatorios, en lugar de siempre ‘1’ como ocurría durante la evaluación de la SER, a fin de emular una comunicación lo más real posible). En definitiva, se puede concluir que los resultados obtenidos con nuestro prototipo confirman las predicciones teóricas, demostrando la gran precisión de los estimadores (1) y (2) desarrollados para los errores en transmisión (P_e) y durante la sincronización ($E[P_{FA}]$).

SER	Estimaciones teóricas	Resultados experimentales
$m = 1$	0,24	0,44
$m = 2$	10^{-3}	2×10^{-3}
$m = 3$	$4,9 \times 10^{-6}$	9×10^{-6}
$m = 4$	$2,9 \times 10^{-8}$	0
BER	Estimaciones teóricas	Resultados experimentales
$m = 3, 4$	3×10^{-5}	$\sim 2 \times 10^{-5}$

Tabla I. Comparación entre los resultados teóricos y experimentales para $L = 100$, $w = 10$ y $s = 8$.

Como aplicación práctica, el sistema OCDMA se utilizó para la transmisión simultánea de señales de audio digital desde diferentes usuarios. Para la tasa de chip dada de $R_{\text{chip}} = 1$ Mcps, se pueden obtener tasas de transferencia cercanas a 10 kbps por ‘canal’ (ya que se pierde algo de tasa efectiva debido a la carga extra que supone la transmisión de la cabecera y el *checksum*), aunque pueden utilizarse simultáneamente varios canales por parte del mismo usuario para aumentar

la calidad del audio transmitido. Por ejemplo, con $s = 8$ canales (los que nos proporciona nuestro prototipo), se pueden destinar cuatro de ellos a un mismo usuario (~ 40 kbps), otros dos a un segundo usuario (~ 20 kbps), disponiendo de dos canales más de baja calidad (voz) de ~ 10 kbps para otros dos usuarios. Durante todas las pruebas realizadas, la recepción obtenida tuvo una alta calidad sin registrarse prácticamente errores (de hecho, los errores eran imperceptibles para el oído humano, aunque eran contabilizados mediante la información del *checksum*, observándose una tasa de BER media de $\sim 10^{-5}$). Las mejoras en los tiempos de conmutación de los LED que trabajan en el visible permitirán en un futuro cercano la aplicación de la técnica OCDMA para comunicaciones a tasas muchos más elevadas en un entorno multi-usuario, haciendo de ella una candidata muy prometedora para el desarrollo de redes VLC multi-usuario.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un sistema OCDMA basado en el uso de códigos ópticos aleatorios para comunicaciones multi-usuario en el espectro visible a tasas moderadas de datos, describiendo sus características básicas de funcionamiento así como un mecanismo de sincronismo adaptado a los códigos ROC. Adicionalmente, se han suministrado estimadores teóricos que permiten determinar *a priori* el rendimiento del sistema en transmisión y durante la sincronización. Se ha desarrollado un prototipo experimental, observando una gran coincidencia entre los resultados obtenidos con el mismo y lo predicho teóricamente. Finalmente, el sistema se ha aplicado satisfactoriamente a la transmisión multi-usuario de señales de audio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de Canarias (SolSubC200801000306), el Plan Nacional del Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2009-14059-C03-02 y TEC2009-14059-C03-03) y el Plan E para la estimulación de la economía y el empleo.

REFERENCIAS

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [2] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, B. Pricope, “OFDM visible light wireless communication based on white LEDs” in *Proc. of IEEE 65th Veh. Technol. Conf.*, VTC2007-Spring., pp. 2185-2189, Apr. 2007.
- [3] J. Rufo, J. Rabadán, F. Delgado, C. Quintana, R. Pérez-Jiménez, “Experimental evaluation of video transmission through LED illumination devices” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 1411-1416, Aug. 2010.
- [4] J.A. Martín-González, E. Poves, F.J. López-Hernández, “Random optical codes used in optical networks” *IET Optoelectron.*, vol. 3, no. 8, pp. 1392-1401, Aug. 2009.
- [5] J.A. Salehi, “Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part I: Fundamental principles” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 824-833, Aug. 1989.
- [6] J.A. Salehi, C.A. Brackett, “Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part II: System performance analysis” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 834-842, Aug. 1989.
- [7] J.A. Martín-González, O. González, E. Poves, F.J. López-Hernández, S. Rodríguez, “Esquema de sincronismo para sistemas OCDMA basado en códigos ópticos aleatorios” *XXV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2010)*, Bilbao, Sept. 2010.
- [8] O. González, J.A. Martín-González, E. Poves, F.J. López-Hernández, R. Pérez-Jiménez, “Adaptive code-division multiple-access system for communications over indoor wireless optical channels based on random optical codes” *IET Optoelectron.*, vol. 3, no. 4, pp. 187-196, Aug. 2009.