

# Esquema de sincronismo para sistemas OCDMA basado en códigos ópticos aleatorios

Jesús A. Martín-González<sup>(1)</sup>, Oswaldo González<sup>(2)</sup>, Enrique Poves<sup>(3)</sup>,

Francisco J. López-Hernández<sup>(3)</sup>, Silvestre Rodríguez<sup>(2)</sup>

jesus.martin@tfo.upm.es, oghdez@ull.es, kike@tfo.upm.es, dxtn@tfo.upm.es, srdguezp@ull.es

<sup>(1)</sup>CENIEH, Paseo Sierra de Atapuerca S/N, 09002 Burgos, Spain

<sup>(2)</sup>Dpto. Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas, Universidad de La Laguna Avda. Astrof. Fco. Sánchez, S/N, 38203 La Laguna, Tenerife (Canary Islands), Spain

<sup>(3)</sup>Dpto. Tecnología Fotónica, Universidad Politécnica de Madrid Avda. Complutense, S/N, 28040 Madrid, Spain

**Abstract**—In this paper, a technique for code acquisition in optical code-division multiple-access (OCDMA) systems using the recently introduced Random Optical Codes (ROCs) is presented. The acquisition scheme, which is based on the transmission of a synchronization preamble, is described. This scheme is a modification of another one previously presented [1], where the phenomenon which we have called “auto-collision” is now resolved. The equations that allow us to establish an upper bound for the acquisition performance are indicated and several results which prove the reliability of these expressions are presented. These results show that the acquisition scheme is practically infallible when the synchronization preamble is constituted by three or four bits, irrespective of the multi-user interference, then making it very appropriate for optical communications over very saturated scenarios (with a large number of users).

## I. INTRODUCCIÓN

La introducción hace unos años de los sistemas ópticos de acceso múltiple por división de código (OCDMA, *Optical Code-Division Multiple-Access*) ha llevado al rápido desarrollo de códigos ópticos como una de las mejores estrategias propuestas para afrontar el problema de la interferencia de acceso múltiple (MAI, *Multiple-Access Interference*) [2], [3]. En dicho esquema, cada bit ‘1’ (“on”) es transmitido como una secuencia diferente para cada canal, con unos parámetros determinados de longitud  $L$  (número de ranuras o *slots* de tiempo) y peso  $w$  (número de pulsos enviados a lo largo de la secuencia de  $L$  *chips*). Cada bit ‘0’ (“off”) es transmitido con la misma longitud citada, pero con un peso nulo. En este caso el proceso de recepción se rige por una regla de decisión en el receptor para interpretar un bit “on” u “off”. Este criterio está basado en correlar el código propio de su canal con la señal recibida en los últimos  $L$  *chips*. Cuando encuentra una correlación igual al peso del código entiende que un bit “on” ha sido recibido y, en caso contrario, considera que se trata de un bit “off”.

Recientemente, los autores han propuesto una nueva familia de códigos, denominados códigos ópticos aleatorios (ROCs, *Random Optical Codes*), los cuales introducen ventajas sobre las familias ya existentes [4], [5], [6], [7]. Hasta ahora, el modelo para la transmisión en este tipo de sistemas usando ROCs supone una sincronización perfecta de *chip* entre emisor

y receptor. Además, en los análisis de la probabilidad de error efectuados hasta la fecha siempre se ha asumido un perfecto sincronismo en fase obtenido mediante algún proceso de sincronización previo a la transmisión. Sin embargo, la generación de ROCs sin tener en cuenta propiedades de autocorrelación especiales, hace que la utilización del tradicional mecanismo de sincronización secuencial [8], [9], [10], [11] pueda no ser suficientemente robusto en situaciones reales.

Por todo esto, la sincronización en fase de este tipo de sistemas se convierte en una pieza fundamental a la hora de implementarlos. Este trabajo analiza el proceso de sincronización en sistemas OCDMA usando ROCs y propone un método especialmente diseñado para las características de estos códigos. Dicho método es una modificación de otro esquema previamente propuesto [1], pero que resuelve lo que hemos denominado como el problema de la “autocolisión”.

## II. MODELO DE SINCRONIZACIÓN DEL SISTEMA

Antes de describir el método de sincronización utilizado, vamos a introducir el concepto de multicorrelación estrechamente ligado a la correlación cruzada entre códigos. Esta idea nos ayudará a evaluar los diferentes métodos expuestos y con ella justificaremos la elección del propuesto finalmente.

Definimos la multicorrelación como la correlación de la secuencia recibida por el receptor y el código del propio usuario. Se entiende que la secuencia recibida está generada por la multiplexación de todos los códigos de los usuarios que en ese momento están emitiendo un dato “1”. El concepto de multicorrelación está ampliamente ligado a la autocorrelación y correlación cruzada pero es más valioso a la hora de evaluar el rendimiento del sistema en su conjunto porque nos da información global del sistema, no solamente de una pareja de secuencias.

1) *Método de sincronización simple*: El primer método de sincronización a tener en cuenta es el utilizado por los códigos ópticos ortogonales (OOCs, *Optical Orthogonal Codes*), que gozan de buenas propiedades de autocorrelación. Este método se resume del siguiente modo: el emisor envía un bit de dato “1”, es decir, una secuencia de pulsos de acuerdo con el código propio del usuario. Mientras, el receptor está escuchando el

TABLE I

EJEMPLO DE LAS SECUENCIAS DE SINCRONISMO PARA LOS MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN EXPUESTOS CUANDO  $L = 10$ ,  $w = 3$  Y  $N = 2$ .

$m = 1$	0100010100 1010100000 0110001000 1110111100
$m = 3$ sin desplazamiento circular	0100010100 0100010100 0100010100 1010100000 1010100000 1010100000 0110001000 0110001000 0110001000 1110111100 1110111100 1110111100
$m = 3$ con desplazamiento circular fijo	0100010100 0010001010 0001000101 1010100000 0010101000 0000101010 0110001000 0000110001 0010000110 1110111100 0010111011 0011101111
$m = 3$ con desplazamiento circular variable	0100010100 0010001010 1000100010 1010100000 0010101000 0000101010 0110001000 0000110001 1100010000 1110111100 0010111011 1100111010

canal y almacenando en un registro de desplazamiento la señal recibida. En este registro está buscando la réplica del código correspondiente a su usuario. En este caso, el receptor detectará su código justo  $L$  slots después de que el emisor haya empezado a transmitir, es decir, cuando éste último completa la emisión del código. En ese momento, ambos estarán sincronizados.

El evento de sincronización, sin embargo, puede ser erróneo, lo que se denomina una “falsa alarma” (FA), cuando el receptor detecta la secuencia esperada antes de acabar de recibir la enviada por el usuario correspondiente o, simplemente, cuando detecta dicha secuencia sin que su usuario haya siquiera intentado sincronizarse con él. Esto se debe a la MAI introducida por el resto de usuarios al comunicarse con sus respectivos receptores. Un fallo de sincronismo en este sentido daría lugar a una ráfaga continua de errores en la recepción de los bits transmitidos, por lo que el proceso de sincronización entre emisor y receptor es crítico a la hora de ofrecer una comunicación fiable.

La probabilidad de una falsa detección de sincronización o la probabilidad de FA ( $P_{FA}$ ) es mucho más grande que la probabilidad de error de bit del código en transmisión,  $P_e$ . Esto es así porque el emisor se ve expuesto a una posible FA en cada slot de tiempo, mientras que un error de transmisión sólo puede suceder cada  $L$  slots.

2) *Método de sincronización basado en varios bits de sincronización:* Después del análisis desarrollado en la sección anterior queda claro que el método propuesto, aunque válido en algunos casos, no ofrece la robustez necesaria en uno de los procesos más críticos del sistema como es la sincronización.

Por lo tanto, en esta sección se propone una estrategia que permite mejorar el rendimiento del método de sincronización expuesto en la sección anterior en función de los parámetros del sistema, logrando una adaptación a las circunstancias particulares de la aplicación. Esta estrategia consiste en enviar  $m$  datos “1” consecutivos en vez de uno solo, es decir, el sistema sólo se considerará sincronizado cuando sucedan  $m$  detecciones de sincronización separadas por  $L$  períodos de chip.

3) *Método de sincronización basado en varios bits de sincronización y desplazamiento circular:* Para hacer efectiva la sensible mejora en el método de sincronización al añadir  $m$  bits de sincronismo expuesto en la sección II-2 es necesario añadir una modificación. En el trabajo presentado anteriormente [1], ésta consistía en intercalar para cada usuario un número diferente de slots vacíos entre cada bit de sincronismo. Por ejemplo, en el usuario  $i$  esperaremos  $i$  slots desde que se termina de enviar un bit de sincronismo hasta que empieza el siguiente, lo que equivale a utilizar una código de sincronismo de longitud  $L + i$ . Una técnica equivalente consistiría en realizar un desplazamiento circular de  $i$  chips entre cada bit de sincronismo, manteniendo en este caso, por tanto, la misma longitud  $L$  para todos los bits.

Sin embargo, la estrategia anterior es sensible a lo que hemos denominado “autocolisión”, donde el propio usuario puede facilitar una falsa alarma si un bit erróneo previo,

en fase con los  $m - 1$  bits siguientes del propio usuario, es detectado. En la tabla I se esquematizan las diferentes estrategias presentadas para un caso particular con  $L = 10$ ,  $w = 3$  y  $N = 2$  (siendo  $N + 1$  el número de usuarios), además de una nueva estrategia con desplazamiento circular de  $i \cdot l$  chips entre un bit de sincronismo y el anterior, para el canal  $i$ -ésimo y el bit de sincronismo  $l$ -ésimo ( $1 \leq l \leq m - 1$ , el índice 0 identifica al primer bit de sincronismo). Esta última estrategia es equivalente al esquema con desplazamiento circular fijo en cuanto a la minimización del efecto de la MAI sobre la probabilidad de falsa alarma. Sin embargo, es inmune a las “autocolisiones”. Veamos por qué: Supongamos que en el esquema con desplazamiento circular fijo estamos trabajando con el usuario 1, donde el desplazamiento entre bits de sincronismo consecutivos es de un chip. Para el ejemplo de la tabla I, la posición relativa de los chips activos es  $\{2,6,8\}$ ,  $\{3,7,9\}$  y  $\{4,8,10\}$  para los bits de sincronismo. Si debido a la MAI se recibiese un bit erróneo previo a estos de sincronismo cuyos chips activos fueran  $\{1,5,7\}$ , el receptor se sincronizaría puesto que encuentra tres bits consecutivos con un desplazamiento circular entre ellos de un chip, tal como estaba esperando. Por tanto, tendríamos sincronización un bit antes de lo correcto y se produciría falsa alarma. Observe cómo es el propio usuario el que favorece la falsa alarma aportando  $m - 1$  de los  $m$  bits de sincronismo necesarios. Este problema de “autocolisión” es relativamente sencillo que se produzca en canales altamente interferentes, pues sólo se requiere de un bit erróneo (el resto los aporta el propio usuario), y es el mecanismo por el que comúnmente se producen falsas alarmas. Además, la probabilidad de falsa alarma por “autocolisión” es independiente de  $m$ . Por tanto, aumentar  $m$  no evita las falsas alarmas utilizando un esquema con desplazamiento circular fijo.

Cuando utilizamos una estrategia con desplazamiento circular variable, para el mismo ejemplo anterior, el usuario 1 desplaza el segundo bit de sincronismo  $i \cdot l = 1$  ( $i = 1, l = 1$ ) chip respecto del primero, el tercer bit de sincronismo  $i \cdot l = 2$  chips ( $i = 1, l = 2$ ) respecto del segundo, y así sucesivamente

si fuera el caso. Por tanto, si ocurriera que se recibe un bit erróneo un *chip* adelantado respecto al verdadero primer bit de sincronismo, el usuario esperaría que el siguiente estuviese dos *chips* retrasado con respecto al segundo recibido, pero se encontraría que sólo lo está un *chip*. Por tanto, ignoraría el bit erróneo y se sincronizaría sólo cuando encontrara la secuencia de tres bits con los desplazamientos relativos adecuados de 1 y 2 *chips*, respectivamente. Luego, la “autocolisión” es evitada con este esquema de desplazamiento circular variable.

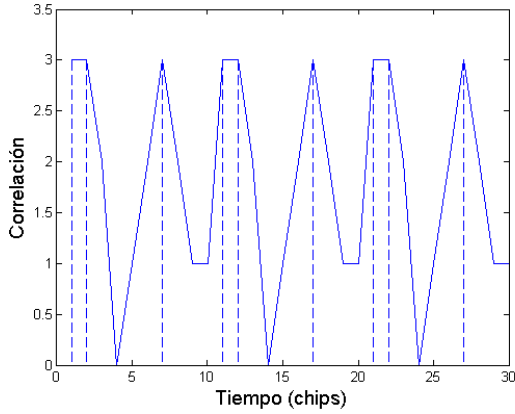


Fig. 1. Multicorrelación de la secuencia recibida y el código del primer usuario, para  $m = 3$  sin desplazamiento circular.

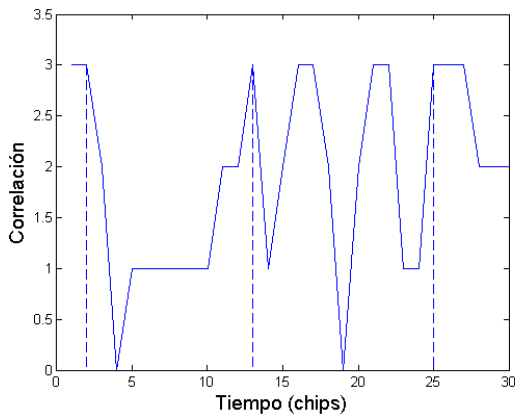


Fig. 2. Multicorrelación de la secuencia recibida y del código del primer usuario, para  $m = 3$  con desplazamiento circular.

Las figuras 1 y 2 se centran en el análisis de la minimización del efecto de la MAI sobre la probabilidad de falsa alarma mediante el uso de desplazamientos circulares entre los bits de sincronismo (el análisis es válido para cualquiera de los dos esquemas presentados, con desplazamiento circular fijo y variable). Dichas figuras muestran la multicorrelación entre los códigos mostrados en la Tabla I y el primero de ellos correspondiente a nuestro usuario principal. Podemos observar que, cuando no se utiliza desplazamiento circular (Fig. 1), se registran tres “eventos de sincronismo” en los instantes (en

unidades de *chips*)  $\{1,11,21\}$ ,  $\{2,12,22\}$  y  $\{7,17,27\}$ . Cuando hacemos uso del desplazamiento circular (Fig. 2), sólo se produce un “evento de sincronismo” en los instantes correctos  $\{2,13,25\}$ . Queda patente, por tanto, que el desplazamiento circular es necesario para incrementar la inmunidad del sistema a la MAI.

### III. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL SISTEMA

Utilizando el método de sincronización propuesto se obtiene una cota superior para la probabilidad de falsa alarma, asumiendo el peor de los entornos posibles de sincronización, es decir, cuando todos los usuarios están intentando sincronizar al mismo tiempo. El valor esperado para la probabilidad de falsa alarma  $E(P_{FA})$  viene dado por la siguiente expresión [12]:

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

Por otro lado, es posible obtener una cota superior de manera más restrictiva que el valor esperado anterior mediante el establecimiento de un intervalo de confianza limitado por un parámetro extremo  $s_\alpha$  definido como [12]:

$$s_\alpha = \max_{s_i=0, \dots, L} \left\{ s_i / \left[ \left( \sum_{s=0}^{s_i} P(S^{(N+1)} = s) \right) \leq \alpha \right] \right\} \quad (2)$$

La cota superior para el intervalo de confianza de  $P_{FA}$  es

$$P_{FA}^\alpha = P_{FA} | (S^{(N+1)} = s_\alpha) \quad (3)$$

donde  $S^{(N+1)}$  es una variable aleatoria que establece el número de espacios (ausencia de pulsos) encontrados en la secuencia recibida cuando transmiten simultáneamente los restantes  $N$  usuarios. La cota superior obtenida a partir de la consideración anterior garantiza que [12]:

$$P(P_{FA} > P_{FA}^\alpha) < \alpha \quad (4)$$

### IV. RESULTADOS

Según las expresiones anteriores, utilizar  $m = 4$  bits de sincronismo permite una fiabilidad prácticamente perfecta de sincronización, con errores despreciables de falsas alarmas ( $< 10^{-10}$  para valores de  $L$ ,  $w$  y  $N$  típicos). Con la idea de probar lo anterior en una aplicación más real, se diseñó un modelo de simulación constituido por una red de  $N + 1 = 8$  dispositivos que utilizaban un esquema OCDMA con códigos ROC de parámetros  $L = 100$  y  $w = 10$ , y se determinaron los

fallos que se producirían en cuanto a errores de sincronismo en una situación de tráfico muy intenso para  $m = 1, 2$  y  $3$ . En la Fig. 3 se observa, en primer lugar, que las expresiones anteriores sólo tienen cierta validez ante unas determinadas condiciones mínimas de relación señal a ruido (SNR, *signal-to-noise ratio*), tal como era de esperar según las discusiones dadas en [7].

Por otro lado, para este peor caso de elevado tráfico donde se ha forzado que todos los usuarios transmitan datos ‘1’ de manera ininterrumpida, el valor esperado de  $P_{FA}$  dado por (1) no es un estimador del todo adecuado. Sin embargo, utilizando un intervalo de confianza con  $\alpha = 0.1$  (90%), observamos que éste establece una cota superior de probabilidad de falsa alarma válido inclusive para este tan improbable caso. Así, podemos concluir que, utilizando este último estimador, aseguramos una cota superior para la falsa alarma absolutamente infranqueable en cualquier situación práctica. Además, es de destacar que para los parámetros dados de  $L = 100$ ,  $w = 10$  y  $N = 7$ , la probabilidad de error de bit  $P_e$  es  $3.4 \cdot 10^{-5}$  [6], valor que está por encima de  $E(P_{FA})$  para  $m = 3$ . Por tanto, utilizar  $m = 4$ , como habíamos comentado, implica disponer de un esquema de sincronismo prácticamente infalible independientemente de la MAI presente en el sistema.

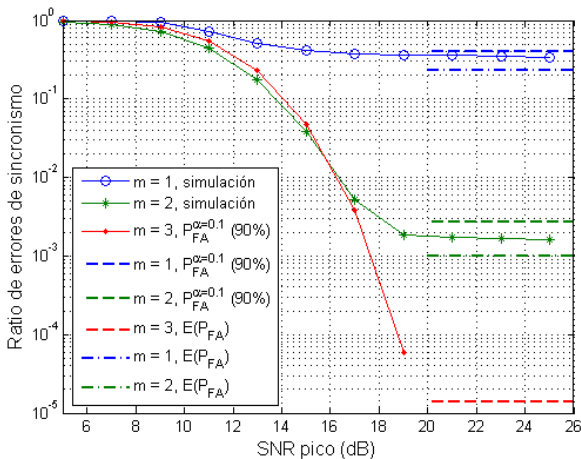


Fig. 3. Ratio de errores de sincronismo para  $m = 1, 2$  y  $3$  en un sistema OCDMA con  $N = 7$ ,  $L = 100$  y  $w = 10$

Por último, comentar que cuando se ha utilizado desplazamiento circular fijo, en lugar de variable como en los resultados de la Fig. 3, el sistema presentó un desempeño equivalente para  $m \geq 2$  con saturación en la probabilidad de falsa alarma a un determinado valor, lo que es debido al fenómeno de “autocolisión”, tal como se pudo constatar durante las simulaciones. Dichos resultados refuerzan aún más si cabe la idea de que la estrategia de desplazamiento circular variable ofrece una solución fiable para aplicaciones prácticas, donde incrementar el valor de  $m$  sí da lugar en este caso a una reducción importante en los errores de sincronismo, haciéndolos despreciables para  $m \geq 4$  incluso en ambientes altamente interferentes.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito una técnica de sincronización de paquetes para esquemas OCDMA que hagan uso de los denominados códigos ópticos aleatorios (ROC). Se han presentado una serie de ecuaciones que permiten evaluar la probabilidad de falsa sincronización de la técnica propuesta en función del número de bits de sincronismo utilizados ( $m$ ) y del resto de parámetros del sistema (número de usuarios y características del código utilizado). Por último, se han llevado a cabo diferentes simulaciones para comprobar la fiabilidad de las expresiones expuestas, obteniéndose resultados muy satisfactorios que demuestran la fiabilidad del esquema de sincronización propuesto.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por la European Space Agency (ESA, proyecto “Optical Wireless Intra-Spacecraft Communication”, ESA Contract 19545/06/NL/GLC), el Plan Nacional del Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2009-14059-C03) y el Gobierno de Canarias (SolSubC200801000306).

## REFERENCES

- [1] Martín-González, J.A., González, O., Poves, E., López-Hernández, F.J., Pérez-Jiménez, R.: “Modelo para la sincronización de códigos ópticos en sistemas OCDMA”, in *XXIV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2009)*, Santander, Sept. 2009.
- [2] Salehi, J.A.: “Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part I: Fundamental principles”, in *IEEE Trans. Commun.*, 1989, Vol. 37, (8), pp. 824-833.
- [3] Salehi, J.A., Brackett, C.A.: “Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part II: Systems performance analysis”, in *IEEE Trans. Commun.*, 1989, Vol. 37, (8), pp. 834-842.
- [4] Martín-González, J.A., Poves, E., López-Hernández, F.J.: “Random optical codes in an intra-satellite optical wireless network”, in *IEEE ICTON Mediterranean Winter Conference*, 2007.
- [5] —, “Random optical codes for optical code-division multiple access used in an intra-satellite optical wireless network”, in *IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications (WOC 2008)*, 2008.
- [6] —, “Random optical codes used in optical wireless network”, in *IET Commun.*, 2009, Vol. 3, (8), pp. 1392-1401.
- [7] González, O., Martín-González, J.A., Poves, E., López-Hernández, F.J., Pérez-Jiménez, R.: “Adaptive Code-Division Multiple-Access System for Communications over Indoor Wireless Optical Channels based on Random Optical Codes”, in *IET Optoelectron.*, 2009, Vol. 3, (4), pp. 187-196.
- [8] Yang, G. C.: “Performance Analysis for Synchronization and System on CDMA Optical-Fiber Networks”, in *IEICE Trans. Commun.*, 1994, Vol. E77B, (10), pp. 1238-1248
- [9] Mustapha, M. M., Ormondroyd, R. F.: “Performance of a serial-search synchronizer for fiber-based optical CDMA systems in the presence of multi-user interference”, in *Proc. SPIE*, 1999, Vol. 3899, pp. 297-306.
- [10] Mustapha, M. M., Ormondroyd, R. F.: “Effect of multiaccess interference on code synchronization using a sequential detector in an optical CDMA LAN”, in *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, Vol. 10, (8), pp. 1103-1105.
- [11] Keshavarzian, A., Salehi, J. A.: “Optical orthogonal code acquisition in fiber-optic CDMA systems via the simple serial-search method”, in *IEEE Trans. Commun.*, 2002, Vol. 50, (3), pp. 473-483.
- [12] Martín-González, J.A.: “Contribución al diseño de modelos de codificación pseudo-aleatoria en sistemas OCDMA incoherentes y asíncronos”, *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [13] Mashhadi, S., Salehi, J.A.: “Code division multiple access techniques in optical fiber networks—Part III: Systems performance analysis”, in *IEEE Trans. Commun.*, 2006, Vol. 54, (8), pp. 1457-1468.