

Modelo para la sincronización de códigos ópticos en sistemas OCDMA

Jesús A. Martín-González⁽¹⁾, Oswaldo González⁽²⁾, Enrique Poves⁽³⁾,
Francisco J. López-Hernández⁽³⁾, Rafael Pérez-Jiménez⁽⁴⁾

jesus.martin@tfo.upm.es, oghdez@ull.es, kike@tfo.upm.es, dxtn@tfo.upm.es, rperez@dsc.ulpgc.es

⁽¹⁾Dept. Mathematics and Computation, Universidad de Burgos. C/ Villadiego, S/N, 09001 Burgos, Spain

⁽²⁾Dept. Fundamental and Experimental Physics, Electronics and Systems, Universidad de La Laguna
Av. Astrof. Fco. Sánchdez, S/N, 38203 La Laguna, Tenerife (Canary Islands), Spain

⁽³⁾Dept. Photonics Technology, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense, S/N, 28040 Madrid, Spain

⁽⁴⁾Dept. Signals and Communications, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Campus de Tafira, 35017 Las Palmas, Gran Canaria (Canary Islands), Spain

Abstract—In this paper we present a technique for code acquisition in optical code-division multiple-access (OCDMA) systems using the recently introduced Random Optical Codes (ROCs). We divide the communication system in two parts: a synchronization preamble and data transmission. We have defined and studied the multicorrelation for ROCs. Based on it, several models for the synchronization of the system are proposed. Finally, one of them have been found as the robust. It is the first model for the synchronization of the recently introduced family, ROC, and this one constitutes a compromise between reliability and acquisition time.

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* [1], [2]). Esta estrategia modula cada bit '1' ("on") 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 modulado 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". Éste 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 *on* bit y en caso contrario *off* bit.

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 [3], [4], [5], [6]. 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 [7], [8], [9], [10] 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. En él, se han tenido en cuenta las propiedades especiales derivadas de su método de generación así como las características particulares de los sistemas donde pueden ser aplicados.

II. MODELO DE LA 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 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.

Se llama detección de sincronización a este evento en el que el receptor detecta su código y él se considera sincronizado. Como se ha descrito anteriormente, el intento de sincronización del emisor produce irremisiblemente una detección de sincronización. Esto se produce por el hecho de que en estos sistemas no es posible un error en la transmisión debido a MAI cuando estamos transmitiendo un dato "1" [2].

Sin embargo, el efecto MAI si puede producir una detección de sincronización en el receptor cuando en realidad el emisor no está intentando sincronizar o lo está haciendo pero en otra fase que la detectada. Este error se denomina falsa alarma (FA) y es producido por la misma causa que un error en la transmisión de los datos, es decir, otros usuarios emiten señal en los w slots correspondientes a la transmisión de pulsos de nuestro código, por lo que el receptor entiende dato "1" cuando realmente el emisor no ha enviado nada. Este efecto de confusión se amplía cuanto más alta sea la proporción de datos "1" enviados por los usuarios. Dicha proporción alcanza el máximo cuando todos ellos están intentando sincronizar con sus respectivos receptores al mismo tiempo. Esta sería la situación más crítica que se puede dar en este proceso de sincronización.

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 un error de transmisión sólo puede suceder cada L slots.

Al calcular la multicorrelación para el usuario propuesto se detectan perfectamente las FA si las hubiera en el caso de sincronización o los errores de recepción en los casos de transmisión.

Por ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el caso para los valores de los parámetros $L = 200$, $w = 15$ y $N = 17$ usuarios interferentes (el número total de usuarios en el sistema será entonces de $N + 1$ si consideramos también a nuestro usuario principal). Se observan tres detecciones de sincronización en los slots $\{21, 133, 162\}$. Una de ellas será verdadera y las otras dos serán FA; sin embargo no es posible detectar cuáles. Otra información que cabe destacar es que los valores de la multicorrelación presentan valores cercanos a w en muchos slots. Por lo tanto, intuitivamente la probabilidad de FA toma valores altos, seguramente mucho mayores a los aceptables en cualquier aplicación real.

Por otra parte, la Fig. 2 muestra el mismo análisis para los parámetros $L = 200$, $w = 15$ y $N = 5$. Observamos una única detección de sincronización en 133, por lo tanto, el sistema está correctamente sincronizado. Además, los valores para la multicorrelación son mucho más pequeños que w , por lo que intuitivamente la probabilidad de falsa alarma debe ser menor

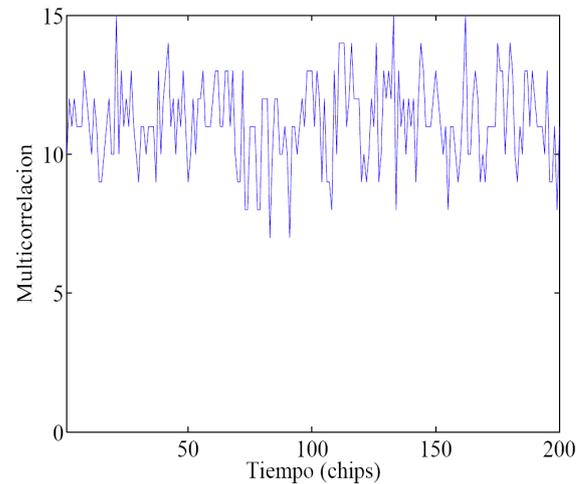


Fig. 1. Multicorrelación para los parámetros $L = 200$, $w = 15$, $N = 15$.

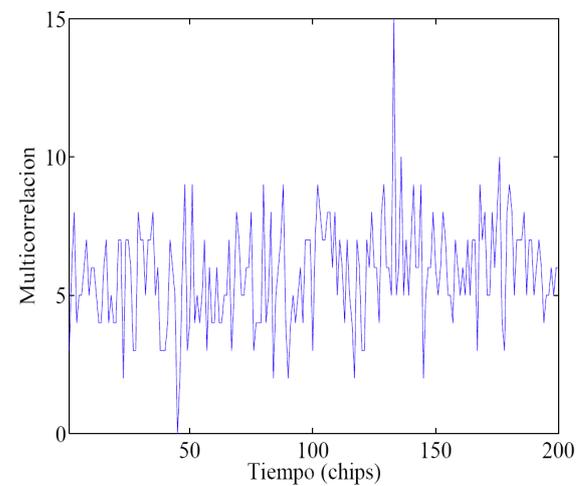


Fig. 2. Multicorrelación para los parámetros $L = 200$, $w = 15$, $N = 5$.

que en el ejemplo anterior.

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 periodos de chip.

3) *Método de sincronización basado en varios bits de sincronización y chips de silencio entre los bits de sincronismo:* 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. Esta consiste 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 $L + i$.

La secuencia utilizada para las tres diferentes estrategias descritas se muestra en la Tabla I. Los parámetros del sistema descrito son $L = 10$, $w = 3$ y $N = 2$.

$m = 1$	1000010100 1001001000 1100100000
$m = 3$ sin chips de silencio	1000010100 1000010100 1000010100 1001001000 1001001000 1001001000 1100100000 1100100000 1100100000
$m = 3$ con chips de silencio	1000010100 1000010100 1000010100 1001001000 0 1001001000 0 1001001000 1100100000 00 1100100000 00 1100100000

TABLE I

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

En las Figuras 3 y 4 se muestran sendos análisis de la multicorrelación entre los códigos mostrados en la Tabla I y el primero de ellos correspondiente a nuestro usuario principal. Los dos análisis mostrados se han realizado utilizando varios bits de sincronismo ($m = 3$), sin chip de silencio (Fig. 3) y con chips de silencio (Fig. 4).

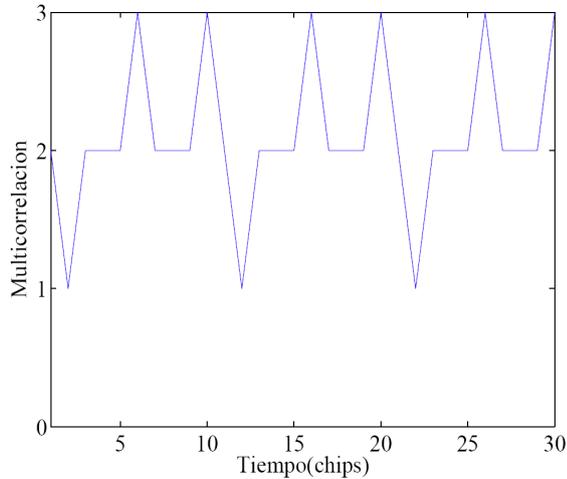


Fig. 3. Multicorrelación de la secuencia recibida y el código del primer usuario, $m = 3$ sin chips de silencio.

En este análisis se pone de manifiesto cómo los chips de silencio son imprescindibles para que la mejora producida al introducir varios chips de sincronismo sea efectiva por la siguiente razón. El comportamiento periódico que se observa en 3 presenta dos series de tres detecciones de sincronización separados por L periodos de chip, $\{10, 20, 30\}$ y $\{6, 16, 26\}$. Por lo tanto, se observa que en este caso los chips de silencio

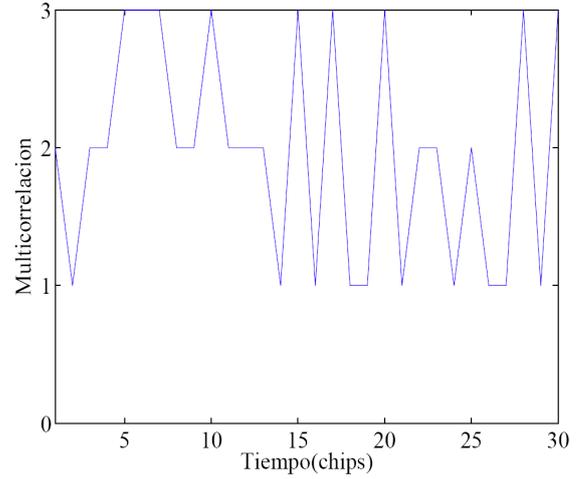


Fig. 4. Multicorrelación de la secuencia recibida y del código del primer usuario, $m = 3$ con chips de silencio.

no evitan la FA. Sin embargo, la Fig. 4 sólo presenta una serie, $\{10, 20, 30\}$. Por lo tanto, la FA es evitada al introducir chips de silencio entre los tres bits de sincronismo.

Una vez justificada la ventaja de estos chip de silencio cabe destacar que la introducción de estos en la secuencia de sincronismo no interfiere en otros usuarios, porque no introducimos pulsos, que son los causantes del MAI. El único inconveniente a tener en cuenta es que alarga levemente el proceso de adquisición. Sin embargo, aun en el peor de los casos, éste nunca demorará más de $m(L + N)$ periodos de chip, lo cual representa un aumento muy poco significativo frente a mL que es lo que duraría sin chips de silencio. Hay que recordar que $N \ll L$.

Tras la sincronización el emisor y el receptor cambiarán al estado de transmisión, donde todos los códigos son de longitud L y el cambio de secuencia en cada bit se realiza conforme al método descrito en la sección I.

III. RESULTADOS

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. Esta cota para la probabilidad de falsa alarma viene dada por la siguiente expresión [11]:

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

Se han llevado a cabo diferentes simulaciones para demostrar la fiabilidad de la expresión anterior sobre esquemas OCDMA en canales ópticos no guiados en interiores, y se ha comprobado que ésta representa un límite superior de probabilidad de error que nunca es superado en la práctica, siempre y cuando se den unas determinadas condiciones de relación señal a ruido (SNR, *signal-to-noise ratio*). Generalmente, esta cota superior de error mantiene un margen que puede llegar a superar en más de un orden de magnitud a los resultados obtenidos mediante simulación. Así, por ejemplo, para $N = 49$ usuarios interferentes, para códigos con parámetros $L = 900$ y $w = 20$, se tiene que las probabilidades P_{FA} teóricas son de 0.5477, $6.99 \cdot 10^{-4}$ y $5.445 \cdot 10^{-10}$ para $m = 1$, 2 y 4 respectivamente, obteniéndose en las simulaciones, aún en situaciones extremas de elevado tráfico de sincronización, unos valores de 0.04, $6 \cdot 10^{-4}$ y ninguna detección de falsa alarma para esos mismos casos. Por tanto, se puede concluir que la ecuación (1) representa una cota superior de error de sincronización por falsa alarma que rara vez podrá producirse en una aplicación real, por lo que nos permite determinar un valor óptimo para el parámetro m en función del resto de parámetros del sistema (N , L y w).

Según los resultados anteriores, utilizar $m = 4$ bits de sincronismo, permite una fiabilidad prácticamente perfecta de sincronización, con errores despreciables de falsas alarmas ($< 10^{-10}$). Con la idea de probar lo anterior en una aplicación más real, se diseñó un modelo de simulación constituido por una red de 50 dispositivos que utilizaban un esquema OCDMA con códigos ROC de parámetros $L = 900$ y $w = 20$, y se determinaron los fallos que se producirían en cuanto a paquetes perdidos en una situación de tráfico intenso para $m = 2$ y 4. Se observa un mejor desempeño frente a la SNR promedio del canal para $m = 4$, aunque no llega a ser lo suficientemente significativo con respecto a utilizar $m = 2$ (véase la Fig. 5). Por lo tanto, este último caso podría ofrecer un desempeño aceptable en una aplicación más real como la llevada a cabo en dicha simulación.

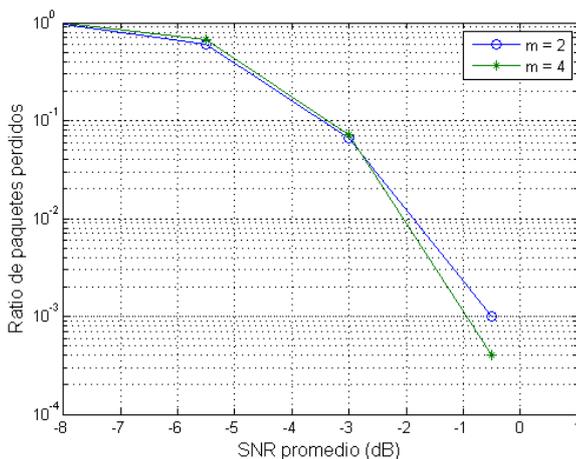


Fig. 5. Ratio de paquetes perdidos para $m = 2$ y 4 en un sistema OCDMA con $N = 49$, $L = 900$ y $w = 20$

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una técnica de sincronización de paquetes para esquemas OCDMA que hagan uso de los denominados códigos ópticos aleatorios (ROCs). Se ha obtenido una ecuación que permite 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). Se han llevado a cabo diferentes simulaciones para comprobar la fiabilidad de la expresión propuesta, obteniéndose resultados satisfactorios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por la European Space Agency (ESA, proyecto "Optical Wireless Intra-Spacecraft Communication", ESA Contract 19545/06/NL/GLC) y el plan nacional del Ministerio de Ciencia y Tecnología (TEC2006-13887-C05-01 y TEC2006-13887-C05-05).

REFERENCES

- [1] Salehi, J.A.: "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part I: Fundamental principles", in *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**, (8), pp. 824-833.
- [2] 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, **37**, (8), pp. 834-842.
- [3] 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.
- [4] —, "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.
- [5] —, "Random optical codes used in optical wireless network", in *IET Communications*, 2009, aceptado para publicación 15/01/2009.
- [6] González, O., Martín-González, J.A., Poves, E., López-Hernández, F.J., Pérez-Jiménez, J.: "Adaptive Code-Division Multiple-Access System for Communications over Indoor Wireless Optical Channels based on Random Optical Codes", in *IET Optoelectronics*, 2009, aceptado para publicación 11/03/2009.
- [7] Yang, G. C.: "Performance Analysis for Synchronization and System on CDMA Optical-Fiber Networks", in *IEICE Transactions on Communications*, 1994, **E77B**, (10), pp. 1238-1248
- [8] 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, **3899**, pp. 297-306.
- [9] 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, **10**, (8), pp. 1103-1105.
- [10] 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, **50**, (3), pp. 473-483.
- [11] 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.
- [12] Mashhadi, S., Salehi, J.A.: "Code division multiple access techniques in optical fiber networks—Part III: Systems performance analysis", in *IEEE Trans. Commun.*, 2006, **54**, (8), pp. 1457-1468.