

Generación y Correlación Eficiente de Macro-Secuencias a partir de Secuencias Complementarias

C. De Marziani, J. Ureña, A. Hernández, M. Mazo; J. J. García, A. Jiménez, J.M. Villadangos
M^a C. Pérez, A. Ochoa, F. Álvarez*.

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica, Campus Universitario, CP: 28805,
Alcalá de Henares, Madrid, España. Tel:+34 918856544 / Fax:+34 918856591

* Departamento de Electrónica y Electromecánica, Universidad de Extremadura, España

marziani@depeca.uah.es

Resumen — La codificación de emisiones mediante secuencias complementarias es ampliamente utilizada en sistemas de comunicaciones y multi-sensor. Estos esquemas de codificación poseen propiedades ideales en sus funciones de auto-correlación y correlación cruzada que hacen muy adecuado su empleo en sistemas de detección asíncrona. Sin embargo, debido a que más de una secuencia es asignada a un usuario, es necesario diseñar esquemas de transmisión eficientes. Un método simple consiste en establecer un orden de emisión de los bits de un conjunto; generando un nuevo código o secuencia denominada "macro-secuencia", la cual se puede emitir empleando una simple modulación en fase. No obstante, este mecanismo produce una degradación en las propiedades de la función de correlación de las secuencias generadas. En este trabajo se presenta un análisis para obtener grupos de macro-secuencias, denominadas "preferidas" las cuales presentan la mínima interferencia posible entre ellas, facilitando la detección simultánea de emisiones de forma asíncrona. Además, se presenta el modo de emplear los correladores eficientes desarrollados para las secuencias complementarias para la detección de señales codificadas mediante estas macro-secuencias.

I. INTRODUCCIÓN

Las secuencias binarias se utilizan frecuentemente como técnicas de compresión de pulso en diversas aplicaciones, tales como: comunicaciones, sistemas multi-sensor y estimación del canal de transmisión [1]. En el caso particular de los sistemas de detección asíncrona [1], es deseable que las características de las secuencias utilizadas permitan obtener funciones de auto-correlación (AC) donde los lóbulos laterales sean del mínimo valor posible comparado con el valor central de esta; y que los valores de correlación cruzada (CC) entre las diferentes secuencias que participan del sistema sea el mínimo posible. Existen diferentes algoritmos que permiten obtener secuencias binarias, pero que no cumplen perfectamente las propiedades descritas; ejemplos son las secuencias PN, códigos Barker, secuencias Walsh-Hadamard, etc [1].

Por otra parte, las secuencias complementarias [2], [3], presentan propiedades ideales en sus funciones de auto-correlación y de correlación cruzada.

Estas características hacen muy atractivo su uso en los sistemas donde varias emisiones simultáneas se realizan desde diversas fuentes independientes [4] [5] [6].

Entonces, puede plantearse un esquema de codificación caracterizado porque a cada usuario del sistema se le asigna un conjunto de M secuencias complementarias (M -CSC); siendo M una potencia de dos (i.e. $M=2^m$ donde $m \in \mathbb{N}-\{0\}$); además, es posible obtener M diferentes M -CSC cuyas propiedades de CC son nulas, esto es son mutuamente ortogonales (MO). La viabilidad de estos sistemas depende por una parte de la utilización de un correlador eficiente, que reduzca la carga computacional y la complejidad del hardware a implementar facilitando su procesamiento en tiempo real.[7] [8].

Además, es necesario diseñar esquemas de emisión eficientes, que permitan ajustarse a las características del hardware a utilizar, dado que más de una secuencia codifica a un usuario dado. El método más sencillo, y que menores requerimientos posee, consiste establecer un orden de emisión de los bits que compone un M -CSC [9], [10]. Con este mecanismo, a partir del M -CSC asignado a un usuario, se conforma una nueva secuencia denominada "macro-secuencia", que contiene los bits del M -CSC en el orden de emisión preestablecido. Luego, usando una modulación digital simple, por ejemplo *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*), la codificación puede ser transmitida. Sin embargo, utilizando "macro-secuencias", las propiedades ideales de la función de correlación se degradan.

Este trabajo analiza la degradación en las propiedades de correlación introducidas por el mecanismo de emisión propuesto y la manera de obtener grupos de estas, denominadas "preferidas", las cuales presentan las mejores propiedades en la función de AC y CC de todas las posibles. El trabajo se organiza de la siguiente manera: la sección II realiza una revisión de las propiedades de los M -CSC. La sección III detalla el proceso de emisión de M -CSC empleando macro-secuencias. En la sección IV se presenta un análisis para la obtención de macro-secuencias "preferidas".

La sección V presenta simulaciones y resultados con el esquema propuesto en este artículo. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en el análisis realizado.

II. CONJUNTOS DE SECUENCIAS COMPLEMENTARIAS

Un conjunto de M secuencias complementarias (M -CSC) es un grupo de secuencias binarias, cuyos elementos son 1 ó -1, donde la longitud de secuencias es $L=M^N$. Donde $M=2^m$ y $m, N \in \mathbb{N}-\{0\}$.

La suma de la función de AC aperiódica (ΣAC) de todas las secuencias del conjunto (1) es nula para cualquier desplazamiento temporal distinto de cero y tiene un máximo de $M \cdot L$ en el caso de que no exista desplazamiento en el tiempo.

$$\Sigma AC = \sum_{i=1}^M \phi_{S_{i,M}}[j] = \phi_{S_{1,M}}[j] + \dots + \phi_{S_{M,M}}[j] \quad (1)$$

$$\Sigma AC = M \cdot L \cdot \delta[j] = M \cdot M^N \cdot \delta[j] = M^{N+1} \cdot \delta[j]$$

Donde $\phi_{S_{i,M}}$ es la función de AC de cada una de las secuencias $S_{i,M}[k]$ que constituye el conjunto con $i \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$; y $\delta[j]$ la función delta de Krönecker.

Además, es posible obtener M M -CSC MO de modo que, dado dos M -CSC cuyas secuencias se denotan como $S'_{i,M}[k]$ y $S''_{i,M}[k]$ respectivamente, la suma de las funciones de correlación cruzada (ΣCC) entre las correspondientes secuencias de ambos conjuntos es:

$$\Sigma CC = \phi_{S'_{1,M} S''_{1,M}}[j] + \dots + \phi_{S'_{M,M} S''_{M,M}}[j] = 0 \quad \forall j \quad (2)$$

Donde $\phi_{S'_{i,M} S''_{i,M}}$ es la función de CC entre las secuencias $S'_{i,M}[k]$ y $S''_{i,M}[k]$.

Por otra parte, se han desarrollado diversos algoritmos recursivos para generar y correlar M -CSC llegando a una solución genérica para M secuencias en [8]. La implementación hardware que se obtiene a partir de este algoritmo permite obtener una estructura regular donde, partiendo de la estructura de $M/2$ -CSC, es posible obtener la arquitectura de generación o correlación de M -CSC. Además, permite obtener M conjuntos MO, simplemente cambiando los valores de una serie de coeficientes binarios. Dichos coeficientes constituyen la semilla de generación de cada conjunto y se describen a través de una matriz denominada \mathbf{W} [8].

Finalmente, en el caso de la implementación de la función de correlación, con esta arquitectura se reduce el número de operaciones a realizar y la complejidad del hardware si se compara con la implementación directa.

Debido a estas mejoras se obtiene un correlador eficiente para los M -CSC denominado M -ECSC (*Efficient Set of M Sequences Correlator*), que permite

obtener mejoras en el procesamiento en tiempo real de las señales capturadas.

III. EMPLEO DE MACRO-SECUENCIAS COMO MECANISMO DE EMISIÓN

Diversos esquemas pueden utilizarse para transmitir la codificación con M -CSC asignada a un usuario [9], [10]. El método más sencillo consiste en establecer un orden de emisión de los bits que compone el M -CSC. Por lo tanto, es necesario construir una nueva secuencia o código que se denominará "macro-secuencia" (M_s), y que está constituida por cada uno de los bits que componen las secuencias de un M -CSC (3), colocados en el orden de emisión preestablecido.

$$\mathbf{S}_{M(N)}^{(s)} = \begin{pmatrix} S_{1,M}^{(s)}[k] \\ S_{2,M}^{(s)}[k] \\ \vdots \\ S_{M-1,M}^{(s)}[k] \\ S_{M,M}^{(s)}[k] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1L} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{(M-1)1} & b_{(M-1)2} & \dots & b_{(M-1)L} \\ b_{(M)1} & b_{(M)2} & \dots & b_{(M)2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde $\mathbf{S}_{M(N)}^{(s)}$ es el M -CSC generado con una semilla s particular, siendo s la representación decimal de la matriz de coeficientes binarios \mathbf{W} [8]. Además, $S_{i,M}^{(s)}[k]$ denomina a cada secuencia del conjunto; b_{il} representa cada bit de la secuencia con $i \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ y $l \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$.

Para obtener la macro-secuencia de este conjunto, es posible concatenar cada secuencia del conjunto (4); o bien entrelazar (interleaving) cada uno de sus bits (5). De esta manera, la longitud final de la macro-secuencia será $L_{M_s} = M \cdot L$.

$$Msc_{(M,L)}^{(s)}[k] = [S_{1,M}^{(s)} \mid S_{2,M}^{(s)} \mid \dots \mid S_{M-1,M}^{(s)} \mid S_{M,M}^{(s)}] \quad (4)$$

$$Msi_{(M,L)}^{(s)}[k] = [S_{1,M}^{(s)} \otimes S_{2,M}^{(s)} \otimes \dots \otimes S_{M-1,M}^{(s)} \otimes S_{M,M}^{(s)}] \quad (5)$$

La generación de la macro-secuencia se denota como $Msc_{(M,L)}^{(s)}[k]$ que describe la concatenación de las secuencias del M -CSC utilizado de longitud L y semilla s . En el caso de emplear un interleaving para generar la macro-secuencia, esta se denotará como $Msi_{(M,L)}^{(s)}[k]$.

El orden de emisión de los bits depende de las características del canal de transmisión. Si se utiliza el método de concatenación, variaciones rápidas del canal de transmisión afectarán de manera diferente a las secuencias transmitidas. Si se utiliza un entrelazado, el efecto del canal se distribuye de manera más uniforme sobre los bits que componen la macro-secuencia. Finalmente, la nueva secuencia obtenida puede ser transmitida usando una modulación en fase [10], [11].

A. Procesamiento de las Macro-Secuencias en recepción

De acuerdo a los métodos de generación de M_s descritos, su función de correlación puede realizarse a través del correlador eficiente del M -CSC que ha generado sido utilizado para su conformación. Así, según el método de generación usado, la función de correlación de $M_s[k]$ puede ser definida como:

$$\begin{aligned} \phi_{M_s} &= \phi_{M_s, S_{1,M}}[k - (D_{M-1})] + \phi_{M_s, S_{2,M}}[k - (D_{M-2})] + \dots \\ &\dots + \phi_{M_s, S_{M-1,M}}[k - D_1] + \phi_{M_s, S_{M,M}}[k] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\phi_{M_s} = \sum_{i=1}^M \phi_{M_s, S_{i,M}}[k - (D_{M-i})]$$

Donde D_{M-i} es un retardo o desfase temporal cuyo valor depende del método usado para generar la macro-secuencia y que permite sumar en fase las funciones de correlación de la macro-secuencia con cada una de las secuencias que la constituye.

La implementación hardware de este algoritmo se muestra en la Fig.1. En el primer bloque, la señal capturada por el transductor se acondiciona y se demodula. Posteriormente, la señal $e[k]$ ingresa al correlador eficiente del M -CSC empleado para generar la macro-secuencia.

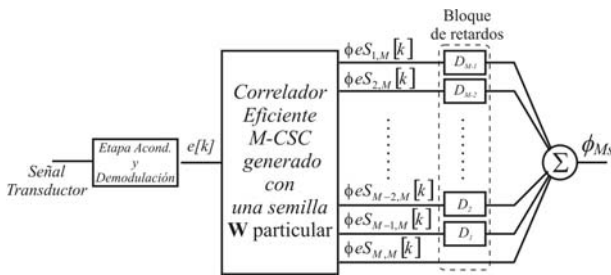


Fig. 1. Esquema para la correlación eficiente de señales codificadas empleando macro-secuencias.

Un aspecto importante a considerar en los correladores eficientes es que por efecto de la modulación de los bits es necesario modificar su estructura de retardos internos, ya que a cada bit se le asigna un símbolo de modulación que separa los bits de la M_s . Además, este efecto de espaciado es necesario considerarlo en el caso de emplear un interleaving para generar la macro-secuencia [12].

Finalmente, a las salidas obtenidas del correlador eficiente (denotadas como $\phi_{e, S_{i,M}}$) se les aplica una serie de retardos con el objetivo de sumar en forma correcta las correlaciones parciales de la $M_s[k]$, con cada una de las secuencias del M -CSC que la generó.

B. Características de la función de correlación de las macro-secuencias.

La Fig. 2 presenta la función de AC de una $Msi[k]$ en el caso particular de generarla empleando un 8-CSC de longitud $L=64$ con una semilla de generación en

valor decimal $s=0$ y utilizando entrelazado de bits. Al igual que en el caso del 8-CSC que generó la macro-secuencia, el valor máximo obtenido en la función de AC es $\phi_{M_s} = M \cdot L = 8 \cdot 64 = 512$ (véase la Fig. 2.a).

Debido al mecanismo de entrelazado utilizado, ahora aparecen lóbulos laterales distintos de cero, que corresponde a la suma parcial de las CC entre las diferentes secuencias del conjunto de acuerdo al desfase existente. Cabe destacar además que el tiempo de correlación se prolonga, a diferencia del caso ideal. La Fig. 3 muestra los resultados obtenidos en la función de correlación cruzada entre las $M_s^{(0)}_{(8,64)}$, $Msi[k]^{(8,64)}$ y $Msi[k]^{(48,64)}$ que se obtienen utilizando 8-CSC MO de forma ideal (véase la Fig.3.a).

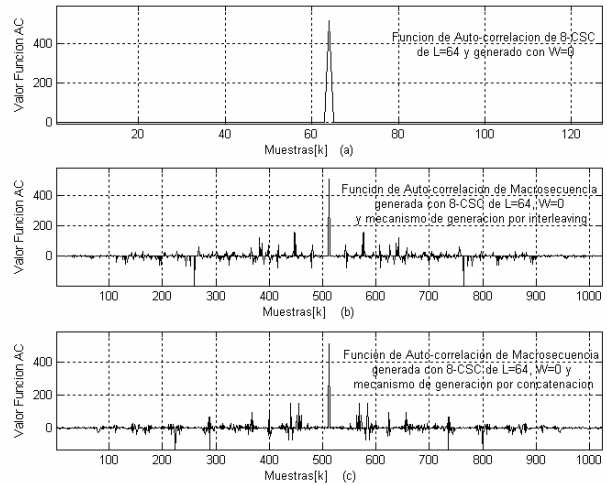


Fig. 2. Comparativa propiedades función de AC de M -CSC y macro-secuencias. a) Valor ideal utilizando 8-CSC de $L=64$ y $s=0$. b) Valores de AC en macro-secuencia generada a partir del entrelazado de sus bits. c) Valores de AC en macro-secuencias generada por concatenación de sus.

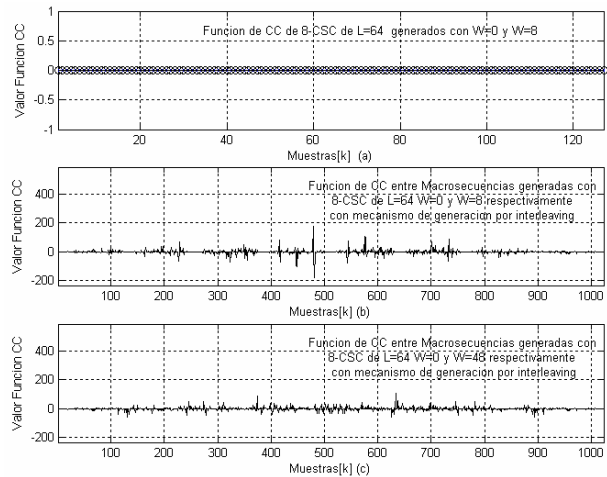


Fig. 3. Comparativa propiedades función de CC de M -CSC y macro-secuencias. a) Valor ideal utilizando 8-CSC de $L=64$ con $s=0$ y $s=8$. b) CC $M_s[k]$ generadas con entrelazado de sus bits utilizando 8-CSC de $L=64$ con $s=0$ y $s=8$. c) CC $M_s[k]$ generadas con entrelazado de sus bits del 8-CSC de $L=64$ con $s=0$ y $s=48$.

IV. OBTENCIÓN DE MACRO-SECUENCIAS PREFERIDAS

Como se observa en las Fig.2 y Fig.3, existe una degradación en las propiedades de las funciones de AC y CC de las secuencias, al ordenar los bits del M -CSS para su transmisión. A fin de reducir este efecto, es posible obtener grupos de macro-secuencias que presenten buenas propiedades tanto en la función de AC como de CC. En [1] se describen diversos factores de mérito que permiten evaluar las características de un grupo de secuencias. El más empleado consiste en obtener entre los códigos de un grupo, el valor máximo que se puede obtener en los lóbulos laterales de la función de AC (7) y el máximo valor de CC (8), esto es:

$$\theta_A = \max\left\{|\phi_{M_s i, x}[j]| \mid \forall j \neq 0 \wedge i = x/i, x = 1, 2, \dots, K\right\} \quad (7)$$

$$\theta_C = \max\left\{|\phi_{M_s i, x}[j]| \mid \forall j \wedge i \neq x/i, x = 1, 2, \dots, K\right\} \quad (8)$$

Donde i, x representan las diferentes M_s que se pueden obtener con un método particular de generación.

Finalmente, de estos dos valores se toma el máximo de ellos como valor característico del grupo y se lo define como "bound" del grupo analizado (9).

$$\theta = \max\{\theta_A, \theta_C\} \quad (9)$$

Con el objeto de buscar el grupo óptimo de macro-secuencias, se desarrolló un algoritmo de búsqueda exhaustiva. En ésta, se consideran las diversas combinaciones de M, L de M -CSC que son MO y que permiten obtener una misma L_{M_s} , utilizando los mecanismos de generación descritos anteriormente. Así para una dada combinación de estas variables, se realizan todas las combinaciones posibles en grupo μ ($\mu \leq M$) de macro-secuencias de una longitud dada L_{M_s} . Finalmente, aquellas combinaciones de μ macro-secuencias que posean el mínimo "bound" se denominarán como macro-secuencias "preferidas".

La Fig.4 detalla los resultados obtenidos en la búsqueda de grupos de $\mu=4$ macro-secuencias con mínimo bound, variando los valores de M y L de los M -CSC. El mismo procedimiento se repitió para el caso de $\mu=8$ macro-secuencias (véase la Fig. 5). En la Fig.4 y Fig. 5 es posible observar que el bound entre macro-secuencias disminuye cuando se incrementa la longitud L de los M -CSC que se utilizan para generarlas. De la misma manera, una reducción en el bound puede ser obtenido si el número de las secuencias del sistema se aumenta para una longitud dada L_{M_s} .

Por otra parte, considerando los mecanismos de generación, se observa que el procedimiento de concatenación permite obtener mejores resultados para longitudes cortas de macro-secuencias.

En el caso de requerir M_s de longitudes $L_{M_s} > 512$, el entrelazado de bits es más conveniente ya que permite obtener valores de bound prácticamente mínimos y las variaciones rápidas que puedan existir en el canal afectaran de manera más uniforme a los bits de las secuencias.

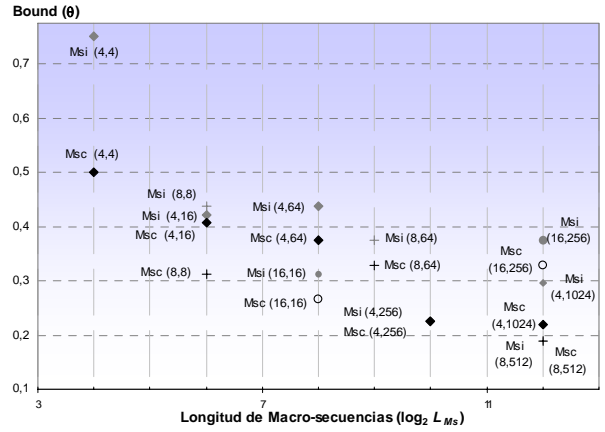


Fig. 4. Valores mínimos de bound obtenidos en la búsqueda de $\mu=4$ macro-secuencias preferidas de longitud L_{M_s} , obtenidas a partir de diferentes combinaciones de M, L y variando el mecanismo de generación. (Msi: entrelazado, Msc.: concatenación).

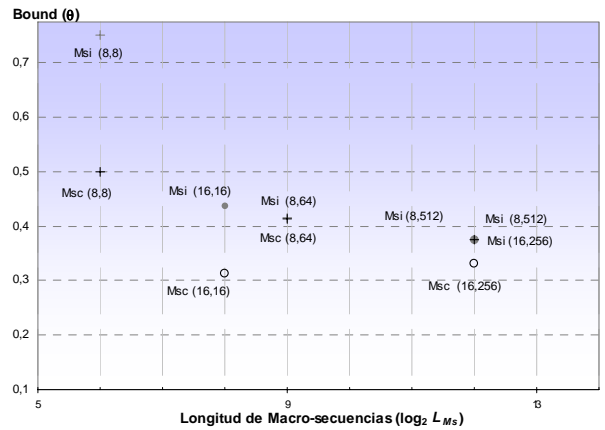


Fig. 5. Valores mínimos de bound obtenidos para $\mu=8$ macro-secuencias preferidas de longitud L_{M_s} , obtenidas a partir de diferentes combinaciones de M, L y variando el mecanismo de generación. (Msi: entrelazado, Msc.: concatenación).

Finalmente, la Fig. 6 resume el bound obtenido cuando los grupos de macro-secuencias "preferidas" se obtienen a partir de M -CSC donde $M=L$. Este caso tiene una implementación hardware muy atractiva porque solamente se requiere una sola etapa del correlador eficiente (M -ESSC). Cuando las macro-secuencias preferidas se generan mediante M -CSC donde $L > M$, con $L=M^N$, es necesario conectar en cascada N etapas de correlación, dificultando la sincronización de dicho algoritmo.

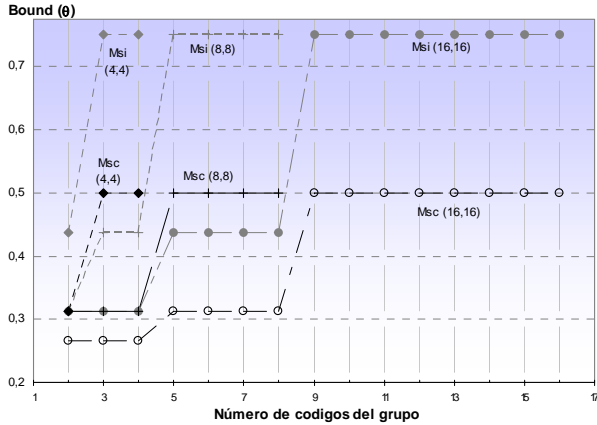


Fig. 6. Comparativa de valores mínimos de bound entre macro-secuencias "preferidas" de longitud L_{Ms} , obtenidas a partir de M-CSC donde $M=L$ y variando los mecanismos de generación. (Msi: entrelazado, Msc: concatenación).

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presentan la utilización de la estrategia propuesta para reducir la interferencia entre emisiones. Se realizaron simulaciones de emisiones simultáneas según el esquema propuesto en la Fig. 8, donde se distribuyen cuatro emisores a diferentes distancias, emitiendo la macro-secuencia asignada a cada uno de ellos.

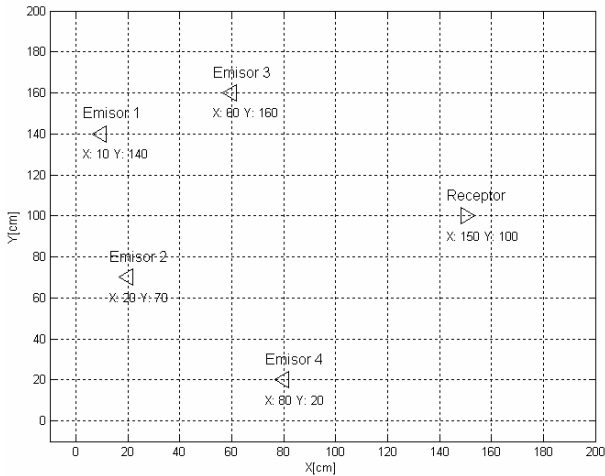


Fig. 8. Distribución de emisores/receptores simulado para la emisión y detección simultánea de macro-secuencias.

El proceso de emisión consiste en transmitir tres veces, a una frecuencia de 30 kHz, la macro-secuencia asignada a cada emisor empleando una modulación BPSK, con un símbolo por bit de código. La relación señal-ruido (SNR) del sistema es -3dB. En un primer caso se emiten macro-secuencias generadas a partir de 4-CSC MO, seleccionando semillas de generación $s=0$, $s=4$, $s=8$ y $s=12$ respectivamente, y concatenando sus secuencias.

El segundo caso de análisis consiste en emitir macro-secuencias generadas a partir de 8-CSC MO, empleando semillas de generación $s=0$, $s=3$, $s=5$ y $s=6$ respectivamente, y nuevamente concatenando sus secuencias. El proceso de recepción empleado es el descrito en la Fig. 1, considerando retardos para correlar macro-secuencias por concatenación y empleando un correlador eficiente modificado para la frecuencia de emisión propuesta.

La Fig. 9 muestra la detección de las señales, según el esquema de procesamiento de la Fig. 1, para el caso de $Msc[k]$ obtenidas con $M=4$, $L=16$ empleando concatenación de secuencias para su generación.

Por otra parte, la Fig. 10 muestra la detección de las emisiones cuando se emplean $Msc[k]$ "preferentes" generadas por la concatenación de las secuencias de 8-CSC de longitud $L=8$.

En ambos casos, se ha empleado un mecanismo de validación de picos como el descrito en [11], donde se utiliza un primer umbral fijo de descarte al 80% del valor máximo esperado. Como se observa en la Fig. 10, empleando macro-secuencia "preferentes" es posible validar correctamente los picos de cada transmisión a diferencia del caso descrito en la Fig. 9 donde no es posible detectar algunos de los picos de correlación.

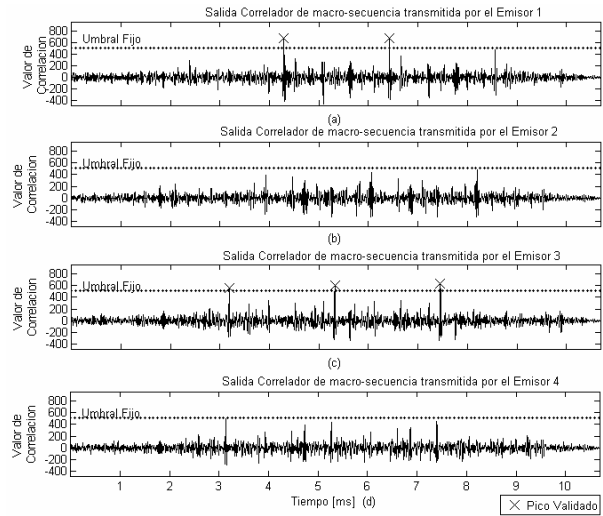


Fig. 9. Salida de correladores propuestos en la Fig.1 para detección de transmisiones realizadas por cada emisor empleando macro-secuencias generadas con 4-CSC de $L=16$ y concatenadas. a) Correlador de $Msc[k]$ de semilla $s=0$. b) Correlador de $Msc[k]$ de semilla $s=4$. c) Correlador de $Msc[k]$ de semilla $s=8$. d) Correlador de $Msc[k]$ de semilla $s=12$.

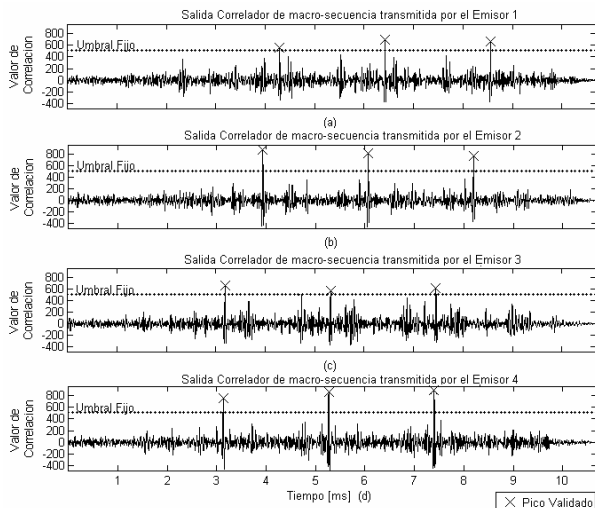


Fig. 10. Salida de correladores propuestos en la Fig.1 para detección de transmisiones realizadas por cada emisor empleando macro-secuencias "preferentes" generadas con 8-CSC de $L=8$ y concatenadas. a) Correlador de $Ms[k]$ de semilla $s=0$. b) Correlador de $Ms[k]$ de semilla $s=4$. c) Correlador de $Ms[k]$ de semilla $s=5$. d) Correlador de $Ms[k]$ de semilla $s=6$.

V. CONCLUSIONES

Se ha analizado la problemática asociada a la transmisión de codificaciones con M -CSC cuando no es posible emitir simultáneamente las secuencias del conjunto. Debido a las técnicas de emisión analizadas, las características ideales de los M -CSC se degradan. Para reducir este problema se realizó un análisis exhaustivo que permite utilizar grupos de macro-secuencias "preferidas" cuyas propiedades de AC y CC permitan obtener la mínima interferencia posible entre ellas. Facilitando la detección simultánea de las emisiones en un receptor determinado en condiciones de SNR muy bajas.

Por otra parte, con el esquema propuesto se puede emplear los algoritmos de implementación eficiente, desarrollados para las secuencias complementarias, que permiten reducir la cantidad de operaciones a realizar y la complejidad de las mismas; permitiendo así un procesamiento en tiempo real de las señales. Para el caso particular de utilizar una sola etapa del correlador eficiente ($M=L$), se analizó el *bound* que se puede obtener entre grupos de diferentes usuarios. En este caso, cuando se aumenta el número de secuencias del conjunto, es posible reducir el *bound* del grupo. El uso de una sola etapa del correlador eficiente facilita la implementación del algoritmo de correlación al no requerir el conexionado en cascada de varias etapas, con la consecuente reducción en los esfuerzos de sincronización del sistema.

VI. AGRADECIMIENTOS

Esto trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto PARMEI (ref. Dip 2003-08715-c02-01), el proyecto ISUAP (ref. PI2004/033), el proyecto ANESUS (CAM-UAH2005/016) y el Servicio de Gestión de la Investigación de la Universidad de Alcalá.

REFERENCIAS

- [1] Fan, P. And Darnell, M.; "*Sequence Design for Communications applications*", First Edition, Research Studies Press LTD, Great Britain, ISBN: 086380201X.
- [2] Golay M. J. E.; "*Complementary series*", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 7, Issue: 2, April 1961, pp.: 82-87.
- [3] Tseng, C. and Liu, C.; "*Complementary sets of sequences*", IEEE Transactions on Information Theory, IT-18, (5), September 1972, pp. 644-652.
- [4] Budisin S.; Popovic B.; Indjin I.; "*Designing radar signals using complementary sequences*", Proceedings of IEE International Conference on Radar 87, London, October 1989, pp.: 593-597.
- [5] Wong, K.; O'Farrell, T.; "*Spread spectrum techniques for indoor wireless IR communications*", IEEE Wireless Comms., Vol. 10, Issue: 2, April 2003, pp.: 54-63.
- [6] Shuangquan Wang; Abdi, A.; "Aperiodic Complementary Sets of Sequences-Based MIMO Frequency Selective Channel Estimation"; Communications Letters, IEEE, Vol. 9, Issue 10, Oct. 2005, pp.:891-893.
- [7] Popovic, B.; "*Efficient Golay Correlator*", Electronic Letters, Vol. 35, Issue 17, 19 Aug. 1999, pp.:1427-1428.
- [8] De Marziani, C.; Ureña, J.; Hernández, A.; Mazo, M., M.; Álvarez, F.; García, J.; Donato, P.; "*Modular Architecture for Efficient Generation and Correlation of Complementary Set of Sequences*", IEEE Transactions on Signal Processing; Accepted for it publication., T-SP-03461-2005.R1. December, 2005.
- [9] Lee, B. B. and Furgason, E. S.; "*Golay Codes for Simultaneous Multi-Mode Operation in Phased Arrays*", IEEE Ultrasonic Symp. Proceedings, 1982, pp. 821-825.
- [10] Álvarez, F. J.; Ureña, J.; Garcia, J. J.; Mazo, M. ; De Marziani, C.; Hernandez, Á.; Villadangos, J. M.; "*A comparative analysis of two modulation schemes for the efficient transmission of complementary sequences in a pulse compression ultrasonic system*" IADAT-tcn2004 International Conference on Telecommunications and Computer Networks. Proceedings of IADAT-tcn2004. ISBN: 84-933971-1-3. San Sebastian, Spain, December 2004.
- [11] Hernández, A.; "*Aplicación de arquitecturas reconfigurables al diseño de sistemas sensoriales ultrasónicos*", PhD. Tesis, University of Alcalá.
- [12] Álvarez, F. J.; Hernández, A.; Ureña, J.; Mazo, M.; García, J.J.; Jiménez, J.; Jiménez, A.; "*Real-time Implementation of an Efficient Correlator for Complementary Sets of Four Sequences Applied to Ultrasonic Pulse Compression Systems*"; Microprocessors and Microsystems, Vol: 30/1, pp: 43-51, January 2006.