

## Análisis y modelado de una estructura sensorial ultrasónica MIMO basado en M-CSS y técnicas de correlación

Alberto Ochoa<sup>a,\*</sup>, Jesús Ureña<sup>b</sup>, Álvaro Hernández<sup>b</sup>, Apolinar González<sup>a</sup>, Walter Mata<sup>a</sup>, Ramón A. Félix<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad de Colima, Car. Colima-Coquimatlán km. 9, 28400, Colima, México.

<sup>b</sup> Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, Campus Universitario S/N, 28805, Alcalá de Henares, España.

### Resumen

En este artículo se propone el análisis y modelado de una estructura sensorial ultrasónica empleando un algoritmo de procesamiento que utiliza un conjunto de macro-secuencias y técnicas de correlación para obtener respuestas impulsivas de canales de transmisión de forma simultánea. La estructura sensorial está formada por múltiples transductores ultrasónicos que transmiten y reciben información del entorno simultáneamente. Este algoritmo de procesamiento emplea una macro-secuencia pseudo-aleatoria obtenida a partir un conjunto complementario de M secuencias (M-CSS) con las cuales, mediante funciones de auto-correlación y correlación cruzada, se generan las respuestas impulsivas del entorno. Para modelar el sistema de transmisión ultrasónico se emplea el modelo MIMO de frecuencia selectiva, con el cual se logra analizar cada instante del proceso de emisión-reflexión-recepción de las señales generadas. Una vez que el modelo del sistema de transmisión ultrasónico MIMO es desarrollado y los algoritmos de correlación son implementados para la detección de las macro-secuencias, se presenta en este documento el modelo matemático y los resultados obtenidos en las simulaciones así como en las pruebas experimentales. Estos validan la utilización de la metodología del modelado de canal aplicado, como de la estimación de las respuestas impulsivas de los canales de transmisión al procesar los ecos recibidos correspondientes a un objeto frente al sistema sensor. El modelo implementado permite desarrollar sobre de él, algoritmos y técnicas de procesamiento, antes de que estos sean implementados físicamente, con el fin de reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones. En cada uno de los casos considerados, se logró obtener las respuestas impulsivas considerando que está presente un objeto frente a la estructura sensorial. *Copyright* © 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

### Palabras Clave:

Estructura Sensorial Ultrasónica, Macro-Secuencia, Modelo MIMO de Frecuencia Selectiva, Conjunto Complementario de M secuencias, Técnicas de Correlación.

### 1. Introducción

Los sistemas de localización y clasificación ultrasónicos han sido modificados casi en su totalidad conforme avanza la tecnología con el fin de incrementar su eficiencia en ellos. Estas modificaciones repercuten en el incremento de la capacidad de procesamiento tanto en la etapa de emisión como en la de recepción, puesto que utilizan algoritmos de naturaleza más compleja en ambas etapas. Los diferentes sistemas sonar ultrasónicos aplicados a la robótica emplean en sus estructuras sensoriales una cantidad variable de transductores (Jiménez et al., 2005)(Araújo et al., 2014), así como distintas configuraciones geométricas de estos elementos que interactúan con el entorno, con el fin de mejorar los sistemas de reconocimiento de objetos

en entornos 3D (Ochoa et al., 2009); Sin embargo, para realizar una correcta clasificación es necesario que los datos extraídos del sistema sensorial contengan información relevante y libre de ruido e interferencias. Para poder realizar esta tarea, es necesario aplicar algoritmos de bajo nivel para modelar los canales de transmisión que permitan reducir el ruido y a su vez extraer la mayor cantidad de información posible del medio.

La utilización de dos o más transductores funcionando de manera simultánea en la etapa de emisión y recepción involucra un cambio en el modelo tradicional del sistema de sensado; obligando a utilizar técnicas que provean información detallada de los canales físicos de transmisión del sensor en cualquier instante de tiempo. Los sistemas de transmisión que emplean un modelo MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) son usados comúnmente cuando dicho sistema utiliza múltiples antenas o transductores, los cuales trabajan tanto como emisores y/o receptores (Ochoa et al., 2009; Ochoa et al., 2006). Para el caso de una transmisión y recepción simultánea, donde se involucran múltiples emisores y receptores, la función de transferencia permite establecer una relación entre cada emisor y receptor, generando con ella un modelo MIMO del sistema de transmisión.

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: [aocchoa@ucool.mx](mailto:aocchoa@ucool.mx) (Alberto Ochoa), [urena@depeca.uah.es](mailto:urena@depeca.uah.es) (Jesús Ureña), [alvaro@depeca.uah.es](mailto:alvaro@depeca.uah.es) (Álvaro Hernández), [apogon@ucool.mx](mailto:apogon@ucool.mx) (Apolinar González), [wmata@ucool.mx](mailto:wmata@ucool.mx) (Walter Mata), [rfelix@ucool.mx](mailto:rfelix@ucool.mx) (Ramón Félix)

URL: <http://miespacio.ucool.mx/aocchoa> (Alberto Ochoa)

Dependiendo del entorno, una señal emitida por un transductor ultrasónico  $T_{emisor}$  llega al receptor  $T_{receptor}$  a través de diferentes caminos pudiendo ser descrita usando un modelo de propagación multi-camino (*Multipath*). Hay diferentes técnicas para estimar la respuesta impulsiva ( $h[k]$ ) de un canal de transmisión (Ochoa et al., 2006; Siyau et al., 2003; Docmac et al, 2013; Matin et al., 2013), por ejemplo la excitación del sistema con un pulso corto o con una señal pre-seleccionada codificada para posteriormente realizar la auto-correlación. En trabajos donde se emplean técnicas como la auto-correlación o correlación cruzada de la señal recibida con señales predefinidas, es normal encontrar en estos codificaciones con secuencias pseudo-aleatorias (Xianbin et al., 2004) o secuencias complementarias (De Marziani et al., 2007; De Marziani et al., 2012; Ruiz et al., 2014).

En el presente trabajo se modela un sensor ultrasónico MIMO con multi-transductor estimándose la respuesta impulsiva de los canales de transmisión generados en el sistema MIMO mediante el esquema de acceso múltiple por división de código (CDMA) (Sarma et al., 2014). El modelo matemático del sistema ultrasónico propuesto, el cual está basado en el esquema MIMO de Frecuencia Selectiva (Pitarokoilis et al., 2014; Satchidanandan et al., 2014), está formado por cuatro transductores que emiten simultáneamente una señal codificada (macro-secuencia) particular y diferente, asignada a cada uno de los transductores; de manera simultánea, en cada receptor los ecos son recibidos y procesados para obtener sus correspondientes respuestas impulsivas, las cuales están relacionadas con cada emisión y sus canales físicos de transmisión entre cada emisor y el receptor considerado. Cada Macro-Secuencia o secuencia directa está formada a partir de un Conjunto Complementario de  $M$  Secuencias ( $M$ -CSS), permitiendo aprovechar sus propiedades de auto-correlación y correlación cruzada mejorando la determinación de las respuestas impulsivas.

El resto del trabajo está organizado como sigue: en la sección II se introducen los conjuntos complementarios de  $M$  secuencias que forman las macro-secuencias; en la sección III se propone la estructura sensorial ultrasónica que puede realizar múltiples emisiones y recepciones; en la sección IV se explica el modelo del sistema ultrasónico MIMO; en la sección V se introduce un método para realizar la detección de los picos de correlación y su procedencia; en la sección VI se presentan algunos resultados obtenidos en las simulaciones; en la sección VII se muestran los resultados experimentales obtenidos con el sistema propuesto y finalmente, las conclusiones son mencionadas en la sección VIII

## 2. Generación de Macro-secuencias a partir de Conjuntos Complementarios de M Secuencias

Una importante característica del sistema ultrasónico MIMO descrito en el presente trabajo es la posibilidad de tener una emisión y recepción simultánea empleando múltiples transductores. Para lograr esta simultaneidad se utilizan macro-secuencias formadas a partir de un conjunto complementario de  $M$  secuencias binarias ( $M$ -CSS), donde cada secuencia del conjunto contiene sólo valores de +1 y/o -1. Todas las secuencias del conjunto son de longitud  $L$  y la principal propiedad de éste es que la suma de sus funciones de auto-correlación (AC) aperiódicas es igual a  $M \cdot L$  para un desplazamiento nulo y cero para cualquier otro instante (De Marziani et al., 2007; De Marziani et al., 2012; Álvarez et al., 2004). De forma general, la suma  $y[k]$  de las funciones de AC  $\phi_{aa}[k]$  es

$$y[k] = \sum_{s=1}^M \phi_{a_s a_s}[k] = \begin{cases} M \cdot L, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Donde  $\{a_1 a_2 \dots a_{M-1} a_M\}$  son las  $M$  secuencias del conjunto de longitud  $L$ . A través de trabajos previos se establece cómo un conjunto  $M$ -CSS de longitud  $L$  se obtiene utilizando un generador eficiente de conjuntos complementarios (ESSG) y cómo se identifica empleando un correlador eficiente de conjuntos de secuencias (ESSC) (De Marziani et al., 2007; De Marziani et al., 2012; Álvarez et al., 2004). Estas herramientas fueron construidas para generar y correlacionar dichos  $M$ -CSS y su principal objetivo es reducir el número de operaciones que ha de realizar. A modo de ejemplo, en la Figura 1(a) se muestra la suma de las funciones de AC (ideal) de un conjunto 32-CSS con 32 secuencias de longitud 32, generado con un ESSG empleando una semilla  $W=8$ . Así mismo, en la Figura 1(b) se muestra la correlación cruzada entre dos diferentes conjuntos 32-CSS, cada uno con 32 secuencias de longitud 32 y con semillas de generación  $W=8$  y  $W=10$ . Para obtener la información presentada en ambas gráficas se emplea un ESSC para generar los valores correspondientes a la auto-correlación y la correlación cruzada de los conjuntos mencionados. Para obtener la señal codificada mencionada al inicio de esta sección usada para excitar cada emisor, se debe considerar que cada una de las  $M$  secuencias del conjunto  $M$ -CSS son concatenadas para construir una *Macro-Secuencia* ( $MS$ ) de una longitud ( $L_S$ ) total de  $M \cdot L$ .

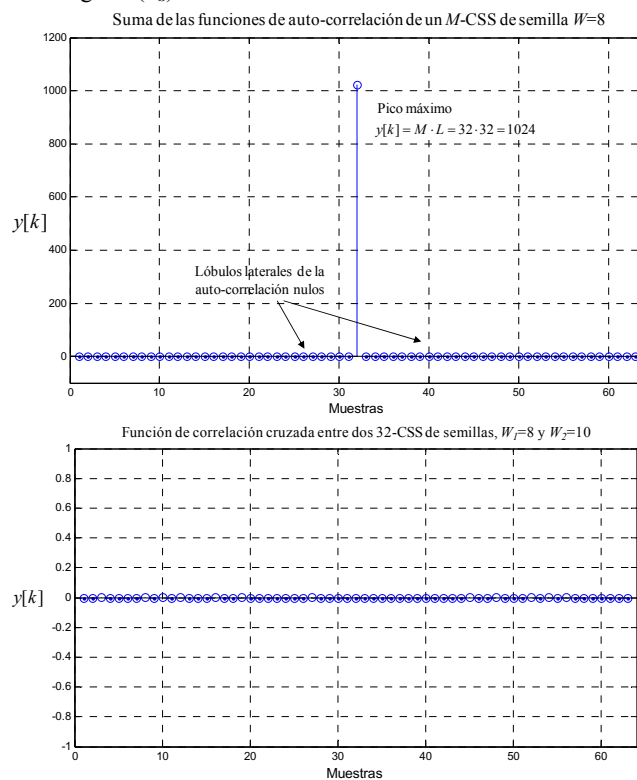


Figura 1: Gráfica correspondiente a la (a) auto-correlación de un conjunto 32-CSS de 32 secuencias de longitud 32 con semilla  $W= 8$  y a la (b) correlación cruzada entre dos conjuntos 32 CSS de semillas  $W=8$  y  $W=10$ .

El conjunto  $S_{M(L)}^W$  de secuencias utilizado para realizar este proceso se observa en la ecuación (2), mientras que en la ecuación (3) se muestra la *Macro-Secuencia*  $MS^W[k]$  formada al concatenar

cada una de las  $M$  secuencias del conjunto generado con la semilla  $W$  que excitará a un transductor del sistema sensor durante la etapa de emisión. El superíndice  $W$  indica la semilla con que se generó el conjunto de secuencias  $\mathbf{S}$ , así como la macro-secuencia.

$$\mathbf{S}_{M(L)}^W = \begin{pmatrix} S_{1,L}^W[k] \\ S_{2,L}^W[k] \\ \vdots \\ S_{M-1,L}^W[k] \\ S_{M,L}^W[k] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,L} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M-1,1} & x_{M-1,2} & \cdots & x_{M-1,L} \\ x_{M,1} & x_{M,2} & \cdots & x_{M,L} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{MS}^W[k] = [x_{1,1} \ x_{1,2} \ \cdots \ x_{1,L-1} \ x_{1,L} \ x_{2,1} \ x_{2,2} \ \cdots \ x_{2,L-1} \ x_{2,L} \ \cdots \ x_{M,1} \ x_{M,2} \ \cdots \ x_{M,L-1} \ x_{M,L}] \quad (3)$$

donde  $\mathbf{S}_{M(L)}^W$  es un  $M$ -CSS,  $S_{n,L}^W[k]$  ( $n=1, 2, \dots, M$ ) que representa cada secuencia del conjunto generado con semilla  $W$ ,  $x_{n,l}$  ( $l=1, 2, \dots, L$ ) correspondiente a cada bit de la secuencia. Para adaptar la señal al ancho de banda de un transductor, cada bit de la  $MS^W$  se transmite mediante una modulación digital (BPSK), usando un símbolo de modulación que consiste en dos periodos de una señal cuadrada a una frecuencia de 50kHz. De forma general, la función de AC  $\phi_{MS}[k]$  de una macro-secuencia  $MS$  está dada por la ecuación

$$\phi_{MS}[k] = \sum_{m=1}^{L_S} MS[m] \cdot MS[m+k] \quad (4)$$

donde  $L_S$  representa la longitud de la macro-secuencia y  $m \in \{1, 2, \dots, L_S\}$ . Como la  $MS[k]$  construida por concatenación está constituida por  $M$  secuencias del  $M$ -CSS generado con la semilla particular  $W$ , su función de AC  $\phi_{MS}[k]$  contiene la suma de las ACs entre las  $n$ -ésimas secuencias  $S_{n,L}^W$  del conjunto  $M$ -CSS y la suma de las correlaciones cruzadas (CC) entre las distintas secuencias ( $S_{n,L}^W$  y  $S_{n',L}^W$ ) del referido conjunto. Por lo tanto se obtiene que

$$\phi_{MS}[k] = \sum_{n=1}^M \phi_{S_{n,L}^W}[k] + \sum_{n=1}^M \sum_{\substack{n'=1 \\ n \neq n'}}^M \phi_{S_{n,L}^W S_{n',L}^W}[k - (n' - n) \cdot L] \quad (5)$$

donde  $\phi_{MS}[k]$  es la AC de la macro-secuencia  $MS$  generada por concatenación;  $\phi_{S_{n,L}^W}[k]$  es la AC de la  $n$ -ésima secuencia del  $M$ -CSS utilizado para generar la  $MS$ ; y  $\phi_{S_{n,L}^W S_{n',L}^W}[k]$  es la CC entre la  $n$ -ésima y  $n'$ -ésima secuencias del conjunto con un retardo de  $(n' - n) \cdot L$  muestras. Por otra parte, la función  $\phi_{MS_1 MS_2}[k]$  de CC entre dos macro-secuencias  $MS_1$  y  $MS_2$  generadas por concatenación con distintos  $M$ -CSS, está definida por:

$$\phi_{MS_1 MS_2}[k] = \sum_{n=1}^M \phi_{S_{n,L}^W S_{n',L}^W}[k] + \sum_{n=1}^M \sum_{\substack{n'=1 \\ n \neq n'}}^M \phi_{S_{n,L}^W S_{n',L}^W}[k - (n' - n) \cdot L] \quad (6)$$

donde  $\phi_{MS_1 MS_2}[k]$  es la función de CC entre  $MS_1$  y  $MS_2$ ;  $W$  y  $W'$  son las semillas de generación de cada conjunto tal que  $W, W' \in \{0, 1, 2, \dots, L-1\}$  y  $W \neq W'$ ;  $\phi_{S_{n,L}^W S_{n',L}^W}[k]$  es la función de CC entre cada  $n$ -ésima secuencia de los conjuntos referidos; y  $\phi_{S_{n,L}^W S_{n',L}^W}[k]$  es la función de CC entre la  $n$ -ésima y la  $n'$ -ésima secuencias generadas con un retardo de  $(n' - n) \cdot L$  muestras.

La Figura 2.(a) muestra la función de AC de una  $MS^W$  obtenida a partir de la concatenación de las 32 secuencias de un conjunto 32-CSS, con una longitud de las secuencias de 32 y generado con una semilla  $W=8$ . Como se observa, aparecen lóbulos laterales en la función de AC de la  $MS$  por efecto de la ordenación de los bits. Sin embargo, el lóbulo principal de la  $MS$  detectada mantiene su amplitud en comparación a la AC de un 32-CSS. En la Figura 2.(b) se representa la CC entre dos  $MS$  generadas por concatenación a partir de dos semillas distintas  $W_1$  y  $W_2$ ; en esta se observa que la CC entre las dos  $MS$  no es nula a diferencia de la CC entre dos  $M$ -CSS, sin embargo mantiene valores relativamente bajos en comparación a la AC.

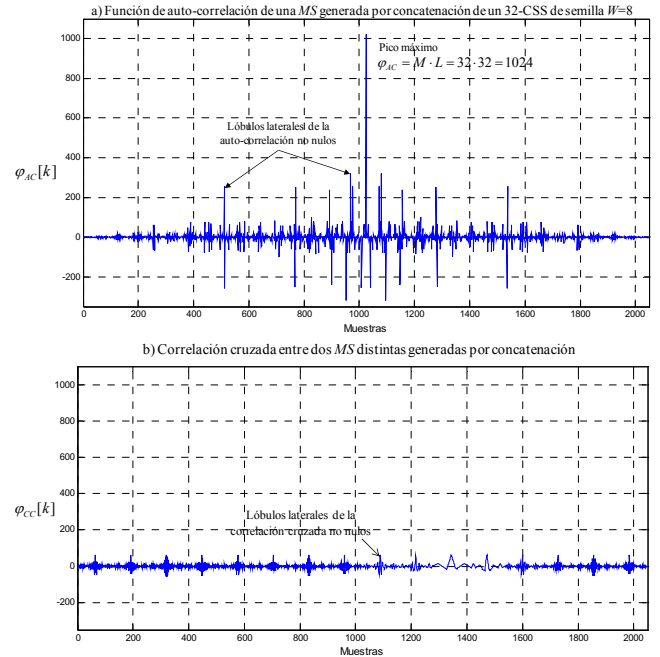


Figura 2: Gráfica correspondiente a la (a) Auto-correlación de una  $MS$  generada por concatenación de un 32-CSS de semilla  $W=8$  y (b) Correlación cruzada entre dos  $MS$  concatenadas a partir de las semillas  $W_1 \neq W_2$ .

### 3. Estructura sensorial ultrasónica MIMO propuesta

Las estructuras sensoriales ultrasónicas empleadas en los sistemas de localización y clasificación de objetos pueden estar conformadas por múltiples transductores y con distintas configuraciones geométricas; con el fin de obtener información

más detallada del entorno que rodea al sensor ultrasónico, mientras que aquellas estructuras que cuenten con más elementos, pueden ser capaces de obtener mayor información en un solo proceso de lectura. Otros problemas que se pueden resolver al incrementar el número de transductores con que cuenta la estructura, son la resolución angular además de minimizar aquellos que están relacionados con las reflexiones especulares.

La estructura sensorial que se presenta en este trabajo, está formada por múltiples transductores ultrasónicos que pueden extraer información del entorno para aplicaciones, tales como localización, clasificación y reconocimiento de objetos, es más posible en un solo proceso de lectura. La configuración física diseñada permite extraer datos en dos o tres dimensiones, lo cual la hace más completa que las presentadas en otros trabajos (Jiménez et al., 2005; Hernández et al., 2004). Una de las características destacables de esta estructura es que las señales asignadas a cada emisor son transmitidas simultáneamente empleando señales codificadas. El esquema de codificación debe de permitir la identificación simultánea de las diferentes señales emitidas después de reflejarse en el entorno, y mediante un solo proceso de lectura lograr extraer toda la información posible para un análisis posterior. En la Figura 3a se muestra la estructura física del sensor ultrasónico, el cual está constituido por  $\mu$  número de transductores que actúan como emisores y receptores a la vez.

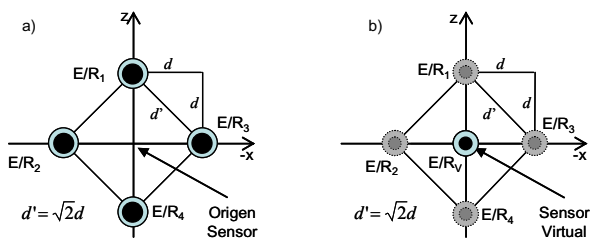


Figura 3: (a) Estructura Física del sensor ultrasónico formado por 4 transductores ultrasónicos. (b) Sensor virtual  $E/R_v$  que sustituye a los transductores de la estructura sensorial y está centrado en el origen.

La configuración presentada dispone de 4 transductores que emiten simultáneamente una señal codificada (SC) asignada a cada emisor, y así mismo proveer información suficiente del entorno al captar los ecos reflejados en el entorno de forma concurrente en cada proceso de lectura. Esta estructura está formada por un sensor vector horizontal y un sensor vector vertical, mismos que permiten obtener información en ambos ejes. La distancia  $d$  que existe entre transductores es pequeña comparada con la distancia  $r$  que puede existir entre un reflector y la propia estructura sensorial ( $d \ll r$ ), lo que permite reducir la correspondencia de ecos. Para efectos del sistema propuesto, se debe considerar que si la distancia  $d$  entre transductores se reduce tanto hasta que estén contiguos, se dificulta la identificación de dichos ecos, afectando el funcionamiento del sistema sensor reduciendo su alcance considerablemente. Debido a esta premisa se puede considerar que el patrón de emisión/recepción de cada uno de los transductores es único y está centrado en el origen de coordenadas de la estructura sensorial. Esta característica de la estructura convierte a los múltiples transductores ultrasónicos en uno sólo (sensor virtual  $E/R_v$ ), que como se mencionó, está centrado en el origen (véase Figura 3b).

Después de emitir simultáneamente con los transductores las señales codificadas asignadas a cada uno, los ecos correspondientes son detectados y pueden ser discriminados en los receptores en cada proceso de lectura al aplicar técnicas como

algoritmos de correlación. En la tabla 1 se relaciona el total de emisiones y recepciones que el sistema sensor ultrasónico puede ser capaz de realizar. La señal emitida por el transductor  $E/R_1 \rightarrow SC_1$ , después de ser reflejada en el entorno, es recibida  $Echo_1$  por los transductores  $E/R_1, E/R_2, E/R_3, E/R_4$ . De forma similar, cada señal emitida por los transductores  $E/R_2, E/R_3, E/R_4$ , es recibida por cada uno de los transductores ( $E/R_{1,2,3,4}$ ) de la estructura sensorial, después de reflejarse en el entorno.

Tabla 1: Relación de emisiones/recepciones de la estructura sensorial propuesta

Transductor emisor	Transductor Receptor
$E/R_1 \rightarrow SC_1$	$Echo_1 + Echo_2 + Echo_3 + Echo_4 \rightarrow E/R_1$
$E/R_2 \rightarrow SC_2$	$Echo_1 + Echo_2 + Echo_3 + Echo_4 \rightarrow E/R_2$
$E/R_3 \rightarrow SC_3$	$Echo_1 + Echo_2 + Echo_3 + Echo_4 \rightarrow E/R_3$
$E/R_4 \rightarrow SC_4$	$Echo_1 + Echo_2 + Echo_3 + Echo_4 \rightarrow E/R_4$

En la Figura 4 se muestran las cuatro posibles configuraciones involucradas en el proceso de emisión/recepción de la estructura sensorial propuesta, donde se caracteriza la emisión de cada transductor como aquellos elementos que reciben los ecos correspondientes a estas emisiones.

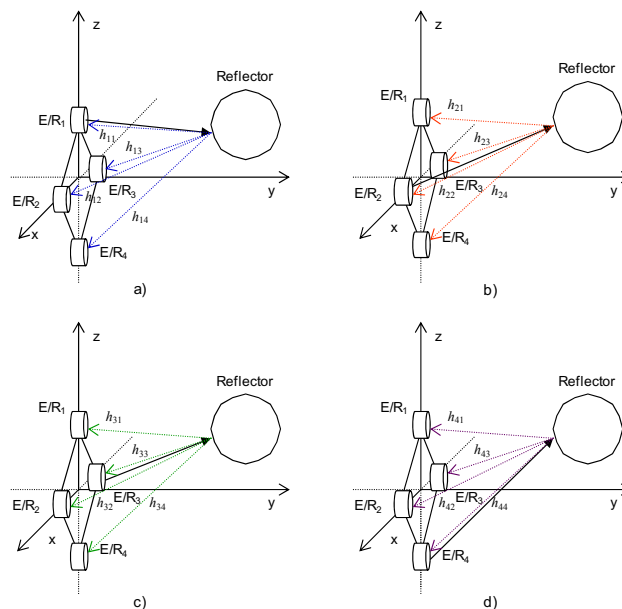


Figura 4: Configuración de los canales físicos de transmisión  $h_{ij}$  para la emisión del transductor  $i$  y la recepción de todos los ecos captados por el transductor  $j$  de la estructura sensorial.

#### 4. Modelo del sistema de transmisión ultrasónico aplicado a la estructura sensorial

De forma general, la relación (considerando el modelo MIMO de frecuencia selectiva (Kafle et al., 2008; Bolcskei et al., 2002; Larsson et al., 2003; Via et al., 2010)) entre la entrada y la salida del sistema de transmisión ultrasónico con  $\mu=4$  transductores Emisor-Receptor trabajando de forma simultánea (véase Figura 3a) está dada por (7). En esta ecuación, la señal recibida  $\mathbf{Y}[k]$  contiene de forma simultánea  $\mu$  tipos de componentes que corresponden a los ecos generados a partir de la emisión simultánea  $\mu$  señales y su correspondiente reflexión en el entorno ultrasónico.

$$\mathbf{Y}[k] = \sum_{l=0}^L \mathbf{H}_l \mathbf{M}_s[k-l] + \mathbf{e}[k] = [\mathbf{H}(z^{-1})] \mathbf{M}_s[k] + \mathbf{e}[k] \quad (7)$$

La señal  $\mathbf{Y}[k]=[y_1[k] \ y_2[k] \ \dots \ y_\mu[k]]^T$ , un vector de  $(\mu \times 1)$  que contiene las señales captadas por cada transductor receptor  $j$  ( $j=1, 2, \dots, \mu$ ),  $\mathbf{M}_s[k]=[M_{s1}[k] \ M_{s2}[k] \ \dots \ M_{s\mu}[k]]^T$  es un vector de  $(\mu \times 1)$  que contiene las señales codificadas (Macro-Secuencias) de longitud  $L_s$  transmitidas por cada transductor  $i$  ( $i=1, 2, \dots, \mu$ ) del sensor,  $L$  es el orden de canal de transmisión,  $\{\mathbf{H}_l\}_{l=0, \dots, L}$  son matrices de  $(\mu \times \mu)$  para el instante  $l$  que contienen los valores correspondientes a las respuestas impulsivas de los canales de transmisión MIMO, y finalmente  $\mathbf{e}[k]=[e_1[k] \ e_2[k] \ \dots \ e_\mu[k]]^T$  es el vector de ruido de  $(\mu \times 1)$  elementos, donde el elemento  $e_j[k]$  de dicho vector está asociado al transductor receptor  $j$ . En la ecuación (8) se muestra la matriz  $H_l$  que contiene las respuestas impulsivas  $h_{ij}^l$  de los canales de transmisión MIMO entre el emisor  $i$  y el receptor  $j$ , en el instante  $l$ . Si se asume que las respuestas impulsivas de dichos canales tienen una longitud finita, se puede considerar que el sistema tiene un número determinado de  $L+1$  taps (retardo máximo a considerar) y este es, como se definió anteriormente, el orden máximo de los canales de transmisión. Considerando esto, en la ecuación (9) se establece el modelo del canal mediante una matriz causal tipo FIR (Finite Impulse Response)  $\mathbf{H}(z^{-1})$ , la cual contiene la suma de las matrices de canal MIMO  $H_l$  correspondientes a cada retardo de tiempo  $l=0, 1, \dots, L$ .

$$H_l = \begin{bmatrix} h_{1,1}^l & \dots & h_{1,\mu}^l \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1,\mu}^l & \dots & h_{\mu,\mu}^l \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{H}(z^{-1}) = \sum_{l=0}^L H_l \cdot z^{-l} \quad (9)$$

La expresión definida en la ecuación (7) del modelo de canal MIMO del sistema sensorial ultrasónico puede ser reescrita mediante una formulación matricial como la mostrada en (10), lo que permite interpretar intuitivamente los datos y el proceso realizado a través de una estructura matricial-algebraica.

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (10)$$

En la ecuación (10), las señales recibidas por los transductores están representadas por  $\mathbf{y}$ ; el modelo del canal está caracterizado por  $\mathbf{G}$ ; las señales codificadas transmitidas por la estructura sensorial están definidas en  $\mathbf{x}$  y el ruido asociado a cada receptor está dado por  $\mathbf{e}$ . El contenido de cada uno de los elementos involucrados en la expresión (10) se muestra de forma explícita en las ecuaciones (11) y (12),

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x^T(-L) \ \dots \ x^T(L_s + L - 1)]^T \\ \mathbf{y} &= [y^T(0) \ \dots \ y^T(L_s + L - 1)]^T \\ \mathbf{e} &= [e^T(0) \ \dots \ e^T(L_s + L - 1)]^T \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_L & \mathbf{H}_{L-1} & \dots & \mathbf{H}_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_L & \mathbf{H}_{L-1} & \dots & \mathbf{H}_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{H}_L & \dots & \mathbf{H}_{L-1} & \mathbf{H}_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde,  $\mathbf{X}$  es el vector-columna emitido por el conjunto de transductores de la estructura sensorial de longitud  $(L_s+2L)\mu \times 1$ ;  $\mathbf{x}=[M_{s1}[k] \ M_{s2}[k] \ \dots \ M_{s\mu}[k]]^T$  es un vector de datos que forma parte del vector-columna  $\mathbf{X}$  de salida de dimensión  $\mu \times 1$  y que contiene la correspondiente salida del transductor emisor  $i$  en el instante  $k$ ;  $\mathbf{e}$  es el vector-columna de ruido de dimensión  $(L_s+L)\mu \times 1$ ;  $\mathbf{e}=[\eta_1[k] \ \eta_2[k] \ \dots \ \eta_\mu[k]]^T$  es el vector de ruido de  $\mu \times 1$  para el instante  $k$  donde cada elemento  $\eta$  del vector está vinculado al receptor  $j$  de la estructura sensorial;  $\mathbf{y}$  es el vector-columna recibido por el sistema sensor de dimensión  $(L_s+L)\mu \times 1$ ;  $\mathbf{y}=[y_1[k] \ y_2[k] \ \dots \ y_\mu[k]]^T$  es un vector de datos parte del vector-columna recibido por el sensor cuya dimensión es de  $\mu \times 1$  y contiene la señal captada en el receptor  $j$  para el instante  $k$ . La matriz  $\mathbf{G}$  (matriz Sylvester) de dimensión  $((L_s+L) \cdot \mu \times (L_s+2L) \cdot \mu)$  que se muestra en la ecuación (12) contiene internamente un conjunto de matrices ( $H_l$ ) que son las correspondientes respuestas impulsivas de los canales de transmisión MIMO en cada instante  $l$ . Esta estructura especial de ordenar los elementos en la matriz  $\mathbf{G}$  permite realizar la operación de convolución (multiplicación de dos polinomios en el tiempo) entre las señales emitidas por el sistema sensor y el propio canal ultrasónico. La utilización de este modelo de frecuencia selectiva permite modelar los canales de transmisión en línea de vista y multi-camino, a diferencia de otros modelos que dificultan el análisis de múltiples caminos. Además, permite incorporar al análisis posibles desvanecimientos que puedan producirse durante la transmisión de las señales, incluso modelar desvanecimientos tipo Ricean o Rayleigh, comúnmente utilizados en exteriores.

##### 5. Algoritmo de procesamiento aplicado a la estructura sensorial ultrasónica MIMO

El sistema sensor ultrasónico propuesto se ha modelado como un sistema MIMO, con el cual puede analizarse el comportamiento de los canales de transmisión (Emisión-Entorno-Recepción) en distintos instantes de tiempo. En el caso del sistema propuesto, se considera en la emisión se realiza de forma simultánea con todos los elementos del sensor, y así mismo en el proceso de recepción, todos los transductores receptores captan señales provenientes del entorno simultáneamente. El algoritmo de procesamiento aplicado a la estructura sensorial ultrasónica permite que durante la emisión se pueda realizar una transmisión simultánea con todos los transductores del sensor con una interferencia mínima entre las emisiones. Así mismo, en la etapa de recepción dicho algoritmo permite procesar las señales que fueron captadas por la estructura sensorial en un sólo proceso de lectura y que contienen las señales que fueron emitidas y reflejadas en el entorno. La utilización de técnicas como la correlación de la señal dentro del algoritmo de procesamiento propuesto, permite identificar un alto grado de eficiencia en la precedencia de las señales codificadas transmitidas así como el instante de llegada al sistema sensor.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de bloques de los algoritmos de procesamiento aplicados a la estructura sensorial

ultrasonica, el cual se divide en tres grandes bloques: el bloque de emisión, donde cuatro macro-secuencias se generan a partir de cuatro conjuntos  $M$ -CSS MO (mutuamente ortogonales) y se utilizan para codificar la emisión de cada transductor; el bloque de recepción, donde las señales recibidas por los transductores son procesadas (adaptadas, demoduladas y correladas) mediante un grupo de correladores que obtienen la salida del sistema; y el entorno ultrasónico, que perturba las señales que cruzan por él. Se observa que a la entrada de cada generador de  $M$ -CSS (ESSG), en la etapa de emisión, la señal de entrada que excita al sistema es  $\delta[k]$  produciendo en la salida de cada transductor emisor una macro-secuencia  $MS$ ; donde cada señal captada en la etapa de recepción se puede expresar como sigue:

$$y_{ij}[k] = h_{i(emisor)}[k] * h_{ij(env)}[k] * h_{ij(receptor)}[k] * \delta[k] + \eta_j[k] * h_{ij(receptor)}[k] \quad (13)$$

donde  $y_{ij}[k]$  es la señal obtenida por el receptor  $j$  en el proceso de lectura y la información en ésta es causada por la transmisión codificada del emisor  $i$ ;  $h_{i(emisor)}[k]$  es la respuesta impulsiva del módulo de emisión para el transductor  $i$ ;  $h_{ij(receptor)}[k]$  es la respuesta impulsiva del módulo de recepción para el transductor receptor  $j$  al procesar la información en busca de la señal que proviene del emisor  $i$ ;  $h_{ij(env)}[k]$  es la respuesta impulsiva del canal físico de transmisión entre el emisor  $i$  y el receptor  $j$ ;  $\eta_j[k]$  es el ruido aditivo en la entrada del receptor  $j$  y finalmente el símbolo  $*$ , denota la operación de convolución. Obviamente, en un proceso *off-line* se puede suponer que el ambiente es ideal, es decir, no hay ruido aditivo en ningún receptor ( $\eta_j[k]=0$ ) y la respuesta impulsiva del entorno es ideal ( $h_{ij(env)}[k] = \delta[k]$ ). Las salidas  $y_{ij}[k]$  obtenidas en estas condiciones serán almacenadas como las señales de referencia del sistema:

$$y_{ij(ref)}[k] = h_{i(emisor)}[k] * h_{ij(receptor)}[k] * \delta[k] = h_{ij(receptor)}[k] * MS_i^W[k] \quad (14)$$

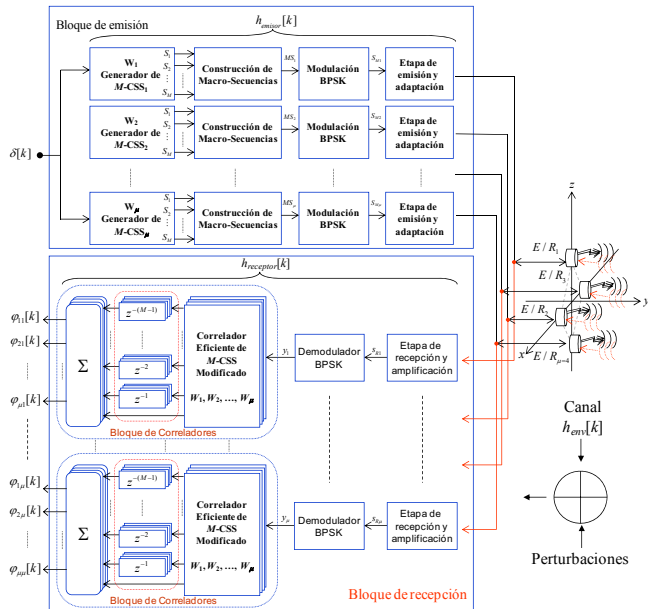


Figura 5: Diagrama de bloques del sistema sensor ultrasónico MIMO (emisores, receptores y entorno).

En una operación normal (proceso *on-line*), el entorno (canal de transmisión) se considera no-ideal (con perturbaciones,

tiempos de vuelo, etc.) y con ruido aditivo. Esta salida es obtenida siguiendo la expresión (13), siendo entonces:

$$y_{ij}[k] = y_{ij(ref)}[k] * h_{ij(env)}[k] + \eta_j[k] * h_{ij(receptor)}[k] \quad (15)$$

Para efectos prácticos, la expresión (15) puede ser sustituida por la (16), en la cual sólo se toma en cuenta la salida del generador de secuencias. Por otra parte, tanto las respuestas impulsivas de la expresión (17) como el ruido del sistema en la expresión (18) pueden ser agrupados en una única expresión como se observa en la ecuación (16), la cual es conocida como la relación entre la entrada y la salida del sistema.

$$y_{ij}[k] = h_{ij}[k] * MS_i^W[k] + e_j[k] \quad (16)$$

Siendo

$$h_{ij}[k] = h_{ij(env)}[k] * h_{ij(receptor)}[k] \quad (17)$$

$$e_j[k] = \eta_j[k] * h_{ij(receptor)}[k] \quad (18)$$

Suponiendo que en el proceso de lectura de las señales ultrasónicas, el canal de transmisión se encuentra perturbado por un ruido gaussiano y que los procesos de modulación y demodulación son ideales, al igual que los módulos de emisión/adaptación y recepción/amplificación, las señales obtenidas a la salida de los canales de transmisión (demoduladores) se pueden reescribir como:

$$\mathbf{Y}[k] = [y_1[k] \quad y_2[k] \quad \dots \quad y_\mu[k]]^T \quad (19)$$

donde cada elemento  $y_j[k]$  de la matriz  $\mathbf{Y}[k]$  contiene la señal recibida por el transductor  $j$  de la estructura sensorial en el instante  $k$ . Por otra parte, las señales recibidas  $\{y_j[k]\}_{j=1, \dots, \mu}$  están determinadas por:

$$y_j[k] = \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot MS_1[k-l] + h_{2j}[l] \cdot MS_2[k-l] + \dots + h_{\mu j}[l] \cdot MS_\mu[k-l]) + \eta_j[k] \quad (20)$$

donde  $\{MS_i[k]\}_{i=1, 2, \dots, \mu}$  representa cada una de las macro-secuencias transmitidas por el transductor  $i$  en el instante  $k$ ;  $o$  es el orden de canal de transmisión; y  $h_{ij}[l]$  son las respuestas impulsivas de los canales físicos de transmisión entre el emisor  $i$  y el receptor  $j$  en el instante  $l$ ; y finalmente  $\{\eta_j[k]\}_{j=1, 2, \dots, \mu}$  son los elementos de ruido asociados al transductor  $j$  en el instante  $k$ .

Para el caso de que se desee realizar la correlación cruzada entre la señal recibida por el receptor  $j$  y la macro-secuencia  $MS_1[k]$  transmitida por el emisor  $E/R_1$  ( $i=1$ ), la función de correlación está definida por:

$$\varphi_{1j}[k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (MS_1[n+k] \cdot y_j[n]) \quad (21)$$

Que se puede escribir como:

$$\varphi_{1j}[k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ MS_1[n+k] \cdot \left\{ \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot MS_1[n-l] + h_{2j}[l] \cdot MS_2[n-l] + h_{3j}[l] \cdot MS_3[n-l] + h_{4j}[l] \cdot MS_4[n-l]) + \eta_j[n] \right\} \right] \quad (22)$$

Al desarrollar esta última expresión se obtiene:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}[k] = & \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot MS_1[n+k] \cdot MS_1[n-l] + h_{2j}[l] \cdot MS_1[n+k] \cdot MS_2[n-l] \\ & + h_{3j}[l] \cdot MS_1[n+k] \cdot MS_3[n-l] + h_{4j}[l] \cdot MS_1[n+k] \cdot MS_4[n-l]) \\ & + \sum_{n=-\infty}^{\infty} (MS_1[n+k] \cdot \eta_j[n]) \end{aligned} \quad (23)$$

Reagrupando términos y realizando además un intercambio en el orden de las sumatorias, se tiene que:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} h_{1j}[l] \cdot \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} MS_1[n+k] \cdot MS_1[n-l] \right\} + \sum_{l=0}^{\infty} h_{2j}[l] \cdot \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} MS_1[n+k] \cdot MS_2[n-l] \right\} \\ & + \sum_{l=0}^{\infty} h_{3j}[l] \cdot \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} MS_1[n+k] \cdot MS_3[n-l] \right\} + \sum_{l=0}^{\infty} h_{4j}[l] \cdot \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} MS_1[n+k] \cdot MS_4[n-l] \right\} \\ & + \sum_{n=-\infty}^{\infty} (MS_1[n+k] \cdot \eta_j[n]) \end{aligned} \quad (24)$$

Para simplificar la expresión, se realiza un cambio de variable en el cual  $n-l=u \Rightarrow n=u+l$ ; de esta forma, la función de correlación queda definida como:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} h_{1j}[l] \cdot \left\{ \sum_{u=-\infty}^{\infty} MS_1[u+l+k] \cdot MS_1[u] \right\} + \sum_{l=0}^{\infty} h_{2j}[l] \cdot \left\{ \sum_{u=-\infty}^{\infty} MS_1[u+l+k] \cdot MS_2[u] \right\} \\ & + \sum_{l=0}^{\infty} h_{3j}[l] \cdot \left\{ \sum_{u=-\infty}^{\infty} MS_1[u+l+k] \cdot MS_3[u] \right\} + \sum_{l=0}^{\infty} h_{4j}[l] \cdot \left\{ \sum_{u=-\infty}^{\infty} MS_1[u+l+k] \cdot MS_4[u] \right\} \\ & + \sum_{n=-\infty}^{\infty} (MS_1[n+k] \cdot \eta_j[n]) \end{aligned} \quad (25)$$

En esta expresión se pueden identificar tanto las funciones de auto-correlación entre las macro-secuencias transmitidas como las funciones de correlación cruzada entre dichas secuencias, dando como resultado la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} h_{1j}[l] \cdot M \cdot L \cdot \delta[k+l] + \sum_{l=0}^{\infty} h_{2j}[l] \cdot \phi_{MS_1MS_2}[k+l] + \\ & + \sum_{l=0}^{\infty} h_{3j}[l] \cdot \phi_{MS_1MS_3}[k+l] + \sum_{l=0}^{\infty} h_{4j}[l] \cdot \phi_{MS_1MS_4}[k+l] + \\ & + \phi_{MS_1\eta_j}[k] \end{aligned} \quad (26)$$

De forma general, las funciones de correlación  $\varphi_{ij}$  entre la señal recibida  $y_j$  por el receptor  $j$  y la macro-secuencia  $\{MS_i\}_{i=1,2,3,\dots,M}$  transmitida por el transductor  $E/R_i$  están definidas por:

$$\begin{aligned} \varphi_{1j}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot M \cdot L \cdot \delta[k+l] + h_{2j}[l] \cdot \phi_{MS_1MS_2}[k+l] \\ & + h_{3j}[l] \cdot \phi_{MS_1MS_3}[k+l] + h_{4j}[l] \cdot \phi_{MS_1MS_4}[k+l] + \phi_{MS_1\eta_j}[k]) \\ \varphi_{2j}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot \phi_{MS_2MS_1}[k+l] + h_{2j}[l] \cdot M \cdot L \cdot \delta[k+l] \\ & + h_{3j}[l] \cdot \phi_{MS_2MS_3}[k+l] + h_{4j}[l] \cdot \phi_{MS_2MS_4}[k+l] + \phi_{MS_2\eta_j}[k]) \\ \varphi_{3j}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot \phi_{MS_3MS_1}[k+l] + h_{2j}[l] \cdot \phi_{MS_3MS_2}[k+l] \\ & + h_{3j}[l] \cdot M \cdot L \cdot \delta[k+l] + h_{4j}[l] \cdot \phi_{MS_3MS_4}[k+l] + \phi_{MS_3\eta_j}[k]) \\ \varphi_{4j}[k] = & \sum_{l=0}^{\infty} (h_{1j}[l] \cdot \phi_{MS_4MS_1}[k+l] + h_{2j}[l] \cdot \phi_{MS_4MS_2}[k+l] \\ & + h_{3j}[l] \cdot \phi_{MS_4MS_3}[k+l] + h_{4j}[l] \cdot M \cdot L \cdot \delta[k+l] + \phi_{MS_4\eta_j}[k]) \end{aligned} \quad (27)$$

Donde las señales  $\varphi_{ij}[k]$  obtenidas por el bloque de correladores asociados al receptor  $j$  están compuestas por la auto-correlación

$\{\varphi_{MS_i}\}_{i=1,2,3,4}$  de la macro-secuencias, las correlaciones-cruzadas entre las distintas macro-secuencias está dada por  $\{\varphi_{MS_iMS_j}\}_{i,j=1,2,3,4|i \neq j}$  y la correlación-cruzada entre la  $MS_i$  y el ruido  $\eta_j$  asociado al receptor  $j$  es  $\{\varphi_{MS_i\eta_j}\}_{i,j=1,2,3,4}$ .

## 6. Simulación del sistema ultrasónico MIMO

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en un entorno de simulación, el cual se caracteriza por utilizar el modelo MIMO de frecuencia selectiva al sistema de transmisión-reflexión-recepción ultrasónico propuesto. En las simulaciones se utiliza un grupo de macro-secuencias que se han nombrado como “preferidas” debido a que éstas se caracterizan por tener un bajo bound de auto-correlación  $\beta_{AC}$ , así como de correlación-cruzada  $\beta_{CC}$  (De Marziani et al., 2006). Estas macro-secuencias seleccionadas son utilizadas para codificar la emisión simultánea de los cuatro transductores ultrasónicos ubicados en el bloque de emisión representado en la Figura 6. Estos transductores actúan como emisores/receptores y captan las señales transmitidas para su posterior procesamiento en el bloque de recepción. Cada transductor del bloque de emisión tiene asignada una macro-secuencia generada a partir de un  $M$ -CSS, al concatenar cada una de las secuencias del conjunto referido, considerando los siguientes parámetros  $M=4$ ,  $L_S=256$ ,  $L_{MS}=1024$ ,  $p_1=1$ ,  $p_2=6$ ,  $p_3=11$ ,  $p_4=16$ . Este grupo de macro-secuencias utilizadas se caracteriza por tener buenas propiedades de auto-correlación y correlación cruzada. Cada transductor emite una única macro-secuencia asignada a él, después de haberse aplicado una modulación BPSK. En el esquema de modulación referido se ha empleado un símbolo con un ciclo de la portadora digital. En el bloque de recepción, la señal capturada por el transductor es digitalizada empleando un muestreo 8 veces superior a la frecuencia de emisión del transductor, logrando así disminuir los errores en la reconstrucción de la señal. La señal digitalizada es demodulada, para posteriormente realizar el proceso de correlación con cada una de las macro-secuencias a fin de detectar con precisión el tiempo de llegada de los múltiples ecos recibidos simultáneamente en cada transductor.

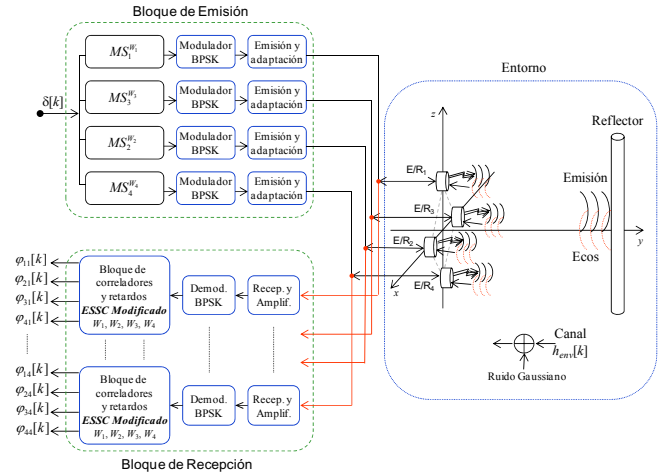


Figura 6: Bloques de emisión y recepción conectados a la estructura sensorial ultrasónica MIMO.

En la Figura 7 se representan las respuestas impulsivas que se estiman a través de las señales captadas por el receptor  $E/R_i$ ,

empleando para ello cuatro macro-secuencias transmitidas simultáneamente por todos los transductores del sistema sensor. Dichas respuestas impulsivas suponen que hay un reflector localizado frente a la estructura sensorial a una distancia de  $r=1\text{m}$  y en la dirección de azimut y elevación de  $\theta=0^\circ$  y  $\gamma=0^\circ$  respectivamente.

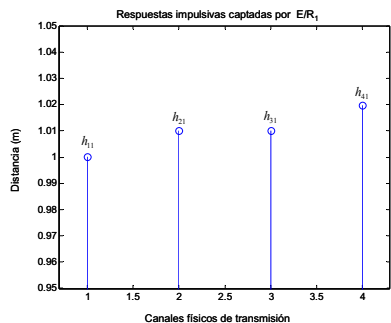


Figura 7: Respuestas impulsivas que se introducen al sistema sensorial y representan la posición de un objeto frente a la estructura sensorial.

La señal recibida por cada transductor está constituida por un grupo de señales que se encuentran superpuestas, como se puede observar en la Figura 8; en la cual se presentan los resultados obtenidos en cada una de las cuatro salidas del bloque de correladores asociados al transductor E/R<sub>1</sub>, donde se trata de detectar las macro-secuencias transmitidas por el sistema de transmisión ultrasónico MIMO propuesto en la Figura 6. Al utilizar estas macro-secuencias preferidas en la transmisión, se logra reducir el efecto causado por las transmisiones simultáneas de las secuencias; es decir, los efectos producidos por las interferencias ISI (Interferencia Inter Símbolo) y MAI (interferencia de acceso múltiple) son mínimos si se emplean macro-secuencias mutuamente ortogonales y con un nivel de bound bajo (De Marziani et al., 2006).

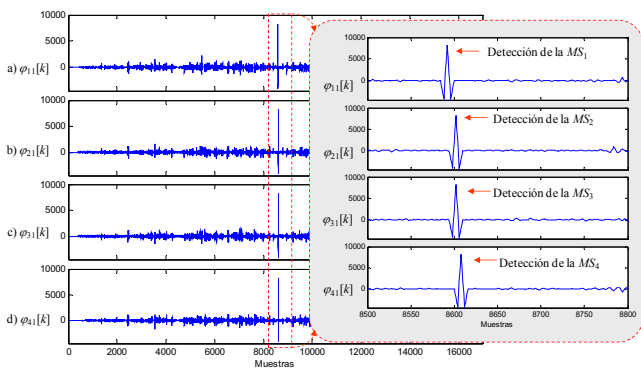


Figura 8: Respuestas Impulsivas que representan la posición de un objeto frente a la estructura sensorial.

Por otra parte, con el fin de conocer cómo se ve afectado el proceso de identificación de las macro-secuencias cuando éstas pasan a través de los transductores, se ha incluido en la simulación el modelo de emisión de un transductor (Álvarez et al., 2009; Matin et al., 2013). Este análisis permite verificar si se puede determinar la procedencia del eco incluso cuando existe una distorsión en la señal recibida, producida por la reducción del ancho de banda causada por el transductor. Al agregar dicho modelo provoca que aparezcan lóbulos laterales alrededor del pico principal de correlación, generados por la reducción del ancho de banda e introduciendo ruido al sistema. El modelo de

emisión del transductor se ha caracterizado mediante el comportamiento de un filtro paso-banda con una frecuencia de resonancia y un ancho de banda, determinados por el tipo de transductor ( $f_e=53\text{ kHz}$  y ancho de banda de  $14\text{ kHz}$  (SensComp Global Components, 2014)). En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos para el sistema de transmisión ultrasónico MIMO considerando en la simulación el modelo de emisión y recepción del transductor.

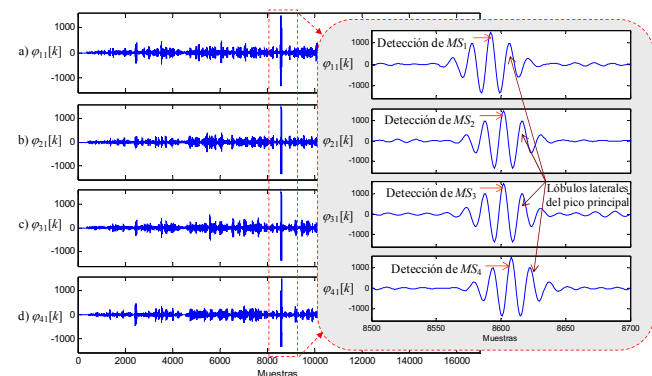


Figura 9: Respuestas impulsivas que representan la posición de un objeto frente a la estructura sensorial considerando el modelo del transductor.

En esta se observa cómo a la salida del bloque de correladores asociado al transductor E/R<sub>1</sub> se obtienen cuatro señales diferentes que corresponden con las macro-secuencias transmitidas por el sistema ultrasónico propuesto en la Figura 6. Al comparar los resultados obtenidos en las Figuras 8 y 9, se observa que en ambas gráficas se logra identificar las macro-secuencias transmitidas en la señal recibida por el transductor E/R<sub>1</sub>, manteniéndose en ambos casos el mismo retardo en la detección de las MS. Sin embargo, la amplitud de las señales obtenidas a la salida de los correladores se ve reducida a consecuencia de aplicar el modelo de emisión del transductor, e incluso se acentúan los efectos causados por la modulación al incrementar el tamaño de los lóbulos laterales alrededor del pico principal. Cabe mencionar en este caso, que las macro-secuencias utilizadas por el sistema de transmisión se caracterizan por tener un nivel de bound ( $\beta$ ) bajo, en torno a  $\beta = 0,3821$  o  $\beta = 0,2156$  dependiendo si se considera o no el modelo del transductor. Los retardos calculados de las MS<sub>*i*</sub> ( $i=1, 2, 3, 4$ ) en las Figuras 8 y 9 se corresponden con los retardos simulados en cada una de las respuestas impulsivas  $h_{i1}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) definidas en la Figura 7.

### 7. Resultados experimentales del sistema propuesto

Para verificar el sistema propuesto en el artículo, se ha construido una estructura sensorial que consta de 4 transductores ultrasónicos que funcionan como emisores/receptores y se utilizan 4 macro-secuencias predefinidas para codificar la emisión y reducir el grado de interferencia durante la detección de las señales captadas por el sensor. Para ello, se emplearon cuatro diferentes conjuntos complementarios de  $M=2$  secuencias de longitud  $L = 64$  y semillas  $\{p_1=1, p_2=3, p_3=38, p_4=40\}$  para construir las macro-secuencias utilizando el método de ordenación por concatenación. Las macro-secuencias se han adaptado empleando una modulación BPSK con un símbolo de modulación de dos ciclos completos de la portadora  $f_e=50\text{kHz}$  ( $T_e=20\mu\text{s}$ ) por cada bit de la macro-secuencia. Para llevar a cabo la emisión y recepción simultánea con el sistema sensor, se



empleó la plataforma computacional ACQUITEK (Data Acquisition Solutions Acquittek, 2014) que utiliza la tarjeta de adquisición de datos PMC-16A1SS8A04. En la Figura 10, se muestra el diagrama de bloques de conexión del sistema computacional aplicado a la estructura sensorial que permite realizar el acondicionamiento y adquisición de las señales empleando 4 canales analógicos (CA) de entrada y 4 CA de salida. Cada uno de los transductores dispone de un módulo de acondicionamiento (MA) basado en el sistema estándar proporcionado por SensComp para este tipo de transductores. La señal emitida  $s_{ei}[k]$  por el transductor  $E/R_i$  tiene asociada una de las macro-secuencias previamente definidas en este apartado.

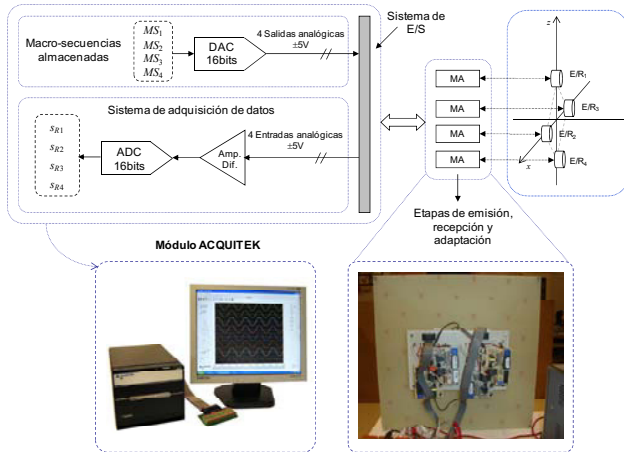


Figura 10: Sistema de adquisición de datos ACQUITEK que permite transmisión y recepción simultánea con 4 CA de entrada y 4 CA de salida.

La señal recibida  $s_{ri}[k]$  por el transductor  $E/R_i$  es amplificada y digitalizada mediante el sistema de adquisición descrito. El módulo de adquisición ha sido configurado para trabajar a una frecuencia de muestreo de  $f_s=500\text{kHz}$ , sabiendo que la frecuencia de la señal emitida es de  $f_e=50\text{kHz}$ . Una vez adquiridas las muestras, estas son guardadas temporalmente en una unidad de almacenamiento para su posterior análisis. Después de configurar el sistema de emisión y recepción, se han realizado algunas pruebas prácticas para validar el sistema sensor en determinadas condiciones. Para definir los TDV medidos en los distintos ejemplos, se emplea la siguiente terminología:  $t_{ij}$  es tiempo de vuelo medido entre el transductor emisor  $i$  y el transductor receptor  $j$ ; y  $d_{ij}$  es la distancia recorrida por el eco después de reflejarse en un objeto que involucra al emisor  $i$  y al receptor  $j$ . El primer escenario utilizado se muestra en la Figura 11, en el cual se asume que un reflector tipo saliente está ubicado sobre el eje axial del sistema sensor a una distancia de 1.06m.

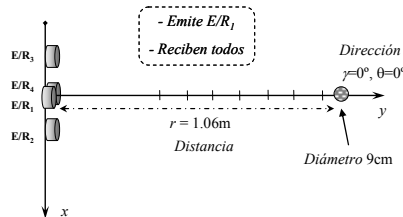


Figura 11: Escenario de prueba para verificar el procesamiento de bajo nivel.

Durante la prueba experimental, en primera instancia se realizó la transmisión de las macro-secuencias por cada uno de los transductores y a la par el sistema de adquisición comenzó a

almacenar las señales captadas por cada transductor receptor. En un proceso posterior se llevó a cabo la aplicación de los algoritmos de correlación para estimar los picos máximos de auto-correlación y por ende las respuestas impulsivas. Realizando una única emisión con el transductor  $E/R_1$ , se han obtenido los resultados mostrados en las Figura 12, 13, 14 y 15, que corresponden con las señales procesadas en los transductores  $E/R_1$ ,  $E/R_2$ ,  $E/R_3$  y  $E/R_4$ , respectivamente. La Figura 12, en su primer gráfica, representa la señal  $s_{R1}[k]$  capturada por el transductor  $E/R_1$ ; en la segunda gráfica se muestran los resultados de la búsqueda de la emisión del transductor  $E/R_1$ ; en las tres figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos al buscar las emisiones de los transductores  $E/R_2$ ,  $E/R_3$  y  $E/R_4$ , respectivamente.

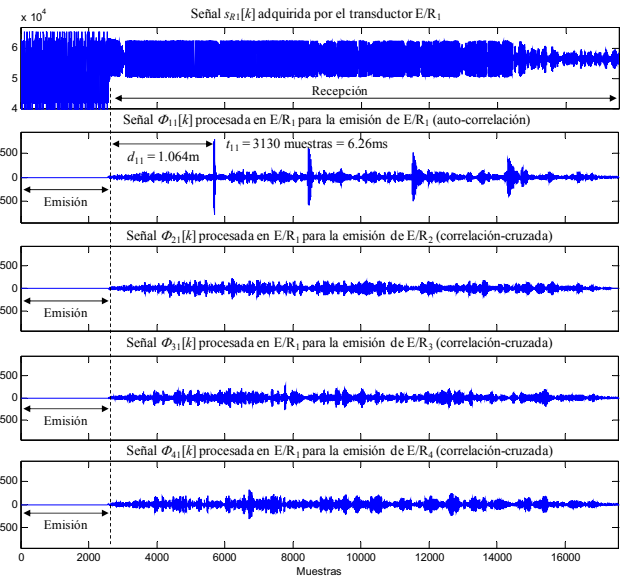


Figura 12: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida en el transductor  $E/R_1$  durante la emisión del transductor  $E/R_1$  para el escenario de la Figura 11.

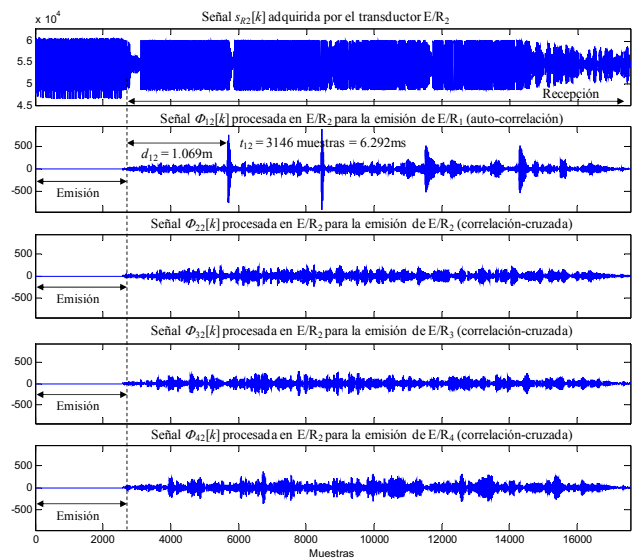


Figura 13: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida en el transductor  $E/R_2$  durante la emisión del transductor  $E/R_1$  para el escenario de la Figura 11

Los resultados arrojados por estas gráficas indican que se ha podido identificar la macro-secuencia emitida por el transductor

E/R<sub>1</sub> a través del eco recibido, como indica la función de auto-correlación. Así mismo, se observa que la amplitud de las correlaciones cruzadas en busca de las otras macro-secuencias es pequeña en comparación con la auto-correlación. Por otra parte, los resultados muestran que el tiempo  $t_{11}$  es el más pequeño, los tiempos  $t_{12}$  y  $t_{13}$  son prácticamente iguales, y el tiempo  $t_{14}$  es el más grande, lo que corrobora el escenario presentado por la Figura 11.

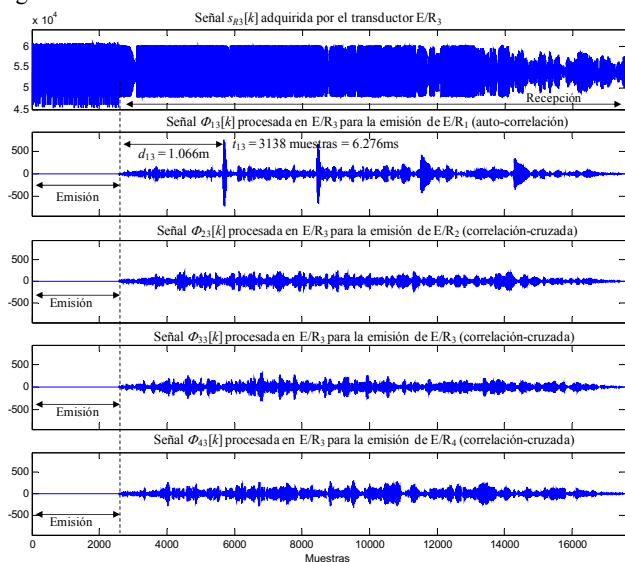


Figura 14: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida en el transductor E/R<sub>3</sub> durante la emisión del transductor E/R<sub>1</sub> para el escenario de la Figura 11.

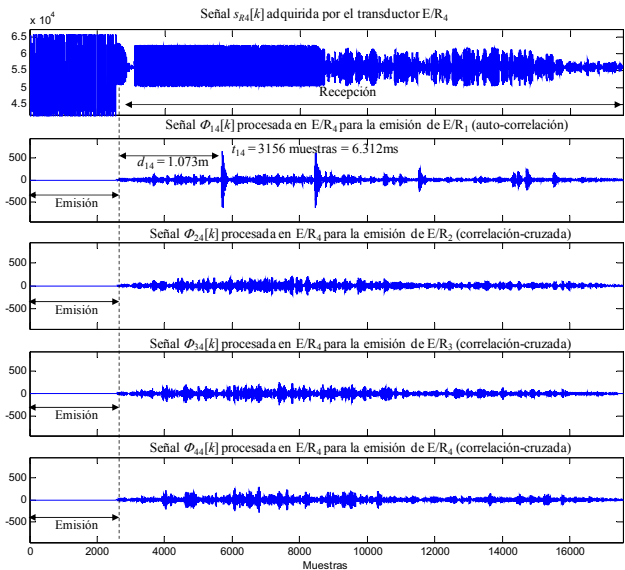


Figura 15: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida en el transductor E/R<sub>4</sub> durante la emisión del transductor E/R<sub>1</sub> para el escenario de la Figura 11.

El segundo escenario es similar al mostrado en la Figura 11, pero la distancia entre el objeto y el sistema sensor es ahora de 1.04 metros, ubicado sobre el eje axial. Realizando una emisión simultánea con los cuatro transductores de la estructura sensorial, en las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos después de procesar las señales captadas por los transductores E/R<sub>1</sub>, E/R<sub>2</sub>, E/R<sub>3</sub> y E/R<sub>4</sub> (véanse las Figuras 16, 17, 18 y 19, respectivamente). En la primer gráfica de la Figura 16 se

representa la señal capturada  $s_{R1}[k]$  por el transductor E/R<sub>1</sub>; y en las siguientes cuatro gráficas de esta figura se muestran los resultados de la búsqueda de la emisión del transductor E/R<sub>1</sub>, E/R<sub>2</sub>, E/R<sub>3</sub> y E/R<sub>4</sub>, respectivamente. En estas gráficas se puede verificar que se han detectado las cuatro macro-secuencias transmitidas simultáneamente al procesar los ecos recibidos en los distintos transductores. Además, se puede observar que la amplitud de los picos de correlación obtenidos es más pequeña, en comparación con el escenario anterior donde emite solo un transductor. Esta reducción de la amplitud se debe principalmente a que la correlación cruzada entre secuencias no es nula. Por otra parte, a través de los 16 TDV obtenidos se puede comprobar la detección correcta del reflector así como la estimación de la distancia  $r$  a la cual se encuentra. En las siguientes Figuras (17, 18 y 19) se muestran resultados similares, donde se logran detectar en cada uno de los casos las macro-secuencias transmitidas.

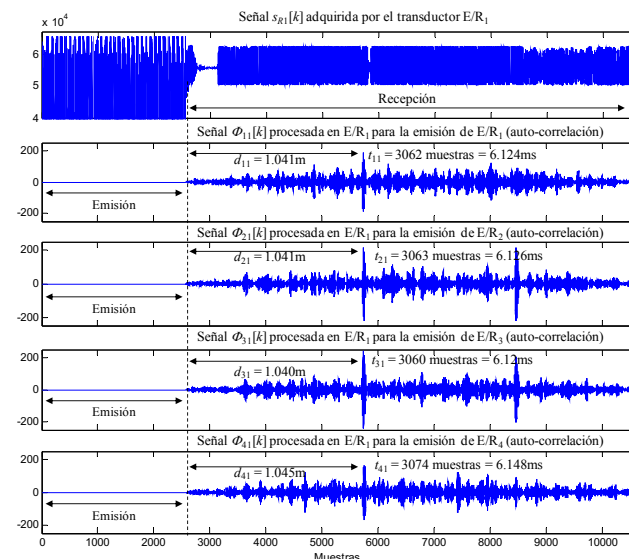


Figura 16: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida por E/R<sub>1</sub>, emitiendo todos los transductores frente a un objeto a 1.04m de distancia.

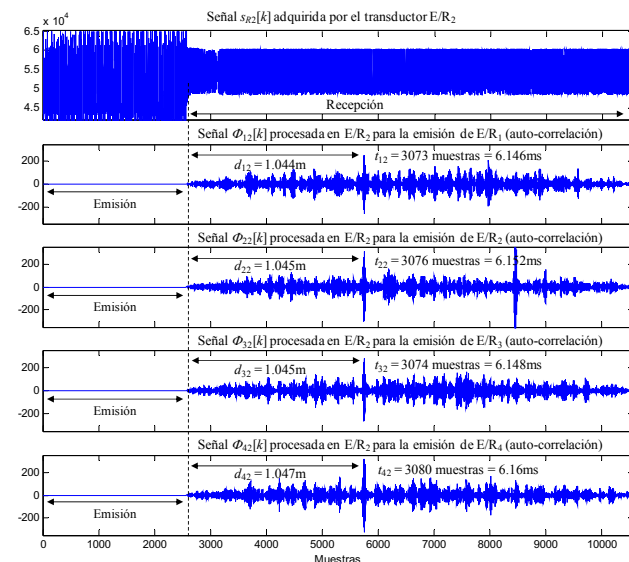


Figura 17: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida por E/R<sub>2</sub>, emitiendo todos los transductores frente a un objeto a 1.04m de distancia.

En todas las gráficas se muestra la distancia calculada en base al pico de auto-correlación y las distancias estimadas se corresponden con la posición del objeto localizado frente a la estructura sensorial a una distancia de 1.04 metros y ubicado sobre el eje axial del sensor.

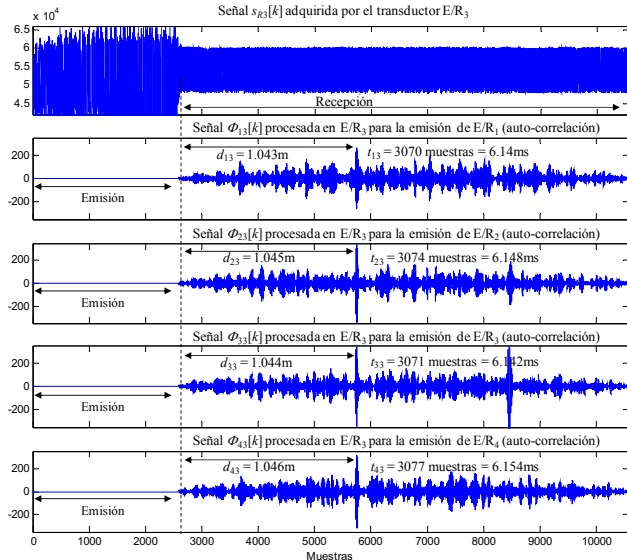


Figura 18: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida por E/R<sub>3</sub>, emitiendo todos los transductores frente a un objeto a 1.04m de distancia.

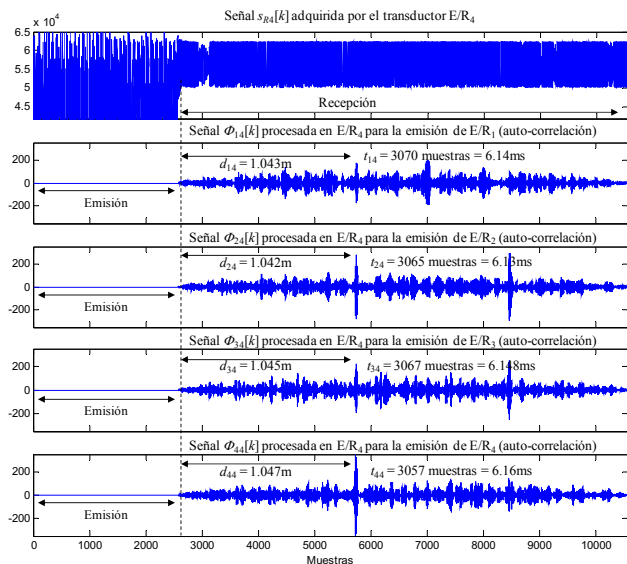


Figura 19: Resultados obtenidos al procesar la señal recibida por E/R<sub>4</sub>, emitiendo todos los transductores frente a un objeto a 1.04m de distancia.

## 8. Conclusión

Se ha propuesto el análisis de una estructura sensorial ultrasónica MIMO que realiza múltiples emisiones y recepciones simultáneas y que además, al procesar los ecos recibidos, se logra estimar las respuestas impulsivas de los canales físicos de transmisión. El sistema sensor ultrasónico tiene la capacidad de realizar una emisión simultánea debido al sistema de codificación empleado para la transmisión de información por parte de los

transductores. La técnica CDMA empleada permite reducir tiempo de exploración durante el proceso de recepción al emplear macro-secuencias formadas a partir de M-CSS en la emisión y con ello reducir el número de transductores del sistema sensor.

El sistema de transmisión ultrasónico fue modelado considerando que la relación entre la entrada y la salida del sistema se asocia a un canal de comunicaciones MIMO lineal e invariante en el tiempo y puede expresarse mediante un producto y suma de matrices algebraicas. En el modelado se empleó la técnica canal MIMO de frecuencia-selectiva, la cual permitió analizar cada instante del canal de transmisión desde que la señal codificada es emitida por el transductor, reflejada en el entorno y recibida por un receptor ultrasónico, considerando múltiples lecturas simultáneas en recepción, existiendo un número finito de matrices  $\{H_l\}_{l=0}^L$  igual al número  $L+1$  de *taps* (retardos) presentes en los canales de transmisión.

El algoritmo de procesamiento aplicado al sistema sensorial ultrasónico MIMO permite obtener simultáneamente, mediante técnicas de correlación, hasta 16 señales correladas  $\phi_{p_i}[k]$ , las cuales pueden ser corroboradas mediante las ecuaciones establecidas en la sección 5. Además, mediante dichas ecuaciones se pueden estimar las respuestas impulsivas de los canales de transmisión al lograr la detección de las macro-secuencias transmitidas a través del pico máximo de la función de auto-correlación, que coincide con la llegada de la señal al sistema sensor.

Una vez que el modelo matemático es propuesto y desarrollado, se implementan los algoritmos de procesamiento, los cuales demuestran mediante simulaciones y pruebas experimentales, que se valida el uso tanto de la metodología, el modelo de canal, y el algoritmo para correlar las señales transmitidas por el sistema sensorial ultrasónico MIMO. Dicha metodología permite demostrar que se puede transferir y adaptar los algoritmos antes de su implementación, facilitando el desarrollo de aplicaciones de esta naturaleza. La obtención correcta de las medidas de tiempo de vuelo, mediante la correspondiente respuesta impulsiva es fundamental, ya que esto hace posible que la información obtenida, en este nivel de procesamiento, pueda ser utilizada por técnicas de alto nivel para realizar tareas de clasificación, localización, entre otras.

## English Summary

### Analysis and Modeling of a MIMO Ultrasonic Sensorial Structure based on M-CSS and correlation techniques.

## Abstract

This paper describes the analysis and modeling of an ultrasonic sensorial structure based on processing algorithm that uses a set of macro-sequences and correlation techniques for obtaining the impulse response of transmission channels simultaneously is proposed. The sensory structure is formed by multiple ultrasonic transducers that transmitting and receiving environment information simultaneously. This processing algorithm employs a pseudorandom macro-sequence obtained from a complementary set of M sequences (M-CSS) which, by auto-correlation and cross-correlation functions, the impulse responses from environment are obtained. The transmission in the ultrasonic system is represented by frequency selective MIMO

model, which is analyzed every instant in the process of reflection-transmission-reception of the signals generated. Once the system model of ultrasonic transmission MIMO is developed and correlation algorithms are implemented for the detection of macro-sequences; the mathematical model, the results obtained in the simulation as well as experimental evidence are presented in this paper. These validate the use of the methodology applied to the channel modeling as well as the estimation of the impulse response of the transmission channels to process the received echoes corresponding to an object in front of the sensor system. The model implemented allows it on can develop algorithms and processing techniques, before they are physically implemented, in order to reduce application development time. In all such cases, is possible to obtain the impulse responses produced in the environment due to the reflectors located opposite the sensor system using correlation techniques.

#### Keywords:

Ultrasonic Sensorial Structure, Macro-Sequence, Frequency-Selective MIMO Model, Correlation Techniques, Complementary Set of M-Sequences.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a el ministerio de educación y ciencia español (PROYECTO RESELAI: TIN2006-14986-CO2-01); al Ministerio de Fomento (Proyecto VIATOR: ref 70025-T05); y al Fondo Ramón Álvarez-Buylla de Aldana (ADCESUDRU FRABA715/10).

#### Referencias

- Álvarez, F.J.; Ureña, J.; Mazo, M.; Hernandez, A.; Garcia, J.J.; Jiménez, J.A. "Efficient Generator and Pulse Compressor for Complementary Set of Four Sequences", IEE Electronics Letters, Vol. 40, No. 11, pp. 703-704, May 2004
- Álvarez, F.J.; Hernández, A.; Ureña, J.; Jimenez, A.; Pérez, M.C.; García, J.J.; Gude, I.; De Marziani, C. Encoding ultrasonic signals with kasami sequences to perform spectrum-based localization. In proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2009), Budapest, Hungary, 26-28 August 2009, pp. 49-53.
- Araújo, A., Portugal, D., Couceiro, M., Sales, J., Rocha, P., 2014. Desarrollo de un robot móvil compacto integrado en el middleware ros. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial {RIAI}, 11 (3) (2014), pp. 315–326.
- Bolcskei, H.; Gesbert, D.; Paulraj, A.J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems. IEEE Transactions on Communications 2002, 50(2), 225-234
- De Marziani, C.; Ureña, J.; Hernandez, A.; Mazo, M.; Garcia, J.J.; Jimenez, A.; Villadangos, J.M.; Perez, M.C.; Ochoa, A.; Alvarez, F. Inter-Symbol Interference Reduction on Macro-Sequences Generated from Complementary Set of Sequences. In proceedings of 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (IECON 2006), Paris, France, 6-10 November 2006, pp. 3367-3372.
- De Marziani, C.; Ureña, J.; Hernández, A.; Mazo, M.; Álvarez, F.; García, J.; Donato, P. Modular Architecture for Efficient Generation and Correlation of Complementary Set of Sequences. IEEE Transactions on Signal Processing 2007, 55, 2323-2337.
- De Marziani, C.; Ureña, J.; Hernandez, A.; Garcia, J.J.; Álvarez, F.J.; Jimenez, A.; Perez, M.C.; Carrizo, J.M.V.; Aparicio, J.; Alcoleas, R. Simultaneous Round-Trip Time-of-Flight Measurements With Encoded Acoustic Signals. IEEE Sensors Journal 2012, 12, 2931-2940.
- Data Acquisition Solutions Acquittek. <http://www.acquittek.com/> (13/02/2014).
- Docmac, D., Silva, E., González, A., 2013. Evaluación de algoritmos para la estimación del Round-Trip Delay Time y una propuesta de mejora, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Vol. 10, No. 1, January–March 2013, Pages 62-72.
- Hernandez, A.; Ureña, J.; Garcia, J.J.; Mazo, M.; Hernanz, D.; Derutin, J.-P.; Serot, J. Ultrasonic ranging sensor using simultaneous emissions from different transducers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 2004, 51(12), 1660-1670.
- Jimenez, J.A.; Mazo, M.; Ureña, J.; Hernandez, A.; Alvarez, F.; García, J.J.; Santiso, E. Using PCA in time-of-flight vectors for reflector recognition and 3-D localization. IEEE Transactions on Robotics 2005, 21, 909-924.
- Kafle, P.L.; Intarapanich, A.; Sesay, A.B.; McRory, J.; Davies, R.J. Spatial correlation and capacity measurements for wideband MIMO channels in indoor office environment. IEEE Transactions on Wireless Communications 2008, 7(5), 1560-1571.
- Larsson, E.; Stoica, P. Space-Time Block Coding for Wireless Communications, 1st ed.; Cambridge University Press: The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 2003; Volume 3, pp. 8-21.
- Matin, M.A.; Ozaki, K.; Numata, Y.; Akai, D.; Sawada, K.; Ishida, M., "Quantifying modal shapes in smart piezoelectric ultrasonic transducer array: Modeling and experiment," SENSORS, 2013 IEEE , vol., no., pp.1.4, 3-6 Nov. 2013.
- Pitarokoilis, A.; Mohammed, S.; Larsson, E.G., "Uplink Performance of Time-Reversal MRC in Massive MIMO Systems Subject to Phase Noise," IEEE Transactions on Wireless Communications, no.99, pp. 1.1. DOI: 10.1109/TWC.2014.2359018. 2014.
- Ochoa, A.; Ureña, J.; Hernandez, A.; Mazo, M.; Jimenez, J.A.; Perez, M.C. Ultrasonic Multitransducer System for Classification and 3-D Location of Reflectors Based on PCA. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009, 58, 3031-3041.
- Ochoa, A.; Ureña, J.; Hernández, A.; Mazo, M.; De Marziani, C.; Pérez, M.C. Processing Algorithm for obtaining the Impulse Response in a MIMO Ultrasonic System. In Proceedings of The IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '06), Prague, Czech Republic, 20-22 September 2006; pp. 977-980.
- Ruiz, D.; Garcia, E.; Ureña, J.; Villadangos, J.M.; Garcia, J.J.; De Marziani, C., "Performance comparison of correlation-based receive filters in an ultrasonic Indoor Positioning System," 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, pp.1548,1551, 12-15 May 2014.
- Sarma, K.K.; Mitra, A., "Multiple-input–multiple-output channel modelling using multi-layer perceptron with finite impulse response and infinite impulse response synapses," Communications, IET , vol.7, no.14, pp.1540,1549, September 24 2013
- Satchidanandan, B.; Kuchi, K.; Koilpillai, R.D., "Generalized Reduced-State Vector Sequence Detection," Communications Letters, IEEE , vol.18, no.10, pp.1691,1694, Oct. 2014.
- SensComp Global Components. [http://www.senscomp.com/products/\(13/02/2014\)](http://www.senscomp.com/products/(13/02/2014)).
- Siyau, M.F.; Nobles, P.; Ormondroyd, R.F. Channel estimation for layered space-time systems. In Proceedings of 4th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC 2003), Rome, Italy, 15-18 June 2003; pp.482-486.
- Vía, J., Santamaría, I., Pérez, J. and Vielva, L. (2010), A new subspace method for blind estimation of selective MIMO-STBC channels. Wirel. Commun. Mob. Comput., 10: 1478–1492.
- Xianbin Wang; Yiyan Wu; Caron B. Transmitter identification using embedded pseudo random sequences. IEEE Transactions on Broadcasting 2004, 50, 244 – 252.