SISTEMA DE SENSORES ULTRASÓNICOS PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS BASADO EN LA TRANSMISIÓN DE SECUENCIAS GOLAY CON MODULACIÓN QPSK Y PORTADORAS DE DISTINTA FRECUENCIA

F. J. Álvarez, J. Ureña*, M. Mazo*, A. Hernández*, J.J. García*, J.A. Jiménez* y P. Donato*

Dpto. de Electrónica e Ingeniería Electromecánica. Universidad de Extremadura.

*Dpto. de Electrónica. Universidad de Alcalá.

fafranco@unex.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un sistema de sensores ultrasónicos para detectar la caída de obstáculos en vías ferroviarias. Este sistema está basado en una configuración sensorial básica de cuatro emisores y seis receptores que puede ser fácilmente ampliada si se desea cubrir áreas mayores. Los receptores son sensibles únicamente a las señales transmitidas por dos de los cuatro emisores gracias a que se realiza una modulación QPSK con portadoras de distinta frecuencia Esta propiedad, junto a la elevada ganancia de proceso que se obtiene al codificar las señales con parejas de secuencias complementarias Golay, permite al sistema operar bajo condiciones meteorológicas adversas donde las señales transmitidas son fuertemente dispersadas.

1. INTRODUCCIÓN

La detección automática de obstáculos es uno de los aspectos más importantes dentro de las aplicaciones de seguridad en el ámbito ferroviario. Varias son las tecnologías que se vienen utilizando en los sistemas desarrollados con esta finalidad (visión artificial, sensores infrarrojos, microondas,...) aunque ninguno de ellos ha resultado ser completamente infalible. Recientemente ha sido propuesto por los autores un novedoso sistema de sensores ultrasónicos que basa su funcionamiento en la codificación de las señales con parejas de secuencias complementarias Golay [1]. Este sistema es robusto frente a condiciones meteorológicas desfavorables siempre que la longitud de las secuencias emitidas sea lo suficientemente grande. No obstante, en atmósferas con una elevada actividad turbulenta las señales ultrasónicas sufren una fuerte dispersión en todas las direcciones, y el desempeño del sistema puede verse seriamente afectado como consecuencia del hecho de que los receptores son sensibles a las señales emitidas por los cuatro emisores. En este documento presentamos una solución a este problema basada en la emisión de señales con modulación QPSK y portadoras de distinta frecuencia.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

La configuración sensorial del sistema propuesto por los autores en [1] es la que se muestra en la figura 1. Esta estructura básica, que puede repetirse tantas veces como sea necesario hasta cubrir un determinado área, está formada por cuatro tipos de emisores (EA, EB, EC y ED) y dos tipos de receptores (RAB y RCD) situados de forma simétrica a ambos lados de la vía.

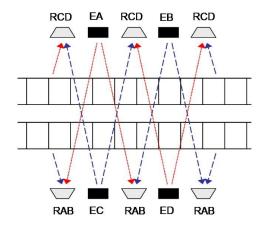


Fig. 1. Configuración sensorial básica

Con esta configuración cada receptor detecta simultáneamente las señales transmitidas por los dos emisores más cercanos situados al otro lado de la vía y además cada región esta cubierta por dos emisores distintos enfrentados, con lo que se introduce redundancia en las medidas. Los receptores pueden discriminar las señales transmitidas por los dos emisores situados al otro lado de la vía gracias a la codificación de estas señales con parejas de secuencias Golay [2] . Una pareja de secuencias complementarias Golay (a1,a2) de longitud L es una pareja de secuencias binarias que se caracteriza porque la suma de sus autocorrelaciones aperiódicas es siempre nula excepto para un desplazamiento nulo,

esto es:

$$R_{a1a1}(n) + R_{a2a2}(n) = 2L$$
 si $n = 0$
 $R_{a1a1}(n) + R_{a2a2}(n) = 0$ en otro caso (1)

Si (b1,b2) es otra pareja de secuencias complementarias, ambas parejas se dice que son ortogonales cuando la suma de las correspondientes correlaciones cruzadas es nula para cualquier desplazamiento:

$$R_{a1b1}(n) + R_{a2b2}(n) = 0$$
 para todo n (2)

Esta propiedad ha sido aprovechada para codificar las señales emitidas por EA y EB con dos parejas de secuencias ortogonales (a1, a2) y (b1, b2) y las señales emitidas por EC y ED con otras dos parejas distintas igualmente ortogonales entre sí (c1, c2) y (d1, d2). Además de las excelentes propiedades de autocorrelación que acabamos de describir, la principal ventaja que presenta el uso de secuencias Golay frente a otro tipo de secuencias con similares características, tales como las secuencias pseudoaleatorias, es la existencia de un algoritmo rápido de correlación que permite la implementación de un correlador eficiente para estas secuencias [3] [4] [5]. La emisión simultánea de las dos secuencias de cada par se ha realizado a través de una modulación QPSK ¹digital utilizando como símbolo para la modulación dos periodos de una señal cuadrada de 50kHz [6]. La señal que llega a cada receptor, después de ser acondicionada y digitalizada con una frecuencia de muestreo de 400 kHz (lo que da 16 muestras por símbolo de modulación), es sometida a un proceso digital cuyo diagrama de bloques puede verse representado en la figura 2. La primera etapa del proceso consiste en la

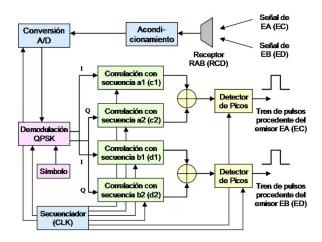


Fig. 2. Diagrama de bloques del proceso de detección

demodulación QPSK para obtener las componentes en fase (I) y en cuadratura (Q). A cada una de estas señales se le

realiza una doble correlación con el objeto de detectar las secuencias complementarias. Después de sumar las correlaciones con las dos secuencias del mismo par se realiza un proceso de detección de picos de modo que, siempre que la emisión no haya sido interrumpida por un obstáculo, se obtiene a la salida de cada detector un tren de pulsos cuyo periodo depende de la longitud de las secuencias emitidas. La codificación de la señal con secuencias Golay de longitud L, además de permitir al receptor discriminar las señales emitidas por ambos tipos de emisores, confiere al sistema una ganancia de proceso ideal de $10 \cdot \log(2L)$ dB, lo que le permite operar en condiciones meteorológicas adversas. No obstante, esta ganancia ideal se ve bastante reducida en la práctica ya que en presencia de un obstáculo parte de la señal transmitida por los emisores situados a un lado de la vía se ve reflejada y es recibida por los receptores situados en el mismo lado. Estos receptores pueden discriminar las señales que provienen de los emisores situados al otro lado, pero no las que provienen de los emisores situados en su mismo lado. Las señales reflejadas generan nuevos picos a la salida de los sumadores, lo que obliga a incrementar el umbral de detección por encima de estos picos. Este efecto puede verse en la figura 3 donde se ha simulado el proceso de detección en el receptor RAB. En esta figura se muestran 3 periodos de detección de 41 ms cada uno (secuencias de 1024 bits) con una relación señal-ruido de -6 dB. En la

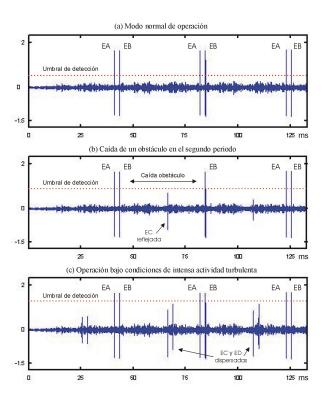


Fig. 3. Simulación del proceso de detección en RAB

¹Quadrature Phase Shift-Keying

figura 3a se muestra el modo normal de operación del sistema en el que las únicas señales que llegan al receptor RAB son las emitidas por EA y EB ya que no se produce ningún tipo de reflexión de las señales emitidas por EC y ED. Como puede verse en esta figura el algoritmo de detección es capaz de detectar las señales emitidas a pesar de que la potencia del ruido es mayor que la de la propia señal. En la figura 3b se ha simulado la caída de un obstáculo durante el segundo periodo de detección. Este obstáculo interrumpe la señal emitida por EA durante 38 ms, provocando además la reflexión de la señal emitida por EC. Como puede verse en esta figura en el segundo periodo ha desaparecido el pico correspondiente a la detección de la señal de EA, lo que el sistema interpretará como la caída de un obstáculo en el área que cubre este emisor, aunque la reflexión de la señal emitida por EC da lugar a un nuevo pico que obliga a elevar el umbral de detección para no confundir al sistema, deteriorando así la ganancia del proceso. La situación es aún peor cuando el sistema opera en condiciones de intensa actividad turbulenta, ya que las turbulencias actúan como centros de dispersión de la energía acústica y los receptores pueden estar recibiendo de forma continua y aleatoria señales provenientes de los emisores situados en su lado. Esta es la situación que aparece representada en la figura 3c, donde se ha supuesto que la potencia de la señal reflejada que llega a los receptores es 3 dB menor que la de las señales directas.

3. MODULACIÓN QPSK CON PORTADORAS DE DISTINTA FRECUENCIA

En esta sección presentamos una solución a los problemas de reflexión y dispersión de las señales ultrasónicas descritos anteriormente. Esta solución consiste en el uso de dos portadoras de distinta frecuencia para las señales emitidas a ambos lados de la vía. La modulación empleada sigue siendo QPSK digital pero ahora las señales emitidas por EA y EB son moduladas con una portadora de 48 kHz mientras que las señales emitidas por EC y ED lo son con una portadora de 56 kHz. Las señales que llegan a los receptores son ahora digitalizadas con una frecuencia de muestreo de 1344 kHz, lo que da 28 muestras por periodo en la portadora de 48 kHz y 24 muestras por periodo en la de 56 kHz tal y como puede verse en la figura 4. Con idea de aumentar la energía total transmitida por periodo de detección vuelve a utilizarse como símbolo para la modulación dos periodos de la portadora, de modo que las señales a transmitir por cada transductor pueden expresarse como:

$$EA(n) = a1(n \text{ div } 56) \cdot S_{48}(n \text{ mod } 56) + a2(n \text{ div } 56) \cdot S_{48}((n \text{ mod } 56) - 7)$$
(3a)

$$EB(n) = b1(n \text{ div } 56) \cdot S_{48}(n \text{ mod } 56) + b2(n \text{ div } 56) \cdot S_{48}((n \text{ mod } 56) - 7)$$
(3b)

$$EC(n) = c1(n \text{ div } 48) \cdot S_{56}(n \text{ mod } 48) + c2(n \text{ div } 48) \cdot S_{56}((n \text{ mod } 48) - 6)$$
(3c)

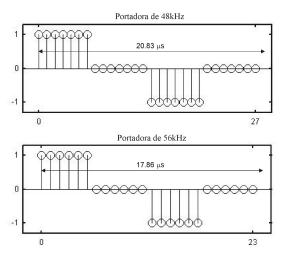


Fig. 4. Portadoras de la modulación ($fs = 1344 \ kHz$)

$$ED(n) = d1(n \text{ div } 48) \cdot S_{56}(n \text{ mod } 48) + d2(n \text{ div } 48) \cdot S_{56}((n \text{ mod } 48) - 6)$$
(3d)

donde S_{48} y S_{56} representan los símbolos de la modulación a 48 y 56 kHz respectivamente. En estas expresiones n toma valores desde 0 hasta $(L \cdot M - 1)$, siendo L la longitud de las secuencias Golay y M el número de muestras por símbolo.

Al utilizar en la modulación un símbolo de dos portadoras se consigue además concentrar el espectro de las señales moduladas en torno a la frecuencia de su portadora, facilitando su transmisión a través de los transductores ultrasónicos. Para realizar la transmisión de estas señales no es necesario utilizar nuevos transductores ya que los empleados en el sistema original tienen un ancho de banda lo suficientemente amplio, tal y como puede verse en la figura 5, donde aparece representada la respuesta en frecuencia de estos transductores [7]. La modulación con portadoras de distin-

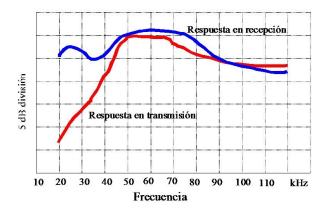


Fig. 5. Respuesta en frecuencia de los transductores

ta frecuencia hace que los receptores sólo sean sensibles a las señales transmitidas por los emisores situados al otro lado de la vía, ya que durante el proceso de demodulación que tiene lugar en estos receptores se hace uso del símbolo empleado en la modulación. Este hecho soluciona el problema de la reflexión tal y como puede verse claramente en la figura 6, donde se ha realizado la misma simulación que en la figura 3 pero asumiendo la transmisión con portadoras de distinta frecuencia. Como vemos en la figura 6b la

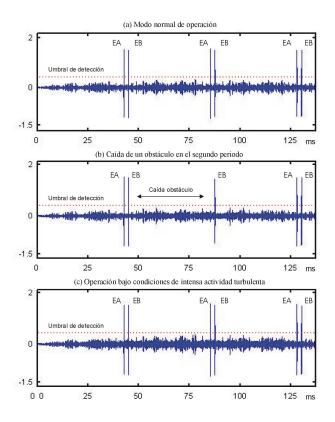


Fig. 6. Simulación del proceso de detección en RAB (con portadoras de distinta frecuencia)

reflexión provocada por la caída de un obstáculo no tiene ahora ningún efecto en el proceso de detección y la ganancia de este proceso sigue estando próxima a la ideal. Esta mejora en el comportamiento del sistema es aún más evidente cuando consideramos su operación bajo condiciones de intensa actividad turbulenta (figura 6c). A pesar de que en estas condiciones continuamente se está produciendo la reflexión de las señales emitidas, el proceso de detección no se ve afectado por ello y el umbral de detección permanece al mismo nivel que cuando el sistema opera en atmósferas no turbulentas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una importante mejora del sistema de sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos en vías que ha sido recientemente propuesto por los autores. Esta mejora consiste en la modulación QPSK con portadoras de distinta frecuencia de las señales emitidas (parejas de secuencias complementarias golay), lo que permite insensibilizar a los receptores del sistema respecto de las señales reflejadas que provienen de los emisores situados en el mismo lado de la vía. De este modo se consigue mantener la ganancia de proceso próxima a su valor ideal incluso cuando el sistema opera en condiciones meteorológicas adversas que provocan una fuerte dispersión de las señales ultrasónicas.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto PARMEI (ref. DIP2003-08715-C02-01).

6. REFERENCIAS

- [1] F. Álvarez, J. Ureña, M. Mazo, A. Hernández, J. J. García, and P. Donato, "Ultrasonic sensor system for detecting falling objects on railways," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Parma (Italia), junio 2004.
- [2] M. J. Golay, "Complementary series," *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-7, pp. 82–87, abril 1961.
- [3] S. Budisin, "Efficient pulse compressor for golay complementary sequences," *IEE Electronis Letters*, vol. 27, no. 3, pp. 219–220, Enero 1991.
- [4] S. Budisin, "Golay complementary sequences are superior to pn sequences," *IEEE International Conference on Systems Engineering*, 1992.
- [5] A. Hernández, J. Ureña, D. Hernanz, J.J. García, M. Mazo, J. P. Dérutin, and J. Serot, "Real-time implementation of an efficient golay correlator (egc) applied to ultrasonic sensorial systems," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 27, no. 8, pp. 397–406, 2003.
- [6] V. Díaz, J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, E. Bueno, and A. Hernández, "Multi-mode ultrasonic operation using golay complementary sequences and qpsk modulation," *TELEC* '2000, Santiago de Cuba 2000.
- [7] Polaroid Corporation, 600 Series. Instrument grade electrostatic transducers, 1999.