

# Implementación de un Sistema de Multiplexación por División de Paquetes Wavelet WPDM

Jorge Iván Marín Hurtado, Alexander López Parrado, Lilian Johany Certuche Alzate, Carlos Andrés Giraldo Castañeda

Grupo de Procesamiento Digital de Señales y  
Procesadores- GDSPROC  
Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de  
Ingeniería - CEIFI  
Universidad del Quindío, A.A 460, Armenia -Colombia  
email: gdsproc@uniquindio.edu.co

*Abstract*— Los sistemas de multiplexación basados en el procesamiento digital de señales permiten disminuir considerablemente la complejidad de su implementación en hardware a costa del incremento en la sofisticación de los algoritmos. Se presenta por lo tanto en este trabajo la implementación en tiempo real de las técnicas convencionales TDM, FDM y la revolucionaria técnica de multiplexación por división de paquetes wavelets (WPDM) en un DSP TMS320C6701. Se hace un estudio comparativo entre WPDM y sus antecesoras TDM y FDM analizando el desempeño de ésta en cuanto al ancho de banda requerido, densidad de canales, inmunidad al ruido y las diferentes técnicas de sincronización. Así mismo, se evalúan los diferentes costos computacionales de las técnicas de multiplexación estudiadas.

*Keywords*— Multiplexación, Paquetes Wavelets, WPDM

## I. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición, la transformada wavelet ha sido usada en una amplia variedad de aplicaciones [1], [2], [3] entre las cuales se encuentran sistemas de comunicación[4]. Al respecto, se han propuesto diferentes esquemas de modulación y multiplexación de señales[4], [5], [6], [7]. El más exitoso de ellos y de aplicación en las comunicaciones móviles, es el empleo de un árbol de síntesis wavelet para la generación de señales de espectro esparcido [4], [5], [6] y/o la generación de códigos CDMA[4]; otro esquema de poca divulgación es la técnica de Multiplexación de Señales por División de Paquetes Wavelet (WPDM)[7]. Esta última al igual que las técnicas convencionales TDM y FDM[8], tiene como propósito transmitir simultáneamente múltiples señales por un mismo canal, para lo cual codifica cada una de las señales mensaje con las funciones base de un paquete wavelet [7].

La WPDM está basada en los conceptos de la transformada wavelet discreta DWT. La idea básica del sistema, consiste en utilizar la transformada de paquetes wavelet inversa como esquema de multiplexación, en el que los coeficientes a la entrada de la estructura del árbol, son reemplazados por señales discretas de voz, con el fin de codificarlas con funciones bases (wavelet), y conformar una única señal que contiene la información suficiente y necesaria para que en la recepción se puedan recuperar las señales transmitidas. La WPDM, por el hecho de estar basada en la

DWT, tiene la propiedad de contener información en el dominio tiempo-frecuencia, generando solapamiento de las señales, que a su vez, produce una mejora del ancho de banda, en comparación con la multiplexación por división de frecuencia FDM[7]; la propiedad de ortogonalidad garantiza que las señales solapadas puedan ser recuperadas en el receptor, además, esta codificación permite que WPDM tenga un mayor inmunidad ante el ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) respecto a la multiplexación por división de tiempo TDM[7].

El sistema de WPDM propuesto en la Ref. [7] ha mostrado tener, por medio de simulaciones, un excelente desempeño en cuanto al ancho de banda e inmunidad al ruido ante señales de entrada digitales. Se propone en este trabajo mostrar la implementación de este sistema en un DSP TMS320C6701 y la evaluación de su costo computacional respecto a los algoritmos de las técnicas FDM y TDM. Así mismo, mostrar la factibilidad de transmisión de señales multinivel, y determinar para éstas el mejor conjunto de funciones base. Para el grupo de investigación, la implementación de estos sistemas de comunicación en DSPs tiene como propósito fundamental el desarrollo futuro de aplicaciones de telemetría.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Multiplexación por división de frecuencia

La multiplexación por división de frecuencia es una técnica, en la cual, la transmisión de varias señales se realiza de manera simultánea por un mismo canal, desplazando su contenido de frecuencia por medio de la modulación de amplitud, de manera que los espectros de las señales moduladas no se solapen, esta modulación se debe hacer a diferentes frecuencias; las señales ya moduladas se suman para después transmitir las. Para conseguir una implementación eficiente, desde el punto de vista espectral, se emplea por cada canal una modulación simple de banda lateral (SSB), ya que por cada canal se requiere el mismo ancho de banda de la señal banda base original [8].

La forma más simple de generar una señal SSB es generar inicialmente una señal de doble banda lateral (DSB), y posteriormente suprimir una de las bandas, ya sea la superior o la inferior, con un filtro pasa-banda. La demultiplexación del sistema se hace, primero con un filtro pasa-banda para obtener la señal del canal necesario; segundo, se demodula de forma síncrona para recuperar la señal original.

Para la implementación en el DSP, cada señal a multiplexar se de muestreó con una  $f_s = 8kHz$ , y para que estas no se solapen en la transmisión se introduce una banda de

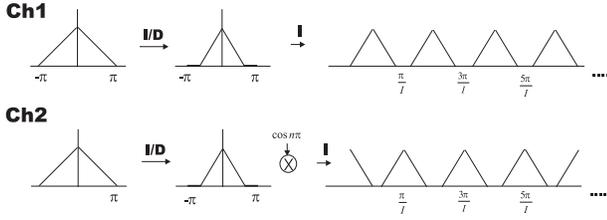


Fig. 1. Multiplexación por división en frecuencia

guarda de  $1kHz$  en el espectro, lo cual se realiza por medio de una interpolación  $I_1$  por 9, seguida de una diezmación  $D$  por 8, por lo tanto las señales a la salida de este sistema toman una frecuencia de muestreo  $f_s = 9kHz$ . Posteriormente, se interpola por un factor  $I_2$  de 20, generando así réplicas de la señal original en todo el espectro posible con la nueva frecuencia de muestreo. Finalmente, por medio de un filtro pasa-banda se escoge la banda lateral superior de una de las réplicas de más alta frecuencia.

Para conseguir una transmisión simultánea, cada uno de los canales cuenta con un diferente filtro pasa-banda. Para el primer canal se escogió la frecuencia central del filtro pasa-banda en  $\omega_c = \frac{10.5\pi}{I_2}$ , de modo que la frecuencia de portadora para este canal es  $47.25kHz$ , los otros canales se toman con frecuencia central consecutiva. Con el fin de conseguir una modulación de banda lateral superior, fue necesario para los canales pares, realizar una reflexión del espectro. Finalmente, en la implementación, los conjuntos interpolador (diezmador)-filtro fueron codificados con la estructura polifase que permite un costo computacional bajo [9].

### B. Multiplexación por división de tiempo

En la multiplexación por división de tiempo, a cada señal se le asigna un conjunto de espacios de tiempo de duración  $\delta$  que se repite periódicamente cada  $T$  segundos [8]. En la demultiplexación, la recuperación de las señales se realiza mediante un proceso de selección de ventana para elegir los instantes de tiempo correspondientes a la posición en el tiempo del canal. Por otra parte, en la transmisión por un canal real pueden presentarse distorsiones de la forma la señal multiplexada, a causa del ruido aditivo y efecto de la función de transferencia del medio, la cual conlleva a un solapamiento de dos o más canales en el tiempo, lo que produce el efecto denominado *Interferencia Intersímbolo* (ISI).

En la práctica, y para reducir el ISI, no basta con asignarle a cada canal un espacio de tiempo para la transmisión, sino también cada canal se codifica con una forma de onda tipo pulso de banda limitada y que cuente con cruces por cero en los otros tiempos de muestreo. El sistema así planteado se denomina técnica de *Modulación por Amplitud de Pulso* (PAM). El propósito del modulador PAM, es el de convertir la señal pulsante en señales extensas en el tiempo, empleando funciones tales como el coseno elevado. Para efectos de implementación sobre el DSP, el algoritmo del modulador PAM, se puede obtener a partir

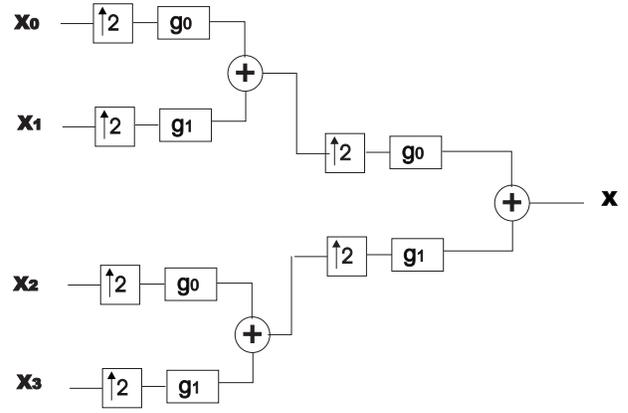


Fig. 2. Paquetes wavelet

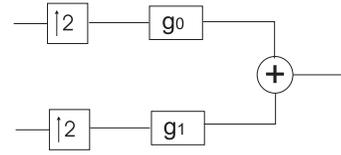


Fig. 3. Célula básica multiplexor

de la discretización de la siguiente expresión:

$$s(t) = \sum_k x[k] \phi(t - kT_s) \quad (1)$$

Que conduce a un interpolador por un factor  $I_{PAM}$ , y un filtrado por un sistema FIR con respuesta al impulso igual a  $h[n] = \phi\left(n \frac{T_s}{I_{PAM}}\right)$ .

### C. Multiplexación por división de paquetes wavelet

La multiplexación por división de paquetes wavelet (WPDM), se logra utilizando la forma inversa de la estructura, en la cual, las entradas al sistema son las señales a multiplexar. La demultiplexación hace uso de un árbol de descomposición wavelet, o equivalentemente, su forma directa. Para implementar dicho sistema se encuentra que en árbol de síntesis (Figura 2), la célula básica de constitución se puede expresar como la de la Figura 3. Luego de constituido el sistema en árbol, a la salida de éste, se utiliza un modulador PAM similar al de la estructura TDM.

La Figura 4, muestra la forma eficiente de implementación de la célula básica de constitución, la cual está

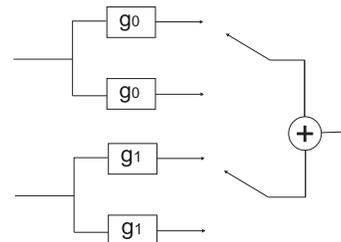


Fig. 4. Implementación eficiente célula básica

compuesta por un filtro pasa-bajo  $g_0$ , y un pasa-alto  $g_1$ , con implementación polifase de filtros FIR, donde  $g_0$  y  $g_1$  son filtros QMF (Quadrature Mirror Filter) [9]. De manera semejante, el demultiplexor se logra introduciendo el demodulador PAM a la entrada, seguido por la estructura en árbol adecuada que se construye al igual que en el multiplexor con una célula básica basada en cuatro filtros QMF  $h_0$  (pasa-bajo) y  $h_1$  (pasa-alto) y sus respectivos diezmadores. La ventaja de emplear estas células básicas es la posibilidad de implementación de un árbol no simétrico que permita transmitir señales mensaje con diferentes anchos de banda.

La demultiplexación de las señales WPDM requiere de una buena sincronización entre el transmisor y el receptor. De no garantizarse esta condición, aparecen en el receptor problemas de modulación intersímbolo. Esto se puede verificar al calcular las condiciones de reconstrucción perfecta de un sistema WPDM de mínimo 4 canales, en las cuales se encuentra que la señal recuperada en cualquiera de los canales depende de la señales de los restantes canales, aun bajo condiciones de reconstrucción perfecta de los filtros QMF. En la Ref. [7] se presenta una técnica de sincronización que consiste en filtrar el valor absoluto de la señal multiplexada por medio de un filtro pasabanda de banda angosta con frecuencia central igual a  $1/T_s$ . Debido al procesamiento digital que se aborda en este trabajo, este tipo de técnica resulta impropio, para tal efecto, se propone un nuevo método que consiste en emplear uno de los canales como canal de sincronización. Por dicho canal se envía un tren de impulsos sinc por razones que se describen más adelante; en el receptor, se evalúa la correlación cruzada entre la señal recuperada por el canal de sincronización y el tono sinc ideal, de esta forma, si la diferencia entre dicha correlación y la función de autocorrelación del tono de sincronía es una cantidad positiva, la señal de reloj se encuentra adelantada, y requiere ser atrasada, y viceversa. Este atraso o adelanto se consigue por medio de la inclusión de una línea de retardos de longitud adaptativa a la entrada del árbol de descomposición wavelet. En las simulaciones, este método de sincronización mostró ser eficiente aún ante alta interferencia al ruido aditivo (0dB).

El canal elegido para la transmisión de dicha señal de sincronía es el que presenta menor inmunidad al ruido y mayor susceptibilidad a la interferencia intersímbolo. Este puede ser determinado teóricamente con las expresiones dadas en [7]. Por otra parte, se escogió como señal de sincronía un tren de sincs dado a que su espectro en frecuencia es de banda limitada y de amplitud uniforme en un rango amplio de frecuencias.

### III. PRUEBAS DE DESEMPEÑO

Para hacer el estudio comparativo de la influencia del ruido se utilizaron los sistemas de multiplexación TDM y WPDM, dado que el sistema TDM respecto a FDM ofrece una mayor inmunidad al ruido. El tipo de ruido analizado en este sistema fue el ruido blanco gaussiano (AWGN). Dado que las señales a transmitir por cada uno de los canales se trata de señales multinivel, se estableció como criterio de comparación la medida de la distancia entre la señal

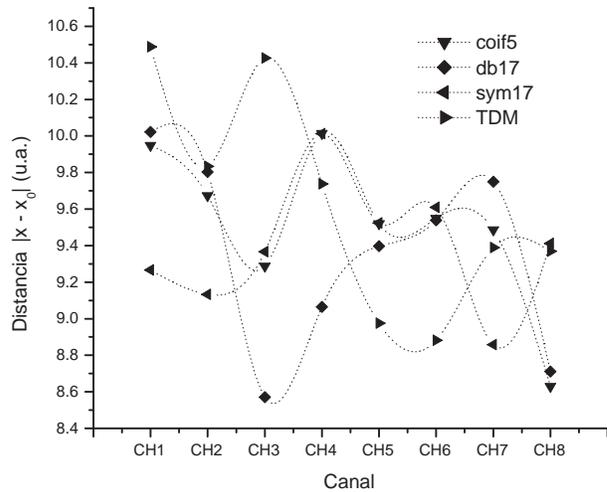


Fig. 5. Análisis de ruido

TABLA I  
TABLA DE RESULTADOS

	Distancia promedio SNR=0dB	Distancia promedio SNR=3dB	Ancho de Banda (KHz)
coif5	9.51	5.50	49.8
db17	9.35	5.13	49.5
sym17	9.39	4.97	49
TDM	9.63	7.2	—
FDM	—	—	39

transmitida y la recuperada en cada uno de los canales. Dicha distancia se calcula con la ecuación:

$$D = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots^2} \quad (2)$$

Para WPDM, se realizaron pruebas de inmunidad al ruido empleando para el paquete wavelet diferentes funciones base: Coiflet, Symlet y Daubechies, a diferentes órdenes. De esta forma se seleccionaron las funciones base que mejor se adaptaran a las condiciones una relación señal a ruido SNR igual a 0dB. Las funciones base con un mejor desempeño a estas condiciones de ruido fueron la Coiflet 5, la Daubechies 17 y la Symlet 17. La figura 5, muestra la gráfica de la distancia para cada uno de los canales con las wavelet elegidas, además los resultados obtenidos para TDM. Todas estas gráficas están referidas a SNR = 0dB.

Nótese que para el caso de TDM los canales inferiores presentan una inmunidad al ruido menor que los canales superiores, en cambio, para el caso de WPDM con las funciones base Daubechies 17 y Symlets 17, el sistema ofrece una inmunidad al ruido semejante en todos los canales. Así mismo, los sistemas basados en WPDM ofrecen un desempeño promedio superior al obtenido por TDM (Ver Tabla I).

En la tabla se incluye también el ancho de banda de la señal multiplexada por FDM y WPDM. Los resultados del ancho de banda difieren de lo planteado en [7], en donde se muestra un ahorro del ancho de banda de hasta el 30% cuando se utiliza WPDM y señales binarias de entrada. En nuestro caso este ahorro no fue posible obtenerlo debido a que: a) las señales transmitidas son del tipo multinivel; b) experimentalmente se comprobó que la reducción del ancho de banda se logra disminuyendo el factor de interpolación del modulador PAM, lo que conlleva a un submuestreo de la señal base PAM (coseno elevado) que no garantiza los cruces por cero que evitan la interferencia intersímbolo, no permitiendo la recuperación eficiente de las señales en el demultiplexor wavelet.

Por otra parte, respecto a la complejidad computacional se encuentra que de las tres técnicas presentadas, TDM es la que ofrece un menor número de cálculos, seguido de WPDM y FDM.

#### IV. CONCLUSIONES

Se mostró la posibilidad de emplear un sistema de multiplexación por división de paquetes wavelet para señales multinivel que proporciona en promedio para todos los canales una mayor inmunidad al ruido que un sistema TDM típico, sin embargo, no fue posible obtener una reducción del ancho de banda de la señal multiplexada frente a FDM. Por otra parte, los algoritmos de FDM, TDM y WPDM implementados en este trabajo permitirán en la región futuros desarrollos de sistemas de comunicación basados en DSP.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha podido realizar gracias al apoyo financiero de la Universidad del Quindío a través del proyecto 222.

#### REFERENCIAS

- [1] R. M. Rao and A. S. Bopardikar, *Wavelet Transforms*. Addison Wesley, 1998.
- [2] G. Strang and T. Nguyen, *Wavelets and Filter Banks*. Wellesley: Wellesley–Cambridge Press, 1997.
- [3] A. Teolis, *Computational Signal Processing with Wavelets*. Boston: Birkhauser, 1998.
- [4] A. N. Akansu and M. J. Medley, *Wavelet, Subband and Block Transforms in Communications and Multimedia*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] K. Hetling, "A pr-qmf (wavelet) based spread spectrum communications system."
- [6] K. Hetling, G. Saulnier, and P. Das, "Optimized filter design for pr-qmf based spread spectrum communications," 1995.
- [7] J. Wu, *Wavelet Packet Division Multiplexing*. Phd thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario, 1998.
- [8] F. G. Stremmer, *Sistemas de Comunicación*. Alfaomega, 1989.
- [9] Fliege, *Multirate Digital Signal*. New York: Jhon Wiley and Sons Ltd., 1994.