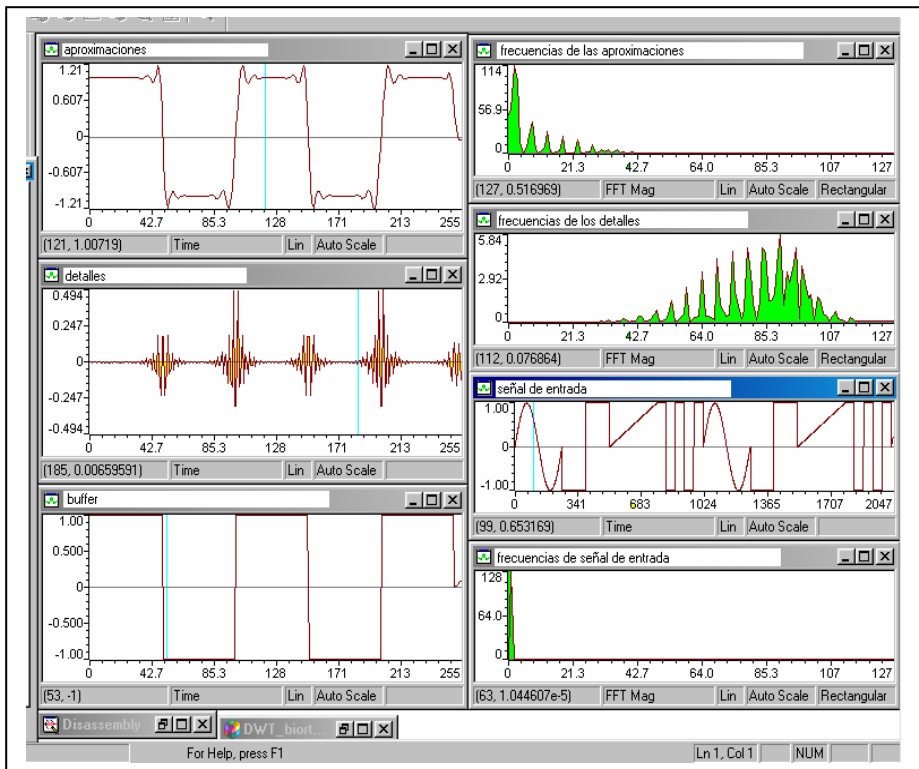


IMPLEMENTACIÓN DE UNA TOOLBOX BÁSICA PARA TRATAMIENTO DE SEÑALES CON WAVELETS EN UN PROCESADOR DIGITAL DE SEÑAL



ABSTRACT

It is exposed the theoretical fundamentation of Wavelet Transform, including topics as: Multiresolution Analysis, Time-Frequency localization, orthonormal wavelets, biorthogonal wavelets and boundary conditions. Also, it is presented the implementation of a toolbox to process signals through wavelet transform by using DSP Starter Kit TMS320C6711, manufactured by Texas Instruments Inc. Matlab was used in order to calculate the filter's coefficients, based on the type of wavelet used.

KEYWORDS

Multiresolution, Time-frequency Analysis, Wavelet, DSP, Filter Bank, Daubechie, Transform, DWT.

RESUMEN

Se presenta la fundamentación teórica de la Transformada Wavelet incluyendo tópicos como: Localización Tiempo-Frecuencia, Análisis Multiresolución, Wavelets Ortonormales, Wavelets Biotragonales y Tratamiento de Frontera. Además, se presenta la implementación de una herramienta (toolbox) para llevar a cabo el tratamiento de señales por medio de transformada wavelet en la tarjeta de desarrollo para el DSP de Texas Instruments TMS320C6711, con apoyo de Matlab para el cálculo de los coeficientes de los filtros, según el tipo de wavelet a utilizar.

PALABRAS CLAVE:

Multirresolución, Tiempo-frecuencia, Wavelet, DSP, Banco de Filtros, Daubechie, Transformada, DWT.

- **Carlos Andrés Niño,** Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander.
- **Cesar Antonio Duarte Gualdrón,** Mag. Profesor la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.
- **Daniel Alfonso Sierra Bueno,** Mag. Profesor Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

Bioingeniería, parte del grupo de investigación CEMOS de la Universidad Industrial de Santander.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de señales exige, a medida que las aplicaciones lo requieren, ciertas herramientas que las transformadas clásicas no cubren, como es el caso para señales no estacionarias. De aquí la necesidad de estudiar instrumentos que se ajusten a las características de cada tipo de señal y así mejorar su análisis.

El presente estudio trata la fundamentación teórica de Wavelet, y la implementación de algoritmos en DSPs, con el propósito de generar una herramienta para el modelado y segmentación de señales mediante la Transformada Discreta Wavelet (DWT).

Al inicio, el artículo se dedica a la revisión conceptual de la DWT. Paso seguido, se presentan las wavelets Ortonormales y Biortogonales, junto con consideraciones de frontera necesarias para la implementación de la DWT.

Se muestra el proceso de implementación de la toolbox en la tarjeta de desarrollo para el DSP de Texas Instruments TMS320C6711, con el apoyo de Matlab para el cálculo de los coeficientes de las wavelets, según el tipo de onda a utilizar.

Por último, se presentan algunos resultados de la puesta en práctica de la herramienta y conclusiones.

2. FUNDAMENTOS DE WAVELETS Y LOCALIZACIÓN TIEMPO FRECUENCIA

El término wavelets, cuyo significado literal es “pequeñas ondas”, hace referencia a la característica de contar con soporte o longitud, idealmente compacto, tanto en tiempo como en frecuencia.

Las wavelets se pueden considerar como una herramienta matemática para la representación, (modelado y segmentación) de formas de onda y análisis tiempo-frecuencia.

El modelado de señales se basa en su representación a partir de funciones base conocidas [1]. Para el caso de la Transformada de Fourier, por ejemplo, se realiza este modelado utilizando como funciones base senos y cosenos, sin embargo, existen otros tipos de funciones que dependiendo de la aplicación y de la señal a modelar permiten una mejor representación.

Se entiende por segmentación el proceso de descomposición de una señal [1]. Para el caso de la Transformada Wavelet, esta división se hace en espacios de funciones (V_j y W_j) generados a partir de las funciones base $\phi(t)$ y $\psi(t)$ por medio de combinaciones, escalamientos y traslaciones de éstas. En este caso las dos funciones base se denominan función de escala y wavelet, respectivamente.

La generación de los espacios de funciones está definida por (1).

$$V_j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \phi(2^j t - k) = \langle \phi(2^j t - k) \mid k \in Z \rangle \quad j \in Z$$

con base $\phi(2^j t)$ (1)

$$W_j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi(2^j t - k) = \langle \psi(2^j t - k) \mid k \in Z \rangle \quad j \in Z$$

con base $\psi(2^j t)$

Considerando los espacios de funciones definidos en (1), se puede observar que el término 2^j determina la rapidez de cambio de las funciones $\phi(t)$ y $\psi(t)$, por tanto este término tendrá un efecto sobre la rapidez de las ondas generadas, es decir, los espacios V y W tendrán un ancho de banda relacionado con el factor 2^j . El término k por su parte hace referencia a

ubicación temporal e indica en qué lugar está centrada la función base (resolución tiempo-frecuencia).

3. ANÁLISIS MULTIRRESOLUCIÓN

Una función puede ser vista como una composición de funciones de transiciones lentas o de aproximaciones y de transiciones fuertes o de detalles [5].

El término 2^j en la ecuación (1) determina el nivel de resolución o escala bajo la cual los detalles pueden ser discernidos, como lo muestra la fig.2.

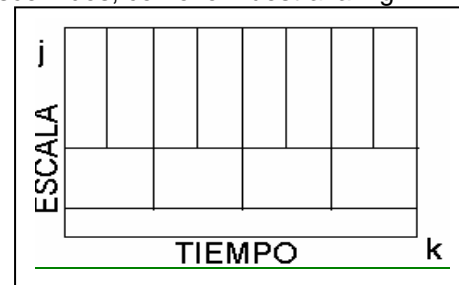


Figura 2. Ventanas tiempo-frecuencia de la Transformada Wavelet.

Sea $f(t)$ una función de energía finita, perteneciente al espacio $L^2(R)$ (funciones de energía finita), que se proyecta sobre el espacio V_n generado por $\langle \phi(2^n t - k) \rangle$ y con resolución $j = n$; este modelo se denomina, $f_n(t)$.

Una alternativa para modelar $f_n(t)$, implica ir de un nivel de baja resolución a uno de alta, esto es posible gracias a la propiedad de anidamiento, representada en (2).

$$\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \dots \subset V_j \dots \subset L^2_{(R)} \quad (2)$$

Con base en esta propiedad, las características tiempo-frecuencia de los espacios V_j y con la función $\phi(t)$ se han planteado cinco requerimientos para el análisis multiresolución [5]:

A. Existe una función $\phi(2^j t)$ llamada función de escala que por traslaciones forma una base ortonormal V_j :

$$V_j = \langle \phi(2^j t - k) \rangle \quad (3)$$

B. El análisis multiresolución requiere que el espacio V_j esté contenido en todos los sub-espacios mayores (anidamiento).

$$V_j \subset V_{j+1} \quad \forall j \quad (4)$$

C. Todas las funciones cuadrado integrables están incluidas en la más alta resolución ($j \rightarrow \infty$). El menor nivel de resolución ($j \rightarrow -\infty$). no permite representar ningún tipo de variación en la señal.

D. Invarianza a la dilatación: Todos los espacios V_j son versiones escaladas del espacio V_0 .

F. Invarianza al corrimiento: Si $f(2^j t) \in V_j$ entonces traslaciones enteras de ésta también pertenecen a V_j .

$$f(2^j t - k) \in V_j$$

La representación de la señal $f(t)$ en el espacio generado por la función de escala $\phi(t)$ se expresa como:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \phi(t - ka) \quad (5)$$

Es importante encontrar un esquema computacional eficiente que represente la señal óptimamente para lo cual se necesita una expresión que relacione las funciones $\phi(t)$ de diferente rapidez [1].

Se desea representar una función de escala rápida como una combinación lineal de funciones $\phi(t)$ lentas y trasladadas. La secuencia p_k , en la función doble escala (6), será la encargada de relacionar tales funciones.

$$\phi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_k \phi(t-k) \quad (6)$$

(6) en el dominio de la frecuencia:

$$\hat{\phi}(\omega) = P(z) \hat{\phi}\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad z = e^{-j\omega/2} \quad (7)$$

(7) permite interpretar que la secuencia P_k es un filtro pasa-bajos, encargado del cambio de nivel en la representación (paso de una señal rápida a una más lenta).

4. WAVELETS ORTOGONALES

Una condición importante que tiene la función wavelet ($\psi(t)$) es que presenta un determinado número de momentos desvanecientes en relación con las funciones de escala, ya que permite establecer la forma de la Wavelet y su capacidad para suprimir determinados polinomios [7]. Finalmente se busca construir $\psi(t)$ ortogonal al espacio V_n .

La función de escala $\phi(t)$ genera un análisis multirresolución (AMR) en L^2 como sugiere (2). Para n entero y, dado que V_{n-1} es un sub-espacio propio de V_n , existe un sub-espacio ortogonal no trivial complementario a este, W_{n-1} .

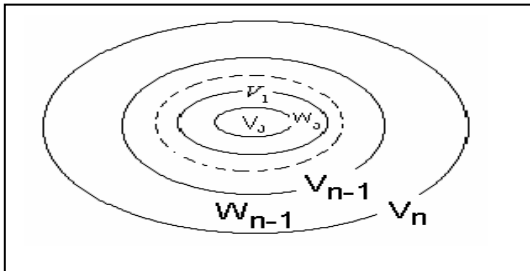


Figura 3. Representación de los espacios ortogonales V_i y W_j

5. WAVELETS ORTONORMALES

Una función es ortonormal si cumple (8). De esto se tiene que la función de energía finita (9) genera el sub-espacio complementario ortogonal, W_n relativo al AMR generado por $\phi(t)$. [1],[2].

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| \hat{\phi}_{D;m}(\omega - 2\pi k) \right|^2 = 1 \quad \forall \omega \quad (8)$$

$$\psi(t) = \sum_k (-1)^k p_{1-k} \phi(2t-k) \quad (9)$$

A continuación se enuncian algunas funciones de escala para generar wavelets ortonormales las cuales son las que se implementaron en el DSP: *Funciones Haar*, *Shanon*, *Meyer*, *Spline Battle – Lemarie*, *Funciones Daubechies*.

6. WAVELETS BIORTOGONALES

Un hecho importante es la necesidad de contar con una Wavelet de análisis que realice la transformada y otra de síntesis que reconstruya la señal.

Para satisfacer este requerimiento se consideran el par de Wavelets $\psi(t)$ y su Wavelet dual $\tilde{\psi}(t)$, las cuales se construyen mediante el principio de dualidad [1],[2]. Esto permite intercambiar las funciones durante la síntesis y el análisis. Es decir, cualquiera de estas puede ser considerada como wavelet de síntesis o de análisis. Por tanto

$$f(t) = \sum_{j,k} \hat{d}_{j,k} \psi_{j,k}(t) = \sum_{j,k} \tilde{d}_{j,k} \tilde{\psi}_{j,k}(t) \quad (10)$$

En general no se requiere que el espacio generado por la Wavelet madre W_n sea ortogonal al espacio generado por la función de escala V_n , sólo se requiere que

$$V_{n-1} \cap W_{n-1} = \{0\} \quad n \in \mathbb{Z} \quad (11)$$

$\psi(t)$ es seleccionada tal que tenga una dual $\tilde{\psi}(t)$, esto indica que el producto interno de $\psi(t)$ con $\tilde{\psi}(t)$ sea:

$$\langle \psi_{j,k}(t), \tilde{\psi}_{l,m}(t) \rangle = \delta_{j,l} \delta_{k,m} \quad j, k, l, m \in \mathbb{Z} \quad (12)$$

Ahora se presentan los espacios: \tilde{V} generado por $\tilde{\phi}(t)$ y el espacio \tilde{W} generado por $\tilde{\psi}(t)$ así:

$$\tilde{W}_n := \langle \hat{\psi}_{n,k}(t) : k \in \mathbb{Z} \rangle \quad \text{y} \quad \tilde{V}_n := \langle \tilde{\phi}_{n,k}(t) : k \in \mathbb{Z} \rangle \quad (13)$$

Estos espacios (V_n, \tilde{V}_n, W_n y \tilde{W}_n) deben cumplir con las siguientes condiciones:

$$W_n \perp \tilde{V}_n \quad \text{y} \quad \tilde{W}_n \perp V_n \quad n \in \mathbb{Z} \quad (14)$$

Finalmente para hacer intercambiables $\psi(t)$ y $\tilde{\psi}(t)$ sin pasar de una representación en el espacio generado por $\phi(t)$ a la representación generada por $\tilde{\phi}(t)$ se requiere que:

$$W_n \perp V_n \quad (15)$$

Es decir, la suma de descomposición ortonormal debe ser una descomposición ortogonal, por tanto es conveniente que $\tilde{\phi}(t)$ sea dual a $\phi(t)$.

7. IMPLEMENTACIÓN

Los anteriores numerales recopilan la descripción de los conceptos fundamentales, que encierra la teoría Wavelet.

A continuación se expone el desarrollo de una Toolbox para la tarjeta de desarrollo del DSP de Texas Instruments TMS320C6711, que sirve para el análisis, procesamiento, modelado y segmentación de señales mediante transformada wavelet.

Una de las principales características de la transformada wavelet, como potente herramienta matemática para el análisis de señales, es la simplicidad de cálculo e implementación. Se presentan los algoritmos elaborados para la implementación realizada en el sistema de desarrollo para el DSP TMS320C6711 de Texas Instruments, donde las familias wavelets fueron desarrolladas utilizando Matlab como herramienta de cálculo y comprobación de la teoría presentada en los numerales anteriores.

7.1 Desarrollo en Matlab

Se planteó como uno de los principales objetivos construir una herramienta para comprender los principios matemáticos involucrados en la transformada wavelet. Por tanto, se desarrollan una a una las familias Wavelet mencionadas anteriormente, calculando las características de su respuesta en frecuencia y comprobando la complementariedad que estas respuestas presentan.

7.2 Implementación en el Sistema de Desarrollo Para DSPs.

La implementación de la Transformada de Wavelet se realiza en el sistema de desarrollo (DSK) para DSPs de Texas Instruments TMS320C6711 utilizando el lenguaje de programación ANSI C y el software del DSK CODE COMPOSER STUDIO (C.C.S.).

En el DSP se han programado los algoritmos de descomposición y reconstrucción de señales utilizando las diferentes wavelets presentadas con anterioridad. El usuario puede elegir la familia Wavelet a utilizar y el número de descomposiciones a realizar. Así el sistema calcula los coeficientes de aproximación y de detalle de cada nivel de descomposición, permitiendo visualizar y modificar el proceso paso a paso, utilizando las herramientas de visualización y manejo de información que ofrece el C.C.S.

A continuación el sistema desarrollado permite recuperar la señal original a partir de los coeficientes de aproximación y de detalle si estos no son alterados. En esta reconstrucción el usuario puede modificar los coeficientes utilizados y de esta forma realizar análisis diversos sobre las diferentes componentes de la señal.

La operación en tiempo real del DSP se ha simulado mediante un canal DMA entre el procesador y la memoria externa del dispositivo, de esta manera es posible analizar señales sintetizadas o adquiridas.

7.2.1 Algoritmo Rápido y Banco de Filtros

La transformada wavelet se realiza a una señal de energía finita $f(t)$ utilizando bancos de filtros. El primer paso consiste en representar $f(t)$ por una función $f_n(t)$ en V_n como sigue:

$$f_n(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n,k} \phi(2^n t - k) \quad (16)$$

donde se toma como coeficientes $c_{n,k}$ a las muestras discretas de la señal $f(t)$. Así el algoritmo wavelet es aplicado a esta secuencia de coeficientes. [1], [2], [4], [7].

7.2.1.1 Algoritmos de Descomposición y Reconstrucción

Para hallar $f_{n-1}(t)$, y , $g_{n-1}(t)$, es decir, la descomposición de la señal en la aproximación $f_{n-1}(t)$ y los detalles $g_{n-1}(t)$, es necesario obtener las secuencias $c_{n-1,k}$ y d_{n-1} a partir de:

$$d_{n-1,k} = \sum_l b_{l-2k} c_{n,l} \quad c_{n-1,k} = \sum_l a_{l-2k} c_{n,l} \quad (17)$$

Las relaciones anteriores muestran que para el cálculo de las secuencias $c_{n-1,k}$ y d_{n-1} la secuencia $c_{n,l}$ es convolucionada con las secuencias a_l y b_l , calculando sólo las muestras de salida de índice par. Esta operación se denomina sub-muestreo y es denotado por $2 \downarrow$.

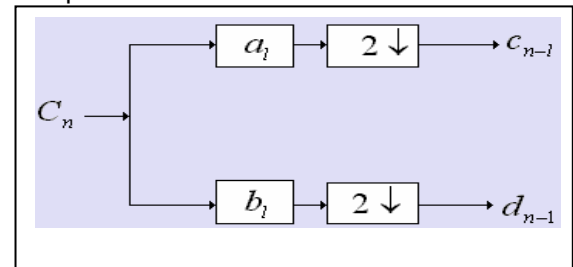


figura 4. Descomposición Wavelet.

Para reconstruir $f_n(t)$ a partir de $f_{n-1}(t)$ y $g_{n-1}(t)$ se debe calcular

$$C_{n,k} = \sum_l \{ p_{k-2l} c_{n-1,l} + q_{k-2l} d_{n-1,l} \} \quad (18)$$

Puede observarse que para desarrollar (18) como una operación de convolución es necesario insertar ceros en las muestras para l impar en $C_{n-1,l}$ y d_{n-1} (Figura 5). La adición de estos ceros a las muestras es conocida como sobre-muestreo y se denota por $2 \uparrow$

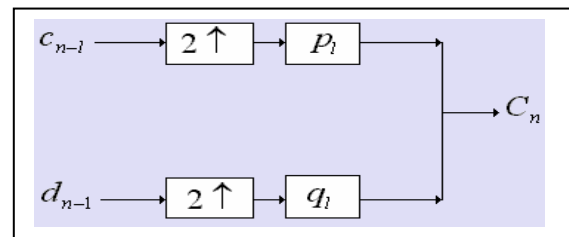


Figura 5. Reconstrucción Wavelet.

7.2.2 Tratamiento de Fronteras

Clásicamente, la DWT es definida para secuencias cuya duración es alguna potencia de dos, pero en general es necesario extender el número de muestras a otros tamaños.

El algoritmo básico de la DWT, esquema simple de convoluciones y sub-muestreo, no está limitado para longitudes diádicas. Como es usual cuando una convolución se desarrolla sobre señales de longitud finita, aparece distorsión en los bordes. Para tratar esto, los bordes pueden ser procesados de forma diferente que los otros puntos de la señal. El presente trabajo ha considerado varios métodos para abordar adecuadamente este problema.

Los métodos utilizados para tratamiento de frontera implementados en este trabajo son: Extensión de cero, simetrización, extensión periódica.

8. RESULTADOS

Esta sección muestra algunas de las pruebas y resultados de la herramienta desarrollada en ambiente Matlab y para la DSK de Texas Instruments para los diferentes algoritmos estudiados e implementados.

Las tablas I a V muestran algunos de los coeficientes de las familias wavelets implementadas. Los cuales corresponden con las diferentes referencias, [1] y [2] entre otras.

Tabla II
Coeficientes secuencia doble escala w. Meyer 3

| K | PK=P-K | K | PK=P-K | K | PK=P-K |
|---|--------------|----|--------------|----|--------------|
| 0 | 1.0518219488 | 7 | -0.045387780 | 14 | -0.003821454 |
| 1 | 0.6280446744 | 8 | 0.0246130788 | 15 | -0.000817683 |
| 2 | -0.049565743 | 9 | 0.0215679632 | 16 | 0.0012145042 |
| 3 | -0.187661179 | 10 | -0.015619473 | 17 | 0.0002279990 |
| 4 | 0.0433049518 | 11 | -0.009032197 | 18 | -0.000132239 |
| 5 | 0.0900390522 | 12 | 0.0085496312 | 19 | -0.000197854 |
| 6 | -0.034396228 | 13 | 0.0031038711 | 20 | -0.000106925 |

Tabla ii
Coeficientes secuencia doble escala w. Daubechies 4

| K | P _K | K | P _K |
|---|------------------|---|-----------------|
| 0 | 0.32580342805130 | 4 | -0.264507167369 |
| 1 | 1.01094571509183 | 5 | 0.0436163004741 |
| 2 | 0.89220013824676 | 6 | 0.0465036010709 |
| 3 | -0.0395750262356 | 7 | -0.014986989330 |

Tabla III
Coeficientes secuencia doble escala w.
Biortonormales spline de orden 2

| K | PK |
|---|-----|
| 0 | 0.5 |
| 1 | 1 |
| 2 | 0.5 |

Tabla IV
Coeficientes secuencia doble escala q_k w.
Biortonormales spline de orden 2

| K | Q _K |
|---|----------------|
| 0 | 0.083333333 |
| 1 | -0.5000000 |
| 2 | 0.833333333 |
| 3 | -0.5000000 |
| 4 | 0.083333333 |

Tabla V
Coeficientes secuencia doble escala a_k w.
Biortonormales spline 2.

| K | A _K | K | A _K | K | A _K |
|---|----------------|----|----------------|----|----------------|
| 1 | 0.68301270189 | 7 | -0.008330249 | 13 | 0.0001602563 |
| 2 | 0.31698729810 | 8 | -0.006098165 | 14 | 0.0001173158 |
| 3 | -0.1160254037 | 9 | 0.0022320835 | 15 | -0.000042940 |
| 4 | -0.0849364905 | 10 | 0.0016339985 | 16 | -0.000031434 |
| 5 | 0.03108891324 | 11 | -0.000598084 | 17 | 0.0000115058 |
| 6 | 0.02275866404 | 12 | -0.000437828 | 18 | 0.0000084228 |

Se probó la herramienta aplicando el tratamiento wavelet a diversas señales como: senoidales con transitorios, escalón unitario, ondas cuadradas no estacionarias, electrocardiogramas, etc. calculando la respuesta de la transformada a cada nivel de descomposición y comparando tales resultados con los obtenidos por medio de los comandos disponibles en Matlab (para aquellas que tiene implementada la Toolbox de Matlab). Además se confrontaron la señal de entrada y su reconstrucción, sin alterar los coeficientes wavelet, mediante el cálculo del error cuadrático medio.

Uno de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla VI teniendo como señal de entrada una señal con duración de 256 puntos, de tipo cuadrada, ciclo de trabajo 50% y con amplitud entre -1 y 1. Se observa un excelente comportamiento tanto en la descomposición de la señal como en su recuperación. La última columna muestra que el error cuadrático medio obtenido durante el proceso es reducido.

Tabla VI.
Error Cuadrático Medio Para Una Función Cuadrada
Entre -1y 1 con 256 Puntos

| Wavelet | Coef. Usados | Trato Frontera | Error Cuadrático Medio |
|-----------------------|--------------|----------------|------------------------|
| Biorotogonal Spline 3 | 15 | Ceros | 0.0013164 |
| Biorotogonal Spline 3 | 15 | Periódico | 0.0021215 |
| Biorotogona Spline 3 | 15 | Simétrico | 0.00246264 |
| Biorotogonal Spline 3 | 30 | Ceros | 4.0519e-006 |
| Biorotogonal Spline 3 | 30 | Periódico | 9.2102e-006 |
| Biorotogonal Spline 3 | 30 | Simétrico | 7.0328e-006 |
| Ortonormal Meyer 2 | 15 | Ceros | 3.1023e-004 |
| Ortonormal Meyer 2 | 15 | Periódico | 0.0010079 |
| Ortonormal Meyer 2 | 15 | Simétrico | 2.63896e-004 |
| Daubechies 4 | -- | Ceros | 7.34208e-007 |
| Daubechies 4 | -- | Periódico | 8.70524e-007 |
| Daubechies 4 | -- | Simétrico | 7.75604e-007 |

9. CONCLUSIONES

Se recopilan los conceptos y connotaciones básicas asociadas a la transformada wavelet. Con base en este estudio teórico se ha implementado una herramienta que calcula esta transformada y permite analizar aplicaciones en diferentes áreas, en particular en el campo de las señales no estacionarias que requieran análisis tiempo-frecuencia.

La transformada discreta de wavelet se desarrolló por el esquema de banco de filtros, mediante convoluciones y sub-muestreo; lo cual, para señales de longitud arbitraria, presenta distorsión en los bordes. Este problema se abordó mediante el esquema de extensión de la señal ya que genera resultados eficientes y simplifica su implementación.

La herramienta implementada permite el análisis de señales con las wavelets ortonormales: Haar, Shannon, Meyer, Battle-Lemarie, Daubechies y las wavelets biortogonales spline. Esta herramienta se ha diseñado combinando las ventajas para realizar desarrollos académicos que ofrece Matlab con las ventajas de velocidad de procesamiento que ofrecen los DSPs, ante todo para aplicaciones que requieran cálculos en tiempo real como la clasificación de formas de onda, extracción de parámetros, filtrado, discriminación de frecuencias, entre otras.

REFERENCIAS

- [1] C.K.Chui, "Wavelets: a Mathematical Tool for Signal Analysis". Texas A&M University College Station, Texas. SIAM. Philadelphia 1997.
- [2] I.Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets". Rutgers University and AT & T Bell laboratories. SIAM. Philadelphia, Pennsylvania 1992.
- [3] A. V. Oppenheim and Ronald W. Schafer, "Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto". Prentice Hall 2000.
- [5] P. Faundez Y Álvaro Fuentes, "Procesamiento Digital de Señales Acústicas Utilizando Wavelets". Profesor Patrocinante Pedro Reumay, Instituto de Matemáticas UACH.
- [6] H.M. Deitel and P.J. Deitel, "Cómo Programar en C/C++". Prentice Hall. Segunda edición 1995.
- [7] "The Wavelet Tutorial" (Agosto 2003) <http://www.ccrma.stanford.edu/unjung/mylec/wtpart4>.
- [8] "Daubechies' Wavelet Transform" (Octubre 2003) http://www.pp.iij4u.or.jp/~alucard/menu_j
- [9] "A Linear Algebra View of the Wavelet Transform" (Noviembre, 2003), http://www.bearcave.com/misl/misl_tech/wavelets/index
- [10] "The Fast Wavelet Transform (FWT) Algorithm" (Enero 2004), <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet>
- [11] Catálogos de Funcionamiento de la Tarjeta de Texas Instruments DSP-TMX6700.

AUTORES



Carlos Andrés Niño Niño, Ing.
Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander. Calle 13 No 29-21, 6350474, Bucaramanga/Col. c_andresvt@yahoo.com



Oscar Javier Olarte Rodríguez, Ing.
Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander. Calle 13 No 29-21, 6431547, Bucaramanga Colombia, oscjaviero@yahoo.es



Daniel Alfonso Sierra Bueno, Mag.
Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico, UIS, 2001, *Summa Cum Laude*. Magister en Ingeniería Eléctrica, UIS, 2004. Profesor Auxiliar de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y De Telecomunicaciones, UIS. Áreas

de Interés Modelado de Sistemas Físicos, Bioingeniería, Procesamiento De Señales, Sistemas de Control. Dir: Escuela de Eléctrica UIS Cra 27 Calle 9 Ciudad Universitaria Tel: 57-7-6359621, Bucaramanga, Colombia; dasierra@uis.edu



Cesar Antonio Gualdrón, MPE.
Ingeniero Electricista, UIS, 1998, *Summa Cum Laude*. Magíster En Potencia Eléctrica, UIS, 2004. Profesor Auxiliar de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, UIS.

Áreas de Interés Procesamiento Digital de Señales, Calidad de la Energía Eléctrica, Bioingeniería. Dir: Escuela de Eléctrica UIS Cra 27 Calle 9 Ciudad Universitaria Tel: 57-7-6359621, Bucaramanga, Colombia; cedagua@uis.edu.co