

# Análisis Basado en la Transformada Wavelet para Determinar Duración de Transitorios en Señales

Juan Marcos Macchi Konrad , Lorenzo De Pasquale, Miguel Angel Banchieri

Departamento de Electrónica  
Facultad Regional Bahía Blanca  
Universidad Tecnológica Nacional  
Bahía Blanca, Argentina  
{marcosmacchi, pasquale, mbanch}@frbb.utn.edu.ar

**Resumen** — El análisis de señales empleando la transformada de Fourier es bien conocido y aplicado en diversas áreas de la ingeniería. Su utilidad fundamental radica en el estudio de señales estacionarias, es decir, aquellas cuyo contenido de frecuencias (espectro) no varía con el tiempo. En situaciones donde las señales son no estacionarias, la transformada wavelet es una alternativa que brinda información tanto en frecuencia como en tiempo, en clara ventaja respecto a la transformada de Fourier y su variante con ventanas fijas (STFT). En este trabajo se presenta un enfoque de análisis de señal centrado en señales moduladas en frecuencia con cambios en su amplitud, donde a través de la transformada wavelet se determinará inicio y fin del intervalo de cambio así como la variación de amplitud. Se utilizan diversas wavelets para mostrar la mejor opción del análisis.

**Palabras claves** — transformada wavelet, transitorios, análisis de señal, potencia

## I. INTRODUCCIÓN

Debido a la elevada proliferación de sistemas y equipos de comunicaciones inalámbricos en los últimos años, y la incertidumbre que existe en torno a ellos con respecto a potenciales efectos nocivos sobre el medio ambiente y, específicamente sobre la salud humana, resulta necesario desarrollar herramientas tecnológicas que posibiliten definir políticas de planificación y control que protejan a la población.

Los organismos vivos se hallan sometidos diariamente en los ambientes urbanos a radiaciones electromagnéticas causadas por las emisiones de las antenas de los sistemas de comunicación. Los niveles de exposición resultan variables dependiendo de la distancia a las fuentes, la presencia de estructuras pasivas que intensifican o reducen las amplitudes de las ondas, la posición relativa a la orientación de la antena, entre otros factores.

Las radiaciones de microondas pulsadas de baja intensidad pueden interferir los campos electromagnéticos intrínsecos de las estructuras biológicas de los seres vivos y producir respuestas anómalas en “ventanas” de frecuencia específicas, que resultan fuertemente dependientes de las intensidades y los tiempos de exposición. Numerosas investigaciones han

reportado efectos nocivos a nivel molecular, celular de procesos inmunes y sobre el sistema nervioso, endócrino y reproductivo [7], [8].

Dado que las mediciones directas en campo representan costos muy elevados, además de insumir mucho tiempo cuando se trata de abarcar grandes espacios, la alternativa inmediata resulta el monitoreo continuo de las emisiones para su análisis y comparación con los valores normalizados.

El procesado con la Transformada Wavelet Discreta (TWD) se ha utilizado en [9], [10], [11], [12] en aplicaciones de radio frecuencia a comunicaciones. Esta herramienta matemática será utilizada en nuestro trabajo para efectuar el estudio cualitativo y cuantitativo en la determinación de la duración de transitorios y en las variaciones de amplitud o de su potencia electromagnética.

Se presenta una breve fundamentación de la TW, para posteriormente aplicarla a señales moduladas en frecuencia con transitorios en su amplitud o potencia. Se determinan luego aplicando la TWD el inicio y fin de los transitorios así como la variación en la amplitud. Los resultados obtenidos servirán de base para un estudio posterior de señales con modulación GMSK utilizadas en la telefonía celular.

## II. FUNDAMENTOS

### A. Transformada Wavelet (TW)

El análisis por medio de la transformada wavelet consiste efectuar el análisis de la señal con ventanas variables en el tiempo [2] como se observa en Fig. 1, a diferencia de la transformada de Fourier con ventanas fijas (STFT) [1].

La TW permite aumentar la resolución en frecuencia cuando se trabaja con bajas frecuencias al poder emplear intervalos de tiempo largos y mejorar también la resolución en el tiempo para altas frecuencias al poder conformar ventanas más angostas [3].

Una wavelet es una “onda pequeña”, Fig. 2, la cual tiene su energía concentrada en el tiempo y es una herramienta para analizar transitorios, fenómenos no estacionarios o variantes en el tiempo. Tiene la oscilación característica de una onda

permitiendo efectuar el análisis simultáneo en tiempo y frecuencia con fundamentos matemáticos flexibles.

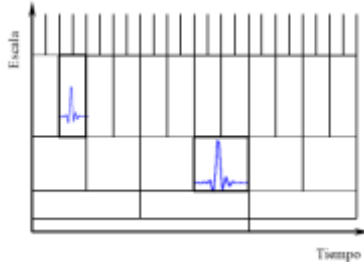


Fig. 1 Formas de las ventanas

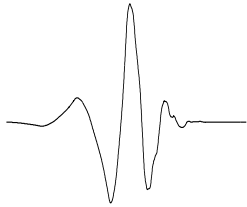


Fig. 2 Wavelet Daubechies 4

**B. La Transformada Wavelet Discreta**

En este trabajo se empleará la transformada wavelet discreta (TWD) en el proceso de una señal discreta  $S(n)$ . La transformación discreta se define de la siguiente forma [3]:

$$C(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} S(n) \cdot \psi_{j,k}(n) \tag{1}$$

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}n - k) \tag{2}$$

Donde

La ecuación (2) representa a la función wavelet discreta.

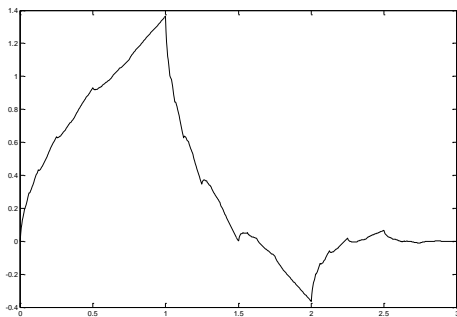


Fig. 3 Función escala Daubechies 4

Puede observarse que  $k$  representa un desplazamiento temporal y mientras que  $j$  hace referencia al escalado de la función ventana, Fig. 3.

La transformada discreta inversa se define como:

$$S(n) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C(j, k) \cdot \psi_{j,k}(n) \tag{3}$$

**C. Análisis Multirresolución**

El concepto básico de multirresolución está dado por el cambio de escala de la función de la ventana conforme al avance de la misma sobre la señal. Esto mismo es posible implementarlo por medio de una serie de filtros pasa bajos y pasa altos, permitiendo cambiar la resolución de la señal por medio del filtro pasa bajos y la escala con el filtro pasa altos. Este método es conocido como codificación de sub-bandas.

Es importante mencionar que el escalado se realiza con una escala diádica (2, 4, 8, 16, 32,...,2<sup>n</sup>) debido a la facilidad y menor cantidad de operaciones que la misma produce al momento implementarlo en un sistema computacional.

Del filtro pasa bajos se tiene la función escalado  $h(n)$  y con el filtro pasa altos la función wavelet  $g(n)$  relacionada.

Al excitar simultáneamente con la señal  $S(n)$  a los filtros pasa bajos y pasa altos, se tendrá a la salida del filtro pasa bajos un vector denominado aproximación  $c_1$  de longitud  $n/2$  y a la salida del filtro pasa altos un vector denominado detalle  $d_1$  del mismo tamaño que el de las aproximaciones, Fig. 4. La resolución del tiempo se reduce a la mitad, pero se incrementa al doble la resolución en frecuencia.

Si se aplica el mismo procedimiento de doble filtrado a la aproximación  $a_1$  obtenida anteriormente, se tendrán dos vectores  $a_2$  y  $d_2$  de longitud  $n/4$ , reduciendo así la resolución temporal en cuatro veces e incrementando cuatro veces la resolución en frecuencia, Fig. 4. Se continúa este proceso hasta que el vector resultante tenga longitud unitaria [3]. Por ejemplo, utilizando la escala diádica y una señal con 1024 muestras, se tendrán 10 niveles de descomposición; donde por cada iteración se reduce a la mitad el vector y la señal de entrada es la aproximación  $a$  anterior.

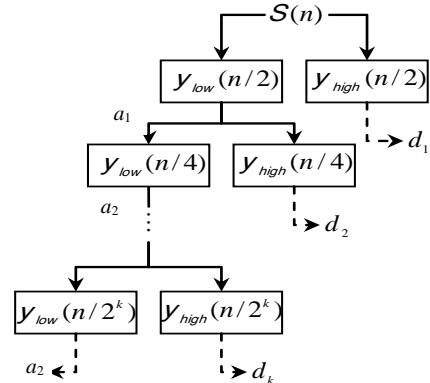


Fig. 4 Esquema del análisis multiresolución

Los coeficientes de la TWD completa se forma con la concatenación de los detalles  $d$  empezando con el de mayor nivel y la primera aproximación  $a_1$ . Es importante notar que el vector de coeficientes de la TWD tiene la misma longitud que el vector de datos.

La función transferencia de ambos filtros está relacionada de la siguiente forma:

$$g(L-1-n) = (-1)^n h(n) \quad (4)$$

Donde  $L$  es la longitud del vector (número de puntos) que contiene los coeficientes del filtro. Los filtros que satisfacen esta característica se conocen como filtros espejos en cuadratura (QMF). Para reconstruir la señal original se procede de forma inversa.

### III. DESARROLLO

#### A. Descripción de la organización del trabajo

Se plantea para el desarrollo de este trabajo el estudio de señales moduladas en frecuencia. Por ser éstas de amplitud constante tienen su mayor semejanza con señales moduladas en fase, como podrían ser las encontradas en telefonía celular. Nos interesa detectar y medir variaciones de amplitud y su duración, y como consecuencia directa sus variaciones de potencia. Para ello en el laboratorio generamos diversas señales de muestra moduladas en frecuencia, a las que luego les aplicamos un pulso para generar cambios de amplitud, de esta manera se ha tratado de trabajar sobre señales reales en lugar de simuladas. Luego, mediante un osciloscopio digital Tektronix TDS3052, éstas son digitalizadas y volcadas a un archivo Excel para ser procesadas en el entorno Matlab. Los datos tomados se procesan y sistematizan a través de la interface gráfica de la Fig. 5. La herramienta matemática utilizada proviene del Toolbox Wavelet y los resultados vuelven a recopilar en un Excel. Las Tablas II a V muestran el resumen del procesamiento para el caso de modulación en frecuencia con índice de modulación alto. Se plantearon y estudiaron otros escenarios. Entre ellos uno de modulación en frecuencia para índice bajo y otro de modulación de amplitud (índice 0,5). Los resultados que se obtuvieron con ellos fueron similares al mostrado en este trabajo. Para ser concreto seleccionamos los datos finales más representativos.

En la interface gráfica de la Fig. 5, en su parte izquierda vemos la señal modulada sin cambios de potencia, luego afectada su amplitud y más abajo la representación del valor eficaz calculado según [4]. En la parte central se observan las gráficas de los coeficientes de la TWD en su descomposición de nivel 4 (aproximación 4 y los detalles correspondientes). El sector de la derecha de pantalla muestra el sector de cálculo e ingreso de las distintas variables: archivo de datos de la señal, nivel de la transformada, wavelet a usar y la detección y cálculo del intervalo del transitorio encontrado, entre otros.

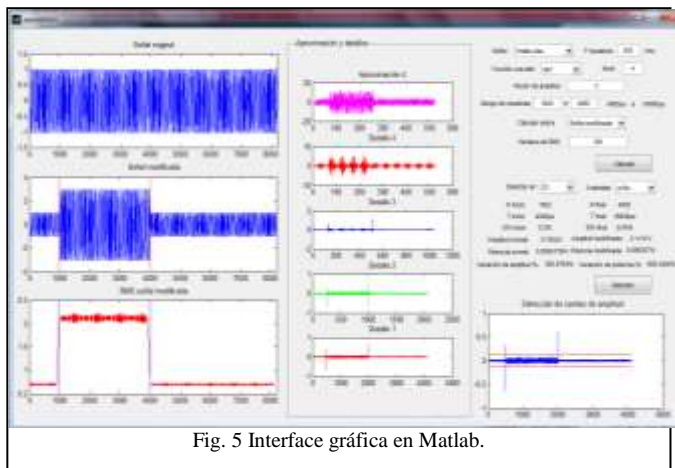


Fig. 5 Interface gráfica en Matlab.

#### B. Evaluación de los resultados obtenidos

En la Tabla I vemos la descripción de la señal elegida presentada como parte de los resultados generales.

TABLA I.

Señal	fmalto.xlsx
Cantidad de muestras:	8192
Frecuencia de muestreo:	250KHz
Frecuencia de portadora y modulante	10kHz y 0,75kHz
Nivel de la transformada:	4
Para 3000 muestras:	Rango de 1000 a 4000
Para 200 muestras:	Rango de 1000 a 1200
Detección de variación de amplitud para 3000 muestras:	Método RMS con ventana de 50 muestras (aprox 1 ciclo de la señal)
Detección de variación de amplitud para 200 muestras:	Método RMS con ventana de 25 muestras (aprox 1/2 ciclo de la señal)

Las Tablas II y III muestran los resultados para un cambio de amplitud de factor tres y dos intervalos de cambio de amplitud. El intervalo largo es la variación real detectada, mientras que la segunda es una fracción de la anterior. Esta última la usamos para comparar las diferencias obtenidas en la información buscada entre ambos intervalos. Queremos encontrar una ventana de datos razonable para uno tomar el intervalo real de cambio dado que su longitud puede ser excesiva para el procesamiento en casos reales. También se muestran las variaciones de amplitud (potencia) medidas en forma porcentual. En todos los casos se detectan los cambios con el promedio  $\mu$  y el desvío estándar  $\sigma$  sobre el detalle 1 de la TWD para seis tipos de wavelet correspondientes a las wavelets madre daubechies y symlet como se puede observar a partir de la Tabla II. Se eligieron estas wavelets dentro del gran conjunto existente por ser las más aptas en nuestro estudio previo exhaustivas pruebas con otras.

TABLA II.

Factor de amplitud de 3, en intervalo de 3000 muestras						
Wavelet	Error en detección de inicio %	Error en detección de fin %	Umbral de detección	Detalle mejor resultado	% variación de amplitud medida	% variación de potencia medida
db3	0,00	0,05	$\mu \pm 4\sigma$	D1	300,1069	900,6414
db7	0,20	0,05	$\mu \pm 4\sigma$	D1	300,1065	900,6392
db12	0,20	0,10	$\mu \pm 4\sigma$	D1	300,0957	900,5742
sym3	0,00	0,05	$\mu \pm 4\sigma$	D1	300,1069	900,6414
sym7	0,40	0,15	$\mu \pm 4\sigma$	D1	300,0769	900,4617
sym12	1,00	0,30	$\mu \pm 4\sigma$	D1	300,0266	900,1598

TABLA III.

Factor de amplitud de 3, en intervalo de 200 muestras						
Wavelet	Error en detección de inicio %	Error en detección de fin %	Umbral de detección	Detalle mejor resultado	variación de amplitud medida %	variación de potencia medida %
db3	0,00	0,17	$\mu \pm 5\sigma$	D1	293,9215	863,8988
db7	0,20	0,17	$\mu \pm 4\sigma$	D1	294,0596	864,7106
db12	0,20	0,33	$\mu \pm 4\sigma$	D1	292,5594	855,9103
sym3	0,00	0,17	$\mu \pm 5\sigma$	D1	293,9215	863,8988
sym7	0,40	0,50	$\mu \pm 4\sigma$	D1	291,1038	847,4141
sym12	1,00	1,00	$\mu \pm 5\sigma$	D1	285,3735	814,3801

Las Tablas IV y V repiten las anteriores pero ahora con un cambio de amplitud de factor un medio manteniendo el resto de las condiciones como antes a los fines de mejor comparación.

TABLA IV.

Factor de amplitud de 0,5, en intervalo de 3000 muestras						
Wavelet	Error en detección de inicio %	Error en detección de fin %	Umbral de detección	Detalle mejor resultado	variación de amplitud medida %	variación de potencia medida %
db3	0,00	0,05	$\mu \pm 4\sigma$	D1	50,0178	25,0178
db7	0,20	0,05	$\mu \pm 5\sigma$	D1	50,0178	25,0178
db12	0,20	0,10	$\mu \pm 4\sigma$	D1	50,0159	25,0159
sym3	0,00	0,05	$\mu \pm 4\sigma$	D1	50,0178	25,0178
sym7	0,40	0,15	$\mu \pm 5\sigma$	D1	50,0128	25,0128
sym12	1,00	0,30	$\mu \pm 4\sigma$	D1	50,0440	25,0440

TABLA V.

Factor de amplitud de 0,5, en intervalo de 200 muestras						
Wavelet	Error en detección de inicio %	Error en detección de fin %	Umbral de detección	Detalle mejor resultado	variación de amplitud medida %	variación de potencia medida %
db3	0,00	0,17	$\mu \pm 4\sigma$	D1	51,7589	26,7337
db7	0,20	0,17	$\mu \pm 4\sigma$	D1	51,7047	26,7899
db12	0,20	0,33	$\mu \pm 4\sigma$	D1	52,0684	27,1112
sym3	0,00	0,17	$\mu \pm 4\sigma$	D1	51,7047	26,7337
sym7	0,40	0,50	$\mu \pm 4\sigma$	D1	52,5125	27,5756
sym12	1,00	1,0	$\mu \pm 4\sigma$	D1	54,1872	29,3625

Se puede observar en todas las tablas anteriores que la wavelet que arroja los mejores resultados resulta ser la Daubechies7 (db7) sobre el detalle 1 (D1) de coeficientes, correspondiente a la mitad superior de la banda de frecuencias de la señal en estudio. Resultado este último esperable, debido

a que los cambios de amplitud están representando transitorios con presencia en las altas frecuencias por encima de la banda de interés de la señal propiamente dicha. Tanto en la parte temporal para detectar el inicio y fin de los cambios como así también en el cambio de amplitud seguimos registrando a la wavelet citada como la más apropiada. En los tiempos de inicio y fin encontramos valores sustancialmente por debajo del uno por ciento, mientras que en los cambios de amplitud las diferencias con el valor teórico son muy bajas para intervalos largos, no así en los intervalos cortos donde aumenta el error cercano al uno por ciento aproximadamente en cambios de amplitud de 50% en disminución o a valores próximos al 10% para cambios de amplitud del 300%. Este último resultado nos da la pauta que, para una señal real con cambios de amplitud muy extensos en el tiempo, el intervalo de muestras largo tomado en el trabajo es el más apto en cuanto a errores se refiere. La información más relevante podría resultar el cambio de amplitud si estuviéramos monitoreando no exceder niveles permitidos de potencia.

Con respecto a los umbrales de detección se observa que la elección del mismo en  $\mu \pm 4\sigma$  arroja los mejores resultados en las distintas condiciones empleadas.

#### IV. CONCLUSIONES

Hemos mostrado que la transformada wavelet se puede utilizar como parte de un procedimiento para detectar y ubicar con exactitud en el tiempo los cambios de amplitud o potencia de una señal de comunicación. En todos los casos es posible identificar el inicio y fin en el 100% de los casos analizados. A pesar que se pueden emplear diversas wavelet como prototipos con resultados satisfactorios como los vistos, en general recomendamos el uso de la wavelet db7 para analizar los casos de cambios en las amplitudes de las señales.

#### V. TRABAJO A FUTURO

Como trabajo a futuro y continuación del trabajo presentado se pretende ampliar el estudio a un conjunto de señales moduladas recreando un canal de comunicaciones multibanda próximas entre sí y con cambios en las amplitudes. El tipo de señales a emplear será en primera instancia el mismo tipo al utilizado en esta publicación. Posteriormente se pretende ampliar el esquema a señales con modulación de fase tipo GMSK. El análisis de los datos procesados con la TWD será útil para detectar fuentes de transitorios basados en esquemas manuales o automáticos, quedando esta fase como etapa de implementación práctica.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] Körner, T. W., Fourier Analysis, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.
- [2] Amara Graps, "An Introduction to Wavelets", Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 1995.
- [3] Castro Fernandez.R, "Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos", E.T.S.I. Industriales – Dto. Ingeniería Eléctrica, Madrid, 2002.
- [4] Antony C. Parsons, W. Mack Grady, Edward J. Powers, "A Wavelet-Based Procedure for Automatically Determining the Beginning and End of Transmission System Voltage Sags", 1998, IEEE, p. 1310-1315..

- [5] Mallat, S. G., "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7 (1989), p. 674-693.
- [6] Daubechies, I., "Ten Lectures on Wavelets". 2nd ed. Philadelphia: SIAM, 1992, CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics 61.
- [7] J. Miyakoshi, "Cellular and Molecular Responses to Radio-Frequency Electromagnetic Fields", Proceedings of the IEEE, Volume: 101, Issue: 6, 2013, Pag.(s): 1494 – 1502
- [8] Kapetanakis, T.N. ; Kaprana, A. ; Vardiambasis, I.O. ; Ioannidou, M.P., "Estimation of exposure time to GSM-900 radiation causing auditory brainstem response changes in rabbits using neuro-fuzzy system", 2011 IEEE International Conference on Digital Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), Pag.(s): 1 – 2.
- [9] K.C. Ho, H. Liu, L. Hong, "On improving the accuracy of a wavelet based identifier to classify CDMA signal and GSM signal", ISCAS '99. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuit and Systems, Vol. 4, pp. 564-567.
- [10] H. Liu, K.C. Ho, "Identification of CDMA Signal and GSM signal using the wavelet transform", 42nd Midwest Symposium on Circuit and Systems, 1999, vol. 2, pp. 678-681
- [11] P. Prakasam, M. Madheswaran, "Automatic Modulation Identification of QPSK and GMSK using Wavelet Transform for Adaptive Demodulator in SDR", ICSCN '07. International Conference on Signal Processing, Communications and Networking, 2007, pp. 507- 511.
- [12] B. Gerfault, B. Godara, M. Nau, "Applying wavelet transformation to RF system modeling", Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, 2009. COMCAS 2009. IEEE International, pp. 1-2.