

Determinación de Transitorios en Sistemas Físicos Usando la Transformada Discreta Wavelet

Lorenzo De Pasquale, Miguel Angel Banchieri, Juan Marcos Macchi Konrad
Departamento Electrónica, Facultad Regional Bahía Blanca,
Universidad Tecnológica Nacional
11 de Abril 461, (B8000LMI) Bahía Blanca
0291-4555220

pasquale@frbb.utn.edu.ar , mbanch@frbb.utn.edu.ar , marcosmacchi@frbb.utn.edu.ar

RESUMEN

La información que se puede obtener directamente de la representación tiempo-amplitud de un fenómeno cualquiera no siempre es la más apropiada, puesto que la información que caracteriza a la señal, en muchos casos, puede observarse más claramente en el dominio de la frecuencia, es decir, mediante un espectro de frecuencias que muestre las frecuencias existentes en la señal. Para encontrar el contenido de frecuencia de diversas señales físicas se puede hacer uso de la transformada de Fourier (TF) ampliamente conocida. La TF entrega la información en frecuencia de la señal, pero no indica el instante de tiempo en el que aparece; esta información no es necesaria cuando la señal es estacionaria; sin embargo es de crucial importancia para señales no estacionarias.

Aunque la TF es una de las técnicas más empleadas, no es la única, hay muchas otras transformadas que se emplean, como la transformada Hilbert, la transformada rápida de Fourier (STFT), la distribución Wigner y la transformada Wavelet. Cada una de estas transformaciones tiene su propia área de aplicación, con ventajas y desventajas.

En nuestro caso utilizaremos con exclusividad la Transformada Wavelet (TW) para estudiar situaciones no estacionarias, es decir las componentes de frecuencia cambian con el tiempo.

CONTEXTO

El proyecto que contiene las líneas de trabajo expuestas en el resumen se titula “Determinación de transitorios en sistemas físicos usando la Transformada Discreta Wavelet”. Se encuentra en evaluación, registrado como PID UTN bajo el número 2197. La financiación tiene su origen en la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional, desarrollándose las actividades en la Facultad Regional Bahía Blanca de la misma institución nacional. Tiene una duración de 24 meses a partir de enero de 2014.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos físicos en general pueden describirse mediante una señal en el dominio del tiempo representativa de la variable física de interés; es decir, una de las variables es el tiempo y la otra la amplitud. Se obtiene una función tiempo-amplitud cuando se representa y grafica esta señal; sin embargo, la información que se puede obtener directamente de esta representación no siempre es la más apropiada, puesto que la información que caracteriza a la señal, en muchos casos, puede observarse más claramente en el dominio de la frecuencia, es decir, mediante un espectro de frecuencias que muestre las frecuencias existentes en la señal. Por lo tanto, para una mejor representación de la señal se hace necesario disponer de su representación en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Para encontrar

el contenido de frecuencia de cada una de estas señales se puede hacer uso de la transformada de Fourier (TF) [16]. La TF entrega la información en frecuencia de la señal, pero no indica el instante de tiempo en el que aparece; esta información no es necesaria cuando la señal es estacionaria; sin embargo es de crucial importancia para señales no estacionarias. El concepto de señal estacionaria es muy importante en el análisis de señales, las señales cuyo contenido de frecuencia no cambia en el tiempo se denominan señales estacionarias, por lo cual no se necesita saber en qué instante de tiempo existen esas componentes de frecuencias, ya que todas las componentes de frecuencia están presentes en todo instante de tiempo.

Aunque la TF es una de las técnicas más empleadas, especialmente en ingeniería eléctrica, no es la única, hay muchas otras transformadas que se emplean, como la transformada Hilbert, la transformada rápida de Fourier (STFT), la distribución Wigner y la transformada Wavelet (TW) [14], [15]. Cada una de estas transformaciones tiene su propia área de aplicación, con ventajas y desventajas.

En nuestro caso utilizaremos con exclusividad la TW para estudiar situaciones no estacionarias, es decir las componentes de frecuencia cambian con el tiempo. En señales no estacionarias no solo es importante conocer las componentes de frecuencia que la integran, sino también es muy importante conocer el instante de tiempo en que se producen esas componentes de frecuencia y su duración pues proveen información valiosa del sistema físico en estudio. Pueden existir dos señales, una estacionaria y otra no estacionaria con idénticas componentes de frecuencias; sin embargo, la TF no es una técnica adecuada para señales no estacionarias cuando se desea obtener una correspondencia tiempo frecuencia razón por la cual se utilizará la TW por ser más apropiada.

La transformada wavelet discreta (DWT) análoga de la TF discreta, es comúnmente utilizada en ingeniería y ciencias de la computación, mientras que la transformada wavelet continua (TWC) es empleada en investigación científica para el análisis de señales.

Las transformadas wavelet (continua, discreta, packet) han sido adoptadas como herramientas para un vasto número de aplicaciones de naturaleza diversa, reemplazando a menudo a la transformada de Fourier convencional en especial en las situaciones no estacionarias donde es crucial conocer la información temporal.

Muchas áreas que han testimoniado este cambio de paradigma, incluyen en la física a la dinámica molecular, astrofísica, geofísica sísmica, óptica, mecánica de turbulencia y mecánica cuántica. Otras áreas que han experimentado este cambio en la ingeniería son: procesamiento de imágenes, análisis de señales médicas, análisis de vibraciones en mecánica, análisis de proteínas y de ADN, climatología, topografía y geografía, reconocimiento del habla, gráficos computacionales, procesamiento de señales y análisis multifractal.

Dentro de las áreas que nos interesan, por la posibilidad de disponer señales reales, podremos aplicar la TW en mecánica para análisis de vibraciones y acústica, en medicina por señales biomédicas y en señales de potencia eléctrica.

Podemos ver como se empleó a lo largo del tiempo la TW en diversas aplicaciones a la mecánica, para el diagnóstico de vibraciones en generadores a turbina en [1], en [2] aparece el monitoreo de vibraciones y detección de fallas en máquinas rotativas, el filtrado basado en wavelet con análisis multiresolución se observa en [3]. En [4] se da un esquema de filtrado wavelet para reducción de ruido y vibraciones y en [5] otra aplicación de diagnóstico de fallas en máquinas de inducción. En cuanto a aplicaciones derivadas de señales acústicas en [6] tenemos wavelets aplicada a la tecnología de emisión acústica (AE) para

monitorear cambios microestructurales en materiales y estructuras. En [7] se presenta el estudio de densidad de potencia espectral no estacionaria con TW aplicado al análisis y procesado de rocas.

Vinculado a la Ingeniería eléctrica, con la TW se ha desarrollado un nuevo método para la detección de fallas entre fase y tierra resultando ser robusto y confiable [10], el estudio de armónicos en la red de distribución eléctrica [9] y el análisis de vibraciones y sincronización de conmutación de seccionadores eléctricos de baja tensión [8].

Dentro de las señales médicas, es amplia la aplicación de las wavelets pudiendo citarse éstas en el estudio de soplos cardíacos para su clasificación y reconocimiento a través del cálculo de la entropía [11], en el estudio de señales de encefalografía de niños normales [13], o en el filtrado adaptivo wavelet de señales de electrocardiograma [12].

Podemos concluir que la amplísima variedad de aplicaciones de la TW da la posibilidad de desarrollar aplicaciones novedosas en diversos campos de la ingeniería a todo momento.

A. Fundamentos Transformada Wavelet

El análisis por medio de la transformada wavelet consiste efectuar el análisis de la señal con ventanas variables en el tiempo [17] como se observa en Fig. 1, a diferencia de la transformada de Fourier con ventanas fijas (STFT) [16].

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 [18].

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.

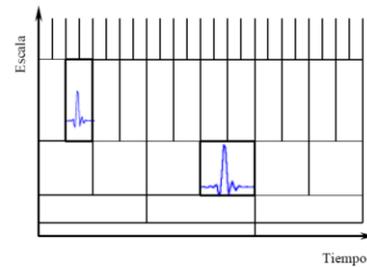


Fig. 1 Formas de las ventanas

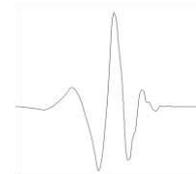


Fig. 2 Wavelet Daubechies 4

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 [20]:

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

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

Donde

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

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:

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

C. Análisis Multirresolución

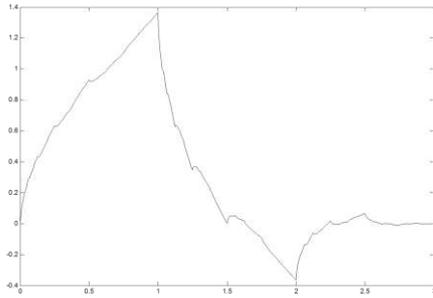


Fig. 3 Función escala Daubechies 4

El concepto básico de multiresolución 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,...,2n) 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 c_1 obtenida anteriormente, se tendrán dos vectores c_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 [17]. 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.

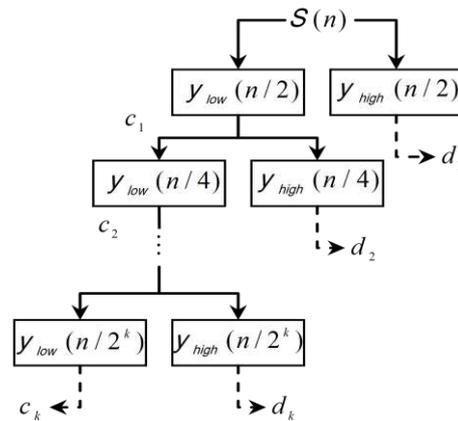


Fig. 4 Esquema del análisis multiresolución

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Este grupo de trabajo inicia sus actividades de investigación con la aprobación del proyecto anterior presentado en el workshop 2012. Es así que una línea de investigación en temas de procesamiento de señales con la TDW. En particular dentro del estudio que se realiza con esta transformada, interesa durante la vigencia del proyecto, determinar los transitorios presentes en diversas señales físicas, los cuales aportan información valiosa. La ventaja de la TDW radica en la detección de los transitorios junto con los instantes de tiempo en que ocurren, permitiendo así una mayor claridad y definición en los puntos donde enfocaremos nuestros estudios como ser en mecánica para análisis de vibraciones y acústica, en medicina por señales biomédicas y en señales de la red eléctrica.

RESULTADOS Y OBJETIVOS

Objetivo general:

- Determinar la presencia de transitorios que determinan un comportamiento

anómalo y sus características de tiempo y frecuencia en señales provenientes de sistemas físicos, estudiar sus orígenes y buscar soluciones a las problemáticas que ellos originan.

Objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento de las señales medidas en variables físicas con distintos tipos de wavelet.
- Estudiar ventajas y desventajas de las wavelets usadas.
- Identificar la wavelet madre que mejor se adapta para la evaluación de cada sistema.
- Determinar sus posibilidades de aplicación y desarrollo a problemas concretos.
- Seleccionar problemas de interés local y regional, donde sería conveniente aplicar las herramientas matemáticas usadas.
- Proponer un módulo basado en microcontrolador que implemente la etapa de cálculo y análisis mediante la TDW.

En [19], [20], [21] podemos encontrar algunos trabajos vinculados a nuestra línea de trabajo.

FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El grupo humano de trabajo está compuesto por tres docentes de Departamento Ingeniería Electrónica. Dos de ellos con grado Magister, uno en Ingeniería y el otro en Ingeniería Biomédica. El restante posee el grado de Ingeniero Electrónico. Se completa el grupo con tres alumnos avanzados de la carrera Ingeniería Electrónica.

Los alumnos que integran el proyecto se inician formalmente en las tareas de investigación, a través de becas estudiantiles de la FRBB, para que se inicien en tareas de investigación y puedan en el futuro seguir adelante con estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- [1] M. Kawada, K. Yamada, K. Yamashita, K. Isaka, *Fundamental Study on Vibration Diagnosis for Turbine Generators using Wavelet Transform*, Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, 2004 , p. 1215 - 1220 vol.3
- [2] B. Isayed, L. Cheded, F. Al-Badour, *Vibration Monitoring and Faults Detection Using Wavelet Techniques*, 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications, IEEE 2007, p. 1 – 4.
- [3] X. Meng, J. Ni, Y. Zhu, *Research on Vibration Signal Filtering Based on Wavelet Multi-resolution Analysis*, 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, IEEE, p. 115-118.
- [4] O. A. Mohammed, A. A. Khan, A. M. El-Tallawy, A. Nejadpak, and M. J. Roberts, *A Wavelet Filtering Scheme for Noise and Vibration Reduction in High-frequency Signal Injection-Based Sensorless Control of PMSM at Low Speed*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, 2012, p. 250-260
- [5] S. H. Kia, H. Henao, G. Capolino, *Efficient Digital Signal Processing Techniques for Induction Machines Fault Diagnosis*, 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), p. 232-246.
- [6] D. Xiang¹, J. Deng, and Y. Qin², *Acoustic Emission Detection and Classification Using Wavelet-Based Power-Law Detector*, 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, p. 1072-1075.
- [7] Y. Kang, W. Zhu, Q. Bai, J. L. Wu, *Time-dependent Power Spectral Density Estimation of AE signals of Rock Based on Wavelet Transform*, Control and Decision

Conference (CCDC), 2011 Chinese ,IEEE, p. 1981-1984.

[8] X. Miao, Y. Wang, *Vibration Signal Wavelet Packet Analysis and Switching Synchronization Research of Low voltage Circuit Breaker*, 2012 3rd International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization, IEEE, p. 107-110.

[9] G. S. Kumar, S. Sarma, C. Venkatesh, *Wavelet Transform Based Harmonic Analysis and Real Power Measurement*, 2011, IEEE, Conference on Power Electronics (IICPE), 2010 India International.

[10] T. Bi, R. Shen, J. Plans, H. Zhao, N., *Method for Single Phase-to-Ground Fault Location Based on Wavelet Analysis and Correlation*, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2013 IEEE PES, p. 1-4.

[11] F. Safara, S. Doraisamy, A. Azman, A. Jantan, and S. Ranga, *Wavelet Packet Entropy for Heart Murmurs Classification*, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Bioinformatics, Volume 2012, Article ID 327269, 6 pages

[12] L. Smital, M. Vitek, J. Kozumplík, and I. Provazník, *Adaptive Wavelet Wiener Filtering of ECG Signals*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, p. 437-445.

[13] S.Z. Mohd Tumari, R. Sudirman, A.H. Ahmad, A. Al-Haddad, *Study of Normal Children Electroencephalography Signals using Wavelet Transformation*, 2012 IEEE EMBS International Conference on Biomedical Engineering and Sciences, p. 896-900.

[14] S. Mallat, *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.

[15] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, 2nd ed., Philadelphia: SIAM, 1992, CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics 61.

[16] T. Körner, *Fourier Analysis*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.

[17] A. Graps, “An Introduction to Wavelets”, Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 1995.

[18] R. Castro Fernández., *Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos*, E.T.S.I. Industriales – Dto. Ingeniería Eléctrica, Madrid, 2002.

[19] Banchieri M. A., *Evaluación de registros electronistagmográficos empleando la transformada wavelet*, Universidad Favaloro, 2008.

[20] Angarola L. M., Córdoba M. F., Banchieri M. A., *Implementación de la Transformada Discreta Wavelet en un sistema embebido para el análisis de registros electronistagmográficos*, II Congreso de Microelectrónica Aplicada uEA II, 7 al 9 de Septiembre de 2011, La Plata.

[21] Macchi Konrad, J. M., De Pasquale, L., Banchieri, M. A., “Análisis Basado en la Transformada Wavelet para Determinar Duración de Transitorios en Señales”, IV Congreso de Microelectrónica Aplicada 2013 uEAIV, 25 al 27 de septiembre de 2013, Facultad Regional Bahía Blanca de la UTN.