

Aplicación de wavelets en la detección fotoacústica de gases traza con señales ruidosas

Applications of wavelets in the photoacoustic detection of trace gases with noisy signals

M. G. González*^{†1}, G. D. Santiago*, V. Slezak[‡], A. Peuriot[‡]

*Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería,
Grupo de Láser, Óptica de Materiales y Aplicaciones Electromagnéticas (GLOMAE)
Paseo Colón 850, C1063ACV, Buenos Aires, Argentina

[†]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, (CONICET)
Godoy Cruz 2290, C1425FQB, Buenos Aires, Argentina

[‡]Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CITEDEF
Juan Bautista de la Salle 4397, B1603ALQ, Buenos Aires, Argentina

¹mggonza@fi.uba.ar

Recibido: 23/04/18; Aceptado: 09/05/18

Abstract—This paper shows that the use of filters based on the discrete wavelet transform (DWT) improves the sensitivity of photoacoustic systems for measurement of trace gases under conditions of unfavorable signal-to-noise ratio (SNR). To achieve this goal, a filter based on Meyer's DWT was designed and tested with simulated and measured signals. For the measurements, a system for the detection of traces of sulfur hexafluoride in nitrogen using a pulsed CO₂ laser was implemented. From the results it was obtained that the use of DWT had a very good performance for signals generated with low laser energies (< 100 μJ) corrupted with impulsive electromagnetic noise.

Keywords: Photoacoustic Spectroscopy; trace gases; wavelets.

Resumen— En este trabajo se muestra que la utilización de filtros basados en la transformada *wavelet* discreta (DWT) mejora la sensibilidad de sistemas fotoacústicos para medición de gases traza bajo condiciones de relación señal a ruido (SNR) desfavorables. Para lograr este objetivo se diseñó un filtro basado en la DWT de Meyer y se lo probó con señales simuladas y medidas. Para las mediciones se implementó un sistema para la detección de trazas de hexafluoruro de azufre en nitrógeno usando un láser pulsado de CO₂. A partir de los resultados se obtuvo que el uso de DWT tuvo un muy buen desempeño para señales generadas con bajas energías láser (< 100 μJ) corrompidas con ruido impulsivo electromagnético.

Palabras clave: Espectroscopía fotoacústica; gases traza; wavelets.

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas fotoacústicas (FA) han sido utilizadas ventajosamente en la detección de numerosas sustancias de interés ambiental y biológico, debido a lo sencillo de su implementación y a la excelente sensibilidad del método que permite medir gases traza de las sustancias en cuestión. El principal atractivo de esta técnica con relación a las basadas en detección de la atenuación óptica de una muestra, consiste en que la fracción de energía absorbida por la sustancia es transformada a señal acústica, evitando así las dificultades de discernir pequeños cambios en la intensidad de un haz de luz al atravesar la muestra [1].

El monitoreo por medio de espectroscopía FA se realiza mediante un esquema experimental que consiste fundamen-

talmente de tres partes esenciales [2]: 1) una fuente láser pulsada o continua modulada, 2) una celda que contiene la sustancia a estudiar y un micrófono y 3) un sistema o método para procesar la señal captada.

En un proceso FA, la energía absorbida por las moléculas a través de colisiones se entrega al medio en forma de calor generando un aumento local de presión. Esto lleva a la aparición de señales acústicas las que, a primer orden, son proporcionales a la energía absorbida a través de la concentración de sustancia, la sección eficaz óptica de absorción y la energía del láser. Para maximizar esta energía es importante tratar de hacer coincidir la longitud de onda de máxima sección eficaz de absorción de la especie estudiada con la longitud de onda del láser. La amplitud de las señales acústicas es registrada por el micrófono y posteriormente procesada para determinar la cantidad de sustancia absorbente. En el caso de una excitación pulsada es habitual recurrir al análisis de Fourier donde la amplitud de alguno de los picos de resonancia es considerada como la información relevante. Por otra parte, si se emplea una excitación modulada ésta se realiza a alguna de las frecuencias de resonancia de la cavidad acústica y la salida del micrófono es detectada sincrónicamente con un amplificador de tipo *lock-in*.

En muchas situaciones las señales captadas por el sensor acústico presentan una relación señal a ruido (SNR) muy desfavorable que derivan en una pérdida de sensibilidad del sistema FA. Esto es causado por diferentes razones, entre ellas se pueden destacar el uso de fuentes de luz de baja energía, detección de gases que presentan pequeña sección eficaz, señal espuria proveniente de la absorción de la ventanas que cierra la celda o ruidos impulsivos electromagnéticos [2]. En estos casos, la transformada de Fourier o la detección sincrónica pueden no ser suficientes para conseguir una determinada sensibilidad y es aquí donde otras herramientas para el procesamiento de señales entran en juego.

En este trabajo se muestra como el uso de la transformada *wavelet* permite mejorar la SNR de señales FA corrompidas con ruido blanco y ruidos coherentes impulsivos electro-

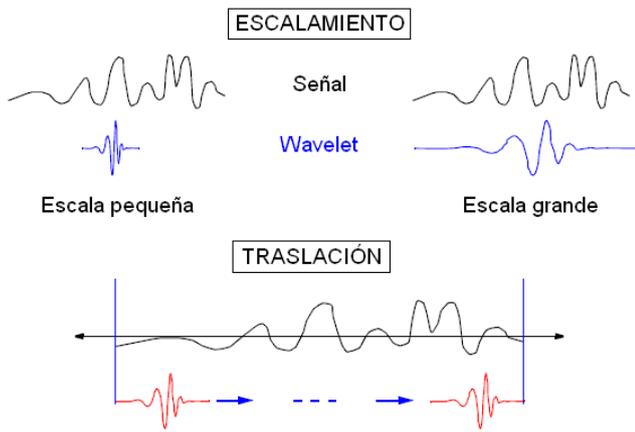


Fig. 1. Esquema del escalamiento y desplazamiento temporal de una wavelet

magnéticos. Para mostrar la eficiencia de estas herramientas se realizaron simulaciones y mediciones sobre un sistema para espectroscopía FA pulsada de gases traza.

II. WAVELETS

El término *wavelet* se define como una pequeña onda o función localizable en el tiempo, que visto desde una perspectiva del análisis o procesamiento de señal puede ser considerada como una herramienta matemática para la representación y segmentación de señales, análisis tiempo - frecuencia, y fácil implementación de rápidos algoritmos computacionales [3]. Las características propias de la transformada *wavelet* otorgan la posibilidad de: i) representar señales en diferentes niveles de resolución, ii) representar en forma eficiente señales con variaciones de picos abruptos, iii) analizar señales no estacionarias permitiendo saber el contenido en frecuencia de una señal y cuando estas componentes de frecuencia se encuentran presentes en la señal. Estos tópicos son los que motivaron el uso de esta herramienta para el procesamiento digital de señales FA.

La transformada *wavelet* constituye una técnica que ha sido propuesta por los investigadores como una poderosa herramienta en el análisis sobre el comportamiento local de una señal. Al igual que la transformada corta de Fourier (STFT), esta transformada utiliza una función ventana que encuadra una señal dentro de un intervalo y focaliza el análisis sólo en ese segmento de la señal.

La transformada continua *wavelet* (CWT) intenta expresar una señal $x(t)$ continua en el tiempo, mediante una expansión de términos o coeficientes proporcionales al producto interno entre la señal y diferentes versiones

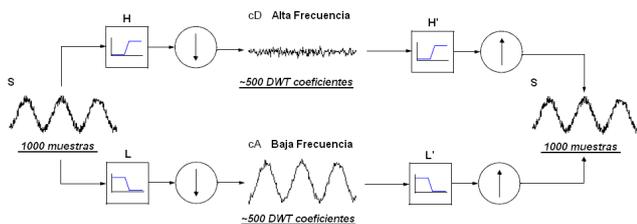


Fig. 2. Proceso básico de un filtrado con wavelet discreto

escaladas y trasladadas de una función prototipo $\psi(t)$ más conocida como *wavelet* madre. Suponiendo que tanto la señal como la función $\psi(t)$ son de energía finita, entonces se puede definir [3]:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

como la transformada continua *wavelet*. La variable a controla el ancho o soporte efectivo de la función ψ , y la variable b da la ubicación en el dominio del tiempo de ψ . Mediante la variable de escala a se puede comprimir ($|a| < 1$) o dilatar ($|a| > 1$) la función $\psi(t)$, lo que dará el grado de resolución con el cual se esté analizando la señal. Por definición la CWT es más una representación tiempo - escala que una representación tiempo - frecuencia. En particular, para valores pequeños de a , la CWT obtiene información de $x(t)$ que está esencialmente localizada en el dominio del tiempo mientras que para valores grandes de a la CWT obtiene información de $X(\omega)$ que está localizada en el dominio de la frecuencia. En otras palabras, para escalas pequeñas la CWT entrega una buena resolución en el dominio del tiempo mientras que para escalas grandes la CWT entrega una buena resolución en el dominio de la frecuencia. Cuando a cambia, tanto la duración como el ancho de banda de la *wavelet* cambian pero su forma se mantiene igual. En lo dicho anteriormente se encuentra la diferencia principal entre la CWT y la STFT, ya que la primera ocupa ventanas de corta duración para altas frecuencias y ventanas de larga duración para bajas frecuencias mientras que la STFT ocupa una sola ventana con la misma duración tanto para altas frecuencias como para bajas frecuencias [3]. Por otro lado, la variable b controla la ubicación de la función en el espacio de tiempo permitiendo deslizar $\psi(t)$ sobre el intervalo de tiempo en el que se haya definido $x(t)$. Un punto importante es que la función wavelet ψ se traslada cubriendo toda la señal para cada valor de a , es decir, si la escala escogida es pequeña habrá más traslaciones de ψ que si la escala escogida es grande. Por lo tanto, la variable b da la cantidad por la cual $\psi(t/a)$ ha sido trasladada en el dominio del tiempo. Los dos comportamientos descriptos se esquematizan en la Fig. 1.

La continuidad de la CWT reside en que tanto la variable de escala como la variable de traslación varían en forma continua [4]. Sin embargo, en términos de cálculo computacional es imprescindible discretizar la transformada, y la suposición más lógica es que tanto los valores de escala como traslación sean discretos.

En la Transformada Discreta Wavelet (DWT) la forma más común de discretizar los valores de a y b es utilizar una red diádica [3], es decir, $a = 2^h$ y $b = k2^h$ con h y k números enteros, de tal manera que el conjunto de funciones

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0 \quad (2)$$

se transforma en el conjunto,

$$\psi_{h,k}(t) = 2^{h/2} \psi(2^h t - k) \quad h, k \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

que corresponde a la versión diádicamente discretizada de la función *wavelet*.

En el análisis con DWT frecuentemente se suele hablar de aproximaciones y detalles. Las aproximaciones son la escala grande, o sea, las componentes de baja frecuencia de la señal original. Por otro lado, los detalles son la escala pequeña, que son las componentes de alta frecuencia. Un proceso básico de filtrado con wavelets es mostrado en la Fig. 2. La señal S con N muestras pasa por un filtro pasa altos H (*wavelet* con a pequeño) y un filtro pasa bajos L (*wavelet* con a grande) obteniéndose dos señales que luego son comprimidas. Las señales cD y cA , de $N/2$ muestras cada una, representan los coeficientes de detalle y aproximación, respectivamente. El proceso inverso se realiza aplicando a las señales obtenidas filtros de reconstrucción H' y L' (que están asociados con los filtros de descomposición H y L) y luego un interpolado. Finalmente la suma de estas dos señales es la original [4]. El proceso de descomposición puede ser iterativo, con aproximaciones sucesivas siendo descompuestas alternadamente, de manera de analizar las componentes de baja frecuencia de la señal. El resultado de esto se conoce como árbol de descomposición *wavelet*.

III. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El gas absorbente elegido para las mediciones fue el hexafluoruro de azufre. Este gas es fundamentalmente inerte para los sistemas vivos y puede utilizarse como trazador para el estudio de difusión de gases en plantas [5]. Esto puede ser importante para estudiar el comportamiento de plantas bajo anegamiento. Como fuente de excitación fue utilizado un láser TEA de CO_2 ya que este gas presenta un pico de absorción coincidente con la longitud de onda correspondiente a la línea 10P(16) del láser.

En la Fig. 3 se muestra el dispositivo experimental implementado. El láser pasa por un divisor de haz que refleja un 13 % de la intensidad incidente con el objetivo de relevar la energía aplicada a la muestra. Esto se hizo mediante un detector piroeléctrico (OPHIR PE50-BB-LP, responsividad 2,164 V/J). El haz transmitido pasa por un iris de 2 mm de diámetro a fin de recortar los lóbulos secundarios presentes en el perfil espacial del mismo. Antes de ingresar a la celda, el láser es atenuado por filtros de fluoruro de calcio (CaF_2) que simulan condiciones de baja energía láser. El resonador utilizado fue una celda cilíndrica de polietileno de alta densidad, con sendos volúmenes amortiguadores en ambos extremos de un resonador central. Para captar la señal FA se usó un micrófono (Knowles EK-3132) adosado a la pared de dicho resonador en el punto medio del mismo. Las señales provenientes del piroeléctrico y el micrófono fueron amplificadas por sendos amplificadores de bajo ruido (Tektronix AM-502) y digitalizadas por una placa de sonido estándar con entrada de línea y frecuencia de muestreo de 44.1 kHz.

Las muestras gaseosas se armaron con un línea de vacío que permitió la realización de mezclas de SF_6 con nitrógeno. Las concentraciones del gas absorbentes usadas estuvieron en el rango entre 1 y 10 ppm.

IV. RESULTADOS

Se implementó un filtro *wavelet* basado en la DWT de Meyer [6]. Para estudiar la performance del mismo se lo

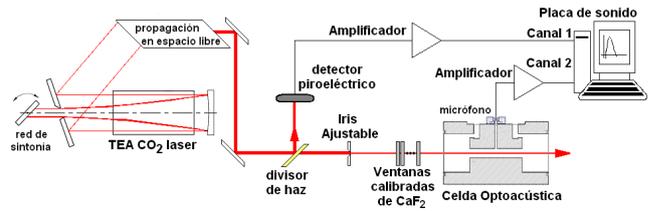


Fig. 3. Esquema experimental para medición de trazas de SF_6

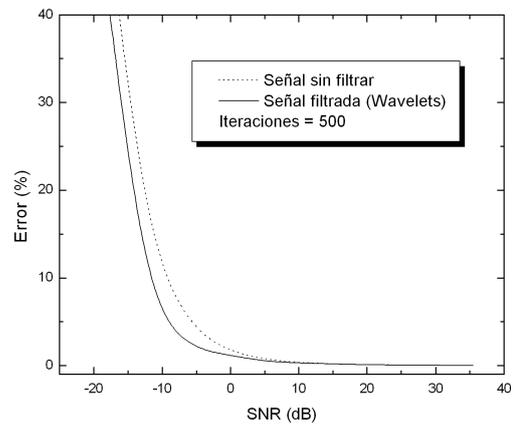


Fig. 4. Resultados de la simulación realizados para analizar la performance del filtro *wavelet* ante señales simuladas corrompidas por ruido blanco (línea sólida). Los resultados son comparados con aquellos de usar la transformada de Fourier (línea punteada).

probó con señales FA simuladas corrompidas con cantidades crecientes de ruido blanco. La simulación del fenómeno FA se realizó usando el modelo descrito en [7]. En la Fig. 4 se presenta el error porcentual encontrado en función de la SNR. Como estimador se consideró la energía contenida en el pico principal de resonancia. Los procesos fueron repetidos 500 veces para cada relación señal a ruido. A modo de comparación también se muestran los resultados obtenidos cuando se utiliza la transformada de Fourier.

Como se puede apreciar de la Fig. 4, los resultados numéricos muestran que la aplicación de *wavelets* para remover ruido blanco es tan buena como utilizar la transformada de Fourier. Sin embargo, como se presenta más adelante, la transformada *wavelet* posee una notable ventaja cuando es necesario la extracción de ruidos coherentes impulsivos [8]. En la Fig. 5 se puede observar un esquema de un árbol de descomposición para una de las señales medidas con el objetivo de mostrar cualitativamente el filtrado de ruidos impulsivos con DWT. En el nivel 4, se aprecia el coeficiente aproximación conteniendo el ruido impulsivo electromagnético proveniente del láser, y por otro lado, en la señal detalle, se posee la resonancia principal de la celda.

En la Fig. 6 se encuentran los resultados de aplicar el filtro *wavelet* para una muestra gaseosa con un concentración de 9 ppm de SF_6 en función de la energía láser aplicada. Se puede observar una mejora notable de la sensibilidad de la detección para energías láser inferiores a 50 μJ .

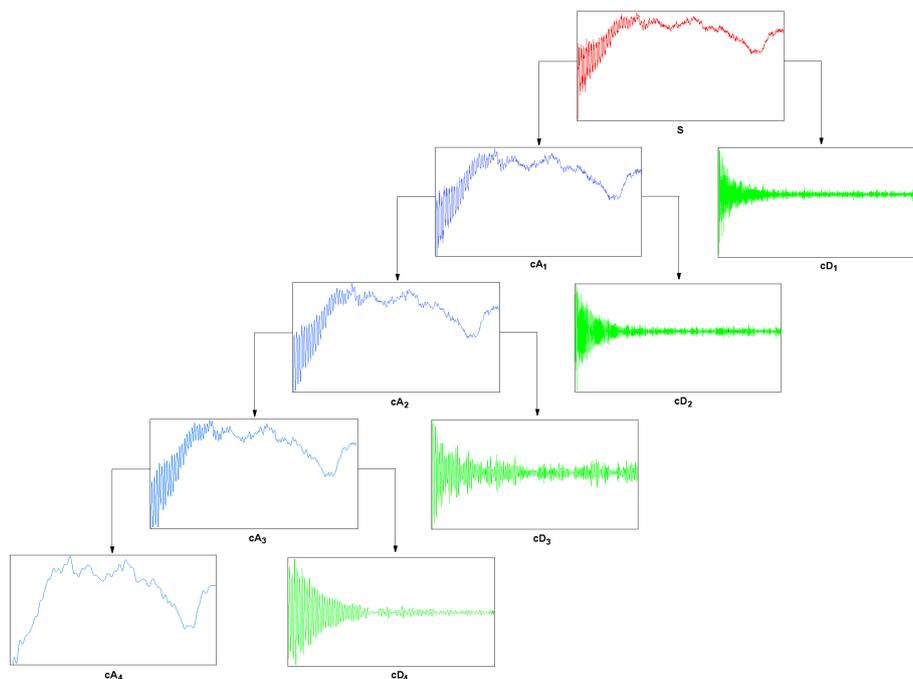


Fig. 5. Árbol de descomposición *wavelet* para señal FA generada en una celda cargada con 1 ppmV de SF₆ y una energía láser de entrada de 20 μJ.

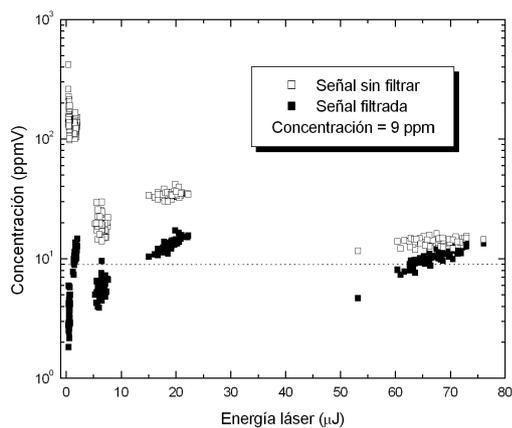


Fig. 6. Concentración medida en función de la energía láser a la entrada de la celda. La línea de puntos marca la concentración real dentro de la celda.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró como el uso de la transformada *wavelet* discreta ayuda a mejorar la sensibilidad de sistemas FA para medición de gases traza bajo condiciones de relación señal a ruido desfavorables. Para lograr esto se diseñó un filtro *wavelet* basado en la DWT de Meyer. Su eficiencia se estudió a través de su aplicación a señales FA simuladas y medidas. Para las mediciones se implementó un esquema experimental para la detección de trazas de SF₆ en nitrógeno usando un láser pulsado de CO₂.

A partir de las simulaciones se obtuvo que la DWT posee un leve ventaja con respecto a la transformada de Fourier cuando se tienen señales corrompidas por ruido blanco. En la mediciones, además de ruido blanco, se encontró la presen-

cia de señales impulsivas electromagnéticas, coherentes con las señales FA, provenientes de la fuente láser. En este caso, el uso del filtro *wavelet* fue esencial para separa esta señal espuria y, de esa manera, lograr mejorar la sensibilidad del sistema cuando se usan energías láseres bajas (< 100 μJ).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por los subsidios de la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020160100052BA) y de la ANPCyT (PICT 2016-2204).

REFERENCIAS

- [1] A. Peuriot, G. Santiago, and V. Slezak, *Modelado, métodos de adquisición y procesamiento en la espectroscopía fotoacústica en gases*, ser. Láseres: Desarrollos y Aplicaciones. Tomo 2., L. Azcarate, P. Diodati, E. Quel, and V. Slezak, Eds. Buenos Aires, Argentina: UNSAMedita, 2007.
- [2] M. G. Gonzalez, "Análisis y desarrollo de nuevas técnicas de detección optoacústicas," Ph.D. dissertation, Univ. de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, Mar. 2008.
- [3] C. Chui, *An Introduction to Wavelets*. San Diego, USA: Academic Press, 1992.
- [4] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*. New York, USA: Academic Press, 1998.
- [5] T. Groot, "Trace gas exchange by rice, soil and pears. a study based on laser photoacoustic detection," Ph.D. dissertation, Katholieke Universiteit, Nijmegen, Holanda, 2001.
- [6] P. Abry, *Ondelettes et turbulence*. Paris, France: Diderot, 1992.
- [7] A. Peuriot, G. Santiago, and V. Slezak, "Simulación y caracterización de una celda optoacústica unidimensional," *Anales AFA*, vol. 15, pp. 90–93, 2003.
- [8] J. Mao, P. Sun, Z. Pan, Q. Su, and Z. Maosen, "Wavelet analysis on photoacoustic spectra of degraded PVC," *Fresenius J. Anal. Chem.*, vol. 361, pp. 140–142, 1998.