

Cancelación activa de ruido de señales de frecuencia variable

A. González, M. de Diego, E. Cervantes, A. Albiol

Departamento de Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia.
Camino de Vera s/n, 46071 Valencia. email: agonzal@dcom.upv.es

ABSTRACT

El control activo de ruido es una disciplina con interés creciente en los últimos años, combina el espíritu de reducción, o mejor dicho de adecuación al entorno, de ruido de la Acústica tradicional con las más modernas técnicas de procesamiento digital de señal en tiempo real [1][2]. En este trabajo se presenta una técnica para cancelación de ruido de señales constituidas por tonos simples o múltiples de frecuencia instantánea variable. Este tipo de señales presenta gran interés práctico ya que son asimilables a ellas ruidos que proceden de un sistema mecánico giratorio con régimen de giro variable, por ejemplo: motores, ventiladores, etc... Los algoritmos adaptativos tradicionalmente usados, *filtered-X* [3], no presentan buenas prestaciones cuando se utilizan para cancelación de este tipo de señales, se propone utilizar un algoritmo adaptativo en el dominio frecuencial, una variante del algoritmo de la *DFT'* deslizante [4]. El algoritmo propuesto puede considerarse óptimo para este tipo de señales en términos de velocidad de convergencia, eficiencia computacional y necesidad de almacenamiento de datos en el sistema de procesado.

INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El esquema simplificado de trabajo utilizado se puede observar en la figura 1, donde no se han dibujado los convertidores A/D y D/A. La filosofía de cancelación implementada en el prototipo es de tipo *feedforward* [1][2], ya que se supone un conocimiento de la señal a cancelar a partir de un sensor de alguna de las propiedades físicas del sistema mecánico que originó el ruido directamente relacionada con la señal acústica a cancelar, por ejemplo: régimen de giro, aceleración, etc...

Nos encontramos ante un caso de control activo de ruido *feedforward* puro de tonos puros con frecuencia variable. Existen referencias en la literatura sobre control de ruido que tratan este tema. Nuestro propósito consiste en optimizar el diseño del controlador adaptativo para que sea capaz de cancelar señales periódicas [5]. No sólo pretendemos que nuestro algoritmo cancele un tono de una frecuencia fija sino que sea capaz en la medida de lo posible de proseguir la cancelación si la frecuencia del tono varía de forma continua.

Nuestros criterios de diseño podrían resumirse en los tres siguientes:

- Desarrollar un algoritmo que cancele de forma óptima señales periódicas, es decir que permita una reducción suficiente del tono indeseado en un tiempo de convergencia reducido.
- Optimizar el algoritmo para seguir cancelando si la frecuencia del tono varía.
- Minimizar los recursos ocupados en el elemento de procesamiento escogido, es decir, reducir al mínimo los requerimientos de memoria y capacidad de cálculo del hardware.

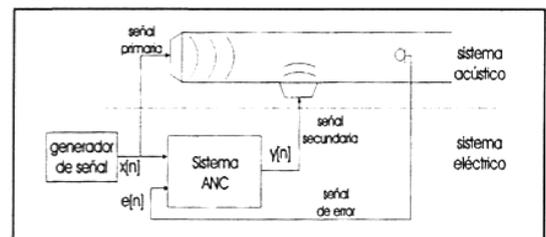


Figura 1: Esquema básico del cancelador de ruido.

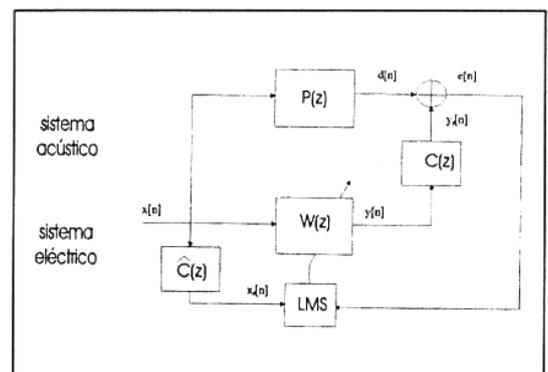


Figura 2: Filtered-X LMS.

EL ALGORITMO FILTERED-X LMS

La primera aproximación al problema la constituye el algoritmo filtered-X LMS, cuyo esquema puede observarse en la figura 2. Esta modificación del algoritmo LMS fue desarrollada por Widrow [6] y Burguess [7] en 1981 para compensar el efecto de la función de transferencia que se tiene a la salida del filtro FIR adaptativo $W(z)$, filtrando la señal de referencia, $x[n]$, que se emplea para la actualización de los coeficientes con una buena estima del camino del error $C(z)$ [8]. La ecuación de actualización de los coeficientes del filtro LMS es de la forma: $w[n+1] = w[n] - \mu x_f[n] e[n]$

Donde $w[n]$ es un vector que contiene los coeficientes, $x_f[n]$ es la señal de referencia filtrada por la estima de $C(z)$, $e[n]$ es una muestra de la señal residual o error y μ (es un parámetro que ajusta las propiedades de convergencia del algoritmo.

OPTIMIZACIÓN DEL FILTERED-X LMS

La configuración utilizada puede entenderse como un esquema de identificación de sistemas. Mediante nuestro filtro adaptativo $W(z)$ estamos intentando ajustar la respuesta impulsional de un filtro desconocido, $P(z)$, al que se suele denominar planta. Cuando la entrada al algoritmo LMS es un solo tono, el algoritmo debe ajustar la respuesta frecuencial de la planta para una sola frecuencia. De este modo, teóricamente sólo son necesarios dos coeficientes en el filtro adaptativo para realizar la identificación, la implementación del filtro con dos coeficientes se puede observar en la figura 3 para coeficientes que presentan un desfase de 90° a la frecuencia del tono de entrada, para este desfase el algoritmo se adapta de manera óptima [2].

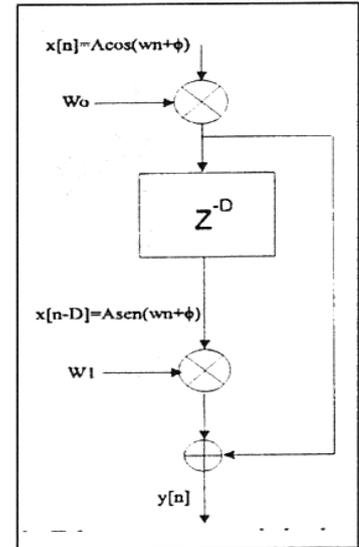


Figura 3: Filtro transversal de dos coeficientes.

Dejando variable el retardo en número de muestras entre los coeficientes del filtro se pueden calcular los valores de los pesos óptimos dada una cierta respuesta frecuencial de la planta. El problema de esta técnica lo constituye el hecho de que debemos variar el número de muestras de desfase dependiendo de la frecuencia que queremos cancelar, con lo cual no es una solución útil para señales de frecuencia variable.

La forma de conseguir el desfase de 90° varía de unos autores a otros. En el ámbito del control activo de ruido Kuo y Ji [2][9] proponen un ecualizador de ruido que realiza una transformación de Hilbert para obtenerlo. Sin embargo el filtro en cuadratura empleado es aproximado y resulta computacionalmente costoso.

ALGORITMOS ACELERADOS, LA DFT DESLIZANTE.

La velocidad de convergencia del algoritmo LMS viene determinada por la denominada dispersión de autovalores de la matriz de autocorrelación de los datos de entrada al algoritmo [3]. De esta forma su convergencia depende en gran medida de las propiedades de la señal con la que se esté trabajando.

Para acelerar el algoritmo LMS se han propuesto en la literatura varios esquemas entre los que se encuentran los algoritmos que preprocesan los datos de entrada para obtener así una convergencia más rápida [4]. A este tipo pertenece el denominado algoritmo de la DFT deslizante. Las propiedades aceleradoras de la convergencia de este algoritmo se demuestran en [10][11].

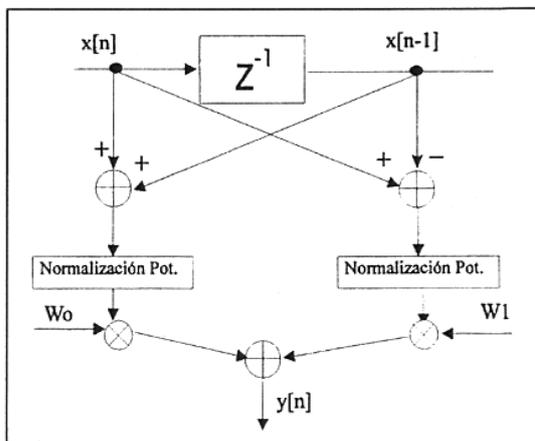


Figura 4: Esquema propuesto.

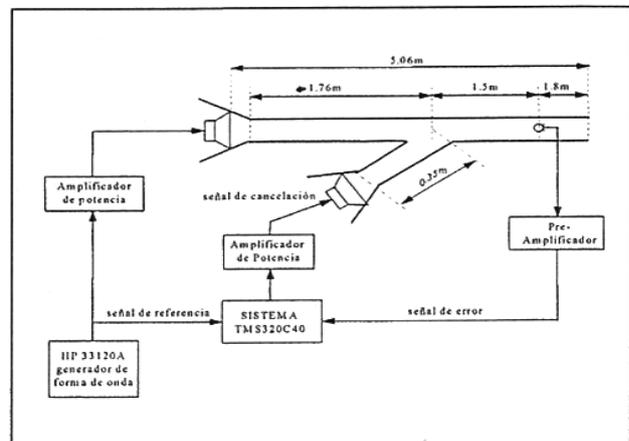


Figura 5: Esquema del prototipo de laboratorio.

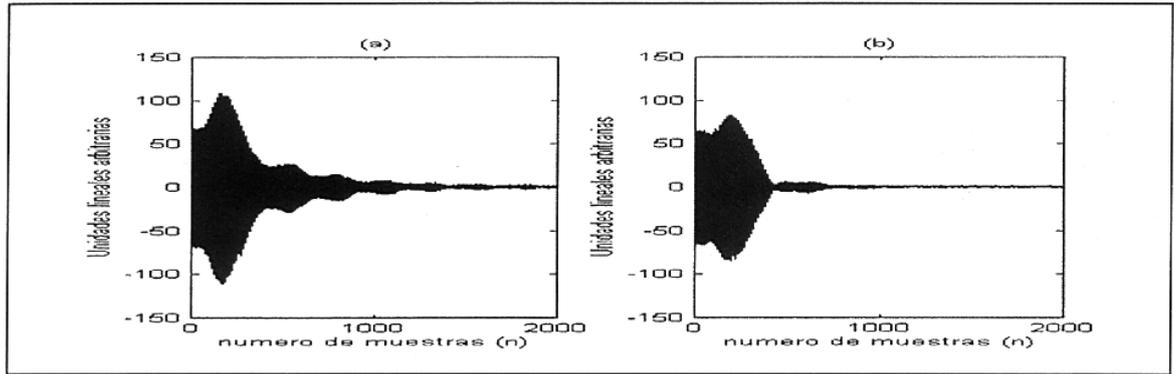


Figura 6: Señal de error para un tono de 75 Hz obtenida en el algoritmo filtered-X LMS con dos coeficientes (a) y con dos coeficientes desfasados 90° (b).

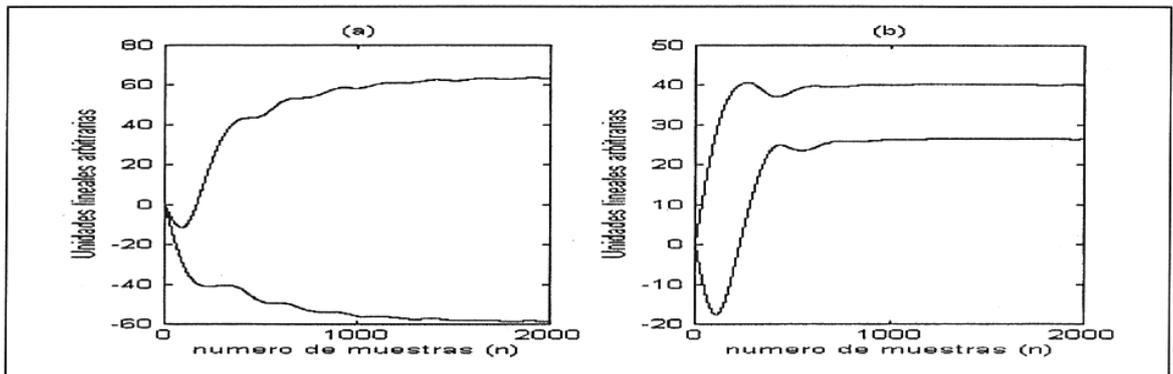


Figura 7: Evolución de los dos pesos del filtro adaptativo para un tono de 75 Hz obtenida en el algoritmo filtered-X LMS con dos coeficientes (a) y con dos coeficientes desfasados 90° (b).

EL ESQUEMA PROPUESTO

El esquema propuesto consiste en una versión simplificada de los algoritmos descritos anteriormente. Si intentamos cancelar un tono puro, sólo dos pesos son necesarios en el algoritmo adaptativo. El algoritmo de la DFT deslizante, computacionalmente complejo en su concepción, se transforma en un algoritmo realmente simple cuando se realiza una DFT de sólo dos puntos. Una DFT de dos puntos se realiza mediante la suma y la resta de dos muestras consecutivas de la señal de entrada. De este modo el esquema queda como en la figura 4, que corresponde al bloque $W(z)$ de la figura 2.

Se puede obtener una solución similar si se parte del ecualizador activo de Kuo y Ji y se sintetiza un filtro en cuadratura de sólo dos coeficientes. La diferencia fundamental estriba en este caso en la etapa de normalización de potencia. Mediante la normalización de potencia se consigue que el algoritmo continúe funcionando como un ecualizador de ruido, a la vez que retiene las propiedades aceleradoras de la DFT deslizante.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Este sistema de control activo de ruido se ha programado en un sistema procesador de señal Fulcrum basado en el microprocesador TMS320C40 de Texas Instrument y ha sido probado para diferentes señales (tonos fijos o tonos desplazándose en frecuencia en el intervalo de 50 a 150Hz) con éxito. La configuración del sistema la vemos en la figura 5.

El prototipo de laboratorio consta básicamente de un tubo de PVC de 90 mm de diámetro. Las dimensiones del conducto se eligieron de tal forma que fueran pequeñas en comparación con las longitudes de onda de trabajo (frecuencias de trabajo de hasta 300:500Hz). Un altavoz en uno de los extremos del tubo actúa como fuente primaria de ruido y en un extremo de una de las ramas del tubo principal está conectado otro altavoz formando un ángulo de 45° . Los dos altavoces son de 200mm de diámetro y están montados en una caja de $35 \times 55 \times 84 \text{ cm}^3$ de volumen. La señal de ruido se crea mediante un generador de ondas HP33120A.

Se muestran a continuación resultados de experimentos en tiempo real para dos señales muestreadas a 1kHz: un tono de 75Hz y una señal FM de 75Hz de frecuencia central, 300mHz de frecuencia moduladora y 10Hz de desviación de frecuencia.

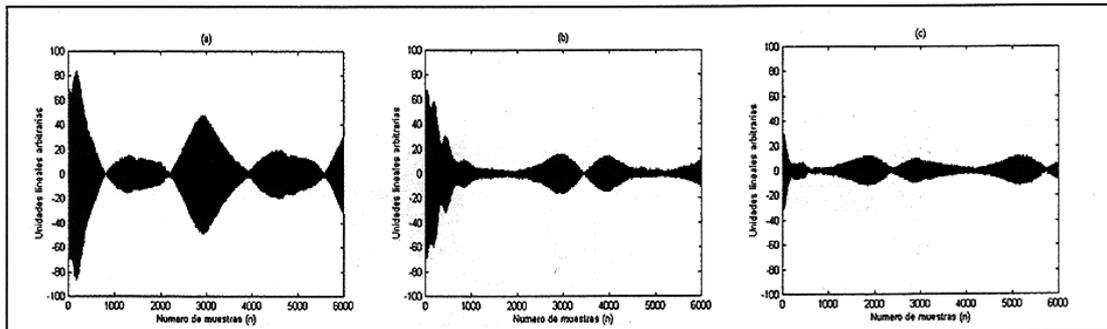


Figura 8: Señal de error para una señal de FM de 75 Hz de frecuencia central, 300 mHz de frecuencia moduladora y 10 kHz de desviación de frecuencia para el algoritmo filtered-X LMS con dos coeficientes (a), algoritmo filtered-X LMS con dos coeficientes desfasados 90° (b) y variante de la DFT deslizante con dos coeficientes (c).

En las figuras 6 (a) y (b) podemos observar la señal captada por el micrófono de error cuando el ruido a cancelar es una señal periódica de frecuencia 75Hz empleando los algoritmos adaptativos filtered-X LMS de dos coeficientes y filtered-X LMS con dos coeficientes desfasados 90° . En la figura 7 vemos la adaptación de los dos coeficientes del filtro con el tiempo. En el caso del algoritmo filtered-X LMS con coeficientes desfasados 90° , la convergencia es mucho más rápida y el error residual mucho menor. En el caso de tener un tono de frecuencia variable, los resultados los podemos observar en la figura 8, en este caso hemos utilizado tres algoritmos diferentes: filtered-X LMS con dos coeficientes, filtered-X LMS con dos coeficientes desfasados 90° y la variante de la DFT deslizante con dos coeficientes. Al igual que en el caso anterior el algoritmo filtered-X LMS con dos coeficientes desfasados 90° se adapta mucho mejor que el clásico filtered-X LMS. Ahora bien, el nuevo algoritmo de la DFT converge más rápido adaptándose a cualquier frecuencia, aparte de su sencillez computacional.

CONCLUSIONES

El nuevo algoritmo adaptativo propuesto variante de la DFT deslizante ha demostrado ser efectivo en la cancelación de señales compuestas por tonos simples o múltiples de frecuencia variable. Así mismo su funcionamiento es óptimo en cuanto a velocidad de convergencia, niveles de cancelación y complejidad computacional y mejor que los algoritmos adaptativos clásicos, variantes del filtered-X LMS.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*. Academic Press, 1992.
 - [2] S. Kuo, D. Morgan, *Active Noise Control Systems*. John Wiley & Sons, 1996.
 - [3] B. Widrow y S.D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1985.
 - [4] J.J. Shynk, "Frequency-domain and Multirate Adaptive Filtering", IEEE Signal Processing Magazine, pp. 14-37, enero 1992.
 - [5] P. Darlington y S.J. Elliott, "Synchronous adaptive filters with delayed coefficient adaption", Proc. ICASSP, 1988, pp. 2586-2589.
 - [6] Widrow, D. Schur and S. Shaffer, "On adaptive inverse control", Proc. 15th Asilomar Conf., 1981, pp. 185-189, 1981.
 - [7] Burgess, "Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation", J. Acoust. Soc. Am., 70, pp. 715-726, sep. 1981.
 - [8] S. D. Snyder y C. H. Hansen. "The effect of transfer function estimation errors on the filtered-X LMS algorithm", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 42, no.4, pp. 950-953, abril 1994.
 - [9] S. M. Kuo, M. J. Ji y H. Jiang. "Development and Experiment of Narrowband Active Noise Equalizer", Noise Control Engineering Journal, pp.281-288, julio-agosto 1993.
 - [10] F. Beaufays, "Transform-Domain adaptive filters: an analytical approach", IEEE Trans. on Signal Processing, vol.43, pp. 422-431, febrero 1995.
 - [11] D. Marshall, W. Kenneth, J.J. Murphy, "The use of orthogonal transforms for improving performance of adaptive filters", IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol.36, pp. 474-483, abril 1989.
- I Discrete Fourier Transform.