



## Diseño de sistemas de control activo de ruido en conductos basado en procesadores digitales de señal

José María Vara Rodríguez (ARTEL Ingenieros S.L.)

Manuel Sobreira Seoane (E.T.S.I.Telecomunicación, Universidad de Vigo)

Este proyecto ha sido realizado durante el disfrute de una beca de investigación concedida por el IGAPE (Instituto Gallego de Promoción Económica) a ARTEL Ingenieros S.L. y desarrollado en la E.T.S.I.Telecomunicación de la Universidad de Vigo.

### Abstract

Low frequency noise cancellation is not efficient with passive filters. That is why an active noise control system is proposed as an economic and feasible possibility. The goal of active control is to achieve cancellation of acoustic noise with a destructive interference, that is, creating an artificial signal that is added to the original sound in order to get perfect cancellation. The basic principle is this: the noise is caught with a sensor to get a reference. This signal is processed in some way, and is back to the environment through a speaker. It is expected the original and the cancelling sounds to have the same amplitude but opposite phase. With a second sensor the result is observed, and can be used to update the system. An real active noise control system applied to ducts based on the Motorola DSP56002 Evaluation Module has been made and experimental results are shown.

### Introducción

En los últimos años el alto nivel de ruido acústico presente en nuestra sociedad ha llevado a tratarlo como un tema prioritario. Hay estudios que demuestran que el ruido puede causar efectos psicológicos negativos, dañar el oído y afectar a la calidad del trabajo. El ruido, especialmente de baja frecuencia, no es sólo molesto durante períodos de exposición larga, sino que además produce fatiga y pérdida de concentración, con el correspondiente deterioro de la calidad de vida. Cada vez son más los programas y normativas que desde organismos oficiales animan u obligan a la reducción del ruido en los ambientes de trabajo. Esto hace que el estudio de métodos de control de ruido sea en este momento de gran interés y utilidad.

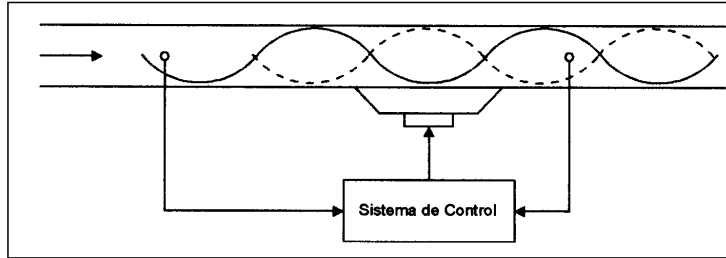
Tradicionalmente se han utilizado silenciadores pasivos para este fin (materiales absorbentes, cavidades resonantes, etc). La atenuación conseguida con técnicas pasivas es función de la longitud de onda de la señal a cancelar y el tamaño del silenciador. No son efectivos para frecuencias por debajo de los 500 Hz puesto que para ello deberían de ser pesados y voluminosos, lo que incrementa considerablemente su coste. El avance de la tecnología electrónica en los últimos años ha relanzado el estudio de los silenciadores activos (control activo).

### Fundamentos del control activo de ruido

El control activo consiste en suprimir el ruido utilizando otra señal acústica de forma que ambas perturbaciones se cancelen. Esto es posible a bajas frecuencias, por lo que resulta una técnica complementaria a la utilización de silenciadores pasivos. La idea fue propuesta por Lueg en 1933 para el control de ruido en un conducto, pero a pesar de que los primeros fundamentos teóricos tienen más de 50 años, las limitaciones de tecnológicas han retrasado su puesta en marcha hasta hace unos pocos años (mediados de los 80).

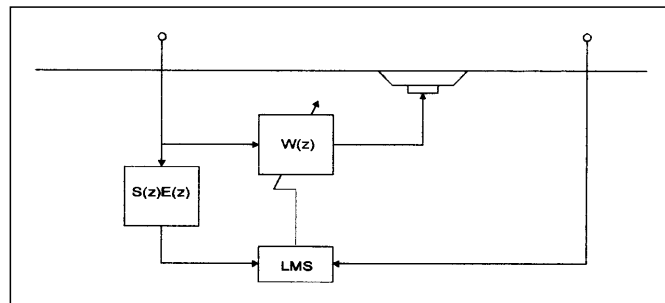
La aparición y posterior desarrollo de los procesadores digitales de señal (DSP) han hecho posible realizar el controlador con un filtro digital programado dentro del DSP. De esta forma, se podrían utilizar algoritmos adaptativos para obtener una cancelación efectiva. Los algoritmos adaptativos utilizan la información procedente de la salida del sistema para corregir su funcionamiento y optimizarlo con respecto a algún criterio. En el caso del control activo el criterio será el de la reducción de la potencia de ruido.

El esquema general de un sistema de este tipo aplicado al control del ruido en conductos es el siguiente:



La señal que se propaga por el tubo (primaria) se adquiere con un primer micrófono (referencia). Tras ser procesada se devuelve al tubo por un altavoz (fuente secundaria). A partir de ahí se propagará por el tubo la suma acústica de la señal primaria y la secundaria. Mediante un segundo micrófono (error) se obtiene el resultado que se pretende optimizar. Esta señal de error es introducida en el sistema de control, que la utilizará para adaptarse, y obtener un mejor resultado, según el criterio ya comentado de mínimo error.

Para la realización del controlador digital se ha utilizado el algoritmo FXLMS (Filtered-X Least Mean Squares), ampliamente estudiado en la literatura. El diagrama de bloques que describe el sistema se puede observar a continuación:



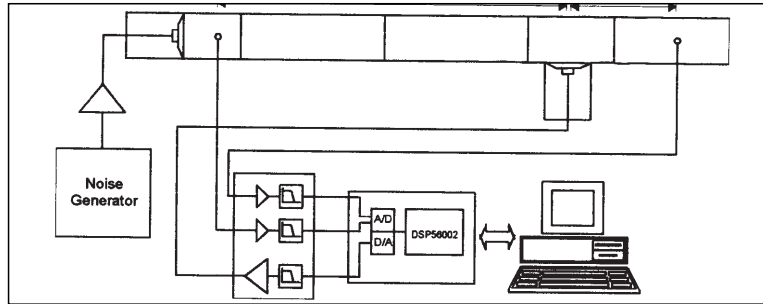
El algoritmo FXLMS adapta los coeficientes de un filtro adaptativo según la expresión:

$$h_i(n+1) = h_i(n) + \mu x'(n)e(n)$$

donde  $h_i(n)$  son los coeficientes del filtro en la etapa actual,  $\mu$  es el paso de adaptación,  $x'(n)$  es la señal de referencia filtrada por una estimación de la respuesta del altavoz y la porción de conducto entre el altavoz secundario y el micrófono de error (denominado también "camino de error") y  $e(n)$  es la muestra correspondiente de la señal de error.

#### Prototipo construido

Se ha construido un prototipo de un sistema de control activo del ruido que se propaga por un conducto basado en el procesador digital de señal DSP56002 de Motorola. Consiste en un tubo de prueba de P.V.C. de 160 mm de diámetro y más de 7 metros de largo sobre el que se han dispuesto los diferentes elementos que constituyen el sistema de control, como se puede observar en la siguiente figura:



Mediante un generador de ruido se inyecta éste en el tubo. Tanto la señal de error como la de referencia se introducen en el DSP a través de una etapa de amplificación y filtrado. El soporte del DSP es la tarjeta de desarrollo DSP56002EVM de Motorola, que incluye, además del procesador, un CODEC (convertidor A/D y D/A estéreo) y el interfaz adecuado para comunicarse con un PC a través del puerto serie. La salida del procesador también es filtrada y amplificada antes de ser introducida en el tubo a través del altavoz secundario. Desde el PC se cargan las rutinas adecuadas en la memoria del DSP y se ejecutan mediante un programa de control desarrollado como parte del proyecto. Para observar los resultados se utiliza un micrófono a la salida del tubo conectado a un analizador de espectro, no representado en la figura.

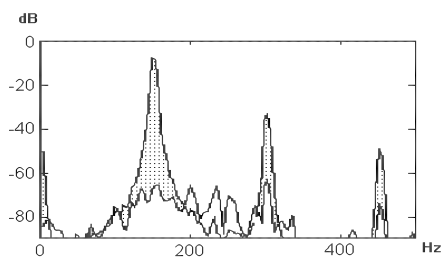
Se han programado dos rutinas principales:

- Estimación de la respuesta al impulso del sistema formado por el altavoz y el camino de error. Esta estimación se hace a priori, antes de poner en funcionamiento el sistema, y es utilizada para filtrar las muestras de referencia antes de adaptar los coeficientes del filtro, como se mencionó en el apartado anterior.
- Control del ruido mediante el algoritmo FXLMS. Al comienzo se ejecuta una rutina de control de ganancia (aprovechando amplificadores de ganancia variable integrados en el CODEC), con el objeto de adecuar el nivel de las señales de entrada al rango dinámico de los conversores.

### Resultados experimentales

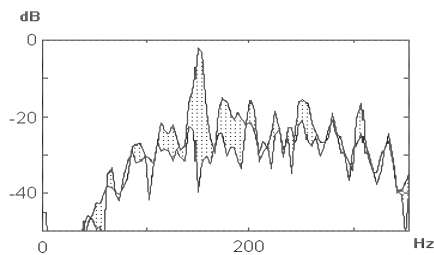
Para las pruebas de evaluación se han utilizado tres fuentes de ruido diferentes:

Tono de 150 Hz sin ruido de fondo:



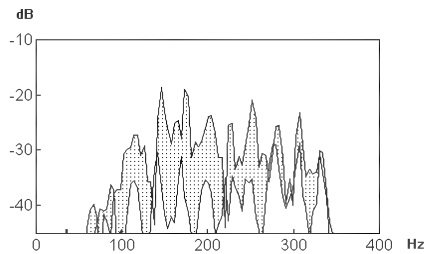
En la gráfica se representan el espectro de la señal sin cancelar (sombreado) y de la señal una vez activado el sistema de control (sin sombreado) recogidas en el micrófono de error. Como se puede observar, se obtiene una atenuación de más de 40 dB en el tono principal, y se llegan a reducir incluso los armónicos. Para estos resultados se ha utilizado un filtro de control de 192 coeficientes y un paso de adaptación de 0.0001. El micrófono de error se situó a 60 cm del altavoz secundario.

Tono de 150 Hz con ruido de fondo (caso más común):



La relación "señal a ruido (tono principal a ruido de fondo)" es de 20 dB. En este caso la reducción del nivel del tono de 150 Hz no es tan grande como en el caso anterior, obteniéndose sin embargo una pequeña cancelación del nivel del ruido de fondo. Esto ocurre porque el algoritmo se centra en cancelar las componentes espectrales más marcadas. Se obtiene, por tanto, un espectro más suave, que es lo que se busca en muchas aplicaciones. Los parámetros utilizados son iguales que en el caso anterior.

Ruido de banda estrecha (de 50 a 315 Hz):



En este caso se ha incluido en el modelo la influencia de la realimentación que se produce entre el altavoz secundario y el micrófono de referencia. Para ello se ha estimado la respuesta en frecuencia entre el altavoz y el micrófono de la misma forma que se hizo con el camino de error, y ahora a la señal de referencia que se introduce en el algoritmo FXLMS se le resta la salida del sistema filtrada por dicha respuesta. Esto se utiliza también cuando el nivel de señal de salida es muy grande, para disminuir el efecto de la realimentación. El nivel de señal reducido ahora es menor que en los casos anteriores, dándose zonas del espectro con una gran cancelación

(aproximadamente 20 dB) y otras en las que no existe apenas cancelación. Esto se debe a las resonancias del conducto y a los diferentes modos longitudinales de propagación de la señal para distintas frecuencias. Como se puede observar el efecto de cancelación es mayor a bajas frecuencias. Se utilizó una estimación de la realimentación de 92 coeficientes. El resto de los parámetros como en los casos anteriores.

### Conclusiones

Se ha construido un sistema de control activo de ruido en un conducto basado en el DSP56002 de Motorola. Las pruebas realizadas permiten afirmar que la puesta en marcha de un sistema de control activo de ruido es una alternativa viable y muy económica al control pasivo. Además, su capacidad de adaptarse a entornos de trabajo diversos lo convierte en un herramienta de trabajo muy flexible.

### Referencias

1. Active Control of Noise, S.J. Elliot y P.A. Nelson.
2. Active Noise Control Systems, Sen M. Kuo y Dennis R. Morgan. John Wiley & Sons, Inc. 1996
3. The active control of noise in a ventilation duct, Lovett Whitelaw. Institute of Sound and Vibration, University of Southampton. 1991
4. Algoritmos adaptativos aplicados al problema del control activo de ruido, Victor González Aria. PFC - E.T.S.I. Telecomunicación de la Universidad de Vigo, 1995
5. Self-adaptive broadband active sound control system, A. Roure. Journal of Sound and Vibration (1985) 101 (3).
6. DSP56002 Users Manual.