

Control Activo del Ruido de Baja Frecuencia en el Instituto de Acústica del CSIC

Pedro Cobo Parra

Instituto de Acústica, C.S.I.C. Serrano 144. 28006 Madrid

Introducción

El ruido se puede controlar por métodos pasivos y/o activos. Los métodos de control pasivo no añaden energía adicional al sistema, por lo que son intrínsecamente estables. Pueden absorber energía o modificar la impedancia del medio para reducir el campo acústico propagado en el mismo. Los métodos pasivos incluyen absorbentes superficiales, silenciadores reactivos, materiales porosos, soportes antivibratorios, resonadores, etc.. (Beranek y Ver, 1992). Las técnicas pasivas se encuentran en un estado muy maduro, y proporcionan soluciones efectivas a frecuencias medias y altas, con un coste no excesivamente elevado. La envergadura del dispositivo de control (tamaño y peso) está relacionada con la longitud de onda del ruido a cancelar. Esto hace que los dispositivos pasivos, por debajo de una cierta frecuencia, sean poco rentables o inviables.

El ruido ambiental, sobre todo en las grandes ciudades, es rico en componentes de baja frecuencia. Se origina en el tráfico rodado a velocidades bajas y medias, en la maquinaria industrial, en turbinas y compresores, en sistemas de ventilación y aire acondicionado, ... Debido a su capacidad de penetración, y a la reducida eficacia de los dispositivos pasivos para atenuarlo, sus efectos son padecidos por una gran parte de la población (Berglund y Hassmen, 1996). El control activo del ruido es una tecnología emergente, que combina fundamentos de acústica, electrónica y procesamiento de señal, proporcionando soluciones viables al problema del ruido de baja frecuencia. Además, los sistemas activos se integran bien con diseños pasivos para ofrecer soluciones híbridas de banda ancha.

Los sistemas de control activo del ruido (CAR) constan de una parte acústica, de un hardware y de un software de control. La parte acústica incluye los sensores del campo primario y las fuentes del campo secundario. El hardware consiste en una placa DSP ensamblada en un ordenador. El software consta de un programa de control que adquiere las señales de entrada, las procesa en la DSP, y calcula las señales de salida. Por tanto, el control activo es un sistema asistido por ordenador. La evolución de la electrónica digital es tal que ya existen placas DSP capaces de realizar miles de millones de operaciones en coma flotante por segundo (Gflops). Además, las prestaciones suben y el precio baja, es decir, mejora la relación beneficio/coste. Por tanto, los sistemas activos tienen una capacidad casi ilimitada para empaquetar nueva información. El éxito de la cancelación activa del ruido radica en la correcta interconexión entre sus aspectos acústicos y sus aspectos de control. Los aspectos acústicos incluyen (Cobo Parra, 1997):

- Principio de cancelación (interferencia destructiva o absorción activa).
- Cancelación global o local.
- Complejidad espacial del ruido (conductos, recintos,...).
- Tipo de ruido (periódico, aleatorio de banda ancha, no estacionario,...).
- Origen del ruido (estructural, aéreo,...).
- Configuración geométrica de fuentes y sensores.
- Diseño del operador de extrapolación entre la zona de medida y la de cancelación.

Los aspectos de control de un sistema CAR incluyen (Nelson y Elliott, 1992):

- Diseño de la estrategia de control.
- Elección del algoritmo de control.
- Implementación hardware del sistema de control.

En la actualidad existen ya sistemas comerciales que implementan los aspectos de control de los sistemas activos a precios muy competitivos. Los aspectos acústicos, sin embargo, no se pueden obviar por ningún sistema comercial. Para disponer los sensores y las fuentes secundarias es necesario caracterizar el campo de ruido, tanto espectral como espacialmente (fuentes de ruido, bandas o tonos dominantes, vías de propagación, variabilidad temporal y espacial,...).

A continuación se presentan algunas de las actividades del Instituto de Acústica en el campo del control activo del ruido.

Protectores auditivos activos

Los protectores auditivos activos, los cuales existen desde mediados de los años 80, son un ejemplo típico de un sistema de control local feedback. Un micrófono mide el ruido en la pequeña cavidad del protector auditivo, y a través de un filtro genera la señal de alimentación para que un altavoz radie el antirruído correspondiente. Si la respuesta en frecuencia de la parte acústica fuese plana, el filtro electrónico consistiría en un simple amplificador y un inversor de fase (Carne, 1988).

En el caso real, el filtro electrónico tiene que compensar la respuesta en frecuencia acústica en bucle abier-

to del sistema (filtrado inverso). Cuando a través de los protectores auditivos se usan señales de comunicación (palabra) se puede diseñar un filtro que cancele el ruido sin alterar significativamente la palabra. Estos protectores auditivos activos mejoran entonces la inteligibilidad. En un puesto de trabajo con elevados niveles de ruido se requiere que la inteligibilidad de la palabra sea al menos aceptable, pues un mensaje mal interpretado puede dar lugar a errores en la actividad laboral, e incluso a accidentes si las palabras transmitidas corresponden a un aviso de peligro. La Figura 1 muestra la curva de atenuación de unos protectores auditivos activos, diseñados en el Instituto de Acústica. El filtro analógico consiste en un bicuadrático implementado como una combinación de un paso bajo, paso banda y paso alto (García Alba, 1997). La curva de atenuación se midió restando los niveles en el micrófono interior a la concha, con el sistema activo conectado y desconectado. El ruido incidente consistió en un ruido aleatorio filtrado en una banda con frecuencia de corte de 1000 Hz.

Control activo del ruido en conductos

El control activo en conductos es un ejemplo típico de un sistema monocanal feedforward. A frecuencias menores que la del primer modo transversal, sólo se propagan ondas planas, y el problema es especialmente simple. En la actualidad, existen sistemas comerciales para el control activo en conductos. Un requisito importante para el buen funcionamiento de un sistema CAR en conductos, es que las señales medidas en los micrófonos de referencia y de error sean coherentes, (Bies y Hansen, 1996). La turbulencia del flujo puede degradar la coherencia acústica y limitar severamente el funcionamiento del sistema CAR. Una de las aplicaciones con más futuro del control activo en conductos es la atenuación del ruido radiado por motores a través de su conducto de

escape (coches, generadores, co-generadores,...). Para su aplicación masiva, es necesario superar algunas dificultades técnicas, tales como el uso de transductores suficientemente robustos en un ambiente tan hostil (niveles de hasta 170 dB, temperaturas de hasta 550 °C, flujos de gases de hasta 200 m/s).

La Figura 2 muestra la curva de atenuación medida en un conducto de 10 cm de diámetro, en el micrófono en frente de la fuente secundaria. Las fuentes primaria y secundaria consisten en altavoces de 13 cm. Los micrófonos de referencia y de error son del tipo electrete. El sistema CAR es la placa EZ-ANC, de Causal Systems (Snyder y Vokalek, 1994). La atenuación se mide como la diferencia de niveles espectra-

les, con y sin el sistema CAR funcionando. El ruido primario consiste en un ruido aleatorio filtrado paso bajo, con frecuencia de corte en 400 Hz (Moreno Acero, 1997). Nótese el pequeño refuerzo a la frecuencia de 100 Hz (1 dB).

Un aspecto interesante de este problema, actualmente bajo investigación, es el uso de varias fuentes secundarias. Como en baja frecuencia la potencia acústica que ha de generar la fuente secundaria es proporcional al cuadrado de la velocidad volúmica, puede que la placa DSP se sature al intentar producir coeficientes para el filtro fuera de su margen dinámico. En estos casos, es preferible usar mejor varios altavoces más pequeños que uno grande.

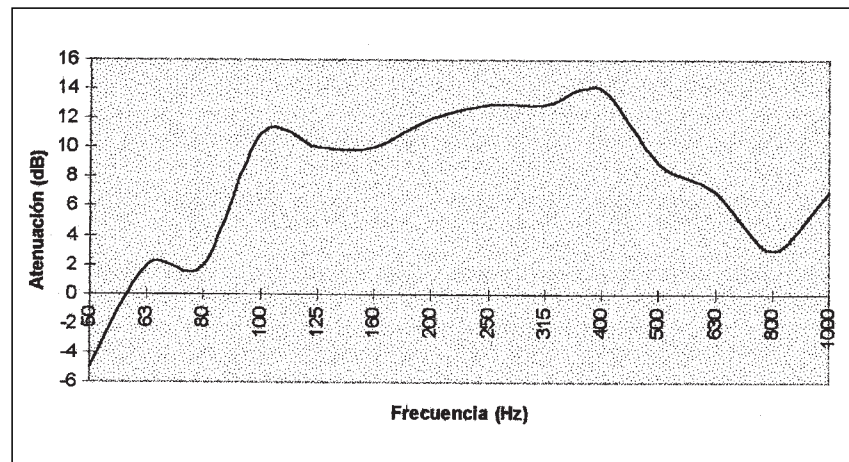


Figura 1. Curva de atenuación a un ruido aleatorio filtrado paso bajo (1000 Hz) de unos protectores activos diseñados en el Instituto de Acústica (García Alba, 1997)

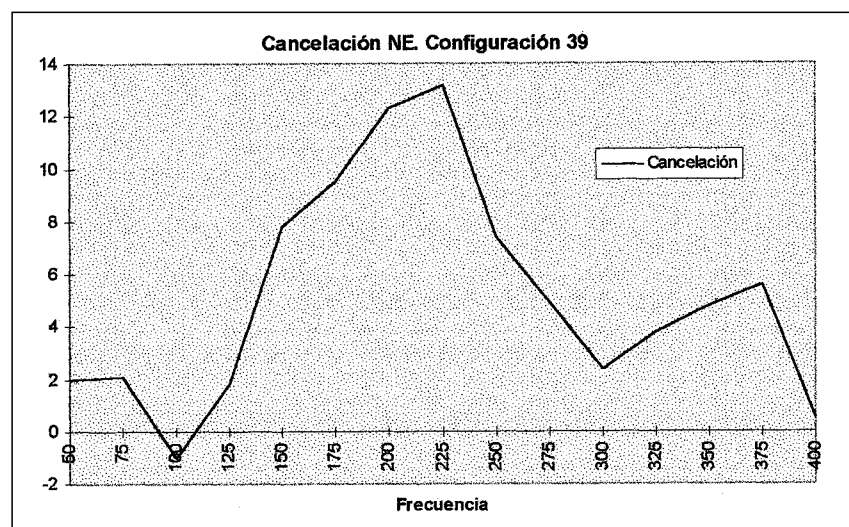


Figura 2. Curva de atenuación de un ruido aleatorio filtrado en paso bajo (400 Hz) en el conducto del Instituto de Acústica (Moreno Acero, 1997)

Optimización de la configuración de fuentes de control

El funcionamiento de un sistema CAR depende críticamente de la correcta interrelación entre los aspectos acústicos y los de control. Uno de los aspectos acústicos más importantes de un sistema CAR es la configuración geométrica de las fuentes de control. En el Instituto de Acústica se ha elaborado un modelo para optimizar la configuración geométrica (número y posición) de las fuentes de control. Se asumen m fuentes de control rodeando en un semicírculo a una fuente primaria, a una distancia d . En un semicírculo en el campo lejano, a una distancia D ($D \gg d$ y $D \gg \lambda$) se sitúan n sensores de error. La función de coste a minimizar es la suma cuadrática de las presiones acústicas en un sector angular de los sensores de error. Cuando el número de configuraciones posibles es pequeño, se puede encontrar la configuración óptima mediante búsqueda exhaustiva. Sin embargo, dado que el número de configuraciones crece factorialmente con el número de fuentes de control y sensores de error, se pueden aplicar técnicas de optimización combinatorial. En nues-

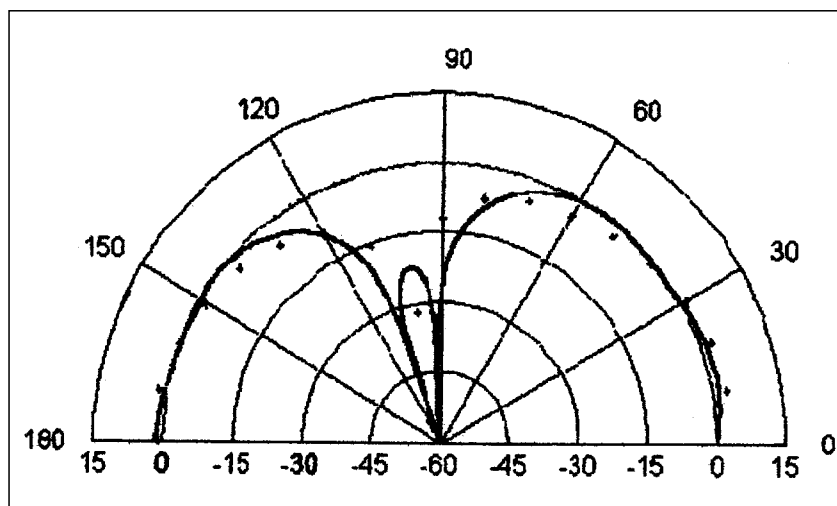


Figura 3. Diagrama de radiación en campo lejano de una fuente monopolar primaria rodeada de tres fuentes secundarias a 80, 100 y 120°. $d/\lambda=1.15$, sensores a 90, 100, y 110°. (—) Diagrama teórico; (++) diagrama medido en cámara anecoica (Moreno Díaz, 1997)

tro caso, aplicamos una optimización por el método del recocido simulado (Laarhoven y Aarts, 1988). La Figura 3 muestra el diagrama polar de radiación teórico (línea continua) y medido experimentalmente (símbolos +), para una fuente monopolar radiando a 280 Hz, rodeada por tres fuentes secundarias a 80°, 100° y 120°. Se trataba de optimizar la cancelación en el sector angular comprendido entre 90° y 110°. Las medidas se re-

alizaron en la Cámara Anecoica del Instituto de Acústica, usando el sistema CAR EZ-ANC.

Agradecimientos

Agradecemos el soporte financiero del Programa Nacional de I+D en Medio Ambiente, de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto AMB96-2387-E).

Referencias

- Beranek, L.L. and Vér, I.L., 1992. Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York.
- Berglund, B. and Hassmen, P., 1996. "Sources and effects of low-frequency noise". J. Acoust. Soc. Am., 99(5), 2985-3002.
- Bies, D.A. and Hansen, C.H., 1996. Engineering Noise Control. Theory and Practice (2nd Edition). E&FN Spon. London.
- Carme, Chr., 1988. "Absorption acoustique active dans les cavités auditives". ACUSTICA, 66(5), 233-246.
- Cobo Parra, P., 1997. Control Activo del Ruido: Principios y Aplicaciones. Publicaciones CSIC (en proceso).
- García Alba, J., 1997. Filtro analógico para la cancelación activa del ruido en protectores auditivos. Proyecto Fin de Carrera ICAI, Madrid.
- Laarhoven, P.J.M. van, and Aarts, E.H., 1988. Simulated Annealing: Theory and Applications. Kluwert Academic Publishers, London.
- Moreno Acero, J.M., 1997. Control activo del ruido de banda ancha en conductos. Proyecto Fin de Carrera ICAI, Madrid.
- Moreno Díaz, J., 1997. Control activo del ruido en campo libre. Estudio y optimización de la configuración geométrica de las fuentes de control. Proyecto Fin de Carrera ICAI, Madrid.
- Nelson, P.A. and Elliott, S.J., 1992. Active Control of Sound. Academic Press, New York.
- Snyder, S.D. and Vokalek, G., 1994. EZ-ANC User's Guide. Causal Systems Pty Ltd., Adelaide, Australia.