

Control activo del ruido

*P. Cobo, T. Bravo, M. Cuesta, C. Ranz, y M. Siguero
Instituto de Acústica. CSIC. Serrano 144. 28006 Madrid
Tel: 91 5618806; Fax: 91 4117651*

*iacpc24@ia.cetef.csic.es, iacbm51@ia.cetef.csic.es, iaccr52@ia.cetef.csic.es,
iacrg32@ia.cetef.csic.es, iacms00@ia.cetef.csic.es*

PACS: 43.50.Ki

Resumen

El Control Activo del Ruido (CAR) es una de las líneas de investigación más jóvenes del Instituto de Acústica del CSIC. En este trabajo presentamos, desde una perspectiva histórica, la labor realizada en CAR en los últimos cinco años.

Summary

The aim of this paper is to present the research carried out on Active Noise Control during the last five years at the Institute of Acoustics, CSIC.

1. Introducción

El CAR surge como una técnica complementaria al control pasivo del ruido en el margen de las frecuencias bajas. Las limitaciones del control pasivo en este margen de frecuencias son bien conocidas. Los materiales absorbentes y aislantes, las barreras antirruído, los filtros acústicos (resonadores de Helmholtz, cámaras de expansión,...), los encapsulamientos de la fuente de ruido, requieren dimensiones y/o pesos a menudo inaceptables por debajo de 500 Hz. Con un paramento simple se puede conseguir un aislamiento de 40 dB con un material de 15 kg/m² a 1000 Hz, pero se requiere uno de 150 kg/m² a 100 Hz. Un silenciador tipo cámara de expansión simple de 34 cm de longitud proporciona la misma Pérdida de Transmisión a 1000 Hz que uno de 3.4

m a 100 Hz. El control pasivo del ruido también funciona en bajas frecuencias. El problema radica en la envergadura de la solución que aporta.

La idea del CAR, como interferencia destructiva entre el campo primario de ruido, y uno secundario, en contrafase, generado electrónicamente, ya fue planteada por Lueg en 1934. En los años 50 encontramos algunas implementaciones prácticas a la reducción de ruidos con una estructura espacio-temporal muy simple, como el radiado por transformadores eléctricos. Pero el verdadero interés por el CAR surge a partir de los trabajos de Widrow sobre filtrado adaptativo y su posible implementación en DSP's. La potencia de los filtros adaptativos radica en su capacidad de adaptar el sistema de control a las condiciones cambiantes de los ruidos que se pretenden reducir. En los años 80 se presentan aplicaciones prácticas del CAR en conductos (tubos de escape de motores, sistemas de ventilación y aire acondicionado) y en protectores auditivos. En los años 90 se publican resultados espectaculares del CAR en el interior de medios de transporte (coches, aviones).

El CAR funciona tanto mejor cuanto más baja es la frecuencia. Por tanto, el CAR no es una alternativa, sino un complemento, al control pasivo del ruido. En la práctica, la solución más apropiada es una híbrida pasiva-activa. Primero, se reducen tanto como sea posible las frecuencias medias y altas mediante control pasivo. El ruido residual de baja frecuencia se ataca entonces mediante control activo.

El Instituto de Acústica del CSIC, consciente de la relevancia de esta nueva técnica, crea un grupo de investigación sobre CAR en 1995. En este trabajo exponemos, desde una perspectiva histórica, los trabajos realizados por este grupo en el periodo 1995-2000.

2. Líneas de investigación y personal involucrado

A instancias del Director del IA, el laboratorio de CAR fue creado por Pedro Cobo en 1995, con mucho entusiasmo pero poca instrumentación. La primera tarea fue un estudio exhaustivo del estado del arte, fruto del cual se publicó un libro (Cobo, 1997). A lo largo de 1995 se incorporó José María López Almansa, ingeniero de Telecomunicaciones, con una beca de la CICYT. Ambos montaron el primer prototipo para el control del ruido en conductos, con tubo de PVC, altavoces de coche, micrófonos de electrete, y un controlador manual compuesto por amplificadores de señal y un cambio de fase proporcionado por un filtro paso-bajo, con la frecuencia de corte próxima a la frecuencia de la señal que pretendíamos cancelar. Con esta instrumentación rudimentaria, éramos capaces de reducir el nivel equivalente del ruido primario periódico en el margen (100, 1000) Hz entre 20 y 30 dB. Afortunadamente, a finales de 1995 adquirimos el controlador adaptativo EZ-ANC con 6 canales de entrada y 6 de salida, que nos permitió atacar problemas de ruido con una estructura espacio-temporal más compleja. Más tarde, a finales de 1997 adquirimos el controlador Digiware, con 8 canales de entrada y 8 de salida, y mayor potencia y velocidad de cálculo.

A lo largo de 1996 se reincorporó al Instituto de Acústica Carlos Ranz, compatibilizando su dedicación a su línea de investigación de siempre, la Hidroacústica, con su apoyo al CAR. La aportación de Carlos Ranz fue decisiva para consolidar esta nueva línea de trabajo, y para crear un grupo con masa crítica suficiente para acceder a Proyectos financiados por la CICYT. A este grupo se unieron José Pons, Salvador Santiago, Manuel Siguero, y Carmen Delgado. Uno de estos Proyectos nos permitió incorporar a dos nuevas becarias, Teresa Bravo a finales de 1997, y María Cuesta, a principios de 1998. Gracias a la generosa dedicación de Teresa y María podemos hablar hoy en día del CAR en el Instituto de Acústica como una línea de investigación consolidada. Muchos ingenieros han realizado su Proyecto Fin de Carrera en nuestro grupo a lo largo de este lustro, y sus nombres aparecen en la lista de agradecimientos.

Las líneas de investigación en las que hemos trabajado han sido las siguientes:

- Desarrollo de filtros analógicos para la cancelación activa del ruido en protectores auditivos (García y Cobo, 1997).
- Control adaptativo monocanal en conductos (Cobo, 1997; Moreno y Cobo, 1997).
- Optimización de la disposición geométrica de las fuentes de control y de los sensores de error en sistemas CAR multicanal (Cobo, 1997; Bravo y Cobo, 1998, 1999, 2000).

- Desarrollo de un sistema CAR multicanal en el interior de vehículos (Cobo y Martín, 1998; Bravo et al, 1999a, 1999b; Bravo y Cobo, 2000; Cuesta et al, 2000).
- Prototipo de un sistema CAR monocanal del ruido de escape de fuentes encapsuladas (Cuesta et al, 1998; Cuesta y Cobo, 1999a, 1999b, 2000a, 2000b; Cuesta et al, 2000).
- Control activo acústico estructural (Cobo, 2000; Cuesta y Cobo, 2000).
- Diseño de altavoces apropiados para el CAR (Siguero y Cobo, 1998, 2000).
- Aspectos cualitativos del CAR (Siguero y Cobo, 1999).

3. Resultados más relevantes

La Figura 1 (arriba) muestra el prototipo del sistema CAR en conductos instalado en el Instituto de Acústica. La Figura 1 (abajo) muestra un resultado típico de control activo de ruido aleatorio filtrado en una banda de 400 Hz. La cancelación espectral es de hasta 20 dB. La cancelación global medida con un sonómetro es de 12 dB.

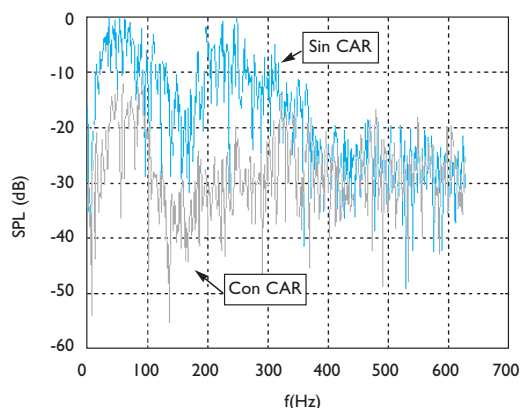


Figura 1. Prototipo CAR en conductos (arriba) y ruido blanco filtrado hasta 400 Hz sin y con CAR (abajo).

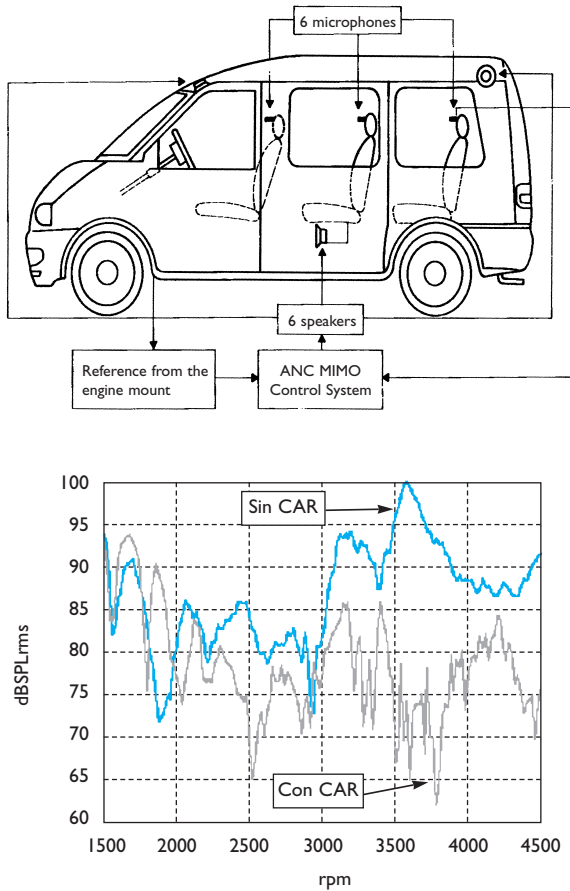


Figura 2. Esquema del sistema CAR instalado en el interior de un vehículo (arriba) y seguimiento del orden $2N$ en el asiento del conductor con y sin el sistema CAR (abajo)

La Figura 2 (arriba) muestra el esquema de un sistema CAR con 6 altavoces y 6 micrófonos, para el control del *booming* en el interior de un vehículo industrial. El *booming* se produce cuando el orden $2N$ del ruido del motor excita un modo de cavidad del habitáculo del vehículo. Como vemos en la Figura 2 (abajo) el *booming* se manifiesta por una subida súbita del orden $2N$ alrededor de una cierta frecuencia. El sistema CAR multicanal implementado proporciona una reducción de este *booming* superior a 25 dB.

La Figura 3 (arriba) muestra un prototipo de un sistema híbrido para el control del ruido radiado por una fuente tipo motor. La fuente de ruido es un grupo eléctrico de 1.9 kVA. Encapsulando la fuente se consigue reducir pasivamente el ruido radiado de frecuencias medias y altas. El ruido de escape de baja frecuencia se ataca mediante un sistema CAR monocanal con una señal de referencia captada con dos acelerómetros en la cu-

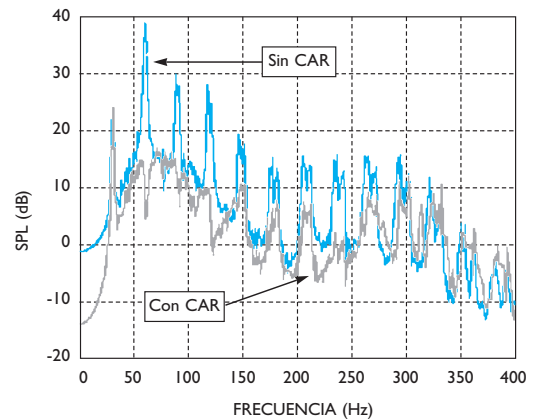


Figura 3. Prototipo de sistema de control de ruido de una fuente encapsulada (arriba) y ruido de escape con y sin el sistema CAR (abajo)

bierta del filtro del aire. La Figura 3 (abajo) muestra el ruido de escape captado por el micrófono de error, con y sin el sistema CAR. El sistema CAR cancela los armónicos $2N-9N$ hasta en 25 dB. El fundamental, a unos 31 Hz, está fuera del margen de respuesta en frecuencias del altavoz.

Agradecimientos

Estamos agradecidos a J.M. López Almansa, J. García Alba, J.M. Moreno Acero, J. Moreno Díaz, P. Gómez-Acebo Muntañola, J. López Fernández, C. Blanco Sancho, J. Gala Escolar, J. Herranz Zúñiga, y O. Doutres, que pasaron por nuestro grupo y contribuyeron a sus resultados. El soporte financiero de la CICYT, a través de los Proyectos AMB-2387-E, AMB97-1175-C03-01 y AMB99-1095-C02-01, es debidamente reconocido.

Referencias

- Bravo, T. y Cobo, P., 1998 "Optimización de las fuentes de control en un sistema CAR multicanal en el interior de un vehículo por el método del recocido simulado". *Revista de Acústica*, (Tecnacústica 98), 29, 281-284.
- Bravo, T. y Cobo, P., 1999. "Control activo global multicanal del ruido de baja frecuencia en recintos". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 99), vol. 30.
- Bravo, T., Cobo, P., and Martín, J.M., 1999a. "A multi-channel active system for control of the booming inside a van". *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(2, Pt. 2), 4aSab11, 1244, (Abstract del artículo presentado en el ASA/EAA/DEGA Meeting de Berlin).
- Bravo, T., Cobo, P., and Martín, J.M., 1999b. "Active noise control of harmonic sound in a van: a case history". *Proceedings of the European Automotive Congress*, Barcelona.
- Bravo, T., and Cobo, P., 2000. "A demonstration of active noise reduction in a cabin van". Submitted to *ACUSTICA united with acta acustica*.
- Bravo, T. y Cobo, P., 2000. "Localización óptima de los transductores en un sistema de control activo del ruido en el interior de un recinto". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 2000), vol. 31.
- Cobo, P., 1997. *Control Activo del Ruido: Principios y Aplicaciones*. Ed. CSIC, Colección Textos Universitarios, 27.
- Cobo, P., 1997. "Control activo del ruido en el Instituto de Acústica del CSIC". *Revista de Acústica*, 28, 44-46.
- Cobo, P. y Martín, J.M., 1998. "Medidas de ruido y vibraciones en el interior de un vehículo relevantes para el diseño de un sistema CAR multicanal". *Revista de Acústica*, (Tecnacústica 98), 29, 277-280.
- Cobo, P., 2000. "Fundamentos del control activo acústico estructural". Informe N° 1, Proyecto AMB97-1095-C02-01, Instituto de Acústica.
- Cuesta, M., Moreno, J.M., Pons, J., y Cobo, P., 1998 "Control activo del ruido de escape de una fuente encapsulada". *Revista de Acústica*, (Tecnacústica 98), 29, 273-276.
- Cuesta, M., and Cobo, P., 1999a. "A hybrid active/passive system for control of the noise radiated by a small generator". *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(2, Pt. 2), 3aSA9, 1156, (Abstract del artículo presentado en el ASA/EAA/DEGA Meeting de Berlin).
- Cuesta, M. y Cobo, P., 1999b. "Control activo del ruido de escape de una fuente encapsulada utilizando una referencia múltiple". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 99), vol. 30.
- Cuesta, M., and Cobo, P., 2000a. "Active control of the exhaust noise radiated by an enclosed generator". *Applied Acoustics*, 61, 83-94.
- Cuesta, M., and Cobo, P., 2000b. "Optimisation of an active control system to reduce the exhaust noise radiated by a small generator". Accepted for publication in *Applied Acoustics*.
- Cuesta, M. y Cobo, P., 2000c. "Modelización de la vibración de una barra y aplicación al control activo acústico estructural de sus modos radiantes". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 2000), vol. 31.
- Cuesta, M., Bravo, T., Cobo, P., Ranz, C., and Siguero, M., 2000. "Designing practical active noise control systems". Reunión Internacional URSI2000, Zaragoza.
- García, J., y Cobo, P., 1997. "Filtro analógico para la cancelación activa del ruido en protectores auditivos". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 97), 28, 211-213.
- Moreno, J.M., y Cobo, P., 1997. "Control activo del ruido de banda ancha en conductos". *Revista de Acústica*, (Tecnacústica 97), 28, 199-202.
- Siguero, M. y Cobo, P., 1998. "Comparación entre los métodos clásico y MLS para la calibración de altavoces". *Revista de Acústica*, (Tecnacústica 98), 29,375-378.
- Siguero, M y Cobo, P., 1999. "Aplicación de acústica cualitativa en el control activo del ruido". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 99), vol. 30.
- Siguero, M y Cobo, P., 2000. "Sistema de altavoces reflex en el interior de un vehículo aplicado al control activo del ruido". *Revista de Acústica* (Tecnacústica 2000), vol. 31.