

Estrategia de Optimización Simplex para Control Activo de Ruido en Conductos

Carlos Hernández, Alberto González, Antonio Albiol
Departamento de Comunicaciones, UPV, ETSI Telecomunicación
Camino de Vera s/n, Universidad Politécnica de Valencia
46071, Valencia, España

Teléfono: 96 387-7300, Fax: 96 387-7309, email: chernand@dcom.upv.es

PACS 43.50.Ki

Resumen

El presente artículo describe que es el *Control Activo de Ruido en Conductos* dentro del campo del *Control Activo del Ruido*, y propone un algoritmo adaptativo que realiza la cancelación del ruido mediante operaciones de evaluación de potencia. Este algoritmo es comprobado en un sistema real para control activo de ruido en conductos.

Summary

The present article describe what is know as *Active Noise Control in Ducts* into the field of *Active Noise Control*, and proposes an algorithm that realizes the cancellation of the noise through power evaluation operations. This algorithm is checked in a real system for active noise control in ducts.

Intrducción

Los problemas con el ruido acústico cada día se vuelven más y más acuciantes. Influye en esto el gran incremento de equipos industriales: motores, ventiladores, transformadores, compresores, etc. El problema social del ruido es de tal importancia que las distintas administraciones, nacionales e internacionales, han elaborado normativas sobre los niveles máximos del ruido que no deben ser sobrepasados.

En lugar de tratar de eliminar completamente el ruido, cosa que además es imposible en la práctica, se trata de reducirlo a unos niveles aceptables para las personas que lo padecen. El control de ruido se presenta entonces como un compromiso entre unos niveles que no deben ser sobrepasados y

el coste social y económico que supone mantener el mismo a esos niveles.

La manera tradicional de controlar el ruido acústico ha sido mediante el empleo de técnicas pasivas tales como cerramientos, *silenciadores pasivos* y barreras acústicas (COBO 97). En cuanto a los silenciadores pasivos, los mismos pueden emplear dos principios básicos: (1) el cambio de impedancia causado por la combinación de conductos; (2) causar la pérdida de energía por la propagación del ruido a través de un conducto que posee material absorbente en sus paredes (ERIKSSON 90).

Estos silenciadores pasivos permiten niveles relativamente altos de atenuación sobre un intervalo de frecuencias bastante amplio; sin embargo, son relativamente grandes, costosos e ineficientes en frecuencias bajas (WARNAKA 82).

Control activo de ruido

La idea del *Control Activo de Ruido* (CAR) es conceptualmente simple: se desea atenuar una señal acústica indeseada, que denominaremos señal primaria; para ello se genera una segunda señal acústica mediante una fuente que llamaremos secundaria, que añadida a la señal primaria produzca la máxima cancelación posible. Aunque la idea es simple, su implementación práctica no está exenta de dificultades debido a numerosas razones, por lo que continua siendo un tema vigente de investigación.

Un sistema CAR para control activo de ruido en conductos (CAReC) es propio de aplicaciones donde se desea controlar el campo acústico en conductos estrechos y de gran longitud: sistemas de ventilación y aireación, escapes de gases, etc, Fig. 1. El sistema CAR emplea la señal de referencia $x(n)$ para generar una señal de cancelación $y(n)$, *antirruído*, de igual amplitud y que estará desfasada 180° con el ruido a cancelar, permitiendo su cancelación (KUO 96).

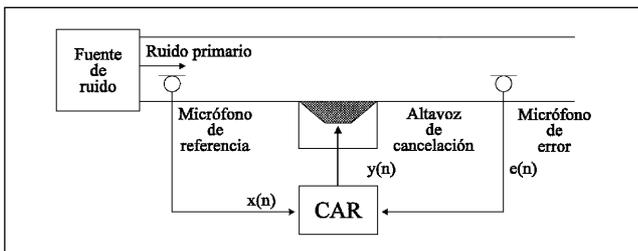


Figura 1: Sistema CAR feedforward para CAReC.

En algunas aplicaciones prácticas el ruido que se produce será periódico. Esto permite que el micrófono de referencia pueda ser sustituido por otro sensor no acústico, como tacómetros, sensores ópticos, etc. La Fig. 2 muestra un sistema de este tipo.

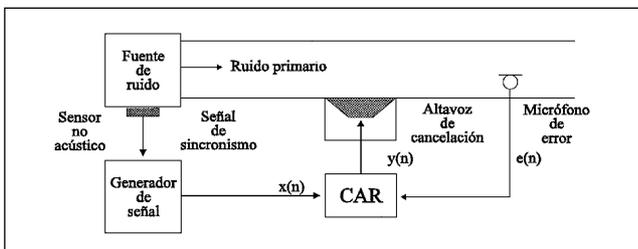


Fig 2: Sistema CAR Feedforward puro para CAReC.

La ventaja inmediata que se obtiene con esta simple sustitución es que al no tomar la señal de referencia directamente del conducto, se evita la realimentación acústica desde el altavoz de cancelación al micrófono de referencia.

Optimización simplex para CAReC

El sistema CAR feedforward puro para CAReC de la Fig. 2 tendrá como principal problema lo que se denomina como *inaccesibilidad* de la señal de error $e(n)$. Esto se debe a que la *adición* de las señales se realiza acústicamente y no de forma eléctrica (NELSON 92) (ELLIOTT 93).

Se hace necesario tener en cuenta el *camino* que debe recorrer la señal de cancelación $y(n)$ que genera el sistema CAR hasta que vuelve a ser captada por el mismo a través del micrófono de error. Este camino se conoce como la *función de transferencia secundaria*. Los algoritmos de CAR que no la tienen en cuenta pueden volverse inestables en su funcionamiento.

El algoritmo *Downhill Simplex Method* (DSM) es un método de adaptación que realizará la estimación de los coeficientes del filtro para minimizar la señal de error $e(n)$, mediante la evaluación sucesiva de la potencia de la misma. Para cada conjunto de coeficientes del filtro digital, se estima la potencia haciendo $\Sigma e^2(n)$ en un bloque de muestras de dicha señal de error $e(n)$.

Estos coeficientes serán modificados en cada iteración del algoritmo intentando minimizar la potencia de la señal $e(n)$. De esta manera, el proceso de minimización se realiza sin nece-

sidad de asumir o conocer otros aspectos de dicha señal de error (NELDER 65).

Para entender como funciona este algoritmo debemos definir primeramente qué es un *simplex*. Denotemos por L la cantidad de coeficientes del filtro a ajustar. Un *simplex* estará definido por $L+1$ vértices.

Cada uno de estos vértices está asociado con una determinada potencia de la señal de error. Esto será equivalente a establecer un conjunto de vectores de coeficientes, $\underline{\mathbf{V}}$ representado cada uno de ellos por los L coeficientes del filtro digital. Denotaremos $f(\underline{\mathbf{V}})$ la evaluación de los vértices para determinar la potencia de la señal $e(n)$ asociada.

El método de minimización consiste en cambiar la *forma* y la *dimensión* del *simplex* mediante el cambio de la posición de los vértices, o sea, los valores de los vectores de coeficientes, probando un conjunto de *tentativas*, las cuales son escogidas a partir de unas reglas de naturaleza geométrica.

Consideremos por su sencillez de representación y sin que se pierda generalidad, el caso en que $L=2$. Para este caso existirán tres vértices en la matriz $\underline{\mathbf{V}}$, siendo el *simplex* un triángulo, Fig. 3. El diámetro de los vértices representa el valor de la evaluación de $f(\underline{\mathbf{V}})$. Mayor diámetro se corresponderá con un valor de evaluación mayor y viceversa.

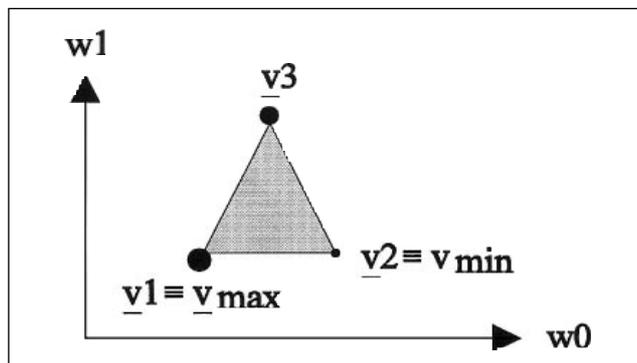


Figura 3: Simplex con tres vértices.

En este caso el vértice $\underline{\mathbf{v}}_1$ será el peor, $\underline{\mathbf{v}}_{\max}$, mientras que el vértice $\underline{\mathbf{v}}_2$ será el mejor, $\underline{\mathbf{v}}_{\min}$. Además, definamos el vértice cuyo valor de evaluación esté más próximo al $\underline{\mathbf{v}}_{\max}$ como el vértice con segundo máximo en $f(\underline{\mathbf{V}})$ o $\underline{\mathbf{v}}_{2\max}$. En este caso resulta $\underline{\mathbf{v}}_3$ pero para un *simplex* con más de tres vértices podría ser otro.

Para hacer que los vértices de $\underline{\mathbf{V}}$ tiendan hacia los valores óptimos que minimizan $f(\underline{\mathbf{V}})$, en cada iteración el algoritmo DSM realiza sobre $\underline{\mathbf{v}}_{\max}$ unas tentativas que le permiten obtener un nuevo vértice $\underline{\mathbf{v}}_n$. En dependencia del resultado de la evaluación de $f(\underline{\mathbf{v}}_n)$, se sustituye el vértice $\underline{\mathbf{v}}_{\max}$ por este nuevo. Estas tentativas son:

- 1. Reflexión:** Expande el poliedro intentando que el nuevo vértice $\underline{\mathbf{v}}_n$ al ser evaluado en $f(\underline{\mathbf{v}}_n)$, posea un valor mejor que el del vértice peor que se modifica, o sea, $\underline{\mathbf{v}}_{\max}$. Si $\underline{\mathbf{v}}_n$ resulta mejor que $\underline{\mathbf{v}}_{\max}$, lo sustituye inmediatamente. Esta tentativa mantiene el volumen del *simplex* evitando la generación del mismo, Fig. 4.

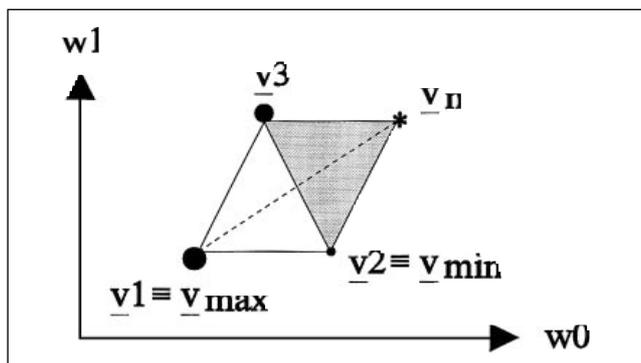


Figura 4: Reflexión a partir del vértice peor.

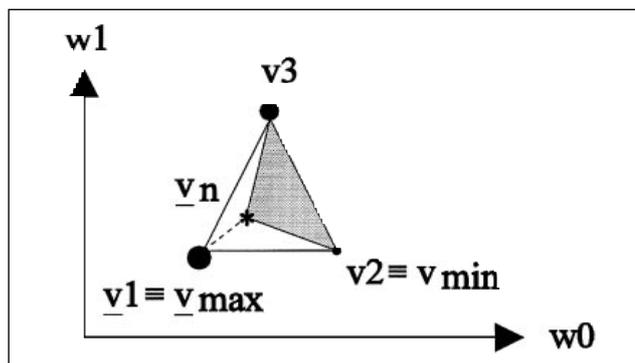


Figura 6: Contracción en una dirección a partir del vértice peor.

2. Doble reflexión: Si la evaluación de \underline{v}_n en $f(\underline{v}_n)$ es mejor que la del vértice mejor \underline{v}_{\min} , entonces podría ser que un mínimo estuviese en esa *dirección*. Se expande nuevamente el poliedro. Si el nuevo vértice que se obtiene \underline{v}_m al evaluarlo en $f(\underline{v}_m)$ resulta mejor que \underline{v}_n , entonces se sustituye también, Fig. 5. Posteriormente se procede a reordenar los vértices según su evaluación en $f(\underline{V})$ y se repite el proceso desde la reflexión sobre el nuevo \underline{v}_{\max} .

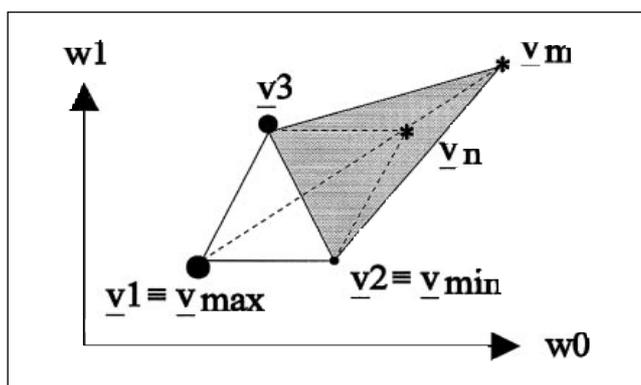


Figura 5: Doble reflexión a partir del vértice peor.

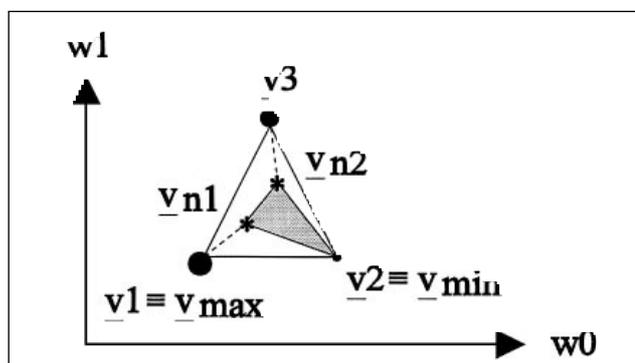


Figura 7: Contracción múltiple en la dirección del vértice mejor.

luación del \underline{v}_n que se obtiene de la reflexión en $f(\underline{v}_n)$ es peor que la de \underline{v}_{\min} y que el vértice $\underline{v}_{2\max}$, que se ha definido como el vértice cuya evaluación en $f(\underline{v}_{2\max})$, es la más próxima a la del vértice \underline{v}_{\max} .

Esto se hace con el propósito de encontrar un vértice intermedio con menor valor de evaluación que \underline{v}_{\max} . En el caso de que \underline{v}_n , fuese mejor que $\underline{v}_{2\max}$ no se realizaría esta tentativa, procediendo a la evaluación de los nuevos vértices en $f(\underline{V})$ y aplicando la reflexión sobre el nuevo \underline{v}_{\max} .

3. Contracción: Se realizará esta tentativa, que denominaremos *contracción C1*, siempre que el \underline{v}_n que resultase de la reflexión de \underline{v}_{\max} fuese peor que el mismo, Fig. 6. Si realizada la contracción el \underline{v}_n obtenido es mejor que \underline{v}_{\max} , entonces se realiza la sustitución de éste, pasando a reordenar nuevamente los vértices obtenidos a partir de su evaluación en $f(\underline{V})$, comenzando nuevamente con la reflexión sobre el vértice peor.

Si en el caso contrario el \underline{v}_n obtenido resulta peor que \underline{v}_{\max} , entonces se realiza la *contracción multidimensional*, denominada *contracción C3*, o sea, la contracción de L vértices del *simplex* hacia \underline{v}_{\min} , Fig. 7. Reordenando nuevamente los vértices según su evaluación en $f(\underline{V})$, se repite el proceso desde la reflexión sobre el nuevo \underline{v}_{\max} . También se realizará la contracción de \underline{v}_{\max} , si la eva-

Experimentos

El algoritmo propuesto ha sido comprobado sobre un prototipo de sistema CAR para CAREC. En la Fig. 8 se detalla la estructura de este sistema.

Como ejemplo práctico realizaremos la cancelación de una señal de 80 Hz de frecuencia fundamental que posee dos armónicas. En la Fig. 9 se muestra la adaptación de los coeficientes del filtro digital para el caso en que $L=4$.

El *simplex* formado por estos cuatro vértices tendrá cinco vértices, cuya evaluación o potencia asociada, deberá converger hacia un mismo valor, debiendo ser éste lo menor posible, Fig. 10.

El nivel de cancelación que se logra sobre la señal de error se muestra en la Fig. 11. Niveles de cancelación entre 30 y 40

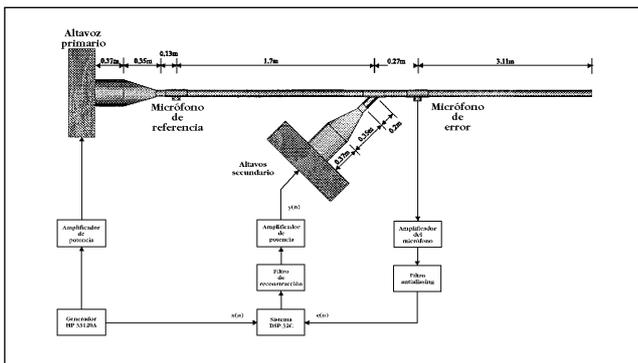


Figura 8: Prototipo de sistema CAR para CAREC.

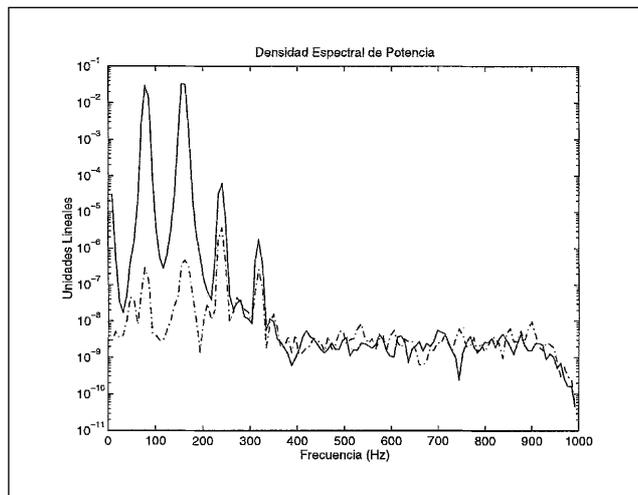


Figura 11: Espectro de la señal medida en el micrófono: (-) antes, (-.-) después de la cancelación.

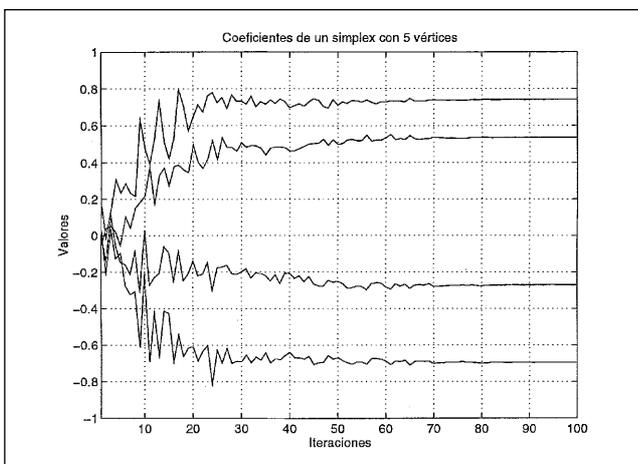


Figura 9: Coeficientes del filtro adaptativo. A partir de la iteración 70 se puede considerar que se logra la convergencia del algoritmo DSM.

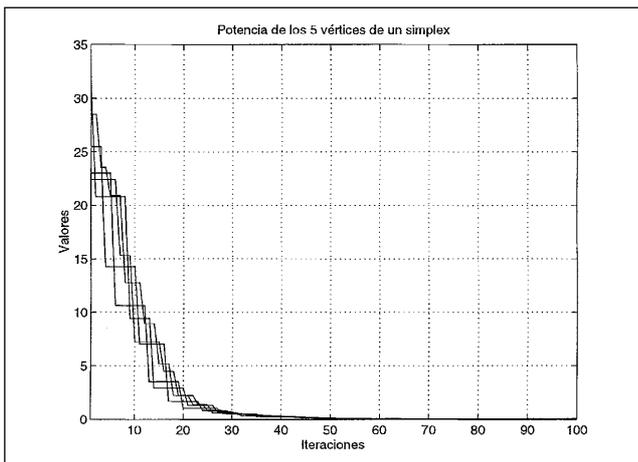


Figura 10: Potencia de los vértices del simplex. En cada iteración del algoritmo DSM ésta debe ir disminuyendo.

dB se consideran aceptables. Debemos señalar la presencia de no linealidades en el sistema acústico. Estas pueden ser originadas por la respuesta de altavoces, amplificadores, micrófonos, etc. Sin embargo, es importante que el funcionamiento del algoritmo sea *insensible* a las mismas.

Conclusiones

El procedimiento que sigue el algoritmo DSM para *mover* los vértices sólo necesita de sucesivas evaluaciones de la potencia de la señal de error $e(n)$, por lo que no necesita asumir o conocer aspectos de la misma.

El algoritmo DSM a pesar de que podría resultar relativamente lento en algunas aplicaciones, se caracteriza por ser muy robusto y estable, siendo su implementación muy sencilla y obteniéndose unos niveles de cancelación aceptables.

La presencia del camino secundario origina un retardo, entre el momento en que se actualizan los coeficientes del filtro digital y el momento en que se estima la potencia de la señal de error, que debe ser tenido en cuenta en la implementación.

Dado que el algoritmo DSM mantiene en todo momento aquel vértice que es mejor que un *simplex*, posibles cambios en la señal a cancelar o en el sistema acústico no podrían ser *seguidos*, debido a que el vértice \underline{v}_{min} se corresponde con una señal de referencia y unas condiciones acústicas que ya no son las actuales.

Para solucionar este problema y hacer que el algoritmo DSM sea adaptativo se debe hacer: (1) no permitir que todos los vértices sean iguales, *moviendo* cierta cantidad el \underline{v}_n que se obtiene por las tentativas de contracción, esto se entiende dado que son éstas las que llevan los vértices del *simplex* hacia un mismo punto; (2) se debe actualizar la potencia de todos los vértices del *simplex* después de un determinado número de iteraciones del algoritmo DSM.

Tanto el valor del *movimiento* del vértice \underline{v}_n como el tiempo de actualización o de *refresco* de la potencia asociada con los vértices del *simplex*, serán establecidos como un compromiso entre la potencia del ruido final que se logre así como la velocidad de readaptación del algoritmo DSM en caso de cambios en las condiciones del sistema CAR para CAREC.

Referencias

(COBO 97) COBO, Pedro: *Control Activo de Ruido: Principios y Aplicaciones*, CSIC, Colección textos universitarios nº 26, 1997.

(ELLIOTT 93) ELLIOTT, S.J.; N. P. A.: *Active Noise Control*, IEEE Signal Processing Magazine October 1993.

(ERIKSSON 90) ERIKSSON, L.J.: *Computer-Aided Silencing: An Emerging Technology*, Sound and Vibration, July 1990.

(KUO 96) KUO, S.M.; MORGAN, D.R.: *Active Noise Control Systems*, John Wiley & Sons Inc., 1996.

(NELDER 65) NELDER, J.A.; M.R.: *A Simplex Method for Function Minimization*, Computer Journal, Vol. 7, pp. 308-313, 1965.

(NELSON 92) NELSON, P.A.; E. S. J.: *Active Control of Sound*, Academic Press, 1992.

(WARNAKA 82) WARNAKA, Glenn E.: *Active Attenuation of Noise: The State of the Art*, Noise Control Engineering, May-June 1982.

(WIDROW 85) WIDROW, Bernard; STEARNS, Samuel D.: *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall Inc., 1985