

COMPARACIÓN DE ALGORITMOS *FEED-FORWARD* ADAPTATIVOS PARA EL CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN UN CONDUCTO

PACS 43.50.Ki

M.A.Cugueró¹; R.S.Sánchez Peña¹; A.Masip¹; B.Morcego¹; J.Quevedo¹; V.Puig¹; T.Pàmies²;
J.Romeu²

¹Sistemas Avanzados de Control, ESAll, Universitat Politècnica de Catalunya

²Laboratori d'Enginyeria Acústica i Mecànica (LEAM)

Universitat Politècnica de Catalunya

Rambla Sant Nebridi 10

Terrassa, Barcelona

E-mail: mcuquero@gmail.com

ABSTRACT

The implementation of several active noise control strategies, based on a feed-forward structure with adaptive controller, in the context of a real mechanical perturbation control application, is taken into account. A controller model identification is implemented, using a variant of the recursive least squares algorithm (RLS). A comparison between RIS and LMS techniques is also performed for the application described.

RESUMEN

En este artículo se trata la implementación de diversas estrategias de control activo de ruido, basadas en una estructura feed-forward con controlador adaptativo, en el marco de una aplicación real de control de perturbaciones mecánicas en un conducto. Con esta finalidad se implementa la identificación del modelo del controlador, utilizando una variante de la técnica de mínimos cuadrados recursivos (RLS) que se compara con el conocido algoritmo LMS en una aplicación real.

I. INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital adaptativo de la señal es un campo nacido de los sistemas modernos de telecomunicaciones. En estos sistemas normalmente existe la necesidad de filtrar una señal para separar su posible componente de ruido que la contamina. Los sistemas convencionales de procesamiento digital de señal utilizados para estas aplicaciones trabajan en lazo abierto, utilizando filtros de características fijas para esta finalidad. Para utilizar este tipo de filtrado normalmente se asume que se conoce cierta información de la señal de entrada y que las perturbaciones, así como la respuesta del sistema, no se modifican con el tiempo. En muchos otros casos, las características de la señal de entrada y la respuesta del sistema no son conocidas, o son variables en el tiempo. En este caso, un filtro de características fijas no ofrecerá un resultado satisfactorio. Para solucionar este problema existen multitud de algoritmos adaptativos, que modifican las características del filtro en tiempo real, mediante la modificación de sus parámetros, para optimizar la respuesta de éste y conseguir así adaptar la respuesta del filtro a cambios del sistema. Una de las aplicaciones donde esta técnica es utilizada es en el control activo de ruido.

I-A. Control Activo vs. Control Pasivo

Las técnicas de control pasivo se basan en el uso de las propiedades absorbentes de algunos materiales con la finalidad de atenuar una onda sonora o campo acústico no deseado en un medio concreto. Para conseguirlo, esta técnica aprovecha este tipo de materiales para absorber la mayor parte de energía de la perturbación o para aumentar la impedancia del medio el cual ésta atraviese. Como se puede observar, el control pasivo de ruido no introduce energía adicional al sistema para conseguir su finalidad, cosa que se traduce en un control estable en todos los casos en los que se utiliza. El rendimiento de esta técnica es especialmente bueno para frecuencias medias y altas dentro del rango audible, siendo bastante pobre en el rango de baja frecuencia, en el que no consigue resultados demasiado satisfactorios.

Las técnicas de control activo de ruido o ANC, de las que existen multitud de variantes y particularidades (ver [1]), se basan en la generación de algún tipo de acción de control con la intención de atenuar la perturbación sonora en un medio concreto. Estas acciones, que dependen del tipo de controlador utilizado, se introducen en el sistema mediante la señal de control, con la finalidad de eliminar el efecto de la perturbación en puntos determinados del mismo. Para ello, se pretende que la señal de control interfiera de manera destructiva con la perturbación en estos puntos, es decir, que la perturbación y la señal de control se encuentren en oposición de fase, buscando así que la magnitud de la señal obtenida en ellos sea lo más pequeña posible (ver figura 1).

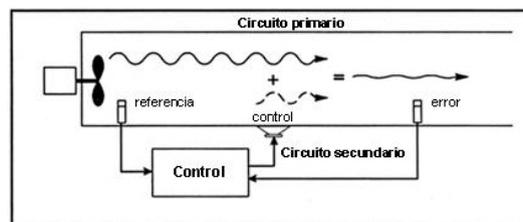


Fig. 1. Visión conceptual de aplicación ANC

Esta técnica se utiliza en el rango de bajas frecuencias, dentro del ancho de banda audible (por debajo de los 500Hz) con lo que resulta un buen complemento al control pasivo. En este caso si se introduce energía adicional al sistema, cosa que puede derivar a situaciones de control inestables; éste es uno de los principales puntos débiles de este tipo de control.

II. APLICACIÓN DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

La aplicación se ilustra en la figura 2. Se trata de un conducto de sección cuadrada de 0.3 metros de lado y 4 de longitud, con extremo abierto. Este elemento está conectado a una sala semi-anecoica por este extremo (figura 3) y a una fuente de ruido por el otro. La fuente de ruido puede ser un altavoz, en el caso de trabajar con ruidos sintéticos, o una fuente de ruido real (i.e. un ventilador). El conducto contiene un micrófono de referencia en su interior, cerca de la fuente de ruido, y un micrófono de error cerca del altavoz de control o actuador secundario (ver [4]). Los micrófonos son BEHRINGER ECM8000 omnidireccionales de respuesta en frecuencia lineal entre 15Hz i 20KHz y -60dB de sensibilidad. Los altavoces son BEYMA 5 MP60/N de 5", 50W y respuesta en frecuencia entre 50Hz y 12KHz.



Fig. 2. Maqueta del conducto



Fig. 3. Extremo del conducto, sala semi-anechoica

El circuito acústico primario va desde el micrófono de referencia hasta el micrófono de error; el circuito acústico secundario va desde el altavoz de control hasta el micrófono de error (figura 1). Estos dos circuitos son identificados por el sistema de control, con lo que se pueden utilizar lazos de control *feed-forward* y/o *feed-back*, respectivamente. El controlador es implementado en un DSP dSPACE DS1003.05 basado en un procesador Texas Instruments TMS320C0 de coma flotante, en el caso del algoritmo RLS, y en un DSP Causal Systems basado en un procesador Analog Devices ADSP2101, en el caso del algoritmo LMS. También ha sido utilizado un módulo de filtrado digital para adecuar las señales obtenidas en los micrófonos, concretamente el DSP 1124P de la casa BEHRINGER.

III. FILTROS ADAPTATIVOS

El elemento principal de procesado, en esta aplicación, es un filtro digital adaptativo. Seguidamente se exponen más detalladamente los tipos y funciones más habituales de filtros digitales y los algoritmos de optimización más utilizados.

III-A. Filtros FIR

Los filtros FIR, de respuesta impulsional finita, deben su nombre al hecho de que su salida depende únicamente de la entrada, de forma que el efecto de un impulso en la entrada se extingue en tiempo finito.

La respuesta de un filtro FIR de L coeficientes w_l , para una entrada $x(k)$ es la descrita en (1):

$$y(k) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l x(k-l) \quad (1)$$

Un filtro FIR siempre es estable, pues no añade polos al sistema. Por otro lado, no puede realizar funciones de transferencia racionales con un número finito de parámetros.

III-B. Filtros IIR

Los filtros IIR, de respuesta impulsional infinita, deben su nombre al hecho de que su salida puede depender tanto de la entrada como de la propia salida del filtro, de forma que el efecto de un impulso en la entrada puede no extinguirse en tiempo finito.

La respuesta de un filtro IIR de N y M coeficientes, a_n y b_m , para una entrada $x(k)$ es la descrita en (2).

$$y(k) = \sum_{n=0}^N a_n x(k-n) + \sum_{m=1}^M b_m y(k-m) \quad (2)$$

Los filtros IIR son sistemas genéricos de procesamiento de señales. Su principal ventaja es que pueden realizar cualquier transformación lineal y discreta con un número finito de parámetros, resultando más eficientes que los filtros FIR. Por otro lado, tienen inconvenientes importantes, como la falta de garantía en su estabilidad o los problemas derivados de la cuantización y redondeo de sus coeficientes, mucho mayores que en el caso de los filtros FIR.

III.C. Algoritmos Adaptativos

Los algoritmos adaptativos son algoritmos de optimización cuya finalidad es obtener los parámetros (de un filtro, en este caso) que minimicen algún criterio preestablecido. En esta aplicación el criterio a minimizar gira entorno a la señal capturado en el punto de cancelación.

Las ecuaciones (1) y (2) se pueden agrupar en la siguiente ecuación (3).

$$y(k) = r^T \cdot p \quad (3)$$

donde el vector p corresponde a los parámetros del filtro (w_l , a_n y b_m en las expresiones anteriores) y el vector r a los regresores, que son valores conocidos e independientes del vector de parámetros.

Por otro lado, definimos el error de cancelación tal y como se observa en (4).

$$e(k, p) = d(k) - y(k) \quad (4)$$

La señal $d(k)$ es la que se desea cancelar, es decir, es el ruido que se propaga por el conducto hasta el punto de cancelación. Esta señal no está físicamente disponible (ver figura 1) pero si que disponemos de la lectura del error. En la ecuación (4) se hace evidente que el error depende tanto de la señal de ruido como de los parámetros empleados en la cancelación.

Con todo ello, el tipo de algoritmos de optimización que se utiliza en esta aplicación calcula los parámetros de forma recursiva. Es decir, en cada paso de cálculo se actualizarán los parámetros según la expresión (5).

$$p(k+1) = p(k) + g(k) \cdot e(k, p) \quad (5)$$

donde $g(k)$ es un vector que se obtiene a partir del criterio concreto a minimizar.

En este artículo se utilizan tres criterios de minimización que se explican seguidamente.

III-C.1. Criterio LMS

El criterio LMS (*Least Mean Squares*) es un método de cálculo de $g(k)$ ampliamente utilizado, especialmente en aplicaciones de procesamiento de señales en las que se requiera una velocidad de cálculo elevada.

En este algoritmo se parte de la función de coste cuadrática del error pero se utiliza una solución aproximada en la que se evalúan los gradientes instantáneos de esta función.

Como resultado, el cálculo de $g(k)$ se realiza según la ecuación (6).

$$g(k) = m \cdot r(k) \quad (6)$$

donde m es una constante que determina la velocidad de convergencia, pero que necesita ser ajustada empíricamente en cada caso.

A pesar de su gran popularidad no prestaremos más atención al criterio LMS porque la experimentación nos ha permitido comprobar que este algoritmo cancela peor y con mayor número de parámetros que los que se explican en los siguientes apartados.

III-C.2. Criterio RLS

El criterio RLS es la versión exacta del anterior algoritmo. Se utiliza el mismo criterio de optimización pero se calcula la solución exacta en cada iteración.

Como resultado se obtiene una expresión más compleja, tal y como se muestra en (7).

$$y(k) = \frac{P(k-1) \cdot r(k)}{1 + r^T P(k-1) r(k)} \quad (7)$$

en la que la matriz P (más concretamente su diagonal) caracteriza la incertidumbre de los parámetros estimados y también se calcula de forma recursiva según la ecuación (8).

$$P(k) = P(k-1) - \mathbf{g}(k) \mathbf{r}^T(k) P(k-1) \quad (8)$$

Como se observa en las ecuaciones (7) i (8) el algoritmo RLS tiene un producto de matrices y su coste computacional es cuadrático con respecto al número de parámetros a optimizar.

III-C.3. Criterio RLS simplificado

El algoritmo RLS no se utiliza, generalmente, en aplicaciones de procesamiento de señales porque exige velocidades de cálculo demasiado altas a los procesadores. Sin embargo, existen versiones simplificadas del algoritmo que, aunque convergen en un número mayor de iteraciones, son mucho menos costosas computacionalmente.

Así, en este caso utilizaremos una simplificación atribuida a Richalet (ver [3], [5]). El cálculo de $\mathbf{g}(k)$ se realiza tal y como se describe en (9).

$$\mathbf{g}(k) = c \cdot \frac{\mathbf{r}(k-1)}{\mathbf{a} + \mathbf{r}^T(k-1) \mathbf{r}(k-1)} \quad (9)$$

donde \mathbf{a} es una constante positiva y c debe cumplir que $0 < c < 2$ para asegurar la convergencia del algoritmo. \mathbf{a} no tiene más finalidad que la de evitar indeterminaciones cuando el vector de regresores se anula y c permite sintonizar la velocidad de convergencia.

IV. RESULTADOS

IV.A. Cancelación de Ruido en un Conducto Procedente de un Ventilador

Los rendimientos de los algoritmos adaptativos introducidos en III.C serán presentados en este apartado, con la finalidad de cancelar el ruido producido por un ventilador, colocado en uno de los extremos del conducto. Este elemento genera una señal que es captada por los micrófonos de referencia y error. Con la finalidad de actuar sobre los tonos principales del ventilador con la máxima eficacia, se han filtrado las señales utilizando un módulo de filtrado digital.

Así, en el caso de utilizar el algoritmo RLS simplificado, modelando un filtro de estructura FIR de 250 ceros, la señal de error que se obtiene sin y con control activo, respectivamente, se observa en la figura 4. Se puede comprobar como, para los dos armónicos más importantes, se obtienen atenuaciones elevadas (17 y 21dB para 100 y 110Hz, respectivamente), siendo el armónico de 88Hz el menos atenuado (1dB).

Para la misma estructura del modelo (FIR de 250 ceros) utilizando el algoritmo LMS, la señal de error que se obtiene sin y con control activo, respectivamente, se observa en la figura 5. En este caso se puede observar como las atenuaciones obtenidas no son tan importantes, llegando hasta a amplificar el armónico de 88Hz en 5dB. Los armónicos de 100 y 110Hz se atenúan 8 y 14dB, respectivamente.

Utilizando de nuevo el algoritmo RLS simplificado, ahora con una estructura IIR de 125 polos y 125 ceros, la señal de error que se obtiene sin y con control activo, respectivamente, se observa en la figura 6. En este caso se observa como se consigue una atenuación mayor para el armónico de 100Hz (24dB) y menor para el de 110Hz (12dB). El armónico de 88Hz se mantiene casi igual.

Utilizando ahora una estructura IIR de 150 ceros y 150 polos, calculados con el algoritmo LMS, la señal de error que se obtiene sin y con control activo en este caso se observa en la figura 7.

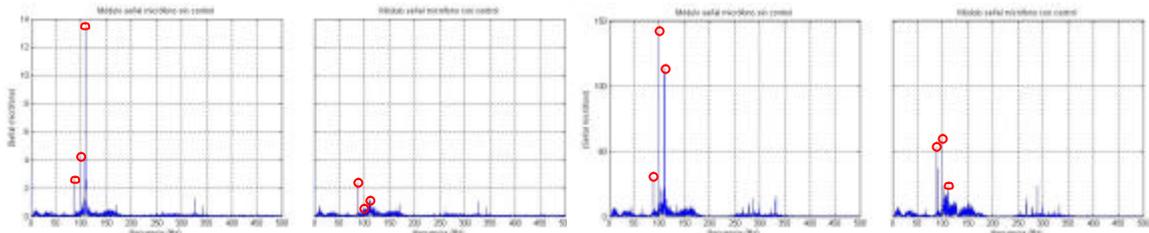


Fig. 4. Señal de error con RLS-FIR, sin y con control

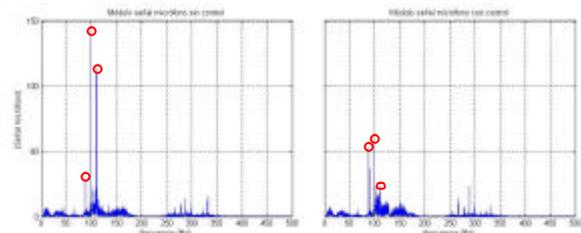


Fig. 5. Señal de error con LMS-FIR, sin y con control

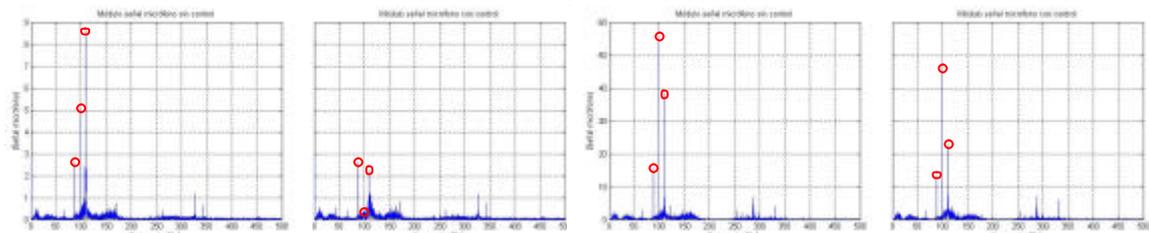


Fig. 6. Señal de error con RLS-IIR, sin y con control

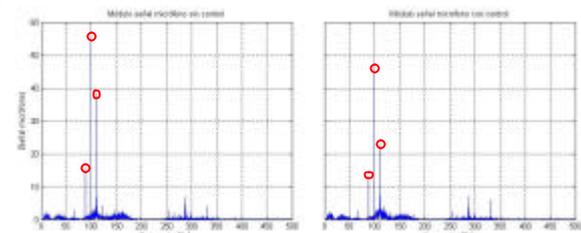


Fig. 7. Señal de error con LMS-IIR, sin y con control

Con esta última casuística se consigue atenuar el armónico de 88Hz en 1.5dB, aunque las atenuaciones conseguidas para los armónicos de 100 y 110Hz son bastante reducidas.

IV.B. Resumen de los Resultados

Los resultados conseguidos para los armónicos de interés se muestran en la tabla I, utilizando el algoritmo RLS simplificado y LMS, respectivamente.

TABLA I. Atenuaciones obtenidas

frecuencia	RLS Simplificado		LMS	
	FIR	IIR	FIR	IIR
88Hz	-1dB	0dB	5dB	-1.5dB
100Hz	-17dB	-24dB	-8dB	-2dB
110Hz	-21dB	-12dB	-14dB	-4.5dB

V. CONCLUSIONES

Como se puede observar en IV-B (Tabla I) el algoritmo RLS simplificado consigue atenuaciones más importantes de los armónicos en los que se obtienen atenuaciones no despreciables (100 y 110Hz). Por otra parte, ningún algoritmo produce resultados satisfactorios con el armónico de 88Hz, llegando hasta a ser amplificado cuando se trabaja con LMS. Así, se puede observar como el algoritmo RLS simplificado consigue mejor rendimiento que el LMS, para modelos de estructura pareja, utilizando como fuente de ruido el ventilador presentado.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer el soporte prestado por la Comissió de Recerca de la Generalitat de Catalunya (ref. 2001SGR00236) y por la CICYT española (ref. DPI2002-02147).

REFERENCIAS

- [1] Kuo, S.M., Morgan, D.R. *Active Noise Control Systems*. John Wiley & Sons, 1996.
- [2] Morcego, B., Cugueró, M.A. Comparación de Implementación en C y Matlab de Filtros Adaptativos para DSP. En *XXII Jornadas de Automática (UAB)*, Barcelona, Catalunya, 2001.
- [3] Richalet, J. *Practique de l'Identification*. Hermès, 1991.
- [4] Romeu, J. *Atenuación de Ruido Industrial de Baja Frecuencia Mediante la Técnica de Control Activo de Ruido*. UPC, 1999.
- [5] Walter, E., Pronzato, L. *Identificatin of Parametric Models*. Masson, 1997.