

AURICULARES CON CONTROL ACTIVO DE RUIDO

LEOPOLDO BUDDE¹, MABEL R. ZANNIER² y GUILLERMO ALONSO³

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (FCEfyN). Av. Vélez Sarsfield 1611. CP X5016. Córdoba, Argentina

²Estudiante de Ingeniería en Sistemas, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (FRC. UTN), Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.

³Ingeniero Electrónico, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (FRC. UTN).

Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.
guillermo.alonso@ta.telecom.com.ar, polibudde@hotmail.com,
mzannier@yahoo.com.ar

Resumen – Los auriculares con control activo de ruido suplementan ó complementan la pérdida por inserción obtenida con control pasivo, basándose en la emisión de un campo acústico secundario de fase opuesta aplicado sobre la membrana timpánica. El ruido es atenuado a partir de la interferencia destructiva de ambas señales en la zona deseada, logrando alta eficiencia para bajas frecuencias. El objetivo de este trabajo es analizar los principios básicos de funcionamiento de los auriculares con control activo de ruido, considerando los distintos algoritmos que aplican el control inverso adaptativo.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes métodos para el control de ruido en auriculares. El control pasivo de ruido, (PNC: Passive Noise Control) es útil para atenuar frecuencias medias y altas, mientras que el control activo de ruido, (ANC: Active Noise Control) presenta alta eficiencia en bajas frecuencias.

El ANC apunta a eliminar el ruido remanente de baja frecuencia en la cavidad auricular, generando un campo acústico secundario en contrafase. Este produce interferencia destructiva de ondas en la zona deseada reduciendo notablemente el nivel de ruido en baja frecuencia [1].

El objetivo de este trabajo es introducir los distintos tipos de ANC, para luego profundizar la teoría del control inverso adaptativo. Una vez presentados los algoritmos utilizados, se analizan aspectos relevantes para la selección de transductores a utilizar. Finalmente se hace una revisión de los principales modelos de auriculares con control activo de ruido disponibles actualmente en el mercado.

2. CONTROL DE RUIDO

La Acoustical Society of América (ASA) define al ruido como cualquier sonido indeseado [2]. El principal objetivo de los sistemas de control de ruido acústico es combatir la contaminación sonora. Los mismos se clasifican en sistemas de control pasivos y activos [3].

2.1 Control pasivo de ruido

El PNC utiliza materiales absorbentes y materiales aislantes para su funcionamiento, sin la introducción de energía acústica adicional [3].

La construcción optimizada de un auricular implica una cavidad ideal de paredes rígidas, con almohadillas ó colchones (de una compliancia considerable) para que el mismo asiente sobre la cabeza del usuario [1].

En el rango de las altas frecuencias es posible lograr una reducción del ruido del orden de 30 dB [1]. Si bien el PNC es efectivo para la protección de ruidos acústicos de alta y media frecuencia, no lo es para los de baja frecuencia (menor a 500 Hz) debido a las grandes longitudes ondas involucradas [3].

2.2 Control activo de ruido

El ANC se basa en reducir la amplitud del nivel de presión sonora del ruido incidente en el oído del oyente, introduciendo un campo acústico secundario [1]. El ruido secundario es de igual amplitud y fase opuesta al primario, y al combinarse ambos se genera interferencia destructiva resultando la cancelación de ambas señales [3]. Si bien no es posible lograr cancelación total, se logran grandes atenuaciones.

Estos sistemas deben ser adaptativos para poder adecuarse a los cambios en las características del ruido y a los cambios en el medio [3].

La cancelación activa es poco efectiva en altas frecuencias debido a las limitaciones de los filtros y de los transductores en auriculares para reproducir adecuadamente el ruido secundario de alta frecuencia [1].

3. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

El ANC puede ser prealimentado o realimentado. En el prealimentado una entrada de referencia coherente con el ruido es censada previa a su propagación más allá de la fuente secundaria. En la realimentación se busca cancelar el ruido sin el beneficio de dicha entrada de referencia [1].

3.1 Sistema de ANC prealimentado

Este sistema utiliza dos micrófonos como sensores y un parlante. Un micrófono se coloca en el exterior del auricular para entregar al controlador una referencia del ruido a cancelar. El otro micrófono se coloca en el interior del auricular para proveer una señal de error [3]. El filtro adaptativo busca predecir el ruido dentro del auricular aplicando a la señal una función de transferencia que modela el sistema completo [1]. El parlante en el auricular recibe la señal de control anti ruido emitida por el controlador, la cual debe generar una zona de quietud donde se encuentra el sensor de error. En los sistemas de banda ancha la señal de error solamente es utilizada por el algoritmo de adaptación [3].

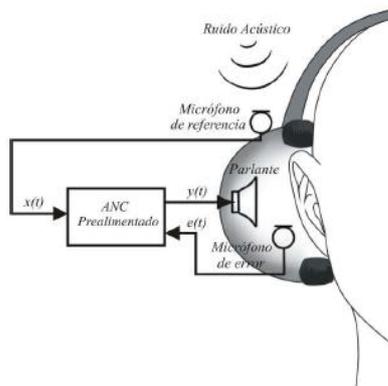


Figura 1: Sistema de ANC prealimentado de banda ancha [3].

En la Figura 1 se muestra el esquema de dicho sistema. Los sistemas de banda angosta apuntan a eliminar ruidos periódicos a quasiperiódicos emitidos por máquinas rotativas o repetitivas. Debido a que su información espectral está relacionada con la velocidad de rotación, la señal de referencia puede obtenerse con un sensor no acústico [3].

3.2 Sistemas de control realimentados

Los sistemas realimentados utilizan un único micrófono de error y una fuente secundaria. El procesador toma dicha señal de error y genera una señal de cancelación, al igual que en el caso anterior [1]. Los sistemas adaptativos utilizan la señal de error para estimar una señal de referencia, además de utilizarlas en el proceso de adaptación. Debido al retardo inherente del sistema el controlador debe actuar en parte como predictor, siendo posible cancelar ruidos de banda angosta solamente [3].

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de un sistema realimentado



Figura 2: Sistema de ANC realimentado [3].

4. CONTROL INVERSO ADAPTATIVO

El control inverso adaptativo (AIC: Adaptive Inverse Control) busca controlar a un sistema, denominado planta, con un filtro cuya función de transferencia es la inversa de la de dicha planta. El objetivo de este sistema es que la salida de la planta siga al comando de entrada. Debido a que la planta suele ser desconocida o no estacionaria, es necesario ajustar el filtro para crear la planta inversa [4]. Adaptabilidad implica que los parámetros del filtro, tales como ancho de banda y frecuencia de resonancia, cambian con el tiempo en función de una señal de error [1]. En la Figura 3 se muestra un esquema simplificado del control inverso adaptativo,

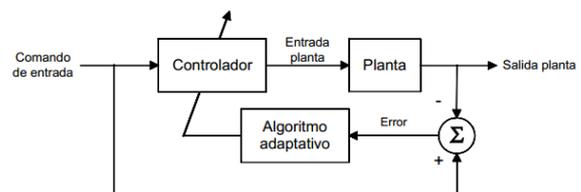


Figura 3: Diagrama en bloques básico de control inverso adaptativo [5].

Un sistema de AIC se dice que es con *modelo de referencia*, cuando el mecanismo de control busca que la respuesta del sistema completo sea igual a la de un *modelo de referencia determinado* [3].

El filtro adaptativo más usado en control activo de ruido es el filtro discreto lineal con respuesta al impulso finita (FIR: Finite Impulse Response), que emplea el algoritmo de mínimos cuadrados (LMS: Least Minimum Square) [4].

4.1 Algoritmo de mínimos cuadrados

El algoritmo de mínimos cuadrados es el algoritmo más simple y universal utilizado en el control adaptativo [1]. El criterio utilizado en la adaptación es minimizar el valor cuadrático medio de la diferencia entre la señal deseada y la señal a la salida del filtro. En el caso de un filtro FIR, se busca minimizar una función de desempeño ϵ la cual describe una superficie en tres dimensiones similar a la de un

paraboloide. Para llegar a dicho mínimo el algoritmo LMS utiliza la dirección opuesta a la que apunta el gradiente de ε , el cual es estimado diferenciando el cuadrado del valor instantáneo del error [3]. Las ventajas de este algoritmo son su simplicidad y a su reducido tiempo de cómputo [1].

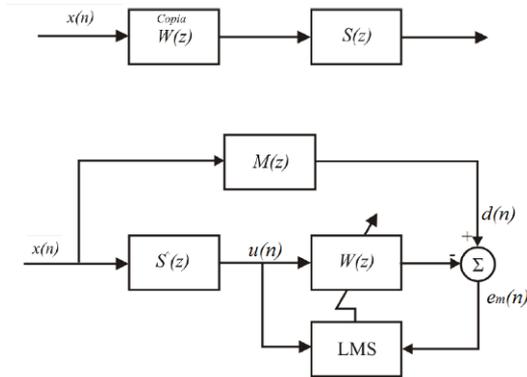


Figura 4: Control inverso adaptativo utilizando el algoritmo LMS [3].

En la Figura 4 se muestra un sistema con el algoritmo LMS, en donde $M(z)$ es el modelo de referencia, $W(z)$ es el controlador, y $S(z)$ es el modelo de planta. A partir de $S(z)$ se obtienen los coeficientes de $W(z)$, del cual se realiza una copia para controlar la planta $S(z)$ [3].

4.2 Algoritmo LMS con Filtro X

Para poder utilizar el algoritmo LMS en el control activo de ruido es necesario realizar una extensión del mismo, ya que la salida del controlador fue restada directamente de la señal de excitación. En las aplicaciones prácticas existe una función de transferencia entre el controlador digital y el mundo físico, conteniendo el conversor digital analógico, la amplificación, la atenuación y las respuestas de los transductores. Este camino secundario introduce modificaciones en el módulo y fase que deben ser compensados por el filtro adaptativo para asegurar la convergencia [4]. El algoritmo LMS con Filtro X (FXLMS) filtra la entrada antes de que sea utilizada por el LMS para actualizar los coeficientes del controlador [3].

En la Figura 5 se observa que la actualización de los coeficientes se realiza empleando el error del sistema $e(n)$. Aunque el modelo de planta $S(z)$ tenga errores, el algoritmo FXLMS minimizará el error del sistema optimizando el filtro de control $W(z)$ [4].

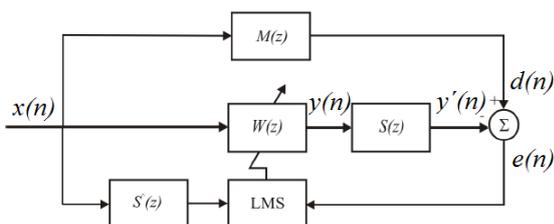


Figura 5: Control inverso adaptativo utilizando el algoritmo FXLMS [3].

5. FACTORES PRINCIPALES DEL ANC

Existen una serie de factores que determinan el desempeño de un sistema de ANC, los cuales serán presentados en orden de importancia. Cada uno de estos factores limita el desempeño máximo alcanzable por el siguiente factor en la lista.

En primer lugar se trata la ubicación de las fuentes secundarias de control, en donde se debe asegurar que las mismas puedan generar la potencia acústica necesaria para la cancelación en el entorno deseado. Esta ubicación debe ser la más cercana al tímpano del oído, y presentar la respuesta en frecuencia de la magnitud del camino secundario más plana posible [5].

En segundo lugar se presenta la ubicación de los sensores de error, los cuales deben ser capaces de censar correctamente los ruidos primarios y secundarios.

En tercer lugar se ubica la calidad de la señal del sensor de referencia, la cual tiene que ver con su correlación con las componentes de ruido presentes en la señal de error.

Finalmente, una vez optimizados los factores anteriores, el máximo desempeño del sistema queda determinado por características del controlador electrónico. Las mismas incluyen aspectos como la exactitud en los cálculos, rango dinámico y tipo de algoritmo utilizado [3].

6. SELECCIÓN DE LOS TRANSDUCTORES

El desempeño de un transductor es función de tres factores principales en lo que concierne al ANC. Estos factores son la dinámica lineal, la dinámica no lineal y el ruido propio.

6.1 Dinámica lineal

La dinámica lineal de un transductor puede ser descompuesta en sensibilidad y respuesta en frecuencia.

En los micrófonos la dinámica lineal tiene menor importancia que en los altavoces, ya que suelen trabajar a frecuencias mucho menores a su primer resonancia mecánica. Su selección suele hacerse en función de su sensibilidad a la presión nominal (V/Pa) en la frecuencia conveniente. Muchos micrófonos utilizados actualmente en sistemas de telefonía móvil son inadecuados para el control de ruido activo, debido a la gran atenuación que presentan en las bajas frecuencias.

En los altavoces la dinámica lineal suele ser mucho más complicada que en los micrófonos, trabajando a través y por encima de su primer resonancia mecánica. Su selección se basa en los límites aceptables de la respuesta en frecuencia, lo cual varía en función de la aplicación [6].

6.2 Dinámica no lineal

Tanto los micrófonos como los altavoces presentan no linealidades en su comportamiento mecánico y electromecánico.

Al igual que en la dinámica lineal, las no linealidades son menores en el caso de los micrófonos. Estos poseen una distorsión característica que aumenta con la presión sonora aplicada. Por lo tanto, una vez identificada la máxima presión que el micrófono soportará, se selecciona el mismo en función de los niveles de distorsión aceptables.

Los distintos componentes del altavoz presentan no linealidades que limitan los rangos de operación del mismo. Muchos sistemas de auriculares incluyen estructuras especiales que limitan el desplazamiento del diafragma durante los grandes cambios de presión [6].

6.3 Ruido propio

Los altavoces no presentan ruido propio, sin embargo los dispositivos que los excitan no están libres de dicho comportamiento. Por el otro lado, los micrófonos representan fuentes de ruido en los sistemas de control activos.

En la mayoría de los casos el ruido térmico-acústico en un micrófono puede ser ignorado. Sin embargo los micrófonos suelen incluir un componente activo que funciona como convertidor de impedancia, el cual convierte al mismo en una fuente de ruido. La selección del micrófono se basa en la consideración del ruido propio, la cual impone los límites inferiores del rango dinámico del sistema completo [6].

7. APLICACIONES PRÁCTICAS

Los auriculares con ANC son de particular utilidad para trabajadores que operan cerca de motores y maquinarias pesadas. El ruido es eliminado de forma selectiva posibilitando la recepción de sonidos deseados, tales como señales de advertencia. El ruido en la cabina de pequeños aviones es generado por una variedad de fuentes, tales como el viento, el motor y el propulsor. En estos casos es esencial eliminar dicho ruido para posibilitar la comunicación.

Otro ámbito de aplicación de estos sistemas de ANC son hospitales donde se efectúan diferentes tipos de audiometrías. Para detectar los defectos en el órgano de la audición es necesario realizar una serie de pruebas en recintos acondicionados especialmente para tal fin, con muy bajo ruido de fondo. Este acondicionamiento implica generalmente un costo elevado.

En aplicaciones militares los soldados suelen trabajar en ambientes ruidosos, siendo necesario algún mecanismo portátil y liviano como estos auriculares para eliminar el ruido ambiente.

Los auriculares con ANC también tienen aplicaciones comerciales en los sistemas de música personalizada, presentando mejores condiciones de escucha [1].

8. MODELOS COMERCIALES

En la Tabla 1 se presenta una revisión de los principales modelos comerciales de auriculares con cancelación activa de ruido. En la misma se especifica respuesta en frecuencia, reducción sonora máxima y sensibilidad de los mismos. En la Tabla 2 se especifica peso, duración de la batería, diámetro del altavoz e impedancia de los mismos.

Modelo	Respuesta en Frecuencia	Reducción Sonora [dB]	Sensibilidad dB_{SPL} 1kHz I_{ref}
Sennheiser PXC 450	8Hz – 28kHz	Hasta 32	108
Studio Beats	20Hz – 20kHz	Hasta 32	115
JVC HA-NC 250	8Hz – 24kHz	Hasta 18	102
Sony MDR ND 500 D	5Hz – 24kHz	Hasta 20	102
Sennheiser PXC 310	15Hz – 22kHz	Hasta 23	107
Logitech UE 6000	20Hz – 20kHz	Hasta 10	99
Audio Technica ANC7b	10Hz – 25kHz	Hasta 20	109
Bose QuietComfort 15	No especifica	No especifica	No especifica
Sony MDR NC 60	14Hz – 22kHz	Hasta 12	102

Tabla 1: Especificaciones de los principales modelos comerciales de auriculares con control activo de ruido.

Modelo	Peso [g]	Duración batería [hs]	Diámetro altavoz [mm]	Impedancia (ANC on, 1kHz) [Ω]
Sennheiser PXC 450	240	21	No especifica	No especifica
Studio Beats	260	No especifica	No especifica	No especifica
JVC HA-NC 250	150	50	No especifica	No especifica
Sony MDR ND 500 D	195	28	40	40
Sennheiser PXC 310	105	20	No especifica	No especifica
Logitech UE 6000	275	40	40	1000
Audio Technica ANC7b	210	40	40	No especifica
Bose QuietComfort 15	207	35	No especifica	No especifica
Sony MDR NC 60	230	30	40	40

Tabla 2: Especificaciones de los principales modelos comerciales de auriculares con control activo de ruido.

9. CONCLUSIÓN

Como conclusión puede afirmarse que el ANC brinda una alternativa muy eficiente en baja frecuencia, ya sean ruidos de banda ancha o angosta.

Los algoritmos utilizados en el control inverso adaptativo se basan en el método de los mínimos

cuadrados, y permiten que el sistema se adapte a los cambios en la fuente sonora y en el entorno acústico.

Si bien el algoritmo LMS presenta una gran estabilidad, el mismo no tiene en cuenta la función de transferencia entre el controlador digital y el mundo físico. Para solucionar esto el algoritmo FXLMS realiza un modelado del camino secundario, de forma tal que sea posible aplicarlo a un control activo de ruido.

En la práctica se han logrado niveles de atenuación de hasta 32dB. Para lograr una atenuación efectiva en todo el ancho de banda audible es necesaria una adecuada combinación de control activo y pasivo.

Estos auriculares presentan un amplio campo de aplicación, desde protectores auditivos para pilotos de aviones hasta en sistemas de reproducción musical personalizados, siendo posible adquirirlos en el mercado hoy en día.

8. REFERENCIAS

- [1] Narahari R, “*Noise Cancellation in Headphones*”, M. Tech. credit seminar report, Electronic Systems Group. Bombay Noviembre, 2003
- [2] Acoustical Society of America, “*American National Standard Acoustical Terminology*”. New York, United States of America. 1994.
- [3] González Vergara F A, “*Controlador activo adaptativo de ruido acústico periódico para un protector de audición y/o auricular*”. Proyecto Integrador. LabDSP, FCEFyN UNC, Córdoba Argentina. Junio 2012
- [4] Hernández Fernández J. J, “*Control Inverso adaptativo*”. Proyecto Fin de Carrera
- [5] Veeravasantadao E, Premkumar P, “Adaptive Active Noise Control Schemes for Headset Applications”. 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, 2008.
- [6] Darlington P, Guiu P, “*Transducers for active noise control: practical considerations for product integration and manufacturability*”. 10 Congreso Frances de Acústica, Lyon. 2010
- [7] Dirección de internet “<http://noise-cancelling-headphones-review.toptenreviews.com/>”. Argentina, 13 de Junio 2012.

DATOS BIOGRAFICOS

Leopoldo Budde, nacido en Córdoba el 22/05/1989. Estudiante de ingeniería electrónica, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba. República Argentina. Sus intereses son: control activo de ruido, realidad acústica virtual y electroacústica. E-mail: polibudde@gmail.com

Mabel R. Zannier, nacida en Córdoba el 07/06/1974. Estudiante de Ingeniería en sistemas de información, Universidad Tecnológica Nacional,

Facultad Regional Córdoba. República Argentina. Sus intereses son: grabación y producción digital de audio, masterización y electroacústica. E-mail: mzannier@yahoo.com.ar

Guillermo Alonso, nacido en Resistencia, Chaco el 09/05/1981. Ingeniero en Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. República Argentina. Sus intereses son: mediciones acústicas, acústica arquitectónica y electroacústica. E-mail: guillermo.alonso@ta.telecom.com.ar