

Evaluación subjetiva de la cancelación activa de ruido en auriculares



Autor: Maximiliano Malvicino (DNI 38267749)

TUTOR/A: Daniel Ottobre

COTUTOR/A: Mariano Girola

Evaluación subjetiva de la cancelación activa de ruido en auriculares

Malvicino, Maximiliano Raúl

1. Fundamentación e introducción

Los dispositivos portátiles, como smartphones y tablets, son ampliamente utilizados por todos los grupos de edad. Los jóvenes los usan, así como las personas mayores. Sirven para muchas aplicaciones diferentes, como escuchar música o hacer llamadas y conferencias. La contaminación acústica en la vía pública, vehículos de transporte, sitios de construcción, o instalaciones industriales afecta la calidad de la experiencia de escucha de los usuarios.

Existen dos formas de reducir el ruido. La reducción pasiva usa materiales porosos para disminuir el ruido por absorción. Pero su implementación en auriculares es voluminosa, costosa e ineficaz en bajas frecuencias. La reducción activa usa el principio de superposición para cancelar las ondas sonoras del ruido.

Los sistemas pasivos no son eficientes en bajas frecuencias ya que, debido a su naturaleza constructiva, no es posible fabricar material absorbente para sonidos cuyas longitudes de onda superen el tamaño de los auriculares.

La cancelación activa ofrece una solución prometedora, ya que según Cui et al. (2003) resulta efectiva para frecuencias menores a 500 Hz complementándose muy bien con los métodos pasivos.

La cancelación activa de ruido (ANC) es un sistema que utiliza el principio de superposición para eliminar el ruido no deseado. Detecta el ruido no deseado con un micrófono, genera una señal de “anti-ruido” con la misma amplitud pero en fase opuesta, y combina esta señal con el ruido, lo que resulta en la cancelación de ambos sonidos.

Según Kuo (1999), es importante que el sistema ANC sea digital. Esto implica que las señales se muestreen y procesen en tiempo real utilizando sistemas de procesamiento de señales digitales. Para esto se usa un algoritmo del filtro adaptativo que ajusta las características del anti-ruido generado de manera que se minimice el error entre la señal deseada y la cancelada.

El algoritmo adaptativo más comúnmente utilizado en el control activo de ruido es el algoritmo de mínimos cuadrados medios (LMS, por sus siglas en inglés), el cual se realiza mediante un filtro transversal. En un filtro transversal, la señal de entrada se divide en múltiples caminos, cada uno de los cuales está ponderado por un coeficiente. Estos coeficientes son ajustados para lograr la respuesta deseada del filtro (Widrow & Stearns, 1985, pp. 16-18).

Este estudio se centra en la evaluación de la cancelación activa a través de pruebas subjetivas en los oyentes para determinar la efectividad de la ANC, la percepción de la reducción del ruido y la existencia de posibles interferencias destructivas que alteren la señal deseada.

Esto nos permitirá comprender mejor cómo los usuarios perciben y utilizan la ANC en su vida cotidiana, así como identificar áreas de mejora en el diseño y desarrollo de esta tecnología.

2. Objetivos general y específicos

Como objetivo general, se procura evaluar si la ANC cumple con su función de reducir el ruido ambiental sin producir interferencias que afecten la calidad del sonido.

Objetivos específicos:

- Generar fragmentos de audio que representen las señales deseadas por los usuarios de auriculares (canal primario).
- Generar grabaciones de ruido de fondo de posibles situaciones de escucha (canal secundario). Ver sección 4.2.
- Seleccionar y preparar el recinto donde se llevarían a cabo las pruebas auditivas, así como el equipamiento a utilizar.
- Verificación del test: Determinar el orden y el nivel SPL que tendrán los fragmentos de señales deseadas y el ruido de fondo en el punto de escucha.
- Realizar el test subjetivo.
- Análisis estadístico de los resultados: Descartar outliers.
- Análisis correlacional de los resultados: búsqueda de posibles repercusiones de la ANC en la calidad del sonido.
- Análisis correlacional de los resultados: determinar rango de nivel de ruido de fondo para el cual el sistema ANC cumple su función de suprimir el ruido de fondo.

3. Marco teórico y estado del arte

Los sistemas de cancelación activa buscan limpiar la señal de ruido. Se tienen sistemas digitales que emplean conversores AD-DA para procesar la señal y generar la señal “antinoise”, mientras que los sistemas analógicos utilizan circuitos electrónicos convencionales para lograr el mismo objetivo.

3.1. ANC analógicos

Un micrófono externo es colocado fuera del auricular capta el ruido ambiental antes de que llegue al oído del usuario. Esta señal de ruido se interpreta como aquella que debe ser cancelada. Se genera una señal de polaridad invertida. A esta señal se le aplica un retardador para compensar el tiempo que tarda el ruido en llegar desde el punto donde se ubica el micrófono hasta el oído. Finalmente, la señal resultante se añade directamente a la música antes de que llegue al oído del usuario.

El esquema de la figura 1 a continuación representa un sistema de cancelación activa analógico.

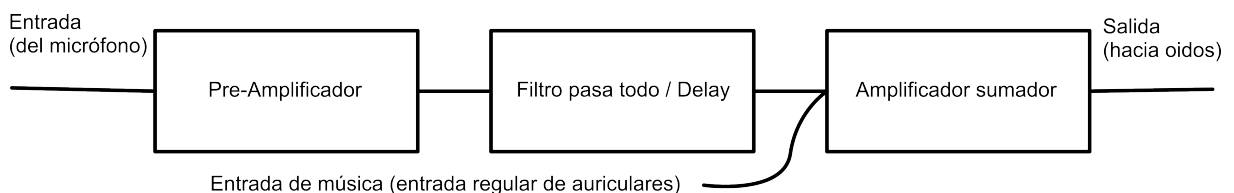


Figura 1: Diagrama de bloques por Kotlicki y McKenna (2016).

3.2. ANC con retroalimentación

En un ANC digital de retroalimentación, se utiliza un micrófono colocado dentro del auricular para capturar el sonido combinado de la música y el ruido externo que llega al oído del usuario. Esta señal combinada se compara con la señal de audio deseada, y cualquier diferencia se interpreta como ruido que debe ser cancelado. Se genera una señal de anti-ruido que se agrega a la señal de audio para cancelar el ruido percibido.

El principio básico del ANC (Cancelación Activa de Ruido) adaptativo es estimar el ruido principal que se va a cancelar y usarlo como señal de referencia $x(n)$ para el filtro adaptativo $W(z)$. Como se muestra en la figura 2, la señal secundaria $y(n)$ se calcula a partir de la señal de error $e(n)$ medida por el sensor de error para sintetizar la señal de referencia $x(n)$. Los coeficientes del filtro $W(z)$ se actualizan mediante el algoritmo de mínimos cuadrados filtrados (FXLMS) en el tiempo n , y L es la longitud del filtro.

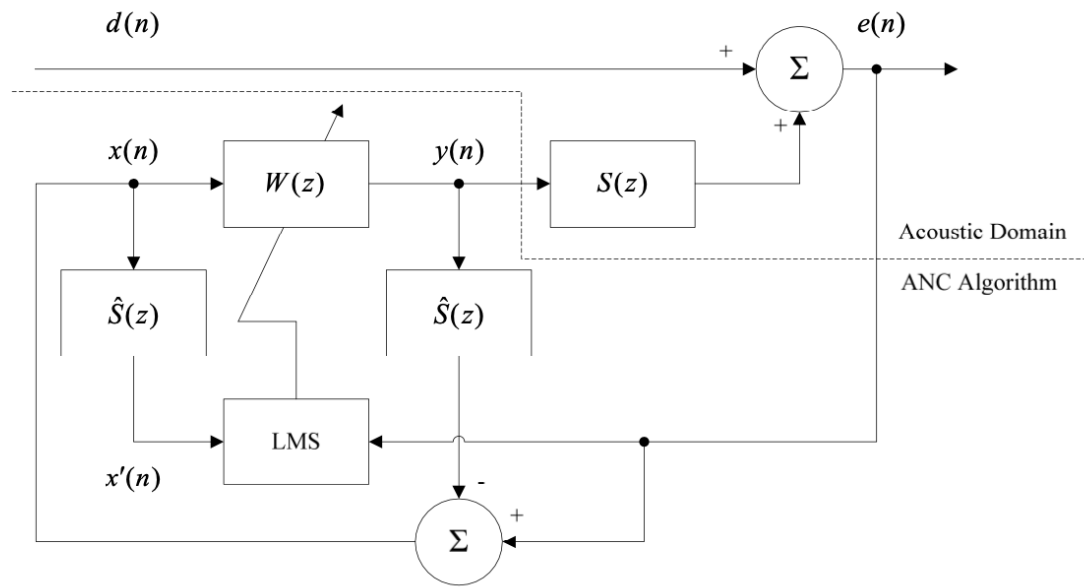


Figura 2: Diagrama de bloques por Kuo et al. (2018, p. 3).

La señal filtrada es

$$x'(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m(n) x(n-m) \quad (1)$$

donde $(m = 0, 1, \dots, M-1)$ son los coeficientes del filtro FIR $S(z)$ (con longitud M) que representan el ruido estimado $d(n)$.

El algoritmo ANC adaptativo de retroalimentación requiere el modelo de la vía secundaria $S(z)$ para actualizar $W(z)$.

El método más popular para estimar la vía secundaria es la identificación del sistema usando ruido blanco como la señal de excitación. Desafortunadamente, el ruido adicional no deseado para productos de electrónica de consumo como los auriculares. Por lo tanto, Kuo et al. (2018, p. 3) proponen utilizar sonido natural en lugar de ruido blanco para el modelado de la vía secundaria.

3.3. ANC con retroalimentación directa

En un ANC digital con feedforward, el micrófono no se coloca dentro del auricular, sino que se sitúa fuera del mismo, capturando el sonido ambiental antes de que llegue al oído del usuario.

Esta señal capturada se compara con la señal de audio deseada y se cancela la diferencia. El objetivo es que la señal de anti-ruido cancele el ruido antes de que llegue al oído, de modo que el usuario solo perciba la señal de audio deseada.

4. Diseño de la investigación

La cancelación activa de ruido (ANC) en auriculares es una tecnología ampliamente utilizada que pretende mejorar la experiencia auditiva al reducir el ruido ambiental. Sin embargo, la efectividad de la ANC puede variar significativamente según el diseño del auricular, la calidad del hardware y las preferencias individuales del usuario. Este estudio investiga la percepción de la efectividad de la ANC en auriculares a través de un enfoque experimental subjetivo. Se expone a participantes voluntarios a diferentes condiciones de ruido y música mientras usan auriculares con ANC. Se les pide que evalúen la calidad del sonido, la reducción de ruido percibida y su nivel de satisfacción con la experiencia auditiva. Por otro lado, se lleva a cabo una simulación que ejecuta los algoritmos de filtrado.

En esta investigación se plantea un diseño experimental de alcance correlacional en el cual las siguientes variables se ven involucradas.

4.1. Variables

- Uso o no de ANC (variable objetiva categórica dicotómica independiente).
- Nivel de ruido de fondo generado (variable objetiva continua independiente).
- Espectro del ruido de fondo (variable objetiva continua independiente).
- Nivel de ruido de fondo percibido por un individuo usando auriculares con ANC (variable subjetiva dependiente).
- Calidad del sonido percibida por un individuo usando auriculares con ANC (variable subjetiva dependiente).

4.2. Situaciones de escucha

Para emular una situación de contaminación sonora, se propone grabar con un micrófono de medición señales de 1 minuto de duración en distintos puntos estratégicos. Luego, se tomarán fragmentos de los 10 segundos que tengan la información sonora más relevante y representativa de cada situación.

Se propone realizar grabaciones de ruido de fondo que representen las siguientes situaciones:

- Pasajero de un colectivo escuchando música.
- Pasajero de un tren escuchando música.
- Peatón escuchando música en una avenida transitada.
- Joven escuchando música en un parque o plaza.
- Deportista escuchando música en un gimnasio.
- Ejecutivo haciendo una videoconferencia en un café con música funcional.
- Ejecutivo haciendo una videoconferencia en un aeropuerto.

4.3. Diseño de prueba subjetiva: Encuesta y muestra

El test subjetivo consiste en una prueba auditiva para evaluar la efectividad de la cancelación activa comparando la percepción de diferentes usuarios.

La población está compuesta por los usuarios de auriculares. Según la norma ITU-R BS.1284-2 de International Telecommunication Union (2019), se determina que la muestra deberá contar con al menos 10 individuos expertos ya sea por conocimiento en el campo o por entrenamiento auditivo. Asimismo, la muestra deberá contar con al menos 20 individuos no expertos.

Para garantizar una situación de control, es imprescindible que el recinto donde se lleve a cabo el experimento tenga un nivel de ruido de fondo de 15 dB SPL menor que el nivel del ruido emitido por el sistema de monitoreo en el punto de escucha.

De esta manera, se procede a realizar la prueba para cada individuo. En una primera instancia se le pide al sujeto que brinde sus datos demográficos y se le pregunta si tiene conocimientos en el campo. Luego, se lo hace escuchar por medio de los auriculares una señal de 10 segundos (que puede ser un fragmento musical o parte de una conversación) que se condiga con cada una de las situaciones de la sección 4.2. De manera simultánea, eventualmente se reproduce por un sistema de monitoreo la señal de ruido correspondiente a la situación.

Se diseña una encuesta para que el individuo registre luego de cada situación las siguientes apreciaciones:

- Nivel de ruido de fondo - escala del 1 (poco ruido) al 5 (mucho ruido)
- Calidad del sonido deseado - escala del 1 (baja calidad) al 5 (alta calidad)

El sujeto va a realizar 8 escuchas de las situaciones propuestas en un orden aleatorio, pudiendo haber situaciones repetidas. De esta forma hacemos variar el espectro del ruido para generar validez de contenido del instrumento de medición.

En cada escucha se va a variar el nivel del ruido de fondo generado y se va a activar y desactivar el sistema ANC del auricular, también de manera aleatoria. Se pueden identificar entonces los siguientes casos posibles, que se van a dar 2 veces cada uno:

1. Sin ANC y con muy poco ruido de fondo generado.
2. Sin ANC y con mucho ruido de fondo generado.
3. Con ANC y con muy poco ruido de fondo generado.
4. Con ANC y con mucho ruido de fondo generado.

De esta forma, es posible determinar outliers si el sujeto percibe baja calidad sonora en los casos 1 o 2, o si percibe mucho ruido en los casos 3 o 4.

Finalmente, con las 4 escuchas de los casos 3 y 4, se usan métodos estadísticos para determinar la eficacia del sistema ANC.

5. Validación de las pruebas

6. Análisis de los resultados: Aplicaciones estadísticas

7. Conclusiones

En primer lugar, se espera que las pruebas subjetivas permitan determinar la efectividad percibida de la ANC en la reducción del ruido ambiental. Se busca analizar la encuesta para ver

si los participantes reportan una mejora significativa en la calidad de la experiencia auditiva al utilizar dispositivos equipados con ANC en entornos ruidosos, como calles transitadas, espacios de trabajo compartidos o transporte público.

Además, se busca evaluar la percepción de los usuarios sobre la interferencia destructiva y posibles artefactos asociados con la ANC. Se espera que los participantes informen sobre la presencia o ausencia de efectos no deseados, como distorsión del sonido, sensación de presión en los oídos o alteración de la calidad de la música reproducida.

8. Líneas futuras de investigación

Por último, se espera que los resultados obtenidos de estas pruebas subjetivas sirvan como base para futuras investigaciones y desarrollo tecnológico en el campo de la cancelación activa de ruido. La retroalimentación proporcionada por los usuarios permitirá identificar áreas de mejora en términos de diseño de hardware, algoritmos de procesamiento de señales y experiencia de usuario, con el objetivo de optimizar la efectividad y la usabilidad de la ANC en dispositivos portátiles.

Una posible línea de investigación a futuro podría incluir la simulación para ejecutar algoritmos de filtrado, con un enfoque particular en el algoritmo de Mínimos Cuadrados Medios (LMS, por sus siglas en inglés). Se podría desarrollar un software que simule la captación del ruido y su cancelación en una señal deseada mediante la implementación del algoritmo LMS. Para ello, se podría crear un script que tome una señal de audio deseada previamente grabada y simule la captación del ruido mediante una señal de ruido también previamente grabada. El algoritmo LMS se aplicaría para adaptar los coeficientes del filtro de manera iterativa, minimizando el error entre la señal deseada y la señal de salida del filtro. De esta forma, se podría predecir cómo el algoritmo LMS podría comportarse en la cancelación del ruido y comparar los resultados con los obtenidos en estudios subjetivos.

9. Cronograma

A continuación, se presenta un desglose detallado de las fases del proyecto, las tareas correspondientes y los plazos estimados para su realización.

Actividad/Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Generación de señales primarias	X															
Grabaciones de ruido de fondo	X															
Preparación de recinto y equip.		X	X													
Verificación del test		X	X													
Realización del test		X	X													
Análisis estadístico de resultados				X												
Análisis correlacional de resultados				X												

Figura 3: Cronograma detallado de las etapas y actividades del proyecto de investigación.

10. Referencias

- Cui, J., Behar, A., Wong, W., & Kunov, H. (2003). Insertion loss testing of active noise reduction headsets using acoustic fixture. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X03000677?via%3Dihub>
- International Telecommunication Union. (2019). ITU-R BS.1284-2 Métodos generales para la evaluación subjetiva de la calidad del sonido [ITU-R BS.1284-2]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-I!!PDF-E.pdf
- Kotlicki, A., & McKenna, J. (2016). *Active Noise-Cancelling Circuit*. Consultado el 27 de abril de 2024, desde https://phys420.phas.ubc.ca/p420_16/bartok1/sound_project.html
- Kuo, S. M. (1999). Active noise control: A tutorial review. https://www.researchgate.net/publication/2985088_Active_noise_control_A_tutorial_review
- Kuo, S. M., Chen, Y.-R., Chang, C.-Y., & Lai, C.-W. (2018). Development and Evaluation of Light-Weight Active Noise Cancellation Earphones. <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/7/1178>
- Widrow, B., & Stearns, S. D. (1985). *Adaptive signal processing*. Prentice Hall. <https://abrarhashmi.files.wordpress.com/2016/02/bernard-widrow-peter-n-stearns-adaptive-signal-processing-prentice-hall-1985.pdf>