

cancelación activa de ruido – active noise cancellation

Authored by
memjavad

October 18, 2025

RECOMMENDED CITATION

memjavad (2025). *cancelación activa de ruido – active noise cancellation*. Spanish Psychological Databases. Retrieved from <https://spanish.arabpsychology.com/?p=746>

Cancelación Activa de Ruido (Active Noise Cancellation - ANC)

Primary Disciplinary Field(s): Ingeniería Acústica, Procesamiento de Señales Digitales (DSP), Electroacústica.

1. Definición Central

La Cancelación Activa de Ruido (ANC) es una tecnología avanzada que se emplea para reducir o eliminar el sonido no deseado mediante la generación intencional de una onda sonora secundaria diseñada específicamente para anular la onda de ruido original. Este proceso se fundamenta en el principio físico de la [interferencia destructiva](#). A diferencia de la cancelación pasiva de ruido, que utiliza materiales aislantes para bloquear la energía sonora, la ANC es un método electroacústico que requiere energía eléctrica y un sistema de procesamiento de señales en tiempo real para funcionar. El objetivo principal de la ANC es mejorar la relación señal-ruido en entornos ruidosos, lo que es crucial tanto para la audición humana como para la claridad de las comunicaciones grabadas o transmitidas.

El mecanismo central de la ANC implica la detección del ruido ambiente utilizando uno o varios micrófonos, el análisis inmediato de las características de frecuencia y amplitud de ese ruido por parte de un procesador, y la emisión subsiguiente de una "antionda" a través de un altavoz o transductor. Para que la anulación sea efectiva, esta antionda debe ser idéntica en amplitud al ruido original, pero estar exactamente desfasada 180 grados. Cuando estas dos ondas (el ruido y la antionda) se combinan en el punto de escucha deseado, sus picos y valles se cancelan mutuamente, resultando idealmente en silencio o, de manera más realista, en una reducción significativa del nivel de presión sonora percibido. Esta capacidad de generar un silencio controlado ha transformado múltiples industrias, desde la aviación hasta los productos de consumo masivo, como los auriculares.

Es fundamental destacar que la efectividad de la ANC está directamente ligada a las características del ruido a mitigar. Los sistemas de ANC son particularmente eficientes contra ruidos de baja frecuencia y de naturaleza constante o predecible, como el zumbido de un motor de avión o el tráfico vehicular. Esto se debe a que las ondas de baja frecuencia tienen longitudes de onda largas, lo que facilita su modelado y predicción por parte del procesador DSP. Por el contrario, los ruidos impulsivos, aleatorios o de alta frecuencia (como voces humanas o el sonido de un claxon) son mucho más difíciles de cancelar activamente, ya que su rápida variabilidad temporal y espacial complica la generación precisa de la antionda con el retraso de fase exacto requerido.

2. Etimología y Desarrollo Histórico

El concepto teórico que subyace a la cancelación activa de ruido se remonta a principios del siglo

XX, mucho antes de que la tecnología electrónica estuviera disponible para implementarlo de manera práctica. La base matemática se encuentra en la teoría de ondas y el principio de superposición, bien establecidos en la física clásica. Sin embargo, la primera patente formal que describía un sistema para la cancelación activa de ruido fue presentada en 1934 por el físico alemán [Paul Lueg](#). Lueg propuso la idea de utilizar la inversión de fase para cancelar ondas sonoras periódicas dentro de los conductos, como las tomas de aire. Aunque su propuesta era conceptual y no se implementó ampliamente en ese momento debido a las limitaciones tecnológicas, sentó las bases para el desarrollo futuro.

El desarrollo práctico y la inversión significativa en la tecnología de ANC comenzaron a mediados del siglo XX, impulsados principalmente por la necesidad militar y aeronáutica. Durante las décadas de 1950 y 1960, la Marina de los EE. UU. y la NASA exploraron sistemas de cancelación de ruido para proteger a los pilotos y tripulaciones de las aeronaves, que estaban expuestos a niveles de ruido extremadamente altos y constantes. El trabajo pionero de Lawrence J. Fogel en la década de 1950 y, posteriormente, el de Willard M. Cannon en el desarrollo de sistemas de cancelación para helicópteros, demostraron la viabilidad de la tecnología en entornos de ruido extremo. No obstante, los sistemas de esta época eran analógicos, voluminosos y muy costosos, limitando su aplicación a nichos especializados.

El verdadero punto de inflexión para la ANC ocurrió con la revolución digital y el advenimiento de los microprocesadores y los [Procesadores Digitales de Señales \(DSP\)](#) rápidos y asequibles en las décadas de 1980 y 1990. Estos avances permitieron el procesamiento complejo de algoritmos en tiempo real, esenciales para ajustar dinámicamente la antionda. Una figura clave en la comercialización fue Amar Bose, fundador de Bose Corporation, quien invirtió fuertemente en la tecnología tras una experiencia frustrante en un vuelo comercial. Los primeros productos comerciales de ANC llegaron al mercado a finales de los 80, inicialmente dirigidos a pilotos, y se expandieron al mercado de consumo masivo con auriculares a principios de los 2000, marcando la transición de la ANC de una herramienta industrial a una característica de estilo de vida.

3. Principios Físicos y Matemáticos

La eficacia de la cancelación activa de ruido reside en una aplicación precisa de la teoría de ondas, específicamente el principio de superposición. Según este principio, cuando dos o más ondas se encuentran en el mismo punto en el espacio, la amplitud de la onda resultante en ese punto es la suma algebraica de las amplitudes de las ondas individuales. Para lograr la cancelación, se busca que la suma sea cero. Esto se consigue cuando la onda de ruido $N(t)$ y la antionda generada $A(t)$ tienen la misma magnitud pero signos opuestos, de modo que $N(t) + A(t) \approx 0$.

Matemáticamente, la generación de la antionda requiere un análisis constante y rápido del

espectro de ruido. Los sistemas modernos de ANC emplean a menudo la [Transformada Rápida de Fourier \(FFT\)](#) o técnicas relacionadas para descomponer la señal de ruido compleja en sus componentes de frecuencia constituyentes. Una vez que se identifican las frecuencias dominantes, el algoritmo de control, típicamente basado en el filtro Adaptativo de Mínimos Cuadrados (LMS) o variantes como el Filtro LMS Normalizado (NLMS), ajusta dinámicamente los coeficientes del filtro digital para minimizar la energía residual de ruido percibida en el micrófono de error. Este proceso iterativo garantiza que el sistema se adapte a los cambios sutiles en las características del ruido ambiente.

El desafío más crítico en la implementación de estos principios es el factor tiempo. La antionda debe generarse y propagarse hasta el punto de anulación con una precisión temporal extrema. Cualquier retraso (latencia) en el sistema de procesamiento implica que la antionda llegará tarde, causando una cancelación imperfecta o, peor aún, una [interferencia constructiva](#) no deseada, que en realidad amplificaría el ruido en ciertas frecuencias. Por esta razón, los sistemas de ANC requieren DSPs de muy alta velocidad y algoritmos optimizados que minimicen el retardo de procesamiento a microsegundos, asegurando que el desfase de 180 grados sea mantenido a lo largo del rango de frecuencias objetivo.

4. Componentes Clave del Sistema

Un sistema típico de Cancelación Activa de Ruido se compone de tres elementos esenciales que trabajan en conjunto dentro de un bucle de control: el micrófono(s) de detección, el Procesador Digital de Señales (DSP) y el transductor de salida. La calidad y la integración de estos componentes determinan la eficiencia global del sistema para atenuar el ruido.

El primer componente es el **micrófono de detección**, cuya función es capturar la señal de ruido que se desea eliminar. Dependiendo de la arquitectura del sistema, se pueden utilizar diferentes tipos de micrófonos. En los sistemas de realimentación (feedback), el micrófono se coloca cerca del oído del usuario (dentro del auricular) para medir el ruido residual que ha pasado a través de la cancelación pasiva. En los sistemas de alimentación anticipada (feedforward), el micrófono se coloca en el exterior del dispositivo (fuera del auricular) para capturar el ruido antes de que llegue al usuario. Algunos sistemas híbridos utilizan ambos micrófonos para maximizar la cobertura de frecuencia y la robustez.

El segundo componente es el **Procesador Digital de Señales (DSP)**, que es el cerebro del sistema. El DSP toma la señal analógica del micrófono, la convierte a digital mediante un convertidor analógico-digital (ADC), y ejecuta el algoritmo de control adaptativo (como el filtro LMS). Este algoritmo calcula en tiempo real la forma de onda exacta que se necesita para anular el ruido. La velocidad del DSP es crucial; debe realizar millones de cálculos por segundo para mantener la latencia mínima. Una vez que la antionda se calcula en formato digital, se convierte

de nuevo a analógico mediante un convertidor digital-analógico (DAC) antes de ser enviada al transductor.

Finalmente, el **transductor o altavoz** es el componente de salida que emite la antionda generada por el DSP. Este transductor debe ser capaz de reproducir las bajas frecuencias con alta fidelidad y suficiente potencia para igualar la amplitud del ruido ambiental, a menudo operando en el mismo rango de frecuencia que el ruido de fondo (típicamente entre 50 Hz y 1000 Hz). La ubicación y el diseño del transductor son críticos para asegurar que la antionda alcance el punto de escucha deseado con la fase y amplitud correctas, logrando así la máxima cancelación en la oreja del usuario.

5. Tipos de Arquitecturas ANC

La tecnología ANC se clasifica generalmente en tres arquitecturas principales, cada una con ventajas y desventajas específicas en términos de rendimiento, complejidad y rango de frecuencias de anulación. La elección de la arquitectura depende del entorno de aplicación y de la naturaleza del ruido a mitigar.

La primera es la arquitectura **Feedforward (Alimentación Anticipada)**. En este sistema, el micrófono de detección se coloca fuera del canal auditivo, mirando hacia el exterior, capturando el ruido antes de que entre. La señal de ruido se procesa y la antionda se emite a través del altavoz interno. La principal ventaja del sistema feedforward es que puede cancelar un rango de frecuencias más amplio, incluyendo algunas frecuencias medias, y es menos susceptible a la retroalimentación acústica. Sin embargo, su principal desventaja es su sensibilidad a los errores en el camino de propagación entre el micrófono externo y el oído, lo que requiere un modelado acústico muy preciso. Además, no puede corregir el ruido residual generado internamente por el propio sistema (como el "silbido" electrónico).

La segunda es la arquitectura **Feedback (Realimentación)**. En este caso, el micrófono se coloca dentro del canal auditivo o muy cerca del oído (dentro del auricular) para medir el ruido residual que llega al usuario. El sistema utiliza esta medición de error para ajustar el filtro adaptativo. La ventaja clave del feedback es su alta precisión, ya que mide exactamente lo que el usuario está escuchando, lo que permite una excelente cancelación de ruido en el rango de bajas frecuencias y corrige automáticamente las variaciones individuales en el ajuste del auricular. No obstante, el riesgo de inestabilidad y oscilación (debido a la retroalimentación) limita su capacidad para operar en frecuencias medias y altas, ya que el sistema tiene menos tiempo para reaccionar antes de que la señal de alta frecuencia se propague.

Finalmente, la arquitectura **Híbrida** combina los micrófonos feedforward y feedback. Este es el sistema más complejo y costoso, pero ofrece el mejor rendimiento general. El micrófono externo (feedforward) maneja eficientemente las frecuencias bajas y medias, mientras que el micrófono

interno (feedback) garantiza la precisión en la cancelación del ruido residual que llega al oído y compensa las fugas de sonido. Los sistemas híbridos son robustos, ofrecen una cancelación superior en un rango de frecuencias más amplio y son menos susceptibles a los problemas de estabilidad que enfrentan los sistemas puramente de feedback. Es la arquitectura preferida en auriculares de consumo de alta gama.

6. Aplicaciones y Significado

La Cancelación Activa de Ruido ha trascendido su origen militar y aeronáutico para convertirse en una tecnología ubicua con profundas implicaciones en la salud, la productividad y el ocio. Su significado principal radica en su capacidad para crear burbujas de silencio en entornos intrínsecamente ruidosos, mejorando la calidad de vida y reduciendo el riesgo de problemas de salud relacionados con la exposición crónica al ruido.

Una de las aplicaciones más significativas sigue siendo la **aviación y el transporte**. Los auriculares ANC son esenciales para pilotos y personal de cabina para proteger su audición y asegurar la claridad de las comunicaciones. En el sector civil, la tecnología se ha integrado en automóviles de lujo y trenes de alta velocidad para reducir el ruido del motor, el rodamiento y el viento dentro de la cabina, mejorando la comodidad del pasajero. Más allá de los auriculares, la ANC se está aplicando en sistemas de reducción de ruido a gran escala, como amortiguadores de ruido en ductos de ventilación y sistemas de escape de generadores industriales.

En el **ámbito de consumo y productividad**, los auriculares y audífonos ANC han revolucionado la forma en que las personas trabajan y se relajan. Al mitigar el ruido de fondo de oficinas abiertas, cafeterías o desplazamientos, permiten una mayor concentración y reducen la fatiga auditiva. Además, la ANC es crucial para mejorar la calidad del audio en llamadas de voz y videoconferencias, ya que muchos sistemas modernos no solo cancelan el ruido para el oyente, sino que también aplican algoritmos de cancelación de ruido a la señal del micrófono para el interlocutor. La tecnología también tiene un impacto potencial en la salud auditiva, al permitir que los usuarios escuchen música o contenido a volúmenes más bajos sin competir con el ruido ambiental, minimizando el riesgo de daño auditivo a largo plazo.

7. Desafíos y Limitaciones

A pesar de su sofisticación, la Cancelación Activa de Ruido enfrenta varios desafíos técnicos y limitaciones inherentes que impiden una cancelación perfecta en todas las situaciones. Comprender estas limitaciones es crucial para establecer expectativas realistas sobre el rendimiento de la tecnología.

La principal limitación es la **efectividad en altas frecuencias**. Como se mencionó, la ANC funciona mejor con ruidos constantes de baja frecuencia (por debajo de 1 kHz). A medida que la

frecuencia aumenta, la longitud de onda se acorta y el sonido se vuelve altamente direccional. Esto significa que pequeños cambios en la posición de la cabeza o en la geometría del canal auditivo pueden alterar drásticamente la fase de la onda en el punto de escucha. Los retrasos de procesamiento del DSP, aunque mínimos, se vuelven significativos en relación con el período de las ondas de alta frecuencia, lo que hace que sea casi imposible generar una antionda precisa. Por lo tanto, el manejo del ruido de alta frecuencia (como voces agudas o chirridos) sigue dependiendo en gran medida del aislamiento físico proporcionado por la cancelación pasiva.

Otro desafío significativo es el **ruido impulsivo y el ruido aleatorio**. El algoritmo adaptativo de la ANC requiere tiempo para "aprender" la forma de onda del ruido y calcular la antionda. Ruidos impredecibles, transitorios o impulsivos (como un golpe repentino, un grito o el sonido de un plato cayendo) cambian demasiado rápido para que el sistema reaccione. Para cuando el DSP ha procesado y emitido la antionda, el ruido original ya ha pasado, o la antionda llega desfasada, lo que puede resultar en una amplificación breve y molesta. La ANC está intrínsecamente diseñada para mitigar el ruido estático o estacionario.

Finalmente, existen desafíos relacionados con la **latencia, el consumo de energía y la calidad de sonido**. La necesidad de un procesamiento ultrarrápido impone altas demandas de energía en los dispositivos portátiles. Además, la introducción de la antionda puede, inadvertidamente, afectar la calidad de la música o la voz que el usuario desea escuchar. Los sistemas deben ser cuidadosamente diseñados para aplicar la cancelación solo al componente de ruido, sin degradar la señal de audio deseada. Además, los sistemas de realimentación (feedback) siempre conllevan el riesgo de inestabilidad y oscilación si no se diseñan filtros de control robustos, lo que puede manifestarse como un silbido molesto o un ruido de fondo constante ("hiss") si el sistema no está calibrado correctamente.

Further Reading

[Cancelación activa de ruido - Wikipedia](#)

[Bose Corporation: History and Technology of Noise Cancellation](#)

[Lueg, P. \(1936\). Process of silencing sound oscillations. U.S. Patent No. 2,043,416.](#)