



ABIERTO

Control activo del sonido de banda ancha a través de la abertura abierta de una ventana doméstica de tamaño completo

Bhan Lam¹ , Dongyuan Shi¹, Woon-Seng Gan¹, Stephen J. Elliott² y Masaharu Nishimura³

Cerrar la ventana suele ser el último recurso para mitigar el ruido ambiental, a expensas de la ventilación natural.

Describimos un sistema de control activo del sonido instalado en la apertura de la ventana doméstica que atenúa el sonido incidente, consiguiendo una reducción global en el interior de la estancia manteniendo la ventilación natural. El sonido incidente se atenúa activamente mediante una serie de módulos de control (un pequeño altavoz) distribuidos de manera óptima a lo largo de la apertura. Un solo micrófono de referencia proporciona información avanzada para que el controlador calcule la entrada de señal antiruido a los altavoces en tiempo real. Un análisis numérico reveló que el potencial máximo de atenuación activa supera el aislamiento acústico perfecto proporcionado por una ventana de vidrio simple completamente cerrada en condiciones ideales. Para determinar el rendimiento en el mundo real de un sistema de control activo de este tipo, se realiza un sistema experimental en la apertura de una ventana de tamaño completo instalada en una sala de prueba. El sistema de control activo logró una reducción de hasta 10 dB en el nivel de presión sonora de energía promedio en presencia de un ruido de banda ancha del mundo real grabado. Sin embargo, la atenuación en el rango de bajas frecuencias y su potencia máxima de salida está limitada por el tamaño de los altavoces.

Encontrar una solución sostenible y práctica para controlar el ruido que entra en edificios con ventilación natural es un problema difícil, especialmente para ciudades tropicales densamente pobladas y de gran altura^{1,2}. Debido a la impracticabilidad de erigir barreras acústicas para edificios de gran altura, los elementos de fachada juegan un papel especialmente crítico en la mitigación del ruido urbano. Irónicamente, la demanda de edificios con ventilación natural está exacerbando el problema del ruido al proporcionar más puntos de entrada. Tal como lo describe De Salis y lo actualizó recientemente Tang, las estrategias para el control del ruido en edificios con ventilación natural son predominantemente pasivas, en las que se emplean estructuras físicas para interrumpir la ruta de propagación del ruido antes de ingresar al interior de la habitación^{1,2}. En el contexto de ciudades densas y de gran altura, solo la estrategia de ventana plena se ha mostrado prometedora^{3,4}, pero aún tiene que superar su reducción inherente en la ventilación. Las soluciones de mitigación de ruido propuestas para aberturas totalmente abiertas hasta ahora se han basado en gran medida en técnicas de control activo^{5–10}.

Un sistema de control activo de ruido (ANC) es un sistema electroacústico, que generalmente se compone de un sensor de "referencia" para proporcionar información anticipada del ruido principal que se va a atenuar, un actuador accionado por un circuito adaptativo para producir el anti-ruido y un sensor de 'error' para proporcionar retroalimentación al circuito adaptativo para adaptarse a los cambios en el ruido primario. Aunque el control es más efectivo en la fuente, por lo general no es factible para la mayoría de los escenarios. Por lo tanto, el ruido que se propaga a través del aire a menudo se atenúa mediante la reducción de la presión del sonido en la posición del sensor de error. En un campo difuso, por ejemplo, en la cabina de un automóvil, la reducción de la presión del sonido en unos pocos micrófonos de error dará como resultado una zona silenciosa 'local' alrededor de cada micrófono hasta una décima parte de una longitud de onda del límite superior de control, por ejemplo, 3,4 cm para control hasta 1 kHz¹¹. Por lo tanto, para un espacio interior grande, se deben distribuir numerosos micrófonos de error dentro del espacio interior para lograr un control 'global', por ejemplo, en aviones de hélice^{12,13} y automóviles¹⁴. Providencialmente, el ruido que se propaga a través de una apertura abierta se puede tratar como la fuente a controlar, y tanto las fuentes de control como los micrófonos de error se pueden organizar de manera óptima para lograr un control global al minimizar la potencia de sonido total de la apertura, como se muestra en un ejemplo anterior. estudio numérico¹⁵.

Idealmente, los altavoces que generan antiruido deben distribuirse alrededor del límite de la ventana para minimizar la obstrucción visual, como lo demuestra el sistema de barrera virtual de doble capa⁶. El sistema de barrera virtual fue diseñado para atenuar el ruido a través de una abertura rectangular deflectora desde el interior de un conducto corto, que refleja los conductos de ventilación industrial. Sin embargo, el desempeño del sistema de barrera virtual basado en límites es,

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Tecnológica de Nanyang, Singapur, 639798, Singapur.

² Instituto de Investigación de Sonido y Vibraciones, Universidad de Southampton, Southampton, SO17 1BJ, Reino Unido.

³ N.Lab., 1568-10, Fujie, Akashi, 673-0044, Japón correo electrónico: blam002@e.ntu.edu.sg

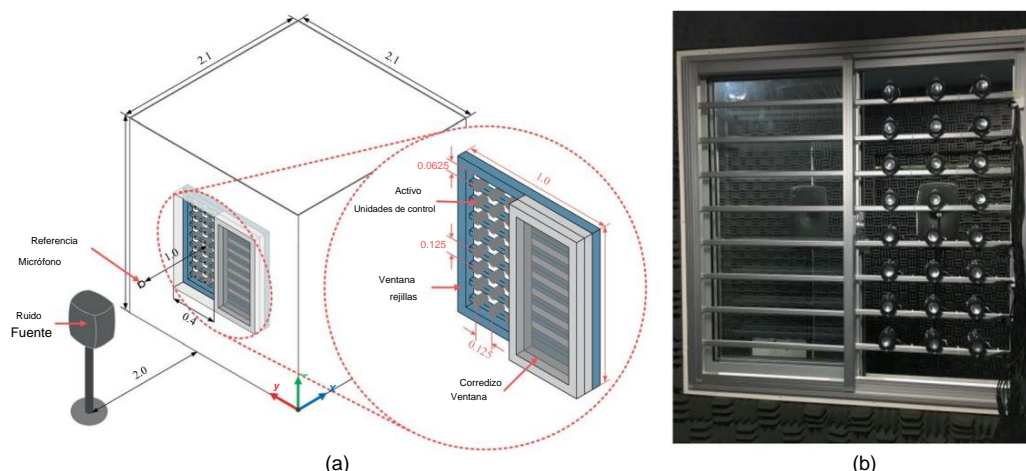


Figura 1. (a) Esquema de la sala de prueba y **(b)** vista del sistema de control activo desde el interior de la cámara de prueba.

limitado físicamente por el tamaño de la abertura, lo que restringe su idoneidad para ventanas normales¹⁶. Las simulaciones numéricas han demostrado que el diseño basado en los límites no es efectivo para una abertura en una pared delgada y rígida, es decir, una ventana en la fachada del edificio⁵.

Este documento describe un sistema en el que un conjunto plano de altavoces de control, distribuidos a lo largo de la abertura de una ventana corrediza de dos paneles de tamaño completo, se activa para atenuar el ruido de banda ancha que incide en el interior de la habitación. La mayoría de las implementaciones anteriores se han instalado en aberturas de ventanas pequeñas no estándar sin paneles de ventana^{8,17}. Aunque recientemente se ha descrito una configuración similar para el control activo del ruido tonal⁵, las demandas de control de ruido de banda ancha en una apertura más grande requerían un sistema de conteo de canales más alto que tenía que implementarse en una plataforma informática diferente con modificaciones importantes. El potencial de atenuación activa del sistema modificado en comparación con el aislamiento acústico de acristalamiento completo se describe en los datos complementarios. Nuestros experimentos muestran que se puede lograr una reducción de hasta 10 dB en el nivel de presión sonora de energía promedio en el rango de frecuencia del ruido típico del transporte urbano¹⁸, con una ventana corrediza de dos paneles completamente abierta.

Resultados

Se instaló una ventana corrediza de dos paneles de 1 m x 1 m de ancho en una habitación simulada hecha de 6 paneles de madera contrachapada de 30 mm de espesor con una dimensión de 2,1 m x 2,1 m x 2,1 m. Se instaló un sistema ANC de 24 canales compuesto por 24 unidades de control individuales en la rejilla de seguridad fijada a la ventana, una característica común en el sudeste asiático, como se muestra en la Fig. 1(a). Cada unidad de control se compone de un altavoz que mira hacia el interior de la sala de prueba, como se detalla en la Fig. 1(b). La fuente primaria, un parlante que emite el ruido a ser atenuado por el sistema propuesto, se ubica a 2 m de la abertura de la ventana. Después de tener en cuenta los marcos de las ventanas y las rejillas, el área abierta mide 0,45 m x 0,93 m. Las unidades de control (con altavoces de 4,5 cm de diámetro) están separadas 0,125 m con las unidades de la periferia colocadas a 0,0625 m del borde de la abertura. Un solo micrófono de referencia, utilizado para detectar el ruido incidente de la fuente primaria, se colocó a 1 m de la fuente de ruido en el medio de la matriz de fuente de control de 24 canales, como se muestra en la Fig. 1(a). La configuración experimental está guiada por simulaciones 2D del método de elementos finitos (FEM) (ver 15 y material complementario en línea), que investigaron la atenuación acústica pasiva proporcionada por el acristalamiento completo y la atenuación activa de un sistema ANC en combinación con paneles de vidrio deslizantes. Se pueden obtener al menos 10 dB de atenuación hasta 1 kHz con tres fuentes activas de "línea" en la apertura entreabierta, que se asemeja a la ventana deslizante de dos paneles totalmente abierta con tres columnas de fuentes activas, como se muestra en la Fig. 1(b). En condiciones ideales, la atenuación acústica pasiva del acristalamiento completo parece estabilizarse después de aproximadamente 1 kHz. Además, a partir del 75 % de acristalamiento con tres fuentes activas, la atenuación supera el aislamiento pasivo del acristalamiento total hasta 1 kHz. Por lo tanto, se espera un buen control activo por debajo de 1 kHz para el sistema experimental.

El rendimiento de atenuación global del sistema de control activo se evaluó en los experimentos basados en el nivel de presión sonora (SPL) promediado en energía en el interior de la sala con una matriz de 7 micrófonos de observación dispuestos de acuerdo con la norma ISO 16283–319. El SPL promedio de energía representa el promedio de espacio y tiempo del nivel de presión de sonido interior que anula la influencia de la radiación de campo cercano de los límites de la sala y evita los modos acústicos en la sala¹⁹. Como comparación, se evaluó el SPL promedio de una matriz plana de 12 micrófonos, denominado SPL promedio plano, colocado a 0,5 m de la ventana. El promedio planar corresponde a las posiciones del micrófono de error donde las presiones de sonido de la suma de los cuadrados fueron minimizadas por el sistema de control activo. Se utilizaron un total de 18 micrófonos en los cálculos del promedio de energía y del promedio planar, que se describen en detalle en la sección Métodos.

Para investigar la practicidad de un sistema ANC para ventanas domésticas, se adoptó un enfoque de filtro fijo, donde se quitaron los micrófonos de error durante la operación. Una señal de ruido gaussiano blanco de banda limitada (BLWN) de 100 Hz a 1 kHz fue el ruido principal que se controló en una etapa de entrenamiento inicial. Después del control de estado estable de la señal BLWN, los coeficientes de filtro se almacenaron y se utilizarán para realizar un control activo en otras muestras de ruido del mismo ancho de banda. El rendimiento de atenuación del sistema de control activo se compara con

Tipo de ruido (Ancho de banda, Hz)	Duración, s	SPL promedio de energía, dBA			SPL promedio planar, dBA		
		Antes del control	Afer control (Atenuación)	Pasivo (Atenuación)	Antes del control	Afer control (Atenuación)	Pasivo (Atenuación)
Ruido blanco gaussiano (100 a 1000)	10	74.60	65,80 (8,80)	61,80 (12,8)	79.90	70,30 (9,60)	65,21 (14,69)
Ruido de carretera (100 a 1000)	6.64	72.93	64,26 (8,67)	60,02 (12,91)	78.20	68,95 (9,25)	63,62 (14,58)
Ruido MRT (100 a 1000)	12.64	77.47	67,33 (10,14)	65,11 (12,36)	82.59	71,15 (11,44)	68,17 (14,42)
Ruido de vuelo de aeronaves (100 a 1000)	19.11	70.69	63,18 (7,51)	56,79 (13,9)	75.88	67,18 (8,7)	59,65 (16,23)

Tabla 1. Nivel de presión sonora promedio de energía ponderado A de grabaciones de ruido de transporte urbano de banda limitada antes y control activo con ventanas completamente abiertas, y sin control activo con ventanas completamente cerradas. Los valores entre paréntesis indican el nivel de atenuación.

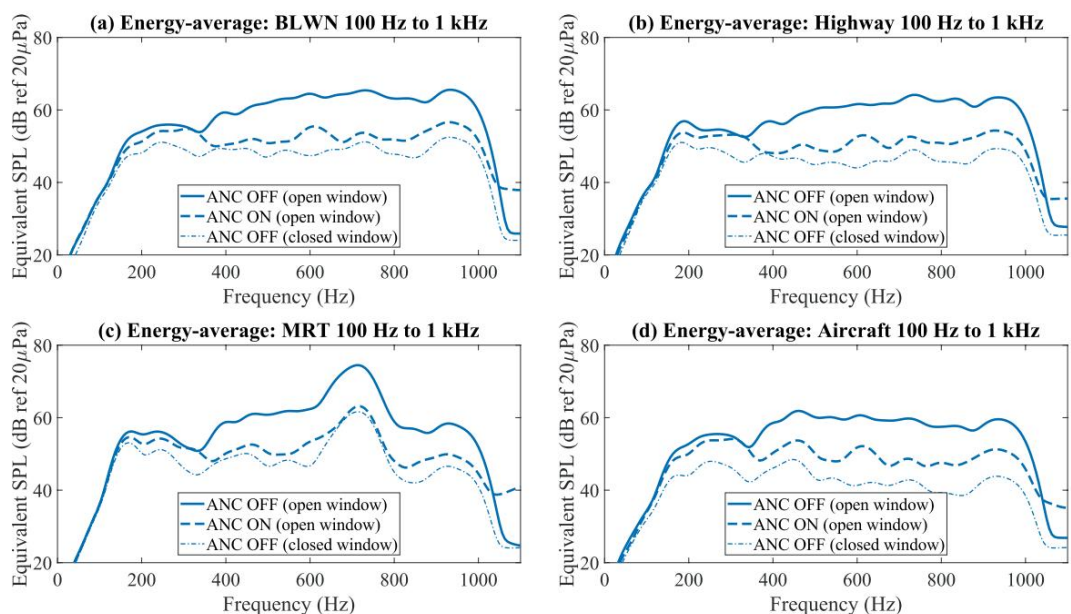


Figura 2. Espectro de promedio de energía ponderado A de 100 Hz a 1 kHz de banda limitada (a) ruido blanco gaussiano, (b) ruido de carretera, (c) ruido de paso de MRT y (d) ruido de aeronaves. antes del control de control activo y con las ventanas completamente cerradas sin control activo (---).

la atenuación pasiva proporcionada por el cierre completo de la ventana corrediza de dos paneles. El rendimiento del control activo se evalúa en un conjunto representativo de tipos de ruido del transporte urbano. Se registraron muestras de ruido de autopista, ruido de tren elevado de transporte rápido masivo (MRT) y ruido de aviones a reacción en las ventanas de un edificio residencial de apartamentos de gran altura en Singapur.

La atenuación pasiva proporcionada por el cierre de la ventana corrediza está entre 12,36 dB y 13,9 dB para SPL promedio de energía y entre 14,42 dB y 16,23 dB para SPL promedio planar, como se muestra en la Tabla 1. La atenuación activa varía entre 7,51 dB y 10,14 dB para SPL promedio de energía y entre 8,7 dB y 11,44 dB para SPL promedio planar. Dado que la diferencia en los niveles de atenuación activa entre el SPL promedio planar y el promedio de energía fue de 0,98 dB en promedio, se logró la atenuación global en el interior de la habitación.

Los espectros de energía media ponderada A de las muestras de ruido antes y después del control activo con las ventanas completamente abiertas y sin control activo con las ventanas completamente cerradas se muestran en la Fig. 2. Por debajo de 300 Hz, la atenuación pasiva es de unos 5 dB y casi no se observó ningún control activo para todas las muestras de ruido. El control activo y pasivo está ligeramente restringido de 300 a 500 Hz. Más allá de 500 Hz, se observa una atenuación pasiva de aproximadamente 10 dB a 12 dB y se logra una atenuación activa de aproximadamente 10 dB para todas las muestras de ruido. La diferencia en el rendimiento del control activo entre el MRT variable en el tiempo y las muestras de ruido de la aeronave se analizaron más a fondo en el dominio del tiempo, como se muestra en la Fig. 3 (a, b), respectivamente. A pesar de algunas fluctuaciones de amplitud en el MRT y el ruido de las aeronaves, la presión promedio móvil medida por los 7 micrófonos (para cálculos de SPL promedio de energía) indica una atenuación uniforme a lo largo del tiempo. Se logró una mayor atenuación para el ruido MRT debido a una reducción sustancial en el ruido dominante a 700 Hz, como se ilustra en los espectrogramas de la Fig. 3 (c, e), mientras que la energía dominante para el ruido de las aeronaves se distribuye de 400 Hz a 1 kHz, como se muestra en la Fig. 3(d). El prominente ruido residual de

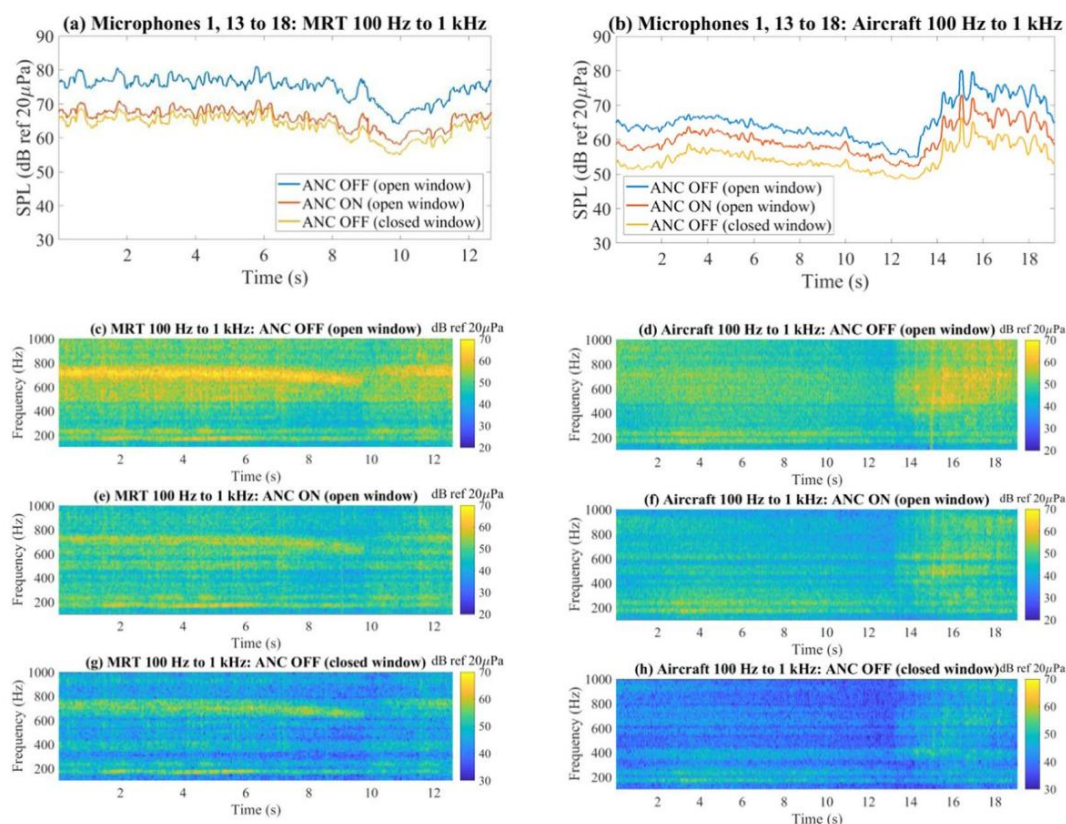


Figura 3. Nivel de presión de sonido promedio móvil en función del tiempo antes del control de control activo y (—), después de activo con las ventanas completamente cerradas sin banda de control activo limitada (a) ruido de MRT y (b) ruido de las aeronaves que pasan. Los espectrogramas antes del control (c, d), después del control (e, f) y las ventanas completamente cerradas (g, h) se muestran para el MRT y el ruido de las aeronaves, respectivamente.

500 Hz después del control activo expone la restricción en el control entre 300 Hz y 500 Hz, como se muestra en la Fig. 3(f).

Los espectrogramas de la ventana completamente acristalada para el MRT y el ruido de las aeronaves se muestran en la Fig. 3 (g, h) para comparar y muestran claramente la atenuación pasiva reducida por debajo de 300 Hz.

Discusión

Este trabajo investiga el potencial de atenuación global de un sistema ANC para ventanas abiertas domésticas para atenuar el ruido común del transporte urbano. El control activo del ruido del transporte urbano se logra manteniendo la ventilación natural. Aunque la atenuación pasiva medida proporcionada al cerrar completamente la ventana siempre excedió la atenuación activa, la diferencia es solo entre 2,22 dB y 6,39 dB SPL promedio de energía.

Aunque el entorno de prueba fue considerablemente ideal, las fuentes de ruido presentadas se midieron en condiciones reales en edificios residenciales. También vale la pena reiterar que el sistema activo permite la ventilación natural, mientras que el flujo de aire está totalmente restringido cuando las ventanas están cerradas. A diferencia de los estudios informados anteriormente con tamaños de apertura limitados y configuraciones voluminosas, este trabajo ha demostrado una reducción global de hasta 10 dB para el ruido típico del transporte urbano para una ventana corrediza de tamaño completo y completamente abierta. El rendimiento de atenuación informado y la configuración del sistema del trabajo anterior se resumen en la Tabla complementaria S1.

Un inconveniente notable del sistema ANC propuesto, en el que las unidades de control activo se distribuyeron a lo largo de la apertura, es la ausencia de control activo por debajo de 300 Hz y la restricción del control entre 300 Hz y 500 Hz.

Este intercambio no deseado se debe a la implementación de pequeños altavoces para reducir la obstrucción visual y minimizar la interrupción del flujo de aire. Como resultado de tales restricciones prácticas de diseño, los sistemas ANC de diseño distribuido para aberturas de fachadas domésticas estarían restringidos en el rango de baja frecuencia, lo que limitaría el potencial de atenuación de ANC al lidiar con el ruido con contenido dominante de baja frecuencia, como el de los aviones a reacción, -por ruido o ruido del transformador. Sin embargo, el ruido del transporte urbano con una energía significativa por encima de 500 Hz, como el ruido del tráfico y de los trenes, se mitigaría de manera efectiva en aproximadamente 10 dB. Según los metanálisis, una reducción de 10 dB en el nivel de exposición al ruido del transporte equivalente podría traducirse en una disminución del 7 % al 17 % en los riesgos para la salud asociados (es decir, hipertensión, cardiopatías isquémicas, incluido el infarto de miocardio)²⁰.

Para un control efectivo del ruido de banda ancha, el enfoque de mínimos cuadrados medios (FxLMS) filtrados hacia adelante x (FxLMS)^{11,21} suele ser el algoritmo de elección en los sistemas ANC en tiempo real²². Los algoritmos más robustos a menudo incurrir en un mayor costo computacional, que aumenta exponencialmente con el número de canales (micrófonos de referencia y de error y fuentes de control). Dado que este documento priorizó la implementación práctica sobre el rendimiento de atenuación máxima, el algoritmo adaptativo FxLMS solo se utiliza para generar un filtro de respuesta de impulso finito (FIR) de coeficiente fijo en

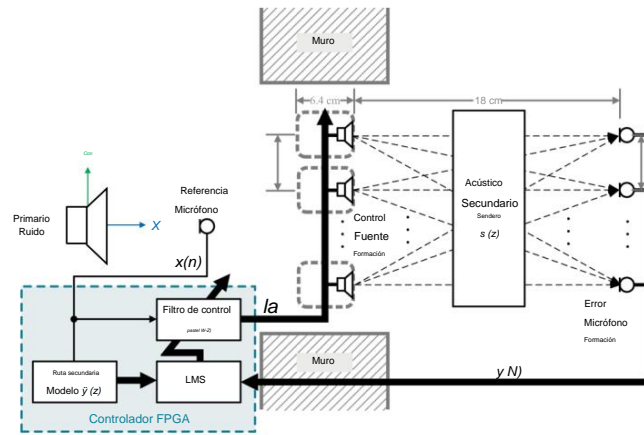


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de control activo en el plano xz, donde el ruido del ruido primario es muestreado por el micrófono de referencia y luego atenuado por la matriz de 24 fuentes de control. Se utiliza una matriz de 24 micrófonos de error para actualizar el filtro adaptativo. Todas las operaciones digitales se ejecutan en el controlador FPGA.

una etapa de formación. Durante el control, las fuentes de control son impulsadas por el filtro fijo y se omiten los micrófonos de error. Vale la pena reiterar que el control activo se logró con un solo micrófono de referencia, filtros fijos pre-entrenados y sin micrófonos de error. Sin embargo, los coeficientes de filtro de control derivados de un ancho de banda de WGN no fueron óptimos, como se demostró en el escenario de ruido de vuelo de la aeronave. Tal como parece, seleccionar de una base de datos de filtros fijos optimizados para funciones específicas de ruido, similar a los auriculares con cancelación de ruido, parece ser la forma más práctica de avanzar^{23–26}. Los métodos para entrenar previamente, seleccionar e incluso cambiar entre estos filtros fijos deben desarrollarse con baja complejidad computacional para adherirse a las restricciones de causalidad²¹, que es un área de investigación en curso.

Métodos

El diagrama de bloques del sistema de control activo se superpone a una vista de la sección transversal del plano xz de la apertura de la ventana, como se muestra en la Fig. 4. Para equilibrar la complejidad computacional y el rendimiento del control, se empleó el algoritmo FxLMS tradicional, donde el las presiones de la suma de los cuadrados se minimizaron en las posiciones del micrófono de error. El ruido de incidencia de la fuente primaria fue muestreado por el micrófono de referencia $J=1$ como la señal $x(n)$, que es filtrada por filtros FIR $w(z)$ para producir un conjunto de señales de control $K=24$ $y(n)$. El conjunto de altavoces de control está controlado por $y(n)$ para minimizar las señales de error $M=24$ $e(n)$ en los micrófonos de error.

La retroalimentación de $e(n)$ y una $x(n)$ alineada en el tiempo actualiza el filtro de control muestra por muestra en la siguiente ecuación de actualización

$$e(n) = \sum_{k=1}^M e_k(n) \quad (1)$$

donde $\mathbf{x}^T(n)$ es la matriz de señal de referencia alineada en el tiempo, $\mathbf{s}^T(n)$ es una estimación de la ruta secundaria real $s(z)$ entre la fuente de control y el micrófono de error, γ es el tamaño del paso, y \otimes denota la convolución del producto de Kronecker. Las rutas secundarias estimadas se derivaron a través de mediciones utilizando el enfoque de mínimos cuadrados medios²¹.

En la etapa de entrenamiento, la fuente primaria de ruido es impulsada por una señal WGN de banda limitada (100 Hz a 1 kHz) y se permitió que el sistema de control se adaptara de acuerdo con la ecuación. (1). Una vez que el filtro de control converge a su estado estable, cuando la reducción de ruido estaba en su punto máximo, se almacenan los coeficientes del filtro. En la etapa de control, la adaptación cesa y las fuentes de control son impulsadas por los coeficientes fijos como

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{w} \otimes \mathbf{x}(n) \quad (2)$$

donde \mathbf{w} es el vector de coeficientes apilados de K filtros de control derivados de la etapa de entrenamiento con la señal WGN de banda limitada. Por lo tanto, no hay retroalimentación de los micrófonos de error. El algoritmo FxLMS se implementó de manera eficiente en una matriz de puertas programables de campo (FPGA) utilizando la arquitectura de múltiples ramas paralelas con plegado²⁷. Para lograr una resolución suficiente, tanto los filtros de control como las estimaciones de la ruta secundaria se establecieron en 200 toques, lo que restringió la frecuencia de muestreo máxima a 25 kHz en el FPGA utilizado (Xilinx Kintex-7 7K325T). Para minimizar la latencia, se utilizaron convertidores de analógico a digital (ADC) de registro de aproximación sucesiva (SAR) de 16 bits y convertidores de digital a analógico (DAC) de cadena de 16 bits. Además, el sobremuestreo también eliminó la necesidad de filtros anti-aliasing, lo que se habría sumado a la latencia general. Las 24 fuentes de control también fueron impulsadas por amplificadores de potencia de clase AB de baja latencia.

Para evaluar el rendimiento del control activo en el interior de la sala de prueba, se distribuyeron en el interior un total de 18 micrófonos de presión (GRAS 40PH, GRAS, Dinamarca), como se muestra en la Fig. 5. La atenuación global en el interior de la sala se evaluó principalmente por el promedio de energía SPL, SPLEA, de 7 micrófonos, como se muestra en la Fig. 5, dado por

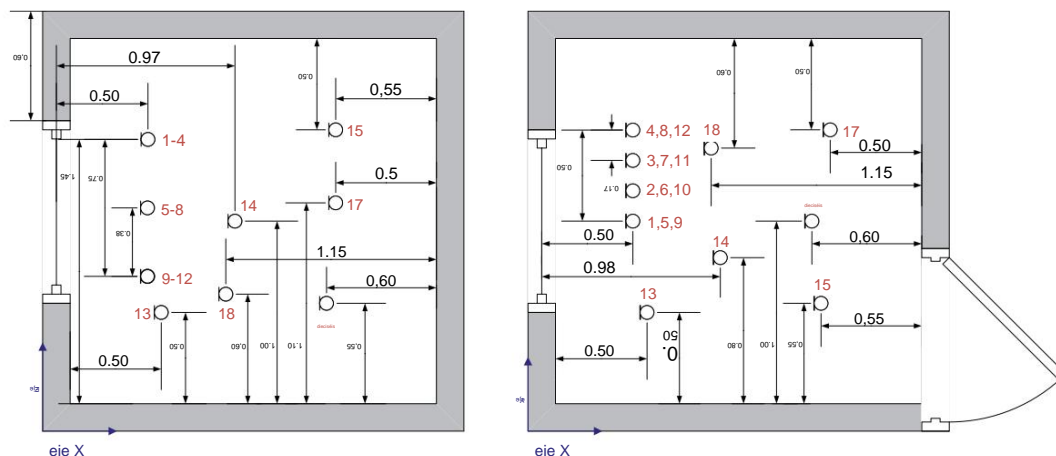


Figura 5. Posiciones del micrófono de observación en el plano xz y xy. Los micrófonos 1 y 13 a 18 se utilizan en los cálculos del nivel de presión de sonido promedio de energía, y los micrófonos 1 a 12 se usan en los cálculos del nivel de presión de sonido promedio planar²⁸.

$$SPL_{E_{TA,i}} = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SPL_{TA,i} / 10 \quad (3)$$

donde $SPL_{TA,i}$ es el SPL promediado en el tiempo del i -ésimo micrófono, i es un elemento de $N = \{1, 13, 14, 15, 16, 17, 18\}$. Los micrófonos 1 a 12 forman un plano rectangular de micrófonos alineados con la abertura abierta de la ventana deslizante muy cerca de la matriz plana de 24 micrófonos de error. Estos 12 micrófonos contribuyen a los cálculos del nivel de presión de sonido promedio planar, SPL_{PA} , dado por

$$SPL_{Bien} = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SPL_{TA,i} / 10 \quad (S1)$$

donde $SPL_{TA,i}$ es el SPL promediado en el tiempo del i -ésimo micrófono, i es un elemento de $N = \{1, 2, \dots, 12\}$

Conclusiones

Se ha presentado un método para atenuar el ruido del transporte urbano que se propaga a través de una ventana completamente abierta de tamaño completo en una habitación. Se ha logrado una reducción de hasta 10dB en el nivel de presión sonora promediado en el espacio y el tiempo para el ruido típico del transporte urbano, lo que indica una reducción global del ruido, al mismo tiempo que se preserva la ventilación natural. La implementación del control activo en el sistema de ventana fue similar a una versión multicanal de la utilizada en los auriculares ANC de consumo, con cancelación de ruido basada en un conjunto de filtros predeterminados, sintonizados para eliminar el ruido en un ancho de banda específico. Aunque el estudio indica el potencial de esta aplicación, aún quedan cuestiones por abordar en futuros estudios de implementación. Por ejemplo, las estrategias para seleccionar, pre-entrenar y cambiar entre estos filtros fijos sin incurrir en una gran sobrecarga computacional, todavía se están buscando. Además, sin sensores de error, el rendimiento del control no se puede monitorear ni corregir por ningún desajuste, aunque se podrían explorar técnicas de micrófono remoto o virtual.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a pedido razonable.

Recibido: 30 de marzo de 2020; Aceptado: 19 de mayo de 2020;

Publicado online: 09 July 2020

Referencias

- De Salis, MHF, Oldham, DJ y Sharples, S. Estrategias de control de ruido para edificios con ventilación natural. Construir. Reinar. **37**, 471–484 (2002).
- Tang, S.-K. Una revisión de los dispositivos de control de ruido de fachadas que permiten la ventilación natural para ciudades de gran altura congestionadas. aplicación ciencia **7**, 175 (2017).
- Tong, YG, Tang, SK, Kang, J., Fung, A. y Yeung, MKL Estudio de campo a gran escala de la transmisión de sonido a través de ventanas plenum. aplicación acústico **89**, 244–253 (2015).
- Tang, SK Reducción de la transmisión de sonido a través de las ventanas del pleno mediante la incorporación de una serie de cilindros rígidos. J. Sonido Vibración. **415**, 25–40 (2018).
- Lam, B., Shi, C., Shi, D. y Gan, W.-S. Control activo del sonido a través de ventanas abiertas de tamaño completo. Construir. Reinar. **141**, 16–27 (2018).
- Wang, S., Tao, J. y Qiu, X. Control de la radiación de sonido a través de una abertura con altavoces secundarios a lo largo de sus límites. ciencia Rep. **7**, 13385 (2017).
- Kwon, B. & Park, Y. Control de ruido interior con un sistema de ventana activa. aplicación acústico **74**, 647–652 (2013).
- Murao, T. & Nishimura, M. Estudio básico sobre blindaje acústico activo. J. Medio Ambiente. Ing. **7**, 76–91 (2012).

9. Murao, T., Nishimura, M., Sakurama, K. & Nishida, S. Estudio básico sobre blindaje acústico activo (Mejora de la reducción de ruido rendimiento en el rango de baja frecuencia). *mecánico Ing. J.* 1, EPS0065–EPS0065 (2014).
10. Xiaojun, Q. Introducción a las barreras de sonido virtuales, <https://doi.org/10.1201/9781351168045> (CRC Press, 2019).
11. Elliott, S.J., Jung, W. & Cheer, J. El seguimiento de la cabeza extiende el control activo local del sonido de banda ancha a frecuencias más altas. *ciencia representante* 8, 5403 (2018).
12. Elliott, S.J. Procesamiento de señales para control activo. (Prensa Académica, 2001).
13. Elliot, S.J., Nelson, P.A., Stothers, I.M. y Boucher, C.C. Experimentos en combate sobre el control activo del ruido de cabina inducido por hélices. *J. Sonido Vibración*. **140**, 219–238 (1990).
14. Samarasinghe, P.N., Zhang, W. y Abhayapala, T.D. Avances recientes en el control activo del ruido dentro de las cabinas de los automóviles: hacia automóviles más silenciosos. *Proceso de señal IEEE. revista* **33**, 61–73 (2016).
15. Lam, B., Elliott, S., Cheer, J. y Gan, W.-S. Límites físicos en el rendimiento del control activo del ruido a través de ventanas abiertas. *aplicación acústico* **137**, 9–17 (2018).
16. Wang, S., Tao, J., Qiu, X. & Pan, J. Mecanismos de control activo de la radiación de sonido desde una abertura con fuentes secundarias instaladas en el límite. *J. Acústica. Soc. Soy.* **143**, 3345–3351 (2018).
17. Tao, J., Wang, S., Qiu, X. & Pan, J. Rendimiento de una barrera de sonido virtual planar independiente en la apertura de un rectangular recinto. *aplicación acústico* **105**, 215–223 (2016).
18. Oficina Regional para Europa de la Organización Mundial de la Salud. Directrices de ruido ambiental para la región europea. (Oficina Regional para Europa de la Organización Mundial de la Salud, 2018).
19. EN ISO 16283-3 Acústica. Medición de campo del aislamiento acústico en edificios y de elementos de construcción. Parte 3: Sonido de fachada. aislamiento. (Organización Internacional de Normalización, 2016).
20. Basner, M. et al. Efectos auditivos y no auditivos del ruido sobre la salud. *Lancet (Londres, Inglaterra)* **383**, 1325–32 (2014).
21. Kuo, S.M. & Morgan, D.R. Sistemas activos de control de ruido: algoritmos e implementaciones DSP. (Wiley, 1996).
22. Kajikawa, Y., Gan, W.-S. & Kuo, S.M. Avances recientes en el control activo del ruido: problemas abiertos y aplicaciones innovadoras. *APSIPA Trans. Información de la señal Proceso.* 1, e3 (2012).
23. Shi, D.Y., Lam, B. y Gan, W.-S. Un nuevo algoritmo de control de ruido activo selectivo para superar el problema de implementación práctica. en 2018 Conferencia internacional IEEE sobre procesamiento de señales, voz y acústica (ICASSP) 1130–1134, <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461458> (IEEE, 2018).
24. Shi, D., Gan, W.-S., Lam, B. y Wen, S. Control de ruido activo de filtro fijo selectivo de alimentación directa: algoritmo e implementación. *Trans. IEEE/ACM. Audio, Voz, Idioma. Proceso.* **28**, 1479–1492 (2020).
25. Wen, S., Gan, W.-S. & Shi, D. Un algoritmo de control de ruido activo selectivo mejorado basado en la transformada empírica Wavelet. en ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 1633–1637, <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9054452> (IEEE, 2020).
26. Wen, S., Gan, W.-S. & Shi, D. Uso de la transformada wavelet empírica para acelerar el sistema de control de ruido activo filtrado selectivo. *J. acústico Soc. Soy.* **28**, 1479–1492 (2020).
27. Shi, D., Gan, W., He, J. y Lam, B. Implementación práctica del algoritmo de mínimos cuadrados medios filtrados x multicanal basado en la arquitectura de ramas paralelas múltiples con plegado para activos a gran escala. *Control de ruido. Trans. IEEE. Integración a muy gran escala. sist.* **28**, 940–953 (2020).
28. Lam, B. Control activo del ruido a través de ventanas abiertas, <https://doi.org/10.32657/10220/48090> (Universidad Tecnológica de Nanyang, 2019).

Agradecimientos

Esta investigación cuenta con el apoyo del Ministerio de Desarrollo Nacional de Singapur y la Fundación Nacional de Investigación, Oficina del Primer Ministro en el marco del Programa de Investigación de Ciudades del Mañana (CoT) (CoT Award No. COT-V4-2019-1). Todas las opiniones, hallazgos y conclusiones o recomendaciones expresadas en este material pertenecen al autor(es) y no reflejan los puntos de vista del Ministerio de Desarrollo Nacional y Fundación Nacional de Investigación de Singapur, Oficina del Primer Ministro, Singapur.

Contribuciones de autor

WSG, MN y SJE concebido y supervisado el estudio. BL escribió el manuscrito con el aporte de los coautores, realizó las simulaciones numéricas y diseñó la sala de maquetas. DS construyó el sistema de control activo experimental. DS y BL realizaron los experimentos y analizaron los resultados. Todos los autores revisaron el manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener intereses contrapuestos.

Información Adicional

Hay **información complementaria** disponible para este artículo en <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66563-z>.

La correspondencia y las solicitudes de materiales deben dirigirse a BL

La información sobre reimpresiones y permisos está disponible en www.nature.com/reprints.

Nota del editor Springer Nature se mantiene neutral con respecto a los reclamos jurisdiccionales en mapas publicados y afiliaciones institucionales.



Acceso abierto Este artículo tiene una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0, que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor o autores originales y a la fuente. proporcione un enlace a la licencia de Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y su uso previsto no está permitido por la regulación legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Te Autor(es) 2020