

Teoría y práctica de la medida de tiempos de reverberación cortos

T. Zamarreño, J. Algaba

Dpto. Física Aplicada Univ. Sevilla. Reina Mercedes s/n. 41012 - Sevilla

Introducción

No es tan extraño, como podría parecer en principio, encontrarse con situaciones en las que el tiempo de reverberación es tan corto que no puede medirse de forma precisa, sobre todo a bajas frecuencias, en bandas de 1/3 de octava, utilizando las técnicas habituales de registro y análisis de las curvas de caída. Estudios de audición, de grabación, salas de teleconferencia, salas de control de radio y TV... son ejemplos típicos en el ámbito de la acústica de salas. Problemas similares aparecen al analizar estructuras mecánicas sometidas a algún tipo de tratamiento amortiguador.

La norma internacional ISO 3382 (1) (en fase de revisión), o la correspondiente UNE (2), describen las medidas de campo de tiempo de reverberación, pero en ellas no se dan recomendaciones para el caso de tiempos de reverberación muy pequeños, aprovechando las ventajas que ofrece la instrumentación digital, es posible (3), subsanar los problemas que se presentan y que analizaremos a continuación.

La teoría

En el método tradicional se utiliza una fuente de ruido de banda ancha, de forma que, cuando la fuente se apaga, se registra la curva de extinción. Esta curva puede tener fuertes fluctuaciones debido al carácter estocástico de la señal de excitación y, en consecuencia, deben de promediarse, de forma coherente, varias curvas de extinción en cada posición de medida. Ampliando el proceso de promediado para disponer de un promedio espacial, es posible obtener curvas de extinción

más regulares a partir de las cuales se evalúa el tiempo de reverberación característico del recinto.

Otro método, ampliamente utilizado, hace uso de un disparo como señal de excitación (señal impulsiva), obteniéndose así la respuesta del recinto al impulso. Como demostró Schröder, (4), la curva de extinción del recinto puede calcularse mediante un proceso de integración hacia atrás del cuadrado de esta respuesta al impulso. Una de las ventajas fundamentales del método es que se eliminan las fluctuaciones estocásticas de la señal. Así, una excitación en cada punto es suficiente para proporcionar una curva de extinción equivalente a la curva promedio, obtenida mediante infinitas excitaciones, utilizando ruido interrumpido. También en este caso será recomendable realizar el promediado espacial que indicábamos antes.

Limitaciones causadas por los filtros paso de banda

Las medidas de tiempos de reverberación se analizan usualmente en bandas de 1/1 ó 1/3 de octava. Sin embargo tales filtros pueden influir sobre la medida debido al amortiguamiento típico de su respuesta, que puede dar lugar a una ondulación característica de la curva de caída. De acuerdo con la referencia (5), se obtendrán curvas de caídas adecuadas, sólo si

$$BT_{60} > 16 \quad (1)$$

donde B es ancho de banda del filtro y T_{60} es el tiempo de reverberación a medir. Si no se cumple el requisito anterior el valor obtenido para T_{60} puede ser menor o mayor que el verdadero, es decir, no se puede predecir el signo del error cometido.

Sin embargo, en la referencia (6) se demuestra que, si se aplica a los filtros la señal invertida en el tiempo, se obtiene una distorsión mucho menor en la curva de caída. Concretamente, se encuentra que, si no se consideran los 5 primeros dB de la caída en la evaluación, el requisito (1) puede sustituirse por

$$BT_{60} > 4 \quad (2)$$

Para medidas en bandas de 1/3 de octava, ello significa que, el límite para resultados aceptables a 100 Hz, pasa de 0.7 a 0.17 s cuando la señal se aplica a los filtros invertida en el tiempo.

La ventaja que se obtiene al invertir en el tiempo la señal se debe al carácter asimétrico de la respuesta impulsiva de los filtros. En la Fig. 1 aparece una curva de respuesta típica de un filtro de 1/3 de octava. La cola de la respuesta da lugar a una caída a medir para disponer de resultados fiables.

Limitaciones debidas al detector

Cuando se pretende medir tiempos de reverberación muy pequeños, es importante elegir el intervalo de promediado del detector lo suficientemente corto como para evitar su influencia en la curva de caída. Si se utiliza un dispositivo con detector exponencial (constante de tiempo τ_d), se ha demostrado, (5), que el tiempo de promediado T_{pr} debe de cumplir la condición:

$$T_{pr} = 2 \tau_d < T_{60} / 14 \quad (3)$$

donde T_{60} es el tiempo de reverberación a medir. Si no se cumple este requisito, el valor medido será mayor que el real.

Sin embargo, puesto que la respuesta del detector es mucho más rápida cuando la señal crece que cuando la señal decrece, también ahora resulta ventajoso aplicar la señal invertida en el tiempo. Si se hace así, de acuerdo con (6), la condición (3) se puede reemplazar por:

$$T_{pr} = 2 t_d < 8T_{60} / T \quad (4)$$

Posteriores investigaciones (7), han puesto de manifiesto que el tiempo de reverberación difiere en menos del 1% del valor correcto si se cumplen las condiciones (1)-(4) y en la evaluación de desprecian los 5 primeros dB de la caída.

Limitaciones inherentes al método del ruido interrumpido

Hemos indicado más arriba la necesidad de promediar temporalmente, para el método del ruido interrumpido, con el fin de obtener curvas de caída regulares que permiten una descripción más precisa de los procesos de reverberación inherentes al recinto.

El periodo de promediado del detector está relacionado con la anchura del filtro pasobanda, de tal modo que, para obtener resultados significativos, ha de ser $BT_{pr} > 1$. Esta relación, que es bien conocida para el análisis de señales estacionarias, resulta, al menos a primera vista, difícil de cumplir en los procesos de extinción. Sin embargo la posibilidad de promediar las caídas permite dar una solución al problema: utilizando esta técnica, el número de excitaciones, N_{exc} , debe ser tal que se cumpla la condición anterior, es decir:

$$N_{exc} \geq 1 / BT_{pr} \quad (5)$$

Para minimizar el número de excitaciones, el tiempo de promediado debe de ser tan grande como sea posible, siempre que se cumplan las condiciones (3) ó (4). Examinando estos requisitos, podemos observar que es posible elegir un intervalo de promediado mayor si el análisis de la señal se realice por inversión en el tiempo que si se hace de forma directa, lo que constituye una ventaja adicional del análisis por inversión temporal.

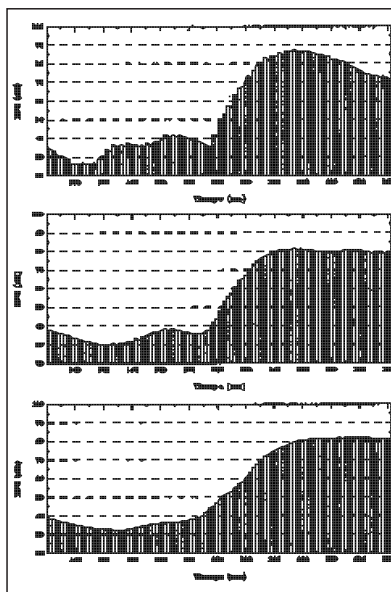


Figura 2

En el caso del método de la respuesta al impulso integrada, puesto que equivale a utilizar un tiempo de promedio muy largo, como ya hemos señalado, no es relevante considerar la condición (5), de modo que es suficiente con una excitación en cada punto. No obstante es conveniente realizar el promedio espacial.

Limitaciones debidas al intervalo de muestreo

Una de las ventajas del promediado exponencial es que es posible elegir de forma independiente el intervalo de muestreo, T_m , y el promediado, T_{pr} . Si deseamos disponer de, al menos, n muestras para la línea de regresión en un rango de D dB, sobre la curva de extinción, debe cumplirse que:

$$T_m < T_{60} D / 60n \quad (6)$$

Así, si requerimos 5 puntos para la regresión (el mínimo estricto sería 2) en un intervalo de 20 dB para tiempos de reverberación $T_{60} > 90$ ms, tendríamos que elegir un $T_m = 6$ ms.

La práctica

El recinto

Las medidas experimentales se han realizado en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica del Centro Na-

cional de Medios de Protección de Sevilla, equipada para los ensayos subjetivos descritos en la Norma UNE 74-011-91: silla, cajas acústicas, instrumentación... En ésta se fija un valor máximo admisible de 1.6 s para el tiempo de reverberación del recinto en cada una de las bandas de 1/3 de octava cuyas frecuencias centrales son 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz.

La cámara tiene un volumen útil aproximado de 5,5x4x4 m³. Está constituida por un paralelepípedo de hormigón montado, dentro del laboratorio, sobre elementos elásticos y recubierto en su interior por cuñas de fibra de vidrio de 80 cm de longitud.

La instrumentación

Las medidas se ha llevado a cabo utilizando el método del ruido interrumpido y el de la respuesta al impulso integrada, sustituyendo, en este caso, el amplificador y el altavoz del esquema de la Fig. 2 por una pistola de fogeo.

La respuesta temporal a la excitación, de ruido o impulsiva, se grabó digitalmente en disco con el analizador Brüel & Kjaer 2133 para su análisis posterior por inversión temporal. Al mismo tiempo, se registraban magnéticamente en un DAT Sony PC-204, con un doble objetivo: por un lado disponer de una copia de las señales y, por otro, si se hiciera necesario, reproducir la señal a una velocidad más lenta (la mitad de la de registro) con el fin de aumentar así la duración de la caída.

El proceso de medida y análisis estaba automatizado mediante las correspondientes autosecuencias para el analizador.

El tiempo de promediado en el detector, $T_{pr} = 1/128$ s, se ha elegido de modo que el límite para medidas fiables del tiempo de reverberación es 13.7 ms, ec. (4).

Con el fin de cumplir con el requisito impuesto por (5) para la banda de 1/3 de octava de interés más baja, 100 Hz, se han utilizado 6 excitaciones por punto, puesto que sólo se ha hecho uso del análisis de la señal invertida temporalmente, pues los valores esperados de T_{60} eran excesivamente cortos y la restricción (2) resulta más favorable que la (1).

Se han utilizado 2 posiciones de la fuente con tres de micrófono para cada una de ellas. En la Fig. 3 se indican las posiciones de la fuente (B&K E5001) y del micrófono (B&K 4165), que se situó, aproximadamente, a la altura del oído del sujeto: 1 m sobre la superficie útil de la cámara.

El ruido era generado e interrumpido por el propio analizador, lo que facilita promediar de forma coherente, tanto temporal como espacialmente, diversas caídas.

En el caso de la respuesta al impulso, éste se ha producido mediante disparos de una pistola de foguero de 9 mm, efectuados junto a la puerta (para eviatar la caída de los casquillos hacia las cuñas del suelo). El micrófono se situó, sucesivamente, en los puntos M1, M2 y M3 de la Fig. 3.

Los resultados

En la Fig. 4 se muestran los espectros típicos del ruido de fondo y de la señal correspondientes a los ensayos de ruido interrumpido. Se aprecia que, en todas las bandas de interés, la relación señal/ruido es del orden de los 50 dB.

En la Fig. 5 se muestra, en el dominio temporal, un proceso de extinción típico en el recinto tras interrumpir bruscamente la emisión de la fuente y en la Fig. 6 se hace lo propio en el caso de la excitación impulsiva.

Los tiempos de reverberación se han evaluado a partir de la curva de caída promediada temporalmente (6 caídas/punto) y especialmente (en total 2 posiciones de fuente y tres posicio-

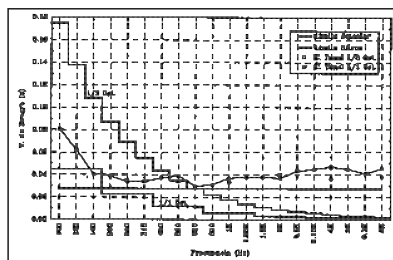


Figura 2

nes de micrófono por cada una de ellas). En este proceso se ha utilizado una regresión lineal con un intervalo de 25 dB, comenzando 5 dB por debajo del nivel estacionario de la señal.

En la Fig. 7, para la banda de 100 Hz, se muestra un proceso de extinción típico (a), el promedio temporal de 6 caídas en un punto (b) y el promedio espacio-temporal (c) de todos los puntos. Un comportamiento similar se observa para el método del impulso integrado.

Finalmente, en la Fig. 8 aparecen los valores medidos del tiempo de reverberación en función de la frecuencia y los límites, ya discutidos, impuestos por los filtros y el detector para disponer de medidas fiables.

Conclusiones

En primer lugar, destacaremos la gran ventaja que supone invertir la señal en el tiempo antes de aplicarla a los filtros: a 100 Hz, los valores más pequeños que podemos medir, en bandas de 1/3 de octava, pasan 0.7 a 0.17 s.

Si además, se hace elección adecuada del periodo de promediado en el detector, del de muestreo y del número de excitaciones (en el método del ruido interrumpido) para promediar temporalmente es posible medir tiempos de reverberación tan bajos como los presentados aquí.

Así, para frecuencias superiores a 400 Hz los valores medidos superan los límites impuestos por los filtros y el detector (Fig. 8), lo que nos permite aceptar como válidos los resultados obtenidos. Como para frecuencias menores que ésta, los valores medidos son algo inferiores a los límites impuestos por los filtros de 1/3 de octava, se repitió el análisis, a partir de la señal temporal registrada en disco, con un ancho de banda de los filtros de 1/1 octava. Vemos que los resultados obtenidos (puntos negros, Fig. 8) se corresponden con los valores medidos en bandas de 1/3 de octava y ahora, prácticamente para todas las bandas, los resultados se sitúan por encima de los límites impuestos por los filtros.

En consecuencia, teniendo en cuenta la precisión del método utilizado, podemos concluir rotundamente, y sin ningún género de dudas, que para todas las bandas de interés señaladas anteriormente, el recinto cumple sobradamente, en lo que a reverberación se refiere, los requisitos impuestos por la UNE 74-011-91. De hecho, los valores medidos sólo representan (en el peor de los casos, 125 Hz) el 3.75% del valor máximo permitido y los valores típicos el 2.5% del mismo.

Bibliografía

- (1) ISO 3382 (1975): Acoustics Measurements of Reverberation Time in auditoria.
- (2) UNE 74-043-80: Medida del Tiempo de Reverberación en auditorios.
- (3) B. RASMUSEN, J. H. TINDEL & H. HENRIKSEN: Design and Measurement of Short Reverberation Times at Low Frecuencias in Talk Studios. J. Audio Eng. Soc., vol. 39, N° 1/2, pp. 47-57. 1991
- (4) M. R. SCHROEDER: New Method of Measuring Reverberation Time. J. Acoust. Soc. Am. 37, pp. 409-412. 1965
- (5) F. JACOBSEN: A note on Acoustic Decay Measurements. J. Sound Vib. 115, pp. 163-170. 1987
- (6) F. JACOBSEN & J. H. RINDELL: Time Reversed Decay Measurements. J. Sound Vib. 117, pp. 187-190. 1987
- (7) B. RASMUSSEN & F. PETERSEN: An Automated Instrumentation for Measurements of Very Short Reverberation Times. Westpac III Conf., Shangai, China. Proceedings, pp. 929-932. 1988