

RESPUESTA EN FRECUENCIA DE ALTAVOCES SIN UTILIZAR CÁMARA ANECOICA

Odín Moreno Amezcua, Santiago. J. Pérez Ruiz, Antonio Pérez López
 Laboratorio de acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico
 Universidad Nacional Autónoma de México
 jesperaleph.cinstrum.unam.mx
 Dirección
 Teléfono, fax y dirección de correo electrónico

Resumen: Para medir la repuesta en frecuencia de los altavoces es necesario contar con un recinto que simule las condiciones de campo libre, esto obliga a contar con una cámara anecoica con volumen suficientemente grande para lograr una frecuencia de corte por debajo de los 20 Hz. Una cámara de este tipo es costosa, por lo por lo que es deseable otros métodos alternativos de medición. En el presente trabajo se presenta un método que consiste en determinar la respuesta en frecuencia en dos condiciones: campo cercano y campo lejano. Estas respuestas se obtienen mediante la respuesta al impulso utilizando secuencias de máxima longitud (MLS, por sus siglas en inglés). Tanto la eliminación de reflexiones como la condición de empalme de las dos respuestas en frecuencia, se realiza utilizando ventanas de truncamiento (Hanning con meseta plana). Este método permite realizar la medición en un recinto parcialmente reverberante.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es mostrar un método para obtener la respuesta en frecuencia de un altavoz, sin utilizar instalaciones especiales como pudiera ser una cámara anecoica, midiendo, como punto de partida, su respuesta al impulso utilizando Secuencias de Máxima Longitud (MLS). El método se basa en la idea propuesta por Struck et al. [1] pero utilizando secuencias MLS y procesando todo en una PC. El sistema de secuencias MLS utilizado, no es ninguno de los existentes en el mercado, es uno desarrollado en el propio CCADET.

2. CONCEPTO DE MLS

Las Secuencias de Máxima Longitud (Maximum Length Sequences, MLS) son básicamente una secuencia de pulsos con patrón pseudo-aleatorio, que se repiten en un periodo $L = 2^n - 1$. Donde n es un entero.

Utilizando las técnicas MLS se puede obtener la respuesta al impulso sin los problemas de una relación señal a ruido baja, como es característico al emplear impulsos de corta duración. Una vez obtenida la respuesta al impulso, se puede separar, mediante ventaneo, la señal directa de los reflejos y de este modo la medición puede hacerse en un recinto parcialmente reverberante.

Estas señales de excitación tienen como característica principal que la autocorrelación es aproximadamente una señal delta.

Si tomamos en cuenta esta propiedad y de acuerdo con la teoría de los sistemas dinámicos lineales, la correlación de entrada salida $\Phi_{xy}[n]$ de un sistema lineal invariante en el tiempo se define como [2]:

$$\Phi_{xy}[n] = \Phi_{xx}[n] * h[n] \equiv \sum_{k=0}^{N-1} x(k-n)_y(k) \quad (1)$$

Donde: $\Phi_{xx}[n]$ corresponde a la autocorrelación de la señal de entrada $x[n]$,

$h[n]$ es la respuesta al impulso y * indica convolución.

Ahora, si $\Phi_{xx}[n]$ es igual a una señal delta, se tiene que la respuesta al impulso es proporcional a la función de correlación entre la entrada y la salida $\Phi_{xy}[n]$. En la figura 1 se presenta lo mencionado.

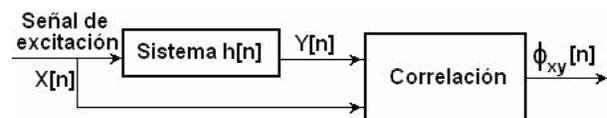


Figura 1. Método para medir la respuesta al impulso a partir de la función de correlación entrada salida

Así la respuesta al impulso de un sistema puede obtenerse calculando la correlación cruzada entre las señales de entrada y salida (esta operación se efectúa mediante la transformada Hadamar que es un algoritmo de cálculo más rápido); después se puede procesar la señal en tiempo, multiplicando la respuesta impulso con una ventana Hanning modificada, para eliminar el efecto de ponderar excesivamente la parte central de la ventana, de este modo eliminamos cualquier señal que no sea la directa. Finalmente se obtiene la magnitud de respuesta en frecuencia aplicando la Transformada de Fourier.

Las técnicas MLS tienen ventajas comparadas con otras formas de medición, como son:

- Presenta un espectro de potencia prácticamente plano,
- Desecha las componentes de DC de la señal muestreada.
- La relación señal a ruido es muy alta.
- Al utilizar la correlación cruzada en el cálculo de la respuesta al impulso, se elimina el ruido de fondo (no correlacionado con MLS) así que las medidas pueden ser realizadas también en ambientes relativamente ruidosos.
- Al promediar se incrementa la relación señal a ruido.

Dentro de las precauciones que se deben tomar al utilizar MLS son:

- La duración de la MLS debe ser mayor que la respuesta al impulso del sistema por analizar. De otro modo, el error de circularidad de la convolución introducirá un error significativo.
- El sistema bajo estudio debe ser invariante en el tiempo, al menos durante el intervalo de la medición.

3. OBTENCIÓN DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

Para obtener la respuesta en frecuencia de un altavoz lo que se hace, es excitarlo con una señal que contenga toda la gama de frecuencias, en la gama de audio, para observar en cuales y cómo es capaz de responder. Para ello le aplicamos una secuencia MLS que satisface lo anterior.

Entonces si se tuviera un altavoz que reproduce fielmente todo lo que se le entrega, lo que presentaría a su salida es el mismo impulso o sea que respondió a todas las frecuencias, evidentemente esto no es posible en la realidad por lo que va a experimentar otro comportamiento.

Al utilizar las MLS se obtiene un archivo de datos que contiene la variación de amplitud del altavoz en función del tiempo, es decir cómo es su comportamiento por la señal estímulo. Esa manera de responder se traduce en una forma de movimiento del cono debido a la presencia de la excitación, de ahí que se le llame respuesta al impulso y esta forma de onda contiene información de las frecuencias que fue capaz de reproducir con su amplitud correspondiente, por ello es que se debe evaluar su transformada de Fourier y así ver el espectro.

4. RESPUESTA EN CAMPO CERCANO Y LEJANO

La respuesta al impulso se mide tanto en campo cercano como en campo lejano, combinando ambas es posible obtener una respuesta en frecuencia en toda la gama de frecuencias. La colocación del micrófono de medición es crítica, ya que hay que evitar la influencia del recinto. En campo cercano la distancia del micrófono debe ser cuando más $0.11a$, donde a es el radio del altavoz [3].

Cuando se mide en campo lejano se hacen las siguientes consideraciones;

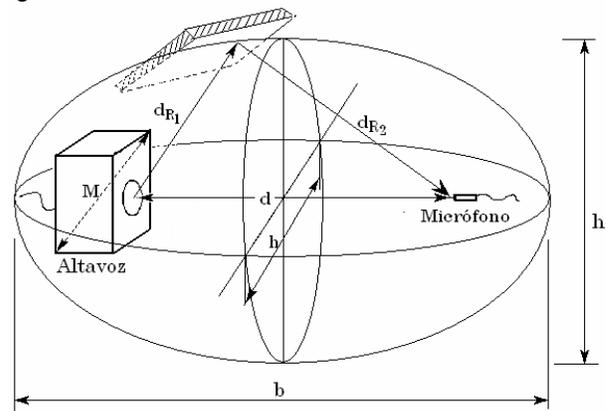


Figura 2. Medición en campo lejano.

En campo lejano el micrófono se sitúa a una distancia d como se muestra en la figura 2. Observe que además de la trayectoria del sonido directo (que recorre d), hay otra que corresponde a la primera reflexión (que recorre d_{R1} y d_{R2}), esto marca

un zona como elipse donde se puede llevar a cabo la medición. Se considera que esta distancia debe tener como máximo un valor de $L/2$ en donde L es la máxima longitud del recinto.

Si la superficie de reflexión se colocara tangente a la elipse se tendría la menor trayectoria para que llegara el primer reflejo, fuera de esa posición cualquier señal rebotada llegará después que ésta, por lo que considerar esa posición es muy importante porque sabemos que primero llegará el sonido directo y posteriormente la reflexión que no debe ser considerada para la medición de respuesta en frecuencia, por ello se recurre al ventaneo con una ventana con respuesta similar a la que se aprecia en la figura 3.

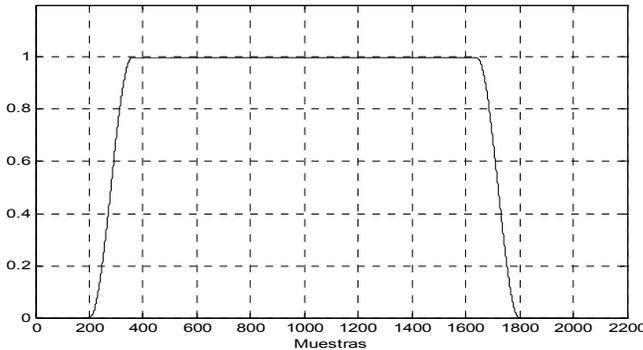


Figura 3 Ventana Hanning con meseta plana para remover reflexiones del impulso.

La ventana utilizada es una ventana híbrida cuyas curvas de subida y bajada corresponden a una ventana Hanning que tendrán una duración del 10% para la subida y 10% para la bajada del tiempo que dure la porción de impulso a considerar y sirven para suavizar la entrada y salida de nivel de la señal. El 80% restante contiene la información más importante de esa señal impulsiva-

Los ceros al principio evitan que se tome en consideración el ruido que pueda existir antes que se presente la señal importante. Los ceros posteriores permiten eliminar los reflejos que se siguen a esta última.

Una vez que se obtengan las respuestas en campo lejano y cercano se procede a empalmarlas en una sola. Para hacerlo, hay que considerar que existirá un intervalo de frecuencias de traslape donde se ubicara el punto de empalme

En la figura 5 se muestra esta zona de empalme, Observe que la respuesta de campo cercano tiene

mayor nivel, debido a que el micrófono se encuentra muy cerca del altavoz.

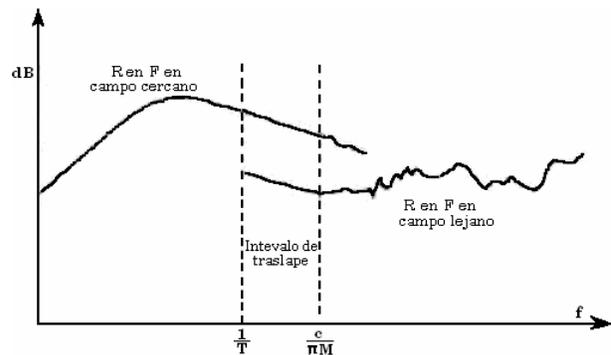


Figura 4. Intervalo de frecuencias de traslape entre campo lejano y cercano.

En este intervalo de frecuencias se puede escoger una frecuencia en común como punto de unión y se recomienda que sea una en donde exista la menor diferencia de nivel considerando la distancia de medición entre las dos condiciones.

Para conocer ese punto se ubican las frecuencias Δf , f_{ka} y se obtiene el campo lejano en términos del campo cercano en ese intervalo por medio de:

$$f_{ka} = \frac{c}{2\pi a} \tag{2}$$

$$\Delta f = \frac{c}{d_R - d} \tag{3}$$

$$H_{FF}(f) = \frac{H_{NF}(f)a}{2d} = H_{NF}(f) - 20 \log_{10} \frac{2d}{a} \tag{4}$$

Radiación en espacio 2π

$$H_{FF}(f) = \frac{H_{NF}(f)a}{4d} = H_{NF}(f) - 20 \log_{10} \frac{4d}{a} \tag{5}$$

Radiación en espacio 4π

- donde: c es la velocidad del sonido.
- a es el radio del altavoz (woofer).
- d_R es la distancia que recorre reflexión más temprana.
- d es la distancia del micrófono
- H_{FF} es el campo lejano
- H_{NF} es el campo cercano

Con ello se puede ver cual sería el punto que menos difiere y así obtener una respuesta en frecuencia final.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para obtener la respuesta al impulso utilizando MLS se utilizó el siguiente equipo:

- 1 Bafle Boston Electronics de dos vías.
- 1 Micrófono de condensador de medición.
- 1 Amplificador Profesional, Yamaha AX-380.
- 1 Amplificador de Instrumentación, B&K 2636.
- Cables de conexión

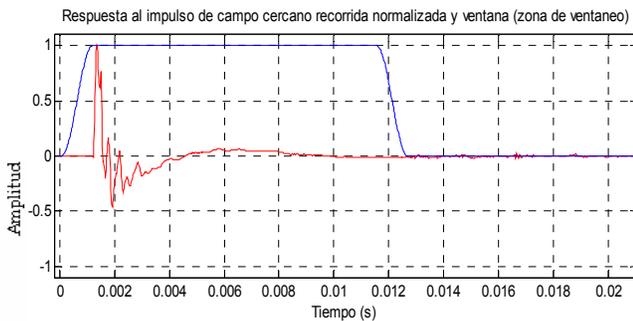


Figura 5 Medición de campo cercano.

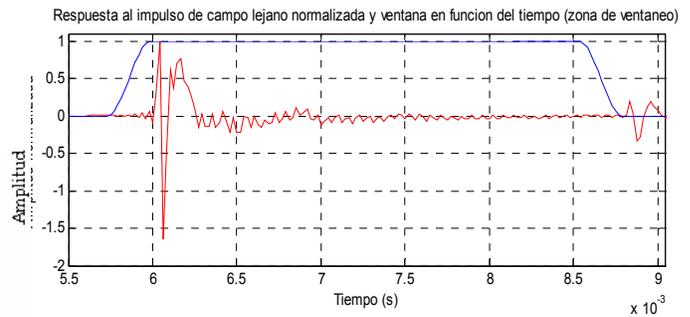
Para el campo cercano se midió a $0.6mm$ del altavoz como se ve en la *foto 1* y para el campo lejano se midió sobre el eje acústico de bafle, es decir, entre los dos altavoces.

6. RESULTADOS

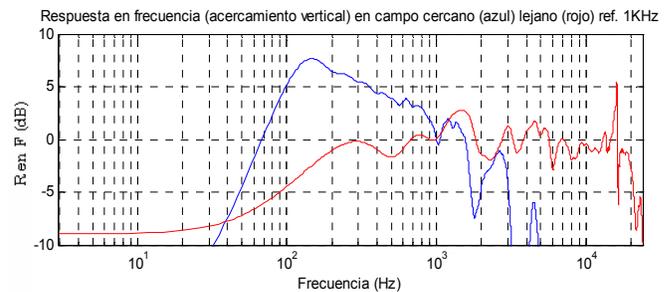
En las siguientes graficas se ilustra el proceso. Todo el procesamiento de señales se realizó en MATLAB.



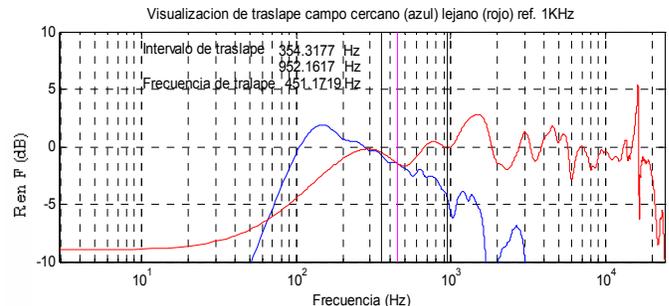
Gráfica 1. Respuesta al impulso en campo cercano con la ventana aplicada.



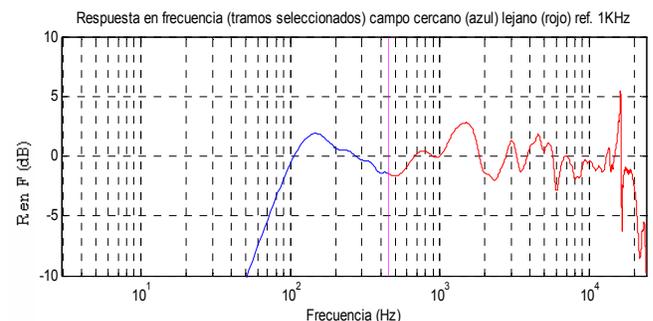
Gráfica 2. Respuesta al impulso en campo lejano con la ventana aplicada.



Gráfica 3. Respuestas en frecuencia sin considerar compensación por distancia de medición.



Gráfica 4. Respuestas en frecuencia con compensación por la distancia en campo lejano con intervalo de traslape y frecuencia de traslape de unión elegida.



Gráfica 5. Respuesta en frecuencia final de altavoz.

7. DISCUSIÓN

Es importante considerar que la distancia que existe desde la fuente sonora a la pared del recinto donde se efectúa la primera reflexión, define el tamaño de la ventana en la medición de campo lejano. Las paredes más alejadas no influyen en la medición ya que las señales que emanen de ellas serán eliminadas.

Para cajas acústicas con ventana (Bass reflex), es necesario medir la contribución de radiación de la ventana sumándola a la del propio altavoz. Se recomienda utilizar un sonó deflector (baffle) para medir la respuesta del altavoz, para evitar la posible cancelación en la respuesta por parte de la radiación posterior del cono.

El método utilizado permite aumentar la resolución en frecuencia colocando los dispositivos lo más alejados posible de la pared que aporte la primera reflexión.

El método propuesto surge de la conjunción de la referencia [1] que describe el uso de la respuesta al impulso de un altavoz para evaluarlo simulando un campo libre. Además con la referencia [2] se contó con un programa en lenguaje C que permite obtener la respuesta impulsiva con MLS, misma que se procesa con MATLAB.

8. CONCLUSIONES

La solución al problema de caracterización de altavoces propuesto, ofrece resultados confiables si necesidad de contar con recintos anecoicos.

Aunque el proceso propuesto enfatiza el uso de técnicas de procesamiento de señales, esto tiene la ventaja adicional de poder obtener mayor información ya que el resultado final es obtener la respuesta al impulso del altavoz, con lo que es posible conocer, adicionalmente, la respuesta en fase, fase mínima o en exceso, curvas de energía-frecuencia.

REFERENCIAS

- [1] Artículo C. J. Struck and S. F. Temme, "Simulated free field measurements," *J. Audio Eng. Soc.* 42, 467-482 (1994).
- [2] V. Garrido, Medición y cálculo de los índices acústicos en recintos. Tesis de Licenciatura. (Ing. Mecánica Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1999.
- [3] Pérez Ruiz Santiago Jesús, Alcántara Iniesta Salvador. Sistemas acústicos de alto desempeño. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Textos Científicos, 2003,101-105.
- [4] JAMES Glyn. Matemáticas avanzadas para ingeniería. Ed. Prentice may. 2da. Ed. 2002, 388-391.
- [5] Cyril M. Harris. Manual de medidas acústicas y control de ruido. Ed. Mc-Graw Hill
- [6] J. Borish; J.B. Angell. "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise" *Jour. Audio Engineering Soc.* Vol. 31(7), 478-487 july/August 1983.
- [7] D. D. Rife; J. Vanderkoy. "Transfer-function measurement with maximum-length sequences" *Jour. Audio Engineering Soc.* Vol. 37(6), 419-443 June 1989.