



## Sistema integral de medidas acústicas

J. Javier López, Alberto González, Alberto Palomar  
Departamento de Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia  
Email : jjlopez@dcom.upv.es, agonzal@dcom.upv.es  
Tel: +34 6 2849300, Fax : +34 6 2849313

### Abstract

A software tool for acoustic measures is presented. The system is developed for running on a PC under Windows95 using a data acquisition card or a sound card. Very accurate measures of frequency response  $H(f)$  or impulse response  $h(t)$  for microphones, speakers or rooms are possible to obtain in a easy form. The MLS (minimum length sequences) method for impulse response calculation is employed. It provides a good signal to noise relation and protection to non linearities. Fast-Hadamard transform has been employed for efficiency in computation.

### 1. Introducción

En los últimos años se han ido introduciendo nuevos instrumentos para medidas acústicas, basados en las propiedades de ciertas señales de excitación. Todos estos sistemas permiten la determinación de la Respuesta Impulsional de un sistema que usualmente incluye altavoces y micrófonos. A partir de dicha Respuesta Impulsional, estos equipos obtienen un gran número de parámetros derivados. Estos instrumentos están basados en ordenadores, aunque requieren de hardware dedicado para la generación y medida de las señales, el cual resulta generalmente costoso y complicado de adquirir.

El sistema que se presenta, consiste en un software desarrollado sobre Windows95 que permite realizar un gran conjunto de medidas acústicas de gran precisión de una forma sencilla y resolviendo los problemas de los sistemas anteriormente comentados. Utilizando únicamente un PC compatible junto con una tarjeta digitalizadora o tarjeta de sonido, a la que se conecta un altavoz y un micrófono se pueden realizar las medidas de la Respuesta en frecuencia  $H(f)$  y respuesta al impulso  $h(t)$  de Altavoces, Micrófonos y Recintos, así como parámetros derivados (Distinción, Índice de Reverberación, Índice de Claridad, Tiempo de Subida).

El hardware necesario está compuesto, en su configuración mínima, por un PC compatible equipado con una tarjeta de sonido de 16 bits y sus correspondientes aplicaciones Windows 95. De esta forma el coste total del sistema se reduce al coste de un PC compatible más el coste de una tarjeta de sonido de 16 bits, equipamiento del que ya disponen la mayoría de usuarios, por lo que el coste real puede llegar a ser nulo.

Para el cálculo de la respuesta impulsional, se ha preferido utilizar el sistema de las MLS (minimum length sequences) o m-secuencias o secuencias pseudoaleatorias, por las ventajas que presenta frente a otros métodos, tal como se comenta en el punto siguiente.

### 2. Medidas utilizando secuencias pseudoaleatorias

Cualquier señal de excitación que sea espectralmente densa, es decir, que tenga energía en todas las frecuencias del rango de medida, puede ser usada como señal de prueba para un sistema de medidas de pro-

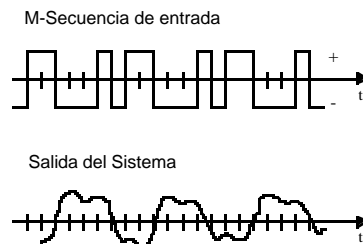
pósito general. Pulsos, chirps, ruido blanco y secuencias MLS (maximum-length sequences) son buenas candidatas para ser señales de prueba.

Durante años las señales de pulsos que intentan imitar la función  $\delta(t)$  se han usado para medir respuestas impulsionales, pero aunque pueda parecer el método natural para medir la respuesta al impulso de un sistema, presentan el inconveniente de su poca energía. Las señales chirp también se han utilizado para estos propósitos permitiendo medidas en módulo y fase, cosa que no permiten los sistemas más simples que utilizan el ruido blanco como señal de prueba.

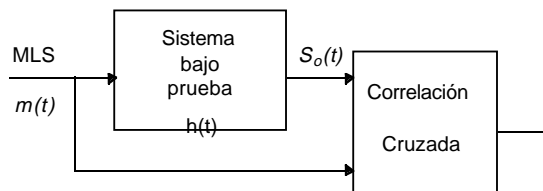
Sin embargo, para medir respuestas impulsionales largas, como son las que presentan algunos recintos, el método de las secuencias MLS popularizado por Schroeder [1], presenta una serie de ventajas frente al resto :

- Evitan no linealidades que pueden distorsionar la medida impulsional.
- Son periódicas y por lo tanto repetibles, con lo que es posible promediar los resultados de varios periodos, mejorando de esta forma la relación señal a ruido.
- Tiene propiedades matemáticas que permiten una alta eficiencia de cálculo, de forma que estos se puedan realizar in situ.
- Permite la supresión de ruido de fondo mediante la técnica de correlación cruzada. Gracias a esta característica se pueden tomar medidas sumamente fiables en ambientes muy ruidosos, en los que el nivel de la señal emitida puede estar incluso por debajo del nivel de ruido.

Las MLS (minimum length sequences) o m-secuencias o secuencias pseudoaleatorias, son secuencias binarias en amplitud y periódicas en tiempo, con un periodo discreto de longitud L igual a  $2^n - 1$  muestras. Su autocorrelación proporciona un término de valor igual a la longitud de la m-secuencia, siendo el resto de términos igual a la unidad. La duración de una m-secuencia es  $D = L \cdot T_s$ , donde  $T_s$  es el periodo de muestreo. Debido a su espectro de potencia plano, la función de autocorrelación es una secuencia impulso unitario con una amplitud L veces la amplitud del pulso. Su NLPS es igual a  $20 \cdot \log L$  (dB). Por lo tanto, a mayor longitud de la m-secuencia mejor NLPS y mayor similitud de su autocorrelación con un impulso.



La respuesta impulsional del sistema bajo prueba se obtiene realizando la convolución discreta de la salida del sistema muestreada, con la secuencia pseudoaleatoria invertida en el tiempo, lo que equivale a correlar las dos señales.



$$\underbrace{m(nT) * h(nT)}_{\text{Respuesta muestre-}} * \underbrace{m(-nT)}_{\text{autocorrelación = N-}} = m(nT) * m(-nT) * h(nT)$$

### 3. Utilización de la transformada rápida de Hadamard

Un detalle importante que no se ha comentado todavía, hace referencia al elevado número de operaciones a realizar para una correlación, que es igual al producto de la longitud de los dos vectores a correlar. Basta poner como ejemplo que el cálculo de una autocorrelación de una secuencia de 65535 muestras que es la que se utiliza por defecto en nuestro software, implica más de 4.300 millones de operaciones, que en el mejor de los casos, que es empleando un DSP programado directamente en lenguaje ensamblador y con un código optimizado, requeriría de un tiempo no inferior a 5 minutos. Por lo tanto, en el caso de un PC no sería viable realizar este tipo de cálculo en un tiempo razonable, lo que impide realizar mediciones de campo y obliga a realizar los cálculos a posteriori.

Para realizar la correlación de forma eficiente se ha empleado la Transformada Fast Hadamard (FHT) que tiene dos ventajas fundamentales; reduce drásticamente el número de operaciones necesarias de forma similar a la FFT y las multiplicaciones desaparecen de los cálculos, siendo necesarias solo sumas.

Usando una notación matricial, podemos obtener la siguiente relación para la correlación cruzada.

$$[h] = [M_L][S_o]$$

donde  $[M_L]$  es una matriz  $L \times L$  que contiene una versión retrasada circularmente de la m-secuencia.

El cálculo de  $[M_L][S_o]$  puede efectuarse eficientemente usando técnicas especiales a través de una factorización de matrices y el empleo de la Transformada de Hadamard, tal como se ha comentado, [1][2][4].

### 4. Parámetros derivados de la respuesta impulsional

Dadas las características de la medición, la principal información que se obtiene es la respuesta impulsional del dispositivo en estudio. La resolución que se obtiene con este sistema es quizás excesiva para ciertas aplicaciones de acústica de recintos, como ejemplo basta decir que en el caso de emplear una m-secuencia de longitud 65.535 y una frecuencia de conversión de 44.100 Hz, la precisión temporal es de 22.67 ms y la frecuencial es de 0.33 Hz.

Para este tipo de aplicaciones existen una serie de parámetros, típicos de la acústica de recintos que son utilizados habitualmente para caracterizar salas. El software implementado los calcula de forma automática a partir de la respuesta impulsional que se ha obtenido.

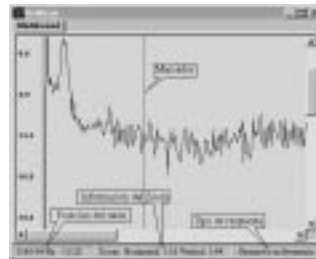
Los parámetros calculados son los siguientes :

Distinción. Dicho parámetro se basa en la diferencia entre el tiempo de llegada del sonido directo y la primera reflexión	$D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$
Índice de Reverberación. Este criterio indica en magnitudes logarítmicas la relación entre sonido reverberante y sonido inicial	$R = 10 \cdot \log\left[\frac{1-D}{D}\right] \text{dB}$
Índice de Claridad. Es similar al índice de reverberación, pero se refiere más a sonido musical que vocal	$C = 10 \cdot \log\left[\frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}\right] \text{dB}$
Tiempo de Subida ( $t_r$ ). Se define $t_r$ como el instante para el cual las energías inicial y final son iguales	$\int_0^{t_r} p^2(t) dt = \int_{t_r}^{\infty} p^2(t) dt$

### 5. Descripción del software

La sencillez de uso de este sistema viene proporcionada por el entorno que cualquier aplicación Windows presenta al usuario, ya que se dispone de un entorno gráfico en el que, además de ser bastante intuitivo de manejar, se puede obtener información de ayuda en el caso de que el usuario tenga cualquier tipo de duda.

Las aplicaciones Windows 95 se han desarrollado mediante el lenguaje Delphi versión 2.0 Desktop de Borland. Este lenguaje es una especie de Pascal visual y permite el rápido desarrollo de aplicaciones Windows, con la ventaja de que los ficheros que genera son directamente ejecutables, a diferencia de lo que ocurre con otros lenguajes de tipo visual que son interpretados y necesitan de ficheros adicionales. De esta forma se consigue una mayor comodidad de empleo y una mayor eficiencia en la ejecución de las aplicaciones. El compilador de esta versión 2.0 de Delphi es de 32 bits, con lo que se obtiene una mayor potencia de cálculo.



El software permite guardar ficheros de medidas, identificando si son de altavoces, micrófonos, recintos o genéricas. También permite calibrar una medida, corrigiéndola con la respuesta de los sensores que se han empleado para dicha medida. Permite visualizar la respuesta impulsional y la respuesta frecuencia en escala lineal o logarítmica así como comparar medidas entre sí. Dispone de marcadores y de marcadores diferenciales y realiza zooms en ambos ejes. Exporta datos a MATLAB y además está preparado para ser fácilmente ampliable e incluir nuevas necesidades de visualización o de cálculo a partir de las medidas realizadas o de los ficheros de datos almacenados.

## 6. Conclusiones

Se ha presentado una herramienta software escalable que junto con un ordenador personal dotado de una tarjeta de sonido, permite realizar una gran cantidad de medidas acústicas y de audio. Podemos resumir las características y ventajas del sistema en :

- Coste de equipos mínimo.
- Máxima fiabilidad debido a la inmunidad frente al ruido ambiente que proporciona la correlación y la posibilidad de promediar distintas medidas.
- Número de equipos mínimo, lo que facilita su transporte para realizar medidas in situ.
- Rápido aprendizaje de uso, puesto que se trata de una aplicación Windows 95 con su correspondiente entorno gráfico, ayuda en línea, etc...
- Proporciona numerosa información: respuesta impulsional, respuesta espectral con resolución menor a 1 Hz, tiempo de reverberación, Claridad, Distinción, Tiempo de Subida, etc....
- Posibilidad de comparar gráficamente distintas mediciones.
- Permite almacenar las respuestas impulsionales en ficheros con formato de variables pertenecientes a MATLAB lo que posibilita realizar un procesamiento adicional al de la propia aplicación.

## Referencias

- [1] Schoroeder, M.R., 'Integrated impulse method measuring sound decay without impulses'. J.Acoust. Soc. Am., 66 (1979) 497-500
- [2] Alrutz, H. & Schroeder, M.R., A fast Hadamard transform method for the evaluation of measurements using pseudorandom test signals. In Proc. 11th Congress Acoust., Paris (GALF, France, 1983) 6 (1983) 235-8
- [3] Paul H. Bardell, Williams H. McAnway & Jacob Savir. 'Built-in test for VLSI: Pseudorandom Techniques'. Ed. John Wiley & sons.
- [4] Chu. 'Impulse Response and Reverberation-Decay Measurements Made by Using a Periodic Pseudorandom Sequence'. Applied Acoustics col 29 n°3 1990.
- [5] John Vanderkooy. 'Aspects of MLS Measuring Systems'. J. Audio Eng. Soc., Vol. 42, No 4, 1994
- [6] Heinrich Kultruff. 'Room acoustics'. Ed. Applied Science Publishers.
- [7] 'Handbook for sound engineers'.
- [8] Mommertz & S. Müller. 'Measuring Impulse Responses with Digitally Pre-emphasized Pseudorandom Noise Derived from Maximum-Length Sequences' Applied Acoustics, Vol. 44, No 3, 1995.
- [9] Massimo Garai. 'Measurement of the Sound-Absorption Coefficient In Situ: The Reflection Method Using Periodic Pseudorandom Sequences of Maximum Length'. Applied Acoustics, Vol 39, 1993.