



IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS ACÚSTICOS MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESADO DIGITAL

A.M. Marced, A. González, M. de Diego

Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.
Camino de vera s/n, 46071, Valencia
Teléfono : 34-6-3879302 Fax : 34-6-3877309
E-mail : mdediego@dcom.upv.es

SUMMARY

The development of powerful, low-cost digital signal processor (DSP) chips and the advances in signal processing have become possible the implementation of more complex algorithms. This paper presents two different methods of impulse response measurement of acoustic systems: the identification of systems by means of adaptive algorithms and the use of Maximum-Length Sequences.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la teoría de sistemas, todas las propiedades de un sistema lineal invariante están contenidas en su respuesta impulsional, por lo que la determinación experimental de esta respuesta impulsional es una de las tareas más importantes en un sistema de transmisión acústico. La respuesta impulsional de un sistema es, según su propia definición, la señal obtenida a la salida del sistema tras ser excitado por un impulso. En la práctica, esta señal de excitación puede ser aproximada mediante un pulso rectangular cuya duración sea pequeña comparada con el periodo de la mayor componente espectral de la señal. Sin embargo, este método ocasiona problemas no sólo porque la mayoría de los altavoces son incapaces de reproducir señales impulsionales correctamente, sino porque para obtener una relación señal a ruido aceptable, la energía de la señal de excitación tiene que ser mayor que un cierto límite. Al tener toda la energía concentrada en un intervalo de tiempo muy pequeño, la amplitud de la señal de excitación puede ser tan elevada que provoque que el altavoz trabaje fuera de su rango lineal de operación e incluso que sea destruido por la señal [1].

Un método tradicional para medir la respuesta impulsional de un sistema acústico, es la utilización de algoritmos adaptativos, en la configuración denominada de identificación de sistemas [2]. Aunque bastante utilizado en sistemas prácticos, como veremos más adelante este método presenta algunos inconvenientes, por ejemplo: el tiempo de convergencia puede ser elevado, el número de coeficientes del filtro adaptativo necesario para una buena caracterización del sistema se desconoce inicialmente, ...

Una técnica más sofisticada en la identificación de sistemas consiste en la utilización de señales pseudoaleatorias como señales de excitación. Estas señales poseen propiedades similares al ruido aleatorio, pero presentan la ventaja de ser deterministas. En particular, se utilizan secuencias pseudoaleatorias de máxima longitud, conocidas como secuencias MLS. La idea básica de la técnica de medida con MLS es la aplicación de una versión analógica de una secuencia MLS a la entrada de un sistema lineal, el muestreo de la respuesta resultante, y la realización de la correlación cruzada de la respuesta del sistema con la secuencia original MLS. El resultado de la correlación cruzada es esencialmente, la respuesta impulsional del sistema. La principal ventaja de esta técnica es la utilización de un método muy eficiente llamado Fast Hadamard Transform que evita tener que implementar el proceso de cálculo de la correlación cruzada [1,3]. Esta técnica es apta para medidas en sistemas

acústicos debido a su facilidad de generación mediante registros de desplazamiento, a la existencia de algoritmos eficientes para calcular respuestas impulsionales de larga duración, y a su inmunidad frente al ruido y la distorsión presentes en estos sistemas [4].

SECUENCIAS PSEUDOALEATORIAS DE MÁXIMA LONGITUD

Una secuencia pseudoaleatoria se define como una secuencia codificada de 1's y 0's con ciertas propiedades de autocorrelación. Una clase de estas secuencias comúnmente utilizada es la secuencia pseudoaleatoria de máxima longitud (MLS) [3].

La respuesta impulsional periódica $h'(n)$, conocida como la PIR del sistema, se calcula mediante la convolución lineal entre la respuesta impulsional del sistema $h(n)$, denominada IR y la secuencia impulso unidad periódica $\delta'(n)$. La relación entre la PIR y la IR es la siguiente:

$$h'(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta'(k)h(n-k) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(n+kL) \quad (\text{eq.1})$$

La secuencia periódica $h'(n)$ se construye, por tanto, desplazando segmentos consecutivos de tamaño L al origen y sumando todos ellos, tal y como se observa en la Figura 1. Este proceso se conoce en la literatura de Procesado de Señal como Time Aliasing o Solapamiento Temporal [5]. Si la IR decae a un valor muy pequeño en sus primeras L muestras, se evita este solapamiento y la PIR se aproxima muy bien a las primeras L muestras de la IR. El método MLS calcula necesariamente la PIR y no la verdadera IR, luego los efectos del solapamiento temporal se deberán evitar eligiendo valores de L grandes para que la IR decaiga a un valor suficientemente pequeño en sus primeras L muestras.

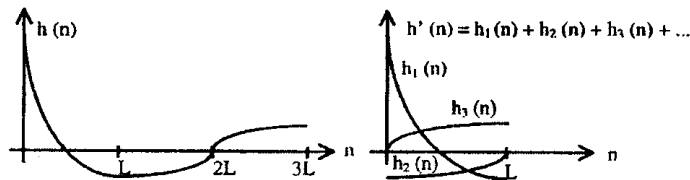


Figura 1. Solapamiento temporal de la IR al formar la PIR del sistema.

Excepto por un término pequeño de componente continua, se puede demostrar que la correlación cruzada entre la salida y la entrada a un sistema desconocido es esencialmente la Respuesta Impulsional Periódica $h'(n)$ de dicho sistema [3,6]. Aunque las secuencias MLS tienen carácter periódico y duración infinita, en la práctica, las señales de test que aplicamos al sistema durante la medida son de duración finita. Generalmente, aplicamos un periodo completo de la secuencia MLS para estabilizar la salida del sistema, y otro periodo completo para efectuar la medida [3,6]. Por otra parte, debido a la naturaleza determinista de las secuencias MLS, teóricamente obtenemos idénticos resultados de un periodo al siguiente. Esto nos permite aplicar promediado sincrónico, un procedimiento que reduce el nivel de ruido de fondo en 3 dB en cada nuevo promediado [4].

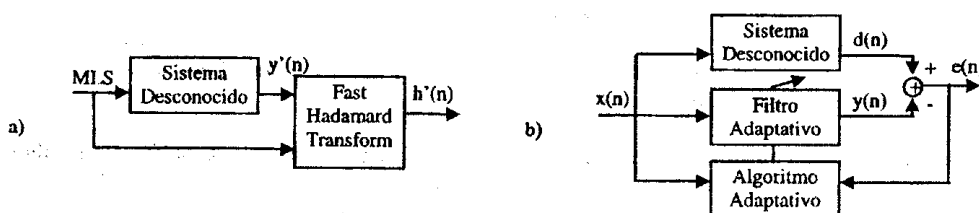


Figura 2. Esquemas de identificación de sistemas, a) mediante el uso de secuencias MLS y b) mediante Procesado Adaptativo.

IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS MEDIANTE PROCESADO ADAPTATIVO

Básicamente, esta aplicación consiste en el modelado de un sistema lineal desconocido, denominado *Planta*, mediante un filtro adaptativo. Para ello se aplica ruido blanco aleatorio tanto a la entrada de la *Planta* como al sistema adaptativo, cuyos coeficientes varían hasta que el error entre las dos salidas sea mínimo. En ese momento, las respuestas en frecuencia de la planta y del filtro adaptativo serán lo más parecidas posibles con el criterio de adaptación utilizado. El algoritmo adaptativo que hemos utilizado ha sido el LMS normalizado en potencia mediante ventana exponencial [2,6]. En la figura 2 se observa la definición esquemática de las dos técnicas empleadas: medida mediante secuencias MLS y mediante Procesado adaptativo.

IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

Para la implementación práctica de los algoritmos, hemos utilizado la tarjeta de procesado de señal de audio DSP-32C, formada por un procesador digital de señal que opera en punto flotante, el DSP32C de AT&T, módulos de memoria, un puerto Host para su interconexión a un PC, junto a dos canales de entrada-salida analógica de calidad de audio profesional. Los canales de conversión analógica-digital y digital-analógica son de 16 bits y se trabaja a la frecuencia de muestreo de 2kHz. En la Figura 3 se observa el esquema del prototipo físico empleado en nuestras medidas.

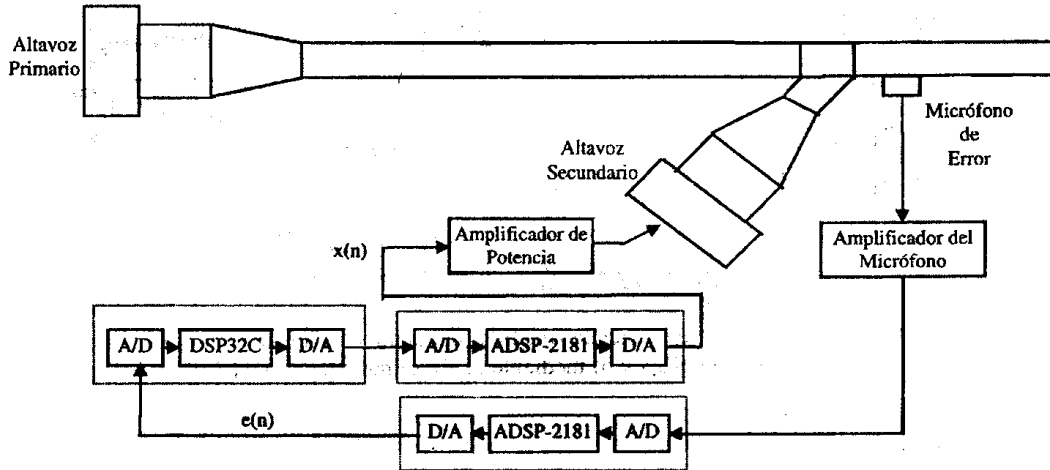


Figura 3. Esquema del sistema acústico utilizado en la práctica para la aplicación Identificación de Sistemas.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Medimos la respuesta impulsional de dos sistemas. El primero de ellos, es el sistema formado por el convertor D/A, el DSP32C y el convertor A/D. Este sistema introduce un retardo de 38 muestras aproximadamente, y presenta una respuesta en frecuencia plana en toda la banda de frecuencias. Las dos primeras gráficas corresponden a la medida del sistema mediante la técnica FFT, empleando una secuencia pseudoaleatoria de periodo $L=127$, por lo que el tiempo de medida ha sido de tan sólo 254 muestras o equivalentemente 127 mseg. Las siguientes dos gráficas se han obtenido utilizando el algoritmo adaptativo LMS normalizado, con estimación de potencia mediante ventana exponencial, con factor de olvido $\lambda=0.998$, y un tiempo necesario para conseguir la adaptación de los 50 coeficientes empleados, de 12000 muestras o 6 seg.

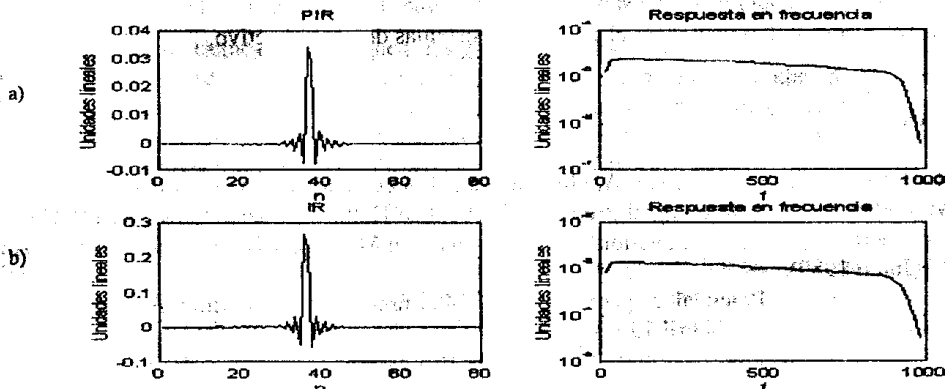


Figura 4. Respuestas impulsionales y frecuenciales medidas del sistema A/D-DSP-D/A : a) mediante una secuencia pseudoaleatoria de longitud 127 y b) mediante el algoritmo adaptativo LMS normalizado.

El segundo sistema, denominado comúnmente Camino Secundario, consiste en añadir al esquema medido en el caso anterior una pareja de filtros de anti-aliasing y de reconstrucción con una frecuencia de corte de 300 Hz y un sistema electroacústico formado por un amplificador, un altavoz (denominado secundario), un conducto de PVC, un micrófono (denominado de error) y un amplificador de señal de micrófono. Este sistema introduce un retardo de 100 muestras aproximadamente, además, la respuesta en frecuencia no es uniforme en la banda de paso. Las dos primeras gráficas corresponden a la medida del sistema mediante la técnica FFT, empleando una secuencia pseudoaleatoria de periodo $L=1023$, por lo que el tiempo de medida ha sido de tan sólo 2046 muestras,

aproximadamente 1 seg. Las siguientes dos gráficas se han obtenido utilizando el algoritmo adaptativo LMS normalizado mediante ventana exponencial, con factor de olvido $\lambda=0.998$, y un tiempo necesario para conseguir la adaptación de los 400 coeficientes empleados, de 12000 muestras, o 6 seg.

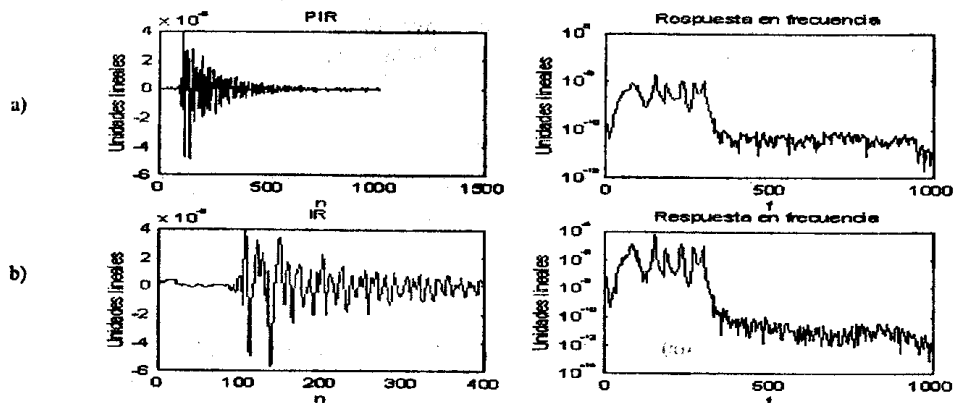


Figura 5. Respuestas impulsionales y frecuenciales medidas del camino secundario : a) mediante una secuencia pseudoaleatoria de longitud 1023 y b) mediante el algoritmo adaptativo LMS normalizado.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se muestran unos ejemplos de medidas de respuestas impulsionales de sistemas acústicos mediante dos tipos de algoritmos funcionando sobre el mismo sistema procesador. Se ha desarrollado un sistema de medida portátil de gran precisión que incorpora ambos algoritmos como posibles opciones. Las medidas obtenidas por ambos métodos presentan gran similitud, si bien, cada uno de los algoritmos presenta particularidades propias. En general, las medidas realizadas mediante secuencias MLS son más rápidas que las obtenidas mediante procesado adaptativo para un grado similar de exactitud. Conviene puntualizar que los algoritmos adaptativos utilizados no son los de mayor rapidez de convergencia teórica y que fueron escogidos por su simplicidad de implementación y de requerimientos de proceso, los cuales son inferiores a la del algoritmo de medida mediante secuencias MLS, especialmente cuando el número de coeficientes significativos de la respuesta impulsional medida aumenta. Debe notarse además que los algoritmos adaptativos actualizan la respuesta medida en cada periodo de muestreo mientras que el método que utiliza las secuencias MLS actualiza la respuesta en cada periodo de la secuencia, L muestras. De este modo, las mediciones mediante el método MLS son en general más apropiadas para sistemas con pocas variaciones temporales mientras que es preferible la utilización de los sistemas adaptativos en sistemas con variaciones temporales en órdenes de tiempo inferiores al periodo de la m -secuencia, como podría ser el caso en los sistemas de control activo.

REFERENCIAS

1. H. Kuttruff, "Room Acoustics", Elsevier Applied Science. London and New York (1991).
2. B. Widrow; S. Stearns, "Adaptive Signal Processing", Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ (1985).
3. D. Rife; J. Vanderkooy, "Transfer Function Measurements with Maximum-Length Sequences", J.Audio Eng. Soc., vol.37 (Junio 1989).
4. M. Vörländer; M. Kob, "Practical Aspects of MLS Measurements in Building Acoustics", Institute of Technical Acoustics, Germany (Abril 1997).
5. A. Oppenheim, R.W. Schaffer, "Discrete-time Signal Processing", Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ (1989).
6. A. Marced, "Técnicas de medición de respuestas impulsionales en sistemas acústicos y su aplicación al Control Activo de Ruido". Proyecto Fin de Carrera, ETS de Ingenieros de Telecomunicación, UPV (1998).