

MODIFICACIÓN DE LAS SECUENCIAS MLS PARA LA MEDIDA DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO

PACS: 43.55.Dt

Soler Rocasalbas, Sergi; Vila Deuchbein, Carles; Rossell Turull, Ivana
Enginyeria i Arquitectura La Salle
Pg. de la Bonanova nº 8,
08022 Barcelona, Spain
Tel: 932 902 476
Fax: 932 90 2470
E-mail: ssoler@salleURL.edu ; cvila@salleURL.edu

ABSTRACT

In this work Maximum Length Sequences (MLS) are shown as a test signal for acoustic insulation measurement, and its modification is proposed to enhance measurement conditions, increasing the precision of the results.

MLS are modified using evolutive algorithms to control its spectral content. This permits to compensate the frequency response of our loudspeaker without renouncing the advantages of working with a digital signal.

The signal-to-noise ratio of the measurement is increased by time averaging received sequences, and the effects of this averaging are analyzed and discussed in depth.

The main objective is to provide an even more reliable measurement method and the possibility of introducing new technologies to use lighter and more efficient equipment in this type of acoustical measurement.

RESUMEN

En este trabajo se presentan las Secuencias de Longitud Máxima (MLS) como señal de excitación para las medidas de aislamiento y se propone su modificación, con el propósito mejorar las condiciones de medida, incrementando así la precisión de los resultados.

Las MLS se modifican con algoritmos evolutivos para controlar su contenido espectral. Esto permite compensar la respuesta en frecuencia del altavoz sin renunciar a las ventajas de trabajar con una señal digital.

La relación señal-ruido de la medida incrementará en caso de que se realice un promedio temporal de estas señales. Los efectos de este promedio serán también analizados y expuestos.

El principal objetivo de este artículo es proporcionar un método de medida robusto, así como equipos más eficientes para realizar este tipo de mediciones acústicas.

1. INTRODUCCIÓN

La medida del aislamiento al ruido aéreo es, por su naturaleza, una de las medidas acústicas donde más crítico puede resultar conseguir la correcta relación señal-ruido (SNR).

Los niveles de ruido de fondo del recinto receptor, junto con el aislamiento de la partición bajo examen, nos van a determinar el nivel al que debemos generar la señal de excitación en el recinto emisor. Esto hace que fácilmente nos veamos con la necesidad de generar señales de más de 100dB y asumir la potencia y peso de los equipos que ello conlleva.

En este sentido la utilización de las secuencias MLS (Maximum Length Sequences) parece poder aportar dos grandes ventajas como señal de excitación. Estas ventajas son:

- Una notable reducción del ruido de fondo de la medida mediante el adecuado procesamiento de la señal recibida por el micrófono. Lo que nos permitiría trabajar con señales de menor potencia.
- La posibilidad de utilizar nuevas tecnologías electrónicas de mayor eficiencia con la consiguiente reducción del peso de los equipos de medida.

Pero queda sin resolver el problema de que la sala emisora y los altavoces de la fuente acústica tienen una respuesta que colorea el ruido emitido. Esto, junto al hecho de que el ruido de fondo típicamente tampoco es blanco, hace que desaprovechemos mucha potencia de nuestro amplificador para conseguir que algunas bandas alcancen los SNR mínimos, mientras otras los sobrepasan holgadamente.

En el presente artículo se propone una solución a este último problema, con la complicación agregada de no querer renunciar a las ventajas anteriormente enunciadas de utilizar secuencias digitales.

2. LAS SECUENCIAS MLS

Las secuencias binarias pseudoaleatorias de longitud máxima (MLS) son secuencias digitales fáciles de generar y con una serie de propiedades matemáticas que las hacen muy interesantes en el campo de las medidas acústicas.

La fig.1 muestra una secuencia MLS de orden 3. Se trata de una señal determinística, y por tener duración finita es fácilmente repetible, haciéndola así periódica. Estas propiedades nos van a permitir hacer promediado temporal síncrono sin riesgo de producir destrucciones en la señal.

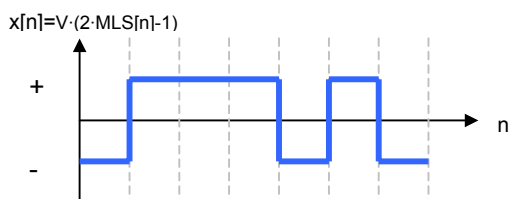


Figura 1: Ejemplo de señal MLS

Su valor eficaz es, a nivel teórico, igual que su valor de pico, lo que se traduce en un factor de cresta igual a la unidad.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n]} = V$$

Su potencia media se puede calcular como:

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n] = V^2$$

Esto nos evidencia que se trata de una señal con la máxima potencia que se puede obtener de una determinada tensión de alimentación $\pm V$.

La autocorrelación de $x[n]$ sigue la expresión:

$$R_{xx}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot x[k+n] \quad \left\{ \begin{array}{l} \approx V^2, \quad n=0 \\ = \frac{-V^2}{N} \approx 0, \quad 0 < n < N \end{array} \right.$$

cosa que demuestra que se trata de una señal muy poco correlada consigo misma y con componente continua casi nula.

El par transformado discreto de Fourier de $R_{xx}[n]$, que es la densidad espectral de potencia de la señal $x[n]$, tiene la siguiente forma:

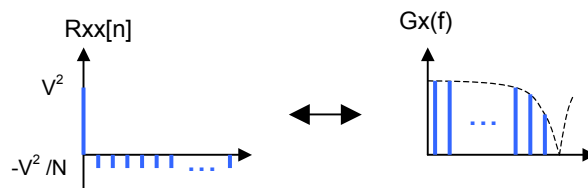


Figura 2: Transformada de una señal MLS

A efectos prácticos, este espectro puede considerarse plano hasta aproximadamente 0,45 veces la frecuencia de CLK a la que generemos la señal. Así pues, ajustando el reloj a 2,23 veces la máxima frecuencia de interés, podemos utilizar las secuencias MLS como señales de excitación con contenido espectral plano, comparable a un ruido blanco analógico.

3. USO DE LAS SECUENCIAS MLS EN LA MEDIDA DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO

3.1. LA MEDIDA DEL AISLAMIENTO

El aislamiento es por definición la relación entre la potencia transmitida al recinto receptor y la incidente en la pared bajo estudio del recinto emisor. La medida de la potencia acústica no es fácil, por lo que normalmente se opta por medir los niveles SPL y realizar correcciones para conseguir valores aproximados del aislamiento.

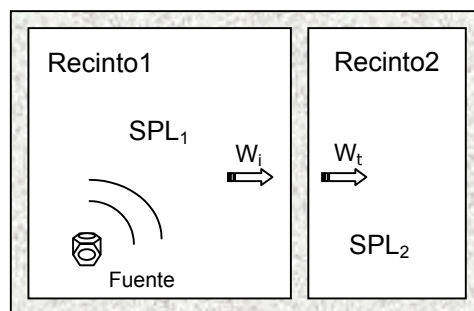


Figura 3: Medida del aislamiento acústico a ruido aéreo.

Estas aproximaciones se describen detalladamente en la familia de normas ISO 140. La obtención del valor de aislamiento global, así como los términos de adaptación a diferentes espectros, se describen en la ISO 717.

La señal acústica de excitación (SPL_1) que se utiliza en este tipo de medidas debe ser de banda ancha y no debe tener diferencias de nivel mayores a 6 dB's entre bandas de tercio

de octava adyacentes. Este requisito habitualmente se cumple utilizando ruido blanco o ruido rosa, pero no hay ningún inconveniente en utilizar secuencias MLS ya que también lo cumplen. Las modificaciones que sufrirá la señal de excitación en el entorno de medida se resumen en el siguiente diagrama de bloques:

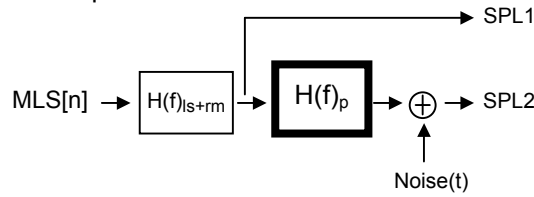


Figura 4: Modificaciones que el entorno de medida realiza sobre la señal de excitación.

Donde $H(f)_{ls+rm}$ es la respuesta en frecuencia provocada por el altavoz más la acústica de la sala emisora, y $H(f)_p$ es la respuesta de la pared que medimos.

Otro requisito que nos va a pedir la normativa ISO 140 será que la relación señal ruido en recepción ($SPL_2/Noise$) no sea menor a 10dB en ninguna de las bandas de tercio de octava estudiadas, que típicamente van de 100Hz a 3150Hz.

Teniendo en cuenta el diagrama de bloques de la figura 4, sabiendo que la mayor parte de paredes tienden a cumplir la tendencia de la ley de masas y en vista a que los ruidos de fondo habituales no son espectralmente planos, es de esperar que la relación señal a ruido no sea ni mucho menos igual en todas las bandas de tercio de octava. Así que la medida normalmente viene limitada por la banda que tiene menor relación señal-ruido.

3.2. USO DEL PROMEDIO TEMPORAL DIRECTO DE MLS

Un aspecto que no parece contemplar la ISO 140 es la posibilidad de aprovechar la repetibilidad de las secuencias MLS para conseguir el incremento de relación señal ruido que explicamos a continuación. Este procesado es completamente compatible con la metodología de medida de la normativa y únicamente añade cálculos en el momento de recibir las secuencias.

Para cada posición fuente-receptor se emite un número determinado (M) de secuencias, una tras otra. Sobre la señal recibida se detectan los inicios de secuencia (por autocorrelación) y se promedian superponiéndolas temporalmente en fase, consiguiendo así mantener la señal y destruir el ruido aleatorio.

El resultado es una medida mucho más inmune a los posibles ruidos de fondo del entorno.

Como aproximación teórica a este método podemos analizar probabilísticamente el efecto de promediar una serie de M secuencias MLS con ruido aditivo, blanco y gaussiano (AWGN) superpuesto:

La función densidad de probabilidad de una secuencia MLS es la de una señal digital bipolar con equiprobabilidad de nivel:

$$p_{MLS}(x) = \frac{1}{2}(\delta(x-V) + \delta(x+V))$$

En cambio, la del ruido blanco es:

$$p_{AWGN}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

Por lo que la densidad de probabilidad de la señal resultante de la adición de las dos señales anteriores será:

$$p_{TOT}(x) = p_{MLS}(x) * p_{AWGN}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(x-V)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(x+V)^2}{2\sigma^2}} \right]$$

El efecto del promedio temporal será inocuo para la MLS y destructivo para el ruido blanco, como se observa en la siguiente simulación:

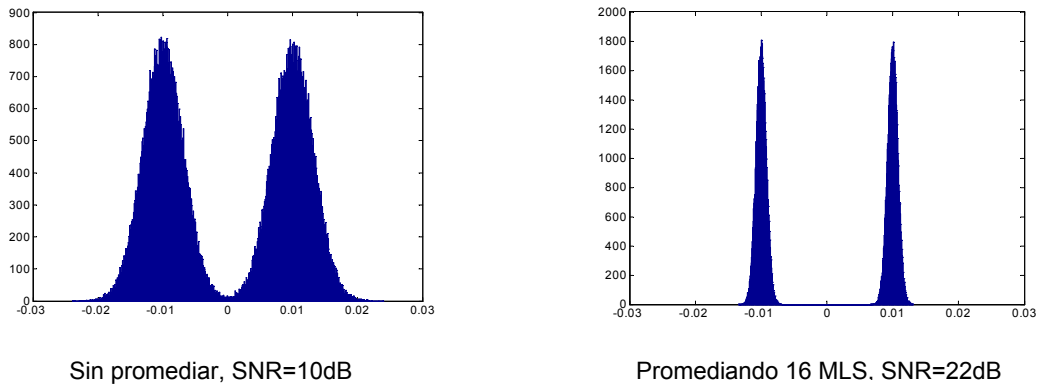


Figura 5: Efecto del promedio temporal de una señal MLS con ruido blanco.

La demostración de que al promediar dos señales idénticas se obtiene la misma señal es evidente. La destructividad del promedio temporal aplicado al ruido blanco reside en el hecho de que la suma de dos variables aleatorias independientes pero idénticamente distribuidas (igual esperanza e igual varianza) resulta en una variable aleatoria de varianza el doble:

Suma de dos instantes del ruido:

$$\sigma_{N+N}^2 = 2 \cdot \sigma_N^2 = (\sqrt{2} \cdot \sigma_N)^2 \rightarrow \sigma_{N+N} = \sqrt{2} \cdot \sigma_N$$

Desviación estándar del promedio:

$$\sigma_{\frac{N+N}{2}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_n}{2} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{2}} \Rightarrow dB_{\frac{N+N}{2}} = dB_N - 3$$

Esto denota que en cada promedio el ruido pierde 3dB mientras la señal queda igual, lo que se traduce en un incremento de la relación señal a ruido del orden de 3dB al doblar el número de secuencias promediadas.

De todo esto deducimos que nos interesa utilizar secuencias cortas y repetirlas tantas veces como podamos. Pero a la práctica nos encontramos con el problema de que para no provocar aliasing temporal la duración de cada secuencia MLS deber ser mayor que la duración de la respuesta del sistema donde se utiliza. Si aceptamos que la duración de la respuesta de una sala se puede aproximar a la mitad de su tiempo de reverberación, vemos que con secuencias de 1s aproximadamente cubrimos la mayoría de los recintos normales. Así pues, incrementar mucho el número de repeticiones de la secuencia puede traducirse en medidas de algunos segundos.

4. MODIFICACIÓN DE LAS SECUENCIAS MLS

El promedio de secuencias MLS nos permite incrementar la SNR por igual en todo el espectro, pero como hemos expuesto al final del punto 3.1, en la medida del aislamiento nos interesaría poder actuar banda a banda.

Lo más lógico sería simplemente ecualizar la señal emitida, pero si hiciéramos este procesado dejaríamos de tener secuencias digitales y por lo tanto no podríamos aprovechar las nuevas tecnologías electrónicas que se están desarrollando. Por este motivo se propone una modificación digital de las secuencias MLS que permite controlar su contenido espectral sin convertirlas en señales analógicas.

Se han realizado estudios sobre los ruidos de fondo en este tipo de medida y se ha llegado a la conclusión de que no es posible definir un espectro típico, aunque tienden a ser espectros decrecientes en frecuencia debido a que normalmente son ruidos exteriores al recinto receptor.

En cambio las respuestas del altavoz y de la sala sí acostumbran a ser más estables, por lo que será más fácil determinar la forma del espectro que las compensa. Con esta compensación se conseguirá que la SNR sea similar en todas las bandas de frecuencia.

4.1. MÉTODO PROPUESTO

Para modificar el contenido espectral de las MLS podemos partir de la observación de que lo que hace que estas señales sean espectralmente planas es que contienen “ráfagas de bits iguales” de todas las longitudes posibles.

Experimentando, se puede observar que eliminar todas las ráfagas de pocos bits iguales hace perder contenido espectral de alta frecuencia, y eliminar las ráfagas de muchos bits iguales afecta a la baja frecuencia. Pero no es fácil controlar a tu gusto el espectro resultante, debido a la gran cantidad de armónicos que salen al efectuar una de estas modificaciones.

Ante tal complejidad se propone el uso de un algoritmo informático evolutivo que por prueba y error obtenga la modificación a efectuar para conseguir el espectro deseado. Las modificaciones que se le definen al algoritmo son del tipo: “donde encuentres 3 bits iguales seguidos pon sólo 1 bit igual a los encontrados”, y los números 3 y 1 los genera él de manera aleatoria. En la figura 6 se muestra un ejemplo.

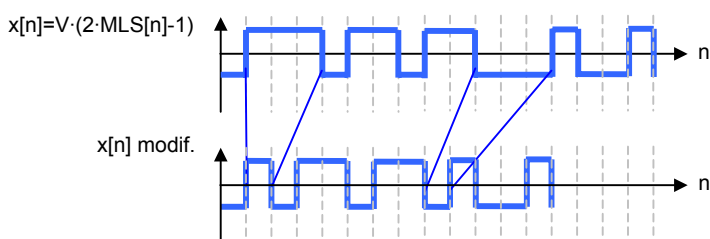


Figura 6: Modificación de una MLS.

Vean que por su naturaleza estas modificaciones no introducen componente continua a la señal, ya que se encontrará tantas ráfagas de “1” seguidos como de “-1” seguidos. La duración de la secuencia, en cambio, sí que se modifica, cosa que no nos importa.

La implementación se ha realizado con un algoritmo Hill Climbing al que se le permite probar unas cuantas decenas de modificaciones. El propio algoritmo emite el resultado de cada modificación y comprueba su efecto analizando la señal acústica obtenida.

Las entradas al algoritmo son: la MLS inicial y el espectro deseado. Tras sus pruebas, el algoritmo evoluciona hacia la modificación que consigue un espectro más parecido al deseado, la aplica y obtiene la secuencia MLS modificada, a la que llamamos MLSM.

4.2. SEÑALES RESULTANTES

La precisión de los resultados de este método depende básicamente de la complejidad del algoritmo utilizado y del número de pruebas que se le permiten hacer. Dejándole hacer pruebas durante unos 10 minutos, los resultados son notables. La figura 7 muestra el espectro de una MLS y su MLSM asociada, radiadas por el mismo dodecaedro de altavoces y en la misma sala.

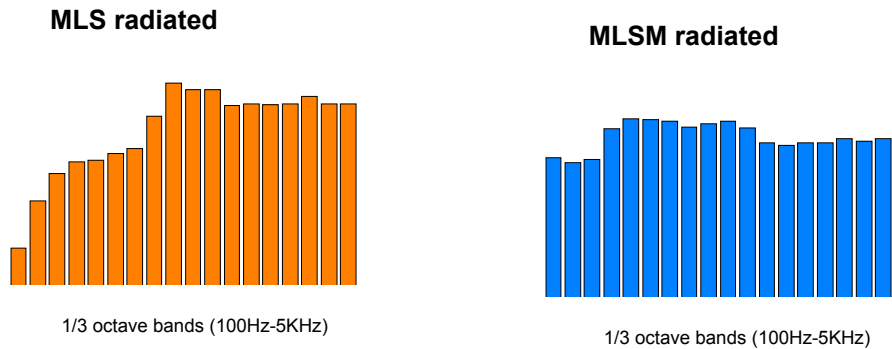


Figura 7: Ejemplo de señales MLS y MLSM.

Adicionalmente se ha comprobado que los equipos de medida mantienen perfectamente su linealidad al utilizar este tipo de señales.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. PROMEDIO DE MLS

Se han efectuado numerosas medidas, en diferentes condiciones, para poner a prueba el método del promediado de MLS. Su comportamiento ha sido realmente bueno.

La relación señal ruido se incrementa del orden de 2-3dB cada vez que se dobla el número de promedios, lo que permite efectuar medidas de aislamientos muy elevados con poca potencia de emisión o en entornos ruidosos. Prueba de ello son las medidas realizadas en particiones de hasta $D_{nT,W} = 72\text{dB}$ utilizando un amplificador de $300W_{\text{RMS}}$ y una fuente dodecaédrica convencional.

La única limitación práctica a tener en cuenta es que si la sincronización de la secuencias en recepción no es exacta se pueden producir pérdidas de señal en las bandas de frecuencia más elevadas. Esto puede ocurrir cuando se promedia un número de secuencias muy elevado o cuando el nivel de ruido está muy por encima de la señal útil.

En la figura 8. se representan los límites prácticos de SNR_{min} dentro de los cuales no se ha experimentado ni el más mínimo error en el resultado de la medida del aislamiento promediando MLSs. Como se puede apreciar se ha ganado un área importante con respecto a los límites de la ISO 140.

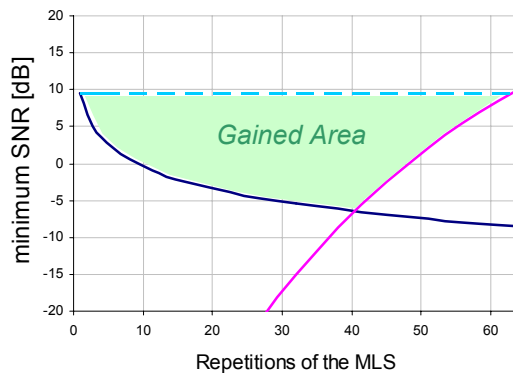


Figura 8: Ejemplo de señales MLS y MLSM.

Otro tema observado es que la eficiencia del método en cuanto a la mejora de la relación señal ruido se reduce cuando el ruido de fondo es periódico, como lo es por ejemplo el ruido de los fluorescentes. Pero afortunadamente los ruidos más comunes se eliminan fácilmente.

5.2. UTILIZACIÓN DE LAS SECUENCIAS MLS MODIFICADAS

La modificación de las secuencias MLS ha permitido conseguir espectros de 1/3 de octava con el contenido espectral deseado y conseguir así SNR muy parecidas (+/-5 dB) en todas las bandas analizadas.

La Figura 9. muestra la diferencia entre la SNR de una medida con ruido blanco (oscuro) y la de la misma medida utilizando una MLSM (claro).

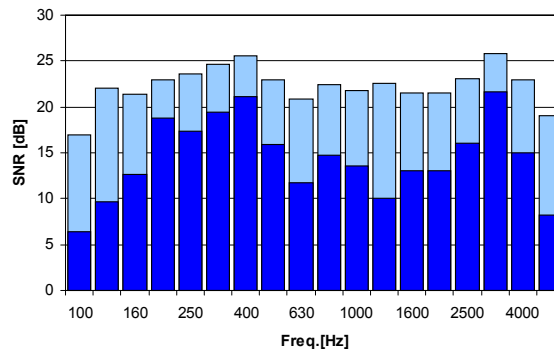


Figura 8: SNR obtenidas en una misma medida, con ruido blanco y con MLSM.

Según las pruebas realizadas hasta el momento su aplicación a la medida del aislamiento acústico ha dado resultados correctos, siempre en condiciones de medida normales.

Queda por comprobar su correcto funcionamiento en condiciones de medida más adversas, es decir, con menor relación señal-ruido en recepción.

6. CONCLUSIONES

Las técnicas MLS son una herramienta muy útil en las medidas de aislamiento al ruido aéreo "in situ", donde las condiciones de medida acostumbran a ser adversas.

El promediado temporal de estas secuencias resulta ser muy eficiente para incrementar la SNR de la medida en la sala receptora, haciéndola más robusta i fiable.

La modificación del contenido espectral de estas secuencias nos permite conseguir que la SNR en la sala receptora no varíe mucho entre las diferentes bandas analizadas. Esta característica es interesante de cara a cumplir la SNR deseada en todas ellas con la mínima potencia posible.

No necesitar tanta potencia en la sala emisora se puede aprovechar para usar amplificadores más ligeros y fuentes con menos altavoces (siempre que se cumplan los requisitos de omnidireccionalidad de la ISO 140).

En caso de no reducir la potencia de los equipos de medida utilizados, estas técnicas ofrecen la posibilidad de medir aislamientos mucho más elevados, que hasta ahora eran difíciles de medir con fiabilidad.

REFERENCIAS

- [1] S. Soler & R. Barti, 'Medida del aislamiento acústico con secuencias MLS', Libro de Actas CIATEA 2004.
- [2] Ole Herman Bjor, M.Sc. 'Maximum Length Sequences', Norsonic. (2000)
- [3] Leon-Garcia, Albert 'Probability and Random Processes for Electrical Engineering', Prentice Hall, Toronto. (1994)
- [4] Sklar, Bernard 'Digital communications', Prentice Hall, New Jersey. (2001)
- [5] UNE-EN ISO 140-4: 'Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "in situ" del aislamiento al ruido aéreo entre locales'. AENOR (1999)