

## DESPLAZADOR DE FRECUENCIAS DIGITAL PARA LA SUPRESIÓN DE REALIMENTACIÓN ELECTROACÚSTICA

PACS: 43.38.Tj

Vila Deutschbein, Carlos; Soler Rocasalbas, Sergi  
Enginyeria i Arquitectura La Salle  
Passeig de la Bonanova nº 8  
08022 Barcelona  
Tel: 932 902 476  
Fax: 932 902 470  
E-Mail: cvila@salleurl.edu; ssoler@salleurl.edu

### ABSTRACT

In the field of electroacoustic installations, several more or less sophisticated methods may be used to avoid annoying feedback "howl" and boost the potential acoustic gain (PAG) by a few dB.

This paper discusses the use of a digital frequency shifter instead of more popular narrow-band filtering techniques. The device has been implemented using a readily available programmable DSP platform and its efficiency has been proven by measurements in various environments.

### RESUMEN

En el campo de las instalaciones electroacústicas se suelen emplear métodos más o menos sofisticados para evitar los molestos "aullidos" producidos por la realimentación entre micrófonos y altavoces y aumentar la ganancia acústica potencial (PAG) unos cuantos dBs.

Este trabajo discute el uso de un desplazador de frecuencias digital en vez de técnicas más populares como el filtrado rechazo-banda de banda fina. El dispositivo ha sido implementado usando una plataforma DSP programable y su eficacia comprobada mediante medidas en diferentes entornos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El uso de medios electrónicos para controlar el comportamiento de realimentación en sistemas de sonorización fue descrito por primera vez por M.R. Schroeder en 1959. Entre otras alternativas, mencionó un dispositivo desplazador de frecuencias basado en un circuito diseñado por A.J. Prestigiacomo. Pocos años después, en 1962, Schroeder describió la teoría de funcionamiento de los desplazadores de frecuencia y su aplicación en la electroacústica [1].

Estos aparatos empleaban circuitería analógica, y si no estaban cuidadosamente diseñados y ajustados, presentaban problemas de ruido de fondo, respuesta en frecuencia y interferencia de la frecuencia portadora. Con la aparición de las técnicas de procesamiento digital

de la señal (DSP) se puede implementar un desplazador de frecuencias más idealizado, bajo ciertas restricciones de diseño que este trabajo presenta.

Hoy en día, pocos dispositivos comerciales dedicados a la supresión de realimentación electroacústica basan su funcionamiento en el desplazamiento de frecuencia. La mayoría de fabricantes emplean filtros de rechazo-banda que se pueden bien ajustar manualmente o funcionar de manera automática. La efectividad de estas técnicas no se pone en duda en este trabajo, pero es sabido que tienen detractores en los círculos del audio profesional. Este trabajo se centra en estudiar la efectividad del desplazador de frecuencias digital como método alternativo para la supresión de realimentación electroacústica.

## 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Cualquiera que haya estado involucrado en el diseño y montaje de un sistema de sonorización estará familiarizado con el fenómeno de realimentación electroacústica, también conocido como "Efecto Larsen". Un sistema de sonorización (en inglés Public Address, PA) donde un micrófono y un altavoz están en la misma sala, está limitado en términos de ganancia máxima, ya que se establece un lazo de realimentación positiva entre ambos elementos. A medida que la ganancia del sistema se incrementa, esta realimentación primero provoca una coloración de la señal de audio reproducida, luego introduce sobreoscilaciones durante los transitorios y finalmente se desarrolla un "aullido" continuo cuando la ganancia del lazo de realimentación supera la unidad.

El uso de altavoces y micrófonos directivos reduce la cantidad de energía que se realimenta, pero debido al carácter más o menos difuso del campo reverberante en cualquier sala, la ganancia del sistema sigue estando limitada. La razón del porqué el aullido se produce a una determinada frecuencia única es interesante. En cualquier instalación de PA existirá una frecuencia en la que la ganancia del lazo de realimentación es máxima. Esta frecuencia dependerá de la respuesta en frecuencia de cada elemento de la cadena. En un modelo simplificado, estos elementos son: Micrófono, amplificador, altavoz y la sala, tal como se indica en la figura 1:

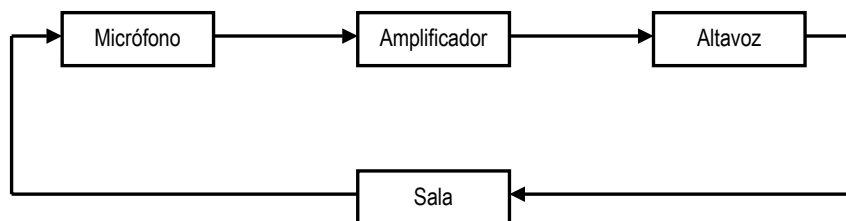


Fig. 1: Elementos del lazo de realimentación

Si se asume una situación ideal, donde todos los elementos de la cadena tengan una respuesta en frecuencia perfectamente plana, la ganancia del sistema se puede incrementar sin excitar ninguna frecuencia en particular. Compensar la respuesta en frecuencia de los equipos electroacústicos mediante ecualizadores o controles de tono es una técnica bien conocida que puede ayudar a mejorar la estabilidad del sistema en varios dBs. Pero la respuesta en frecuencia de la sala tiene una forma mucho menos predecible ya que en ella intervienen fenómenos acústicos complejos como resonancias de la sala, reflexiones en las paredes, ecos flotantes, etc. Además, la sala presenta una respuesta diferente dependiendo de las condiciones de medida (punto de excitación y de medida).

La figura 2 muestra una respuesta en frecuencia típicamente irregular de una sala, entre 500 y 600 Hz. Nótese los acentuados valles y picos debidos a resonancias de la sala y efectos de filtro peine debido a las reflexiones con las paredes. La línea discontinua representa la respuesta media en esta banda de frecuencias, tal como se obtendría p.ej. con un análisis en bandas de octava. Los picos y los valles pueden estar hasta 10 dB por encima o por debajo de

la respuesta media. Pese a que la respuesta media represente la sonoridad subjetiva de la sala (determinado por un oyente), es precisamente el pico más alto el que provocará el molesto “aullido” a esa frecuencia en particular si la ganancia del amplificador se aumenta en exceso. Si se consiguen aplanar estos picos, la ganancia del sistema se podría aumentar hasta 10 dB, siguiendo este ejemplo.

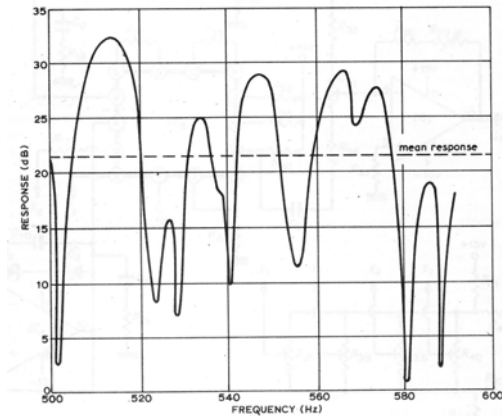


Fig. 2 Respuesta en frecuencia típica de una sala

Como se ha mencionado anteriormente, esto se suele realizar mediante filtros de rechazo-banda insertados en el lazo de realimentación. Aunque sea teóricamente posible sintetizar exactamente la respuesta inversa de la sala, tenemos el inconveniente que los picos y los valles se desplazan dinámicamente en función de la posición del micrófono, la temperatura, la absorción del público entre otros factores. En cualquier caso, poner en marcha manualmente un sistema de ecualización de estas características implicaría realizar un conjunto extenso de medidas y un cuidadoso ajuste de la ecualización.

Schroeder demostró que la respuesta de la sala se puede aplanar efectivamente mediante un ligero desplazamiento en frecuencia de la señal que llega al altavoz. Esta técnica asegura que cualquier componente frecuencial sujeta a alta ganancia en uno de los picos, que habitualmente llevará al molesto aullido, verá cambiada su frecuencia en su siguiente paso por el bucle y por lo tanto estará sometida a una ganancia mucho inferior. A medida que la señal continúa dando vueltas en el bucle, se verá desplazada en frecuencia cada vez y por lo tanto estará “multiplicando” por una ganancia distinta en cada viaje. Después de varias vueltas, la ganancia media experimentada por la señal será igual a la respuesta media de la sala mostrada en la figura 2. De la misma manera, si una componente de señal recibe una ganancia baja en su primera vuelta por el bucle, es muy probable que sea sometida a una ganancia mayor en la segunda vuelta. Sin embargo, La ganancia media volverá a ser igual a la respuesta media de la sala.

## 2.1 Consideraciones de Diseño

La cantidad de desplazamiento no es una magnitud especialmente crítica. Moviéndonos en unos márgenes razonables no tendremos problemas. Para minimizar efectos molestos para el oyente, el desplazamiento deberá ser el menor posible, mientras que para la aplicación de supresión de realimentación el desplazamiento deberá ser de orden similar al espaciado entre picos y valles adyacentes en la respuesta frecuencial de la sala. El desplazamiento de frecuencia óptimo para la supresión de la realimentación se encontrará mas fácilmente de manera experimental. En la mayoría de casos un desplazamiento de 5 a 6 Hz ha resultado mas que suficiente, no obteniendo mejora con valores más elevados. Es posible que en el caso que el tiempo de reverberación sea inferior a un segundo se precise un desplazamiento mas elevado.

Es irrelevante si el desplazamiento es en dirección ascendente o descendente. Las medidas realizadas demuestran que el uso del desplazador de frecuencia en un sistema de sonorización típico puede representar un aumento de la ganancia útil del sistema entre 6 y 8 dB. Aunque se haya indicado previamente que el aumento teórico máximo es de 10 dB, este valor no se alcanzará en la práctica ya que la realimentación que se genera inevitablemente a tan altos niveles produce efectos secundarios en la calidad de audio.

Debe remarcarse que el desplazador obtiene un aumento en el margen de estabilidad por medio de “aplanar” la respuesta de la sala. Dicho en otras palabras, se obtendrán mejores resultados si la señal que llega al micrófono es de carácter reverberante, es decir que ha sido “procesada” por las múltiples reflexiones de la sala. En muchos casos ésta es la situación típica.

### 3. IMPLEMENTACIÓN

El desplazador de frecuencia con el cual se han realizado las pruebas se ha implementado en una plataforma DSP comercialmente disponible. Ésta dispone de entradas y salidas analógicas, un panel de control, interficie MIDI y visualizador LCD. La señal de audio se muestrea y procesa a 48 kHz, con una resolución de 24 bits por muestra.

#### 3.1. Modulador BLU

La idea general de un desplazador de frecuencias corresponde a la de un modulador de banda lateral única (BLU), pero difiere en un aspecto crucial de la concepción clásica del modulador como lo conocemos de un sistema de telecomunicación. En nuestro caso, la frecuencia portadora no está muy por encima de la señal moduladora, sino que de hecho está dentro o debajo de su espectro. Aquí, la señal de audio de 20 Hz a 20 kHz se modula con una portadora de 4 a 8 Hz. La figura 4 representa el diagrama de bloques principal que se ha implementado.

La señal modulada en BLU se escribe como:

$$f(t) = A\Re(m_a(t) \exp(j2\pi\omega_c t))$$

$$f(t) = A[m(t) \cos(2\pi\omega_c t) - \hat{m}(t) \sin(2\pi\omega_c t)]$$

donde  $m_a(t)$  denota la señal analítica y  $\hat{m}(t)$  es la transformada de Hilbert de  $m$ . Tomando la

Transformada de Fourier del conjunto veremos que:

$$m_a(t) \exp(j2\pi\omega_c t) \leftrightarrow 2u(\omega - \omega_c)M(\omega - \omega_c)$$

$$f(t) = A\Re[m_a(t) \exp(j2\pi\omega_c t)] \leftrightarrow A[u(\omega - \omega_c)M(\omega - \omega_c) + u(-\omega - \omega_c)M^*(-\omega - \omega_c)]$$

Gráficamente, las componentes de frecuencia positiva de  $m$  se han desplazado  $\omega_c$  y las componentes de frecuencia negativa se han desplazado  $-\omega_c$ .

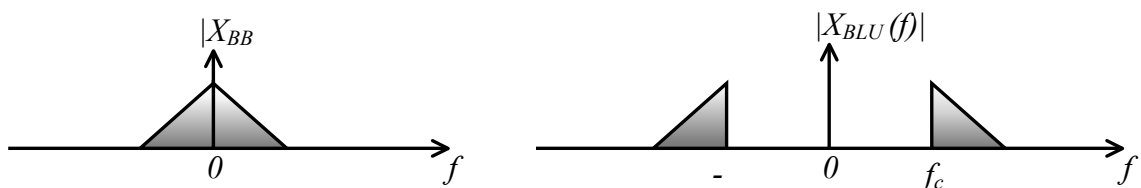


Fig 3 Espectro resultante de la modulación en banda lateral única

Para realizar un modulador de banda lateral única se necesita disponer necesariamente de señales en cuadratura. Una señal de audio es unidimensional, así que deberemos crear la señal en cuadratura mediante un circuito o algoritmo adecuado.

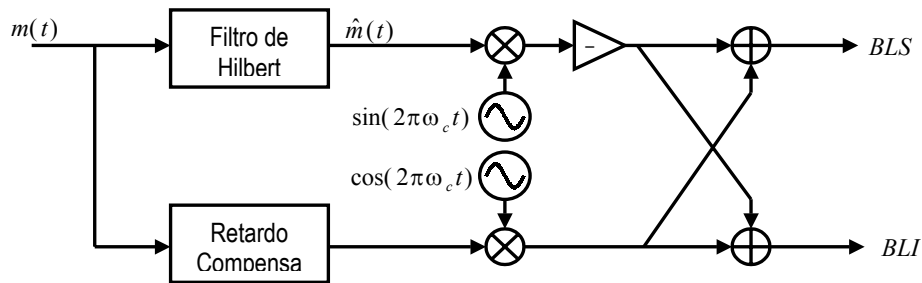


Fig. 4 Diagrama de bloques del desplazador de frecuencias

La transformada de Hilbert es una herramienta matemática que permite obtener dos señales en cuadratura a partir de una señal unidimensional. El resultado de aplicar la transformada de Hilbert a una señal  $m(t)$  es también una señal en el dominio temporal  $\hat{m}(t)$ , con un cambio de fase de  $-90^\circ$ .

Sobre papel, la transformada de Hilbert parece perfecta para nuestra aplicación (de hecho es la única herramienta disponible...), pero para su implementación habrá que tomar unos compromisos bastante conflictivos.

Desde el punto de vista electrónico, crear una señal en cuadratura respecto a la entrada consiste en realizar un filtro paso-todo con un desfase lineal de  $-90^\circ$  en todo el margen de interés. Este filtro fue descrito por R. B. Deme y D.G. Luck en 1946 y se conoce como "Deme filter" y que se utilizó en el Bode Frequency Shifter.

La limitación de este filtro está básicamente en las bajas frecuencias. Es práctica- (y teóricamente) imposible desfasar  $-90^\circ$  una señal de muy baja frecuencia. Para ello necesitaríamos filtros de orden muy elevado. Es imperativo establecer una frecuencia mínima que deseamos desplazar que sea útil para nuestra aplicación. Idealmente, esta frecuencia debería ser de 20 Hz, para abarcar todo el espectro de audio.

### 3.2. Implementación Digital

A nivel de implementación en un sistema digital, tenemos básicamente dos alternativas de diseño del filtro de Hilbert. La primera opción es usar un filtro FIR (Finite Impulse Response). Este tipo de filtro es especialmente útil, ya que tiene una respuesta de fase lineal y un retardo de grupo constante en toda la banda de interés. Además, la mayoría de herramientas informáticas para diseñar filtros pueden calcular los coeficientes para un filtro Hilbert de tipo FIR directamente. La otra alternativa sería utilizar un filtro IIR (Infinite Impulse Response). Tiene la ventaja de conseguir los mismos resultados con ordenes más pequeños, pero puede tender a la inestabilidad. Las herramientas de CAD no calculan filtros Hilbert de tipo IIR. Por estos motivos se ha optado por implementar un filtro de tipo FIR.

Será necesario introducir un bloque de retardo para compensar en la rama inferior el retardo de grupo introducido por el filtro de Hilbert. Los demás bloques del diagrama (generador senoidal en cuadratura con frecuencia variable, multiplicador, inversor y sumador) son de implementación sencilla en un entorno DSP y no es objeto esta comunicación explicar su funcionamiento.

#### **4. MEDIDAS**

El supresor de realimentación se ha probado en diferentes entornos con resultados satisfactorios en la mayoría de casos. El procedimiento de medida ha sido situar un altavoz y un micrófono en la sala de ensayo e incrementar la ganancia hasta que se alcanza el límite de estabilidad. El objetivo de la medida es comparar los niveles de ganancia máxima con y sin el proceso de desplazamiento de frecuencias activado. Se han repetido las medidas variando la directividad del micrófono, su posición y el ángulo respecto al altavoz.

Las medidas muestran la ventaja de usar el desplazador de frecuencias en casi todas las situaciones. El incremento mínimo de PAG ha sido de 0,4 dB y el máximo de 6,8 dB. Hay que decir que con el uso del desplazador a 6 Hz y a ganancias moderadas, no repercute en la calidad de la voz captada por el micrófono y reproducida por el altavoz. En líneas generales se puede afirmar que el desplazador se muestra mas efectivo cuanto más influencia tenga la sala en la cadena. El desplazador mostró excelentes resultados en una sala de conferencias típicas con micrófonos de sobremesa y sistema de sonorización distribuida en el techo, siendo el incremento de PAG unos 6 dB.

#### **5. CONCLUSIONES**

El uso del desplazador de frecuencias para la supresión de realimentación electroacústica es una solución simple y efectiva, especialmente cuando se procesan señales de voz. El usuario no ha de ajustar ningún parámetro excepto la cantidad de desplazamiento, e incluso ésta puede dejarse prefijada a 6 Hz para uso general. Los mejores resultados se obtienen en espacios acústicamente problemáticos. Incrementos de PAG de 4 a 6 dB se obtienen con facilidad. En la mayoría de casos, la señal desplazada en frecuencia es virtualmente indistinguible de la original, a no ser que la cantidad de desplazamiento sea superior a unos 8 Hz. Procesar señales musicales con el desplazador de frecuencias representa perder las muy bajas frecuencias debido a la naturaleza del filtro paso-todo de Hilbert.

#### **6. REFERENCIAS**

[1] M.R. Schroeder, *Improvement of Feedback Stability of Public Address Systems by Frequency Shifting*, J. Audio Eng. Soc., Volume 10 Number 2 pp. 108-109; April 1962

[2] H. Bode and R. Moog, *A High-Accuracy Frequency Shifter for Professional Audio Applications*, J. Audio Eng. Soc., Volume 20 Number 6 pp. 453-458; July/August 1972

[3] Andrew Bateman and Lain Paterson-Stephens, *The DSP Handbook*, Prentice Hall