

MOLDEADO ESPECTRAL DE RUIDO ACÚSTICO

REFERENCIA PACS: 43.50.Cb

Antonio Mínguez^{1,2}, Manuel Recuero^{1,3}

1 Instituto de Investigación del Automóvil (INSIA)

2 Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

3 Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ctra. Valencia km. 7

28031 Madrid España

Tel: 34 913 367 796

Fax: 34 913 367 784

E-Mail: aminguez@diac.upm.es

ABSTRACT

In this paper, noise shaping technique, usually employed in digital audio (analogue-digital conversion and mastering), is studied in order to be applied to acoustic noise. The aim is to redistribute the spectral noise to different frequencies where the ear is less sensitive and perceive a lower acoustic sensation. Block diagram and estimations of the transfer functions involved are outlined. Simulation results show the viability of a future practical implementation on a digital signal processing platform.

RESUMEN

En este artículo se estudia la viabilidad de aplicar técnicas de moldeado espectral de ruido (*noise-shaping*), utilizado habitualmente para el ruido de cuantificación de señales digitales de audio, en el campo acústico. El objetivo fundamental es redistribuir espectralmente el nivel de ruido en aquellas zonas donde el oído sea menos sensible y perciba una sensación acústica inferior. Se plantea el diagrama de bloques necesario, así como las estimaciones algorítmicas de las funciones de transferencia que intervienen en el proceso. Los resultados de simulación obtenidos muestran la viabilidad del sistema en una futura implementación práctica sobre una arquitectura de procesado digital de señales.

INTRODUCCIÓN

La técnica de moldear en frecuencia el nivel de ruido (*noise-shaping*) [1,2] se emplea habitualmente para mejorar la relación señal a ruido de cuantificación en la conversión analógica-digital (A/D) y en el proceso digital de mezcla o masterización.

El ruido de cuantificación aparece en la conversión A/D cuando las muestras de tensión se convierten en códigos de "n" bits. Existe un error entre el valor de tensión de la muestra y el valor discreto que representa el código asignado. Este error, es inversamente proporcional al número de bits y puede considerarse como una variable aleatoria uniforme. Esta variable aleatoria tiene una función densidad de probabilidad constante ($1/\Delta$) entre $-\Delta/2$ y $+\Delta/2$, siendo Δ la resolución en amplitud de la cuantificación. La potencia de este ruido es $\Delta^2/12$ lo que da lugar a márgenes dinámicos de cuantificación de aproximadamente de 6n dB (96 dB para 16 bits).

En el dominio espectral, el nivel del ruido se distribuye de forma uniforme hasta la mitad de la frecuencia de muestreo ($f_s/2$). Si se aumenta N veces la frecuencia de muestreo, el nivel se extenderá hasta una frecuencia mayor ($Nf_s/2$), pero el nivel total seguirá siendo constante ya que no depende de la frecuencia de muestreo sino del número de bits "n". Por tanto, el nivel de ruido vs frecuencia disminuirá y la relación S/N en el margen de frecuencias de audio ($f_s/2$) aumentará. Este aumento es de 6 dB cada vez que cuadruplica la frecuencia de muestreo.

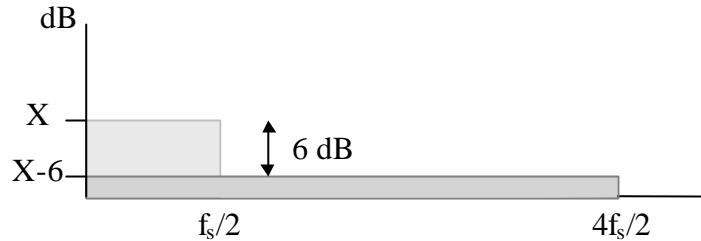


Figura 1. Densidad espectral de potencia del ruido de cuantificación vs. frecuencia de muestreo.

La relación S/N se puede mejorar si se "moldea" espectralmente el ruido para llevarlo fuera del margen de audio, según se muestra en la figura 2, donde es oído es incapaz de percibirlo. Esta es la técnica que utilizan los convertidores A/D sigma-delta: sobremuestreo, *noise-shaping*, filtrado paso-bajo digital y reducción digital de la frecuencia de muestreo a su valor nominal [3].

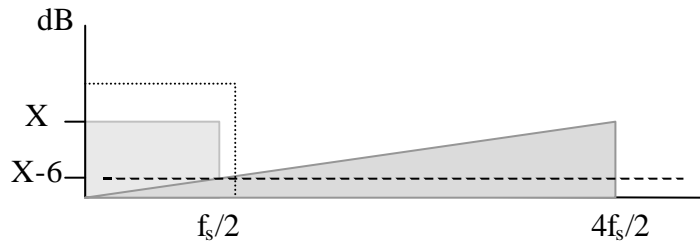


Figura 2. Densidad espectral de potencia del ruido de cuantificación con "noise-shaping"

Por otra parte, el ruido de cuantificación se incrementa al disminuir la resolución binaria de las muestras, por ejemplo al pasar de 20 a 16 bits por muestra. Este caso se presenta cuando los equipos que procesan, graban y/o transmiten digitalmente no tienen todos ellos la misma resolución. El incremento de ruido de cuantificación es de 6 dB por cada bit eliminado (bits de menor peso). Este ruido tiene un espectro uniforme en todo el margen de frecuencias ($0-f_s/2$). De nuevo, este ruido puede "moldearse" en frecuencia con objeto de mejorar la relación S/N, esta vez desde un punto de vista subjetivo, realzándolo en las frecuencias donde nuestro oído es menos sensible y atenuándolo en las frecuencias donde el oído presenta una mejor sensibilidad (figura 3).

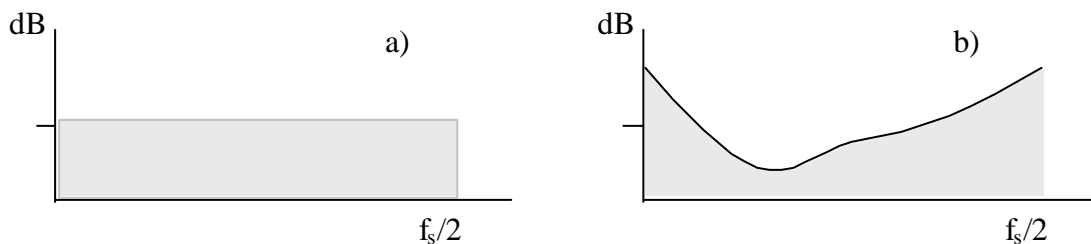


Figura 3. Espectros de ruido de cuantificación por pérdida de resolución binaria: a) sin *noise-shaping*, b) con *noise-shaping*

NOISE-SHAPING

Veamos a continuación como puede se implementar digitalmente un sistema de *noise-shaping*. En la figura 4 se presenta el diagrama de bloques.

x(n) señal de entrada
y(n) señal cuantificada
e(n) ruido de cuantificación
u(n) señal "intermedia"
h(n) sistema "moldeador"

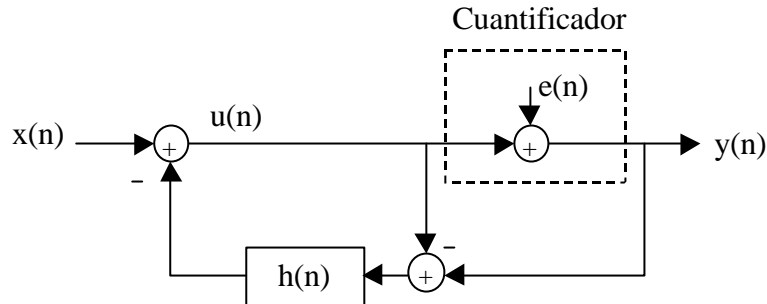


Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de cuantificación con noise-shaping.

El cuantificador queda caracterizado por la suma de una señal aleatoria e(n) a la señal de entrada. Este ruido de cuantificación se inyecta de nuevo a la señal de entrada, pasando previamente por filtro moldeador. Un análisis del sistema, nos lleva a las siguientes expresiones:

$$u(n) = x(n) - h(n) * [y(n) - u(n)] \quad [1]$$

$$y(n) = u(n) + e(n) \quad [2]$$

El símbolo "*" representa la función de convolución. Pasando al dominio transformado Z, las ecuaciones se pueden expresar de la siguiente manera:

$$U(z) = X(z) - H(z)[Y(z) - U(z)] \quad [3]$$

$$Y(z) = U(z) + E(z) \quad [4]$$

despejando U(z),

$$U(z) = \frac{X(z) - H(z)Y(z)}{[1 - H(z)]} \quad [5]$$

sustituyendo,

$$Y(z) = U(z) + E(z) = \frac{X(z) - H(z)Y(z)}{[1 - H(z)]} + E(z) \quad [6]$$

por tanto:

$$Y(z) = X(z) + E(z)[1 - H(z)] \quad [7]$$

y en el dominio de la frecuencia:

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega}) + E(e^{j\omega})[1 - H(e^{j\omega})] \quad [8]$$

En la ecuación anterior se puede observar como queda modificado el espectro del ruido de cuantificación E(e^{jω}) al multiplicar 1-H(e^{jω}). De esta forma se puede seleccionar la función de transferencia que permita realzar y atenuar el espectro en función de la sensibilidad de nuestro oído, para tener una percepción subjetiva inferior.

MOLDEADO ESPECTRAL DE RUIDO ACÚSTICO

La técnica de noise-shaping puede utilizarse para “moldear a nuestro gusto” el ruido acústico no deseado. Supongamos un equipo Hi-Fi que emite una señal de audio por un altavoz, en una sala donde está presente un ruido acústico. En un determinado punto de la sala se encuentra un oyente recibiendo ambas señales (p.e. en el interior de un automóvil). Si se tiene en cuenta el diagrama de bloques de la figura 4, se puede implementar un sistema análogo para procesar el ruido acústico, sin alterar la señal de audio (de acuerdo con la ecuación 8). En la figura 5 se presenta el nuevo diagrama de bloques adaptado a nuestro caso particular.

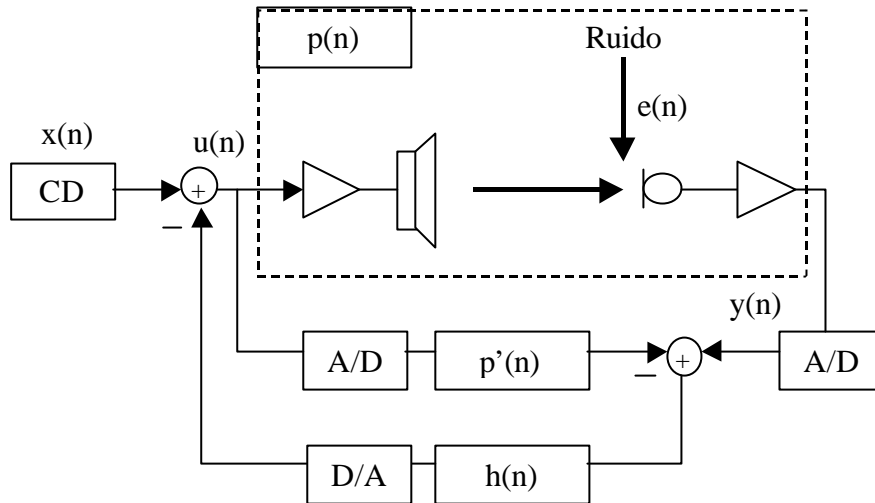


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de moldeado frecuencial de ruido acústico.

La diferencia fundamental entre el diagrama de la figura 5 con respecto al de la figura 4 es la existencia de una función de transferencia entre la señal $u(n)$ e $y(n)$. Esta función de transferencia es la correspondiente al sistema formado por: amplificador – altavoz – función de transferencia de propagación acústica – micrófono – amplificador de micrófono. Es necesario introducir una estimación de esta función de transferencia para poder extraer de la señal $y(n)$ el ruido acústico, representado por $e(n)$. La estimación puede realizarse previamente con una configuración adaptativa de identificación de sistemas con un algoritmo LMS [4] y utilizando como señal de excitación un ruido aleatorio gaussiano. El análisis del sistema nos lleva a las siguientes ecuaciones:

$$u(n) = x(n) - h(n) * [y(n) - u(n) * p'(n)] \quad [9]$$

$$y(n) = u(n) * p(n) + e(n) \quad [10]$$

En el dominio Z:

$$U(z) = X(z) - H(z)[Y(z) - U(z)P'(z)] \quad [11]$$

$$Y(z) = U(z)P(z) + E(z) \quad [12]$$

despejando $U(z)$,

$$U(z) = \frac{X(z) - H(z)Y(z)}{[1 - H(z)P'(z)]} \quad [13]$$

sustituyendo,

$$Y(z) = U(z) + E(z) = \frac{X(z) - H(z)Y(z)}{[1 - H(z)P'(z)]} P(z) + E(z) \quad [14]$$

$$Y(z) = \frac{X(z)P(z) + E(z)[1 - H(z)P'(z)]}{1 + [P(z) - P'(z)]H(z)} \approx X(z)P(z) + E(z)[1 - H(z)P'(z)] \quad [15]$$

y en el dominio de la frecuencia:

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})P(e^{j\omega}) + E(e^{j\omega})[1 - H(e^{j\omega})P'(e^{j\omega})] \quad [16]$$

En la ecuación anterior se puede apreciar que el espectro del ruido también depende de la función de transferencia $P'(e^{j\omega})$. Así mismo, la estimación de esta función de transferencia ha de ser precisa ya que de lo contrario puede aparecer realimentaciones (polos en la ecuación) en el sistema.

DISEÑO DEL FILTRO NOISE-SHAPER

El diseño del filtro $H(z)$ debe ser tal que la función de transferencia conjunta $1-H(z)P'(z)$ produzca la forma espectral deseada. Un posible diseño debería producir una gran atenuación alrededor de 3 kHz y otra en las cercanías de 12 kHz, regiones espectrales donde nuestro oído es más sensible. Sin embargo, el mejor diseño debe estar basado en la naturaleza del ruido acústico. Debe realizarse un análisis previo de su distribución espectral y producir atenuaciones justamente en aquellas regiones donde se encuentren las máximas distribuciones. Por ejemplo, el ruido que nos encontramos en el interior de un vehículo es fundamentalmente de baja frecuencia, por tanto el filtro deberá diseñarse para atenuar las bajas frecuencias.

Por otra parte, en frecuencias bajas la longitud de onda es mucho mayor y el efecto “moldeador” será percibido mucho mejor ante posibles variaciones de la posición del oyente respecto del punto óptimo de percepción (posición del micrófono). Téngase en cuenta, que sólo estamos moldeando donde se encuentra el micrófono. En otros puntos tendremos otras funciones de transferencia distintas, $P(z)$, y otras señales de ruido (señales correladas pero no idénticas). Estos problemas no aparecen, por ejemplo, cuando el sistema se implementa en unos auriculares, para mejorar la calidad de la señal de audio frente a ruidos externos.

Los coeficientes óptimos del filtro no se pueden hallar de una forma analítica. Una vez estimada la función de transferencia $P(z)$, un algoritmo iterativo busca los coeficientes de $h(n)$ - no más de 32- que producen la mejor aproximación al espectro requerido (curva moldeadora). En la figura 6, se presenta un posible modelo de búsqueda de los coeficientes mediante un algoritmo adaptativo [4] que minimiza el error cuadrático medio, excitando el sistema con una señal aleatoria gaussiana. $M(z)$ es la respuesta del filtro moldeador ideal, cuya señal de salida debe asemejarse a la señal de salida del sistema formado por $1-H(e^{j\omega})P'(e^{j\omega})$.

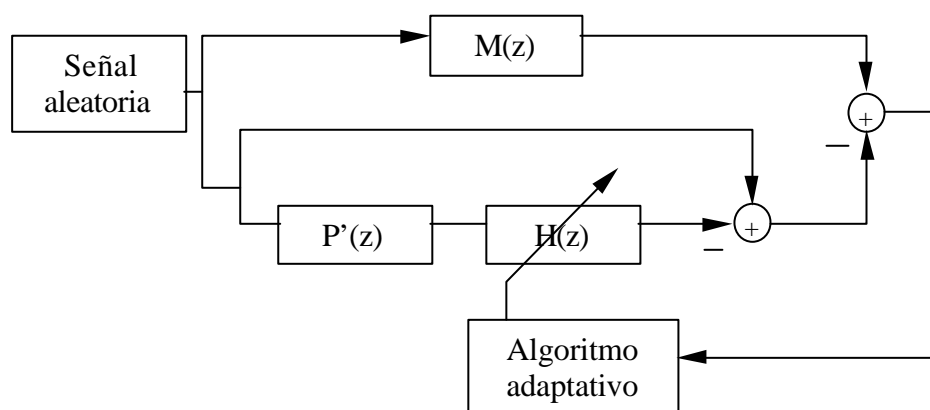


Figura 6. Modelo de búsqueda de coeficientes de $H(z)$ para una función moldeadora ideal $M(z)$.

En la figura 7 podemos observar el moldeado espectral producido para una señal sinusoidal contaminada con un ruido aleatorio. Se produce una atenuación en bajas frecuencias, alcanzando el valor mínimo entorno a los 3 kHz, a costa de aumentar el ruido en altas frecuencias (máximo alrededor de los 17 kHz)

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una técnica para moldear espectralmente el ruido acústico. La técnica, utilizada ya en audio en los procesos de conversión analógica-digital y en la masterización digital de mezcla, no elimina el ruido sino que lo redistribuye en el dominio espectral en aquellas regiones donde nuestro oído es menos sensible. Se ha mostrado el modelo acústico de implementación y las ecuaciones involucradas en el mismo. En este nuevo modelo es necesario estimar la función de transferencia electro-acústica para que el sistema sea estable. Una vez estimada esta función de transferencia se ha presentado un algoritmo adaptativo iterativo para la búsqueda de los coeficientes de la función de transferencia que moldea espectralmente el ruido. Resultados de simulación han mostrado la consecución de los objetivos iniciales. En una fase posterior se implementará el sistema en una plataforma de procesamiento digital de señal para abordar de forma práctica el moldeo espectral de ruido acústico en auriculares y en el interior de un automóvil

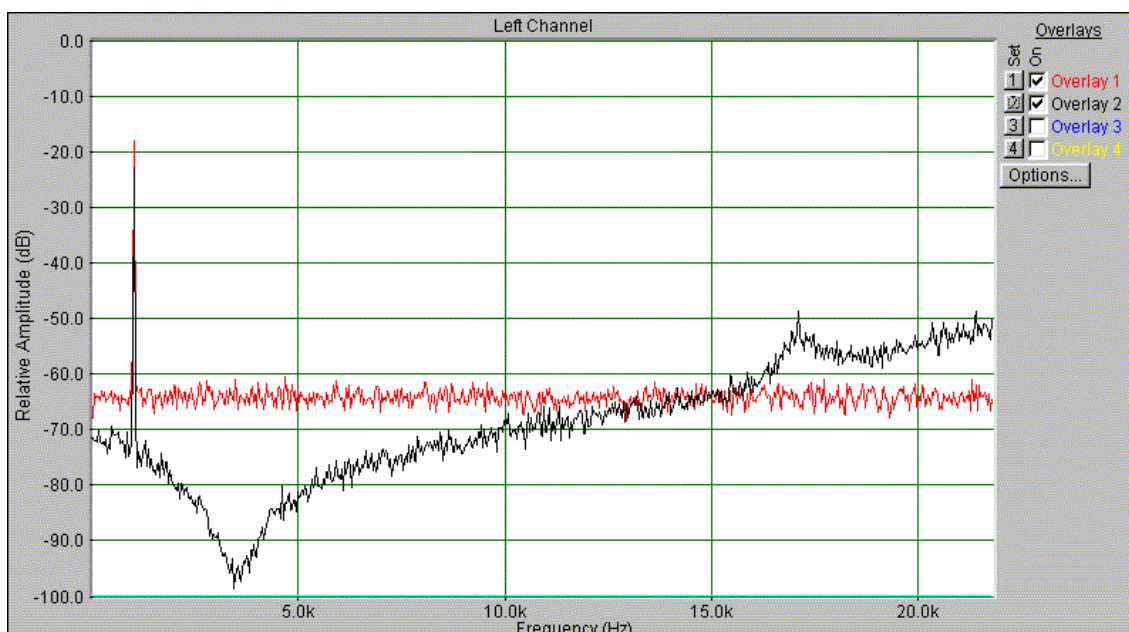


Figura 7. Simulación del moldeo espectral de ruido para una señal sinusoidal de 1 kHz contaminada con un ruido aleatorio

REFERENCIAS

- [1] Christopher Hicks, "Aspects of sampling, oversampling, dither and noise-shaping, as applied to digital audio", <http://www2.eng.cam.ac.uk/~cmh/oversamp.txt>, Nov., 1994.
- [2] Christopher Hicks, "The application of dithering and noise-shaping to digital audio", http://www2.eng.cam.ac.uk/~cmh/n_shape.txt, June, 1994.
- [3] John Watkinson, *The art of digital audio*, Ed. Focal Press, 1988
- [4] B. Widrow, "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications", *Proc. of IEEE*, Vol. 63, No. 12, December 1975.