

Trabajo Práctico 1

Diseño de filtros aplicado al procesamiento de audio

1. Introducción

1.1. Motivación

En un sistema electroacústico, donde una señal acústica es transmitida desde su fuente hasta algún medio de reproducción o grabación, existen diferentes etapas intermedias que modificarán las características del audio original. Un sistema electroacústico se puede pensar a grandes rasgos como un conjunto de sistemas encadenados compuestos básicamente por la fuente sonora (voz, instrumento, ruido, etc.), recintos acústicos, micrófonos, filtros, amplificadores u otros sistemas agregados con diferentes propósitos. Una propiedad que siempre debe tenerse en cuenta es la respuesta en frecuencia de todo el sistema y de cada etapa. Esta propiedad puede variar dependiendo de la geometría del lugar y materiales presentes en el recinto acústico donde se captó la fuente de sonido, así como también de la respuesta de los dispositivos incluidos en medio de la cadena electroacústica.

Muchas veces uno de los objetivos que buscamos es compensar la respuesta en frecuencia de manera tal que el sistema, o una parte de él, tenga una respuesta en frecuencia plana. Para ello podemos utilizar ecualizadores correctivos (del mismo modo que en un sistema de comunicaciones) con el fin de compensar la respuesta en frecuencia alterada por el propio sistema. Sin embargo, también es muy común el uso de ecualizadores desde un punto de vista creativo, dando énfasis a ciertas bandas del espectro según una apreciación subjetiva.

También es posible que la señal se vea contaminada por ruidos o interferencias que se suman en alguna de estas etapas. En caso que las señales interferentes sean de banda angosta, es posible utilizar filtros eliminabanda. Para otros tipos de interferencias existen técnicas que se basan en propiedades estadísticas de las señales, como son los filtros adaptativos, los cuales requieren información de correlación entre las señales y ruidos.

En muchos casos, compensar todas las alteraciones indeseadas producidas por el sistema electroacústico se hacen parcial o totalmente mediante filtros analógicos. Sin embargo, hoy en día con la capacidad de procesamiento digital que poseen los dispositivos comerciales, se hace muy versátil el uso de filtros digitales implementados por software para este propósito.

1.2. Objetivos

El presente trabajo práctico tiene como objetivo el diseño distintos tipos de filtros. Por un lado, se deberá diseñar e implementar un *ecualizador* digital que permita corregir la respuesta en frecuencia de un sistema electroacústico dado. Por otro lado, se buscará también implementar filtros eliminabanda para suprimir interferencias de banda angosta que se suman a la señal de audio. En la Figura 1 se pueden ver las distintas etapas del sistema electroacústico en su totalidad. Para el filtro eliminabanda se utilizarán filtros tipo *notch*. Por su parte, el ecualizador *deberá corregir la respuesta del sistema realizando la acción inversa a la respuesta en frecuencia del sistema electroacústico*, buscando que la ganancia de la respuesta final sea lo más plana posible (dentro del ancho de banda de interés). Desde el punto de vista de la percepción humana, puede considerarse una respuesta plana cuando la *desviación máxima es de 2 dB sobre la respuesta ideal en el rango del espectro audible*, ya que el oído humano no distingue apreciablemente variaciones inferiores a ésta.

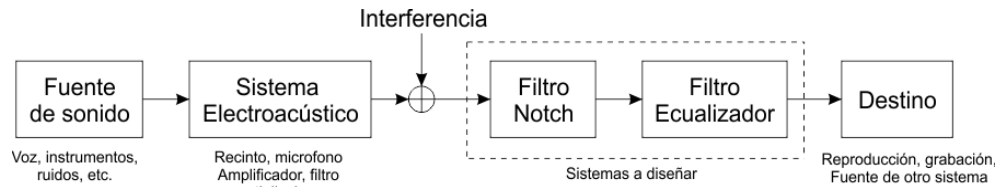


Figura 1: Cadena *electroacústica* total, incluyendo os filtros de ecualización y notch.

1.3. Datos suministrados

Fuente de sonido Para probar subjetivamente los resultados obtenidos con cada sistema implementado, se dispone en el campus de archivos de audio en formato `.wav`, denominados: `pista_1.wav`, `pista_2.wav`, etc., los cuales contienen pequeños segmentos de música. No obstante puede utilizarse cualquier otro tipo de audio, pero garantizando tramos cortos (unos pocos segundos de duración) para realizar las distintas pruebas. Se recomienda también ir variando los distintos archivos de audio para el testeo y no utilizar siempre el mismo. Cada pista son segmentos de audio de corta duración muestreadas a una frecuencia de $f_s = 44100 \text{ Hz}$.

Sistema electroacústico En el campus también se encuentra disponible el archivo `h_sys.mat`. Este archivo se corresponde con la respuesta impulsiva $h[n]$ del sistema electroacústico (generada artificialmente para limitar la complejidad), suponiendo que se ha capturado generando un impulso de sonido y muestreado a una frecuencia de muestreo de 44100 Hz (una de las formas para caracterización de recintos [1]) y cuya respuesta en frecuencia se desea compensar.

Interferencias La señal de interferencia deberá ser generada como la suma de tres tonos puros de frecuencias $f_1 = 210 \text{ Hz}$, $f_2 = 375 \text{ Hz}$ y $f_3 = 720 \text{ Hz}$ y amplitudes $A_1 = 0,05$, $a_2 = 0,03$ y $A_3 = 0,02$ respectivamente. Considere una frecuencia de muestreo $f_s = 44100 \text{ Hz}$ para generar dichos tonos en tiempo discreto.

1.4. Requerimientos

El ecualizador deberá cumplir con ciertos requerimientos para lograr la adecuada compensación del sistema, debiendo cumplirse las siguientes condiciones:

- Considere que la ganancia de la respuesta en frecuencia total debe garantizar una respuesta aproximadamente plana con un apartamiento que en lo posible no exceda los 2 dB de variación.
- La compensación debe garantizarse sólo en el rango de frecuencias audible. Idealmente de 20 Hz - 20 kHz, sin embargo, a los efectos prácticos, el ser humano en promedio suele distinguir el sonido dentro del rango 20Hz - 16kHz.

Recuerde que un buen criterio de diseño es aquel que cumple las especificaciones utilizando la menor cantidad de recursos materiales o computacionales.

2. Supresión de las interferencias

Siguiendo el esquema de la Figura 1, en esta parte del trabajo práctico nos enfocaremos en el diseño de un filtro tipo notch para eliminar las interferencias de banda angosta (que deberán sumarse a cada señal de prueba). Utilizaremos para comparar dos clases de filtros: i) un filtro FIR de fase lineal generalizada. ii) un filtro IIR mediante el diseño analógico y mapeo a discreto.

- (a) Genere la señal de interferencia $i[n] = i_1[n] + i_2[n] + i_3[n]$ (parámetrizada con el largo para poder ajustarlas a cualquiera de las pistas de audio) de acuerdo a los datos suministrados para este caso.
- (b) Implemente un filtro FLG tipo *notch* que elimine dichas interferencias. Puede utilizar el tipo de filtro FLG que desee, así como también definir las especificaciones que considere apropiadas. Grafique la respuesta en frecuencia del filtro implementado superpuesta al espectro de la señal de interferencia $i[n]$ y verifique si el diseño se ajusta apropiadamente.
- (c) Utilice las pistas de audio para testear los resultados. Para ello primero genere la señal contaminada con la interferencia $x[n] = s[n] + i[n]$, donde $s[n]$ es el audio original. Luego grafique el espectro de la señal filtrada $y[n]$ y haga un análisis de forma subjetiva, utilizando la función `sound(pista, fs)` (Matlab u Octave), reproduciendo las señales en el siguiente orden:
 - 1 Señal con interferencias
 - 2 Señal filtrada
 - 3 Señal original
- (d) Implemente un filtro IIR (puede elegir entre *Butterworth*, *Chebyshev-I*, *Chebyshev-II* o *Elíptico*) para diseñar un filtro notch IIR usando las transformaciones en frecuencia para filtros eliminabanda (este caso no fue incluido en la guía 3C pero es similar a los otros y está disponible en [4], Capítulo 10). Puede definir las especificaciones que considere más apropiadas. Luego grafique el módulo de la respuesta en frecuencia de los filtros superponiéndolos al espectro de señal de interferencia $i[n]$.
- (e) Se pide para el filtro IIR implementado el mismo análisis que en el ítem (c).

3. Ecualización del sistema electroacústico

3.1. Filtros de fase lineal

Se desea implementar el ecualizador mediante un filtro FLG multibanda tal que que no agregue distorsión de fase. Considere para ello el método de ventanas de acuerdo a las siguientes consignas.

- (a) Utilice la respuesta impulsiva del sistema $h[n]$ suministrada y grafique la inversa del módulo de su respuesta en frecuencia. De esta respuesta, obtenga las ganancias para el filtro ecualizador como $|H_{eq}(z)| = 1/|H(e^{j\omega})|$. Defina la función amplitud ideal $A_{eq}(\omega)$ y tolerancias, tanto de amplitud como de frecuencia, para cumplir lo mejor posible con los requerimientos.
- (b) Implemente el filtro multibanda que cumpla con las especificaciones definidas previamente. Si es necesario reajuste el orden M , la ventana o las frecuencias de corte hasta que lo considere necesario. Indique el tipo de filtro resultante y la ventana utilizada.
- (c) Grafique el módulo (en decibels) de la respuesta en frecuencia del ecualizador resultante $|H_{eq}(e^{j\omega})|$, del sistema electroacústico $|H(e^{j\omega})|$ y la total $|H_{tot}(e^{j\omega})| = |H(e^{j\omega})| \cdot |H_{eq}(e^{j\omega})|$. Verifique si se cumplen los requerimientos. También grafique el retardo de fase que introducen el ecualizador, el sistema electroacústico y el total.
- (d) Con la respuesta impulsiva del canal acústico $h[n]$ y utilizando las señales de prueba disponibles (sin interferencias), obtenga la señal distorsionada a la salida del sistema electroacústico. Luego aplique el filtro ecualizador y utilice las funciones de Matlab (u Octave) para escuchar las señales ecualizadas en el siguiente orden:
 - 1 Audio a la salida del sistema electroacústico.
 - 2 Audio final ecualizado.
 - 3 Audio original.

Verifique los resultados de acuerdo a su apreciación subjetiva. ¿Considera que se cumplieron con los objetivos de la ecualización?

3.2. Filtro de fase mínima

En el ecualizador FLG implementamos un multibanda definido a partir de las ganancias inversas de la respuesta en frecuencia del sistema electroacústico ajustando todos los parámetros de manera manual. En esta parte el objetivo es aplicar un ecualizador IIR directamente como un sistema inverso a partir de la descomposición de fase mínima del sistema electroacústico. ¿Porqué motivo hacíamos esto para un sistema inverso?. Dado que en este caso el filtro se obtiene automáticamente en función del sistema a compensar, no es necesario definir tolerancias ni especificaciones del mismo.

- (a) Determine en forma genérica (como productoria de polos p_i y ceros c_i) la transferencia del sistema electroacústico, su descomposición de fase mínima $H_{min}(z)$ y pasa todo de módulo unitario $H_{ap}(z)$. Luego determine la transferencia genérica del ecualizador teniendo especial cuidado en las constantes de escalamiento (esto es importante para que el sistema total ya ecualizado dé una ganancia unitaria).

- (b) Recordando que la respuesta impulsiva del sistema electroacústico $h[n]$ es una aproximación FIR (ya que se supone se obtuvo de un muestreo para un impulso acústico), grafique el diagrama de polos y ceros del sistema electroacústico $H(z)$, el sistema de fase mínima $H_{min}(z)$, el pasa todo $H_{ap}(z)$ y el ecualizador $H_{eq}(z)$. Sugerencia: puede usar las funciones `poly()` y `roots()` para pasar de raíces a coeficientes de un polinomio y viceversa (tenga en cuenta que para un orden elevado a veces éstas funciones pueden tener problemas numéricos).
- (c) Grafique en un mismo gráfico el módulo (en decibels) de $H(e^{j\omega})$, $H_{eq}(e^{j\omega})$ y la respuesta total $H_{tot}(e^{j\omega}) = H_{eq}(e^{j\omega}).H(e^{j\omega})$. Comente los resultados observados.
- (d) Grafique el retardo de grupo de los sistemas analizados en el punto anterior.
- (e) Compruebe subjetivamente los resultados siguiendo la misma consigna del punto 3.1 (d). Comente su apreciación y relaciónelo con los resultados de la ecualización.

4. Efectos numéricos

Sabemos que los filtros implementados con aritmética de punto fijo poseen efectos numéricos debido a la cuantización. En particular mencionamos el *overflow*, los *errores por redondeo o truncamiento de señales* y los *errores en el sistema por cuantización de coeficientes*. En esta parte analizaremos los efectos de cuantificar los coeficientes del filtro. Para ello nos basaremos en el filtro total $H_{neq}(e^{j\omega}) = H_n(e^{j\omega}).H_{eq}(e^{j\omega})$ compuesto por la cascada del filtro *notch* IIR y el ecualizador IIR.

- (a) Obtenga el módulo de la respuesta en frecuencia del filtro completo $|H_{neq}(e^{j\omega})|$ implementado con coeficientes cuantizados para distinta cantidad de bits: $W = \{16, 6, 3\}$. Grafique superpuestas las respuestas del sistema (en decibels) comparándolas con la respuesta computada con coeficientes en punto flotante (default) como referencia. Analice las diferencias (se recomienda no reproducir audio aplicando estos filtros hasta no verificar su estabilidad). Sugerencia: si bien Matlab tiene algunas opciones para el casteo de tipo de datos, a los fines de este trabajo práctico una forma simple y fácil de emular la cuantización de coeficientes para cualquier número de bits es utilizando `coef_w=round(coef*2^W)/2^W`.
- (b) Grafique el diagrama de polos y ceros del sistema en punto flotante superpuesto al del sistema cuantizado (para cada W por separado). Verifique la estabilidad en todos los casos. Sugerencia: recuerde que `poly()` y `roots()` pueden llegar a tener errores numéricos para un número elevado de elementos. Si observa problemas para graficar los polos y ceros con `zplane()` recuerde que siempre puede utilizarse directamente `plot()`; también puede verificar la estabilidad computando directamente el valor absoluto de las singularidades.

5. Conclusiones

Como conclusiones, elabore un resumen breve y conciso sobre las ventajas, desventajas o características particulares que considera para cada método propuesto en este trabajo. Además se sugiere verificar el funcionamiento del sistema completo aplicando los filtros *notch* y ecualizador en cascada para las señales con la distorsión del canal más las interferencias.

6. Herramientas de utilidad

A continuación se describe una lista de las funciones proporcionadas por las herramientas de software oficiales de la materia (Maltlab u Octave) que resultarán útiles para la realización de este trabajo práctico. Explore cada una de ellas.

- `h_sys = load('h_sys.mat')`
- `audio = wavread('pista_1.wav')`
- `sound(audio, fs)`
- `clear sound` o `clear playsnd`
- `[H,w] = freqz(b,a,nfft)`
- `y = filter(b,a,x)`
- `w = window(@hamming,M+1)`
- `zplane(b,a)`
- `r = roots(c)`
- `c = poly(r)`
- `grpdelay(b,a,nfft)`

Normas y material entregable

- Realizar los diseños requeridos y entregar un informe con los comentarios y/o resultados solicitados en cada ítem.
- Se sugiere que el informe sea conciso y cumpla específicamente los puntos solicitados (no deben incluirse desarrollos teóricos que no hayan sido pedidos explícitamente).
- Adjuntar los archivos de código relevantes organizados según su conveniencia o criterio, lo más claro posibles y con los comentarios necesarios.
- Cada miembro del grupo deberá poder explicar el funcionamiento de la totalidad de los algoritmos o criterios utilizados en cualquiera de las instancias de examen final, además de otros contenidos de la materia.

Referencias

- 1 Stan, Guy-Bart and Embrechts, Jean Jacques and Archambeau, Dominique. (2002). Comparison of different impulse response measurement techniques. Journal of the Audio Engineering Society. 50. 249-262.
- 2 Apuntes de cátedra: Ejemplos y guías de ejercicios.
- 3 A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall, 3rd. ed., 2009.
- 4 Porat, Boaz. A course in digital signal processing, (1997).