

DSD

Diseño de filtros digitales

© Roberto Ripio, 2012-2019

Introducción

DSD quiere decir (por ejemplo) Digital Speaker Design. Es un conjunto de scripts de GNU-octave para el cálculo de filtros FIR de ecualización y corte de altavoces en recintos multivía, y filtros FIR de corrección de sala. Contiene las funciones específicas para el diseño de filtros digitales, y los scripts de diseño que las utilizan.

GNU-octave es un entorno de programación interpretada para cálculos matemáticos que puede usarse interactivamente o por medio de scripts. DSD se ejecuta dentro de ese entorno, lanzando los scripts de cálculo con el nombre del archivo de proyecto como argumento.

Instalación

DSD puede ejecutarse en los sistemas operativos habituales. Las instrucciones a continuación se detallan para el sistema operativo Ubuntu-Linux, pero los procedimientos generales son semejantes en otros sistemas, y su usuario podrá trasladarlos fácilmente teniendo en cuenta también que el modo de indicar los directorios y la localización de los archivos de usuario pueden variar.

Los pasos son:

- Instalar GNU-Octave, más los paquetes de funciones necesarios.
- Instalar git.
- Instalar DSD con git.
- Dar de alta el directorio de DSD en la ruta de búsqueda de Octave.
- Dar de alta el directorio de DSD en la ruta de búsqueda de ejecutables del sistema operativo.

Octave

En Ubuntu-Linux: `'sudo apt install octave'`.

Es necesario que estén instalados los siguientes paquetes de Octave: control, general, io, signal y statistics. Dependiendo del sistema operativo esto se consigue de formas diferentes. En Ubuntu-Linux, por ejemplo, se ejecutaría la orden:

```
'sudo apt install octave-control octave-general octave-io  
octave-signal octave-statistics'
```

Es posible que la distribución de octave para algunos sistemas operativos ya tenga los paquetes necesarios instalados. Puede comprobarse ejecutando en la línea de órdenes de Octave la orden `pkg list`.

Para instalar en otros S.O. consultar la página web de Octave: <https://www.gnu.org/software/octave/#install>.

Git

En Ubuntu-Linux: `'sudo apt install git'`.

Para instalar en otros S.O. consultar la página web de git: <https://git-scm.com/downloads>.

DSD

Cambiar al directorio bajo el que se quiera instalar DSD, por ejemplo: `'cd /home/[user]'`, donde [user] se cambiará por el nombre de usuario real.

Clonar con git el repositorio de DSD: `'git clone https://github.com/rripiio/DSD'`.

Ruta de octave

Abrir Octave, y en su línea de órdenes, escribir la secuencia:

```
addpath (genpath ('/home/[user]/DSD/src'))  
savepath ()
```

Esto guardará permanentemente la ruta de carga de los scripts de DSD.

Ruta del sistema operativo

Editar el fichero de usuario `/home/[user]/.bashrc` y añadir:

```
# Añade DSD al path  
PATH=$PATH:/home/[user]/DSD/src
```

Recordamos que [user] se cambiará por el nombre de usuario real.

Confección de los filtros

El procedimiento es el siguiente:

- Elaboración de los archivos de respuesta en frecuencia de los diferentes altavoces de la caja acústica, en formato **.frd**.
- Elección de las frecuencias de corte y del tipo de crossover en cada corte.
- Escribir los parámetros del filtro en los correspondientes archivos de guión (extensión **.xof**), uno por cada vía.
- Ejecución del programa 'dsdxof', con el archivo de proyecto como parámetro, y opcionalmente añadiendo como parámetros la frecuencia de muestreo y la clase de filtro.
- Revisar los niveles de atenuación producidos por el filtro para tenerlos en cuenta en la estructura de filtrado y ganancia.

Estos pasos se detallan a continuación.

Elaboración de los archivos de respuesta en frecuencia

El filtrado se elabora partiendo de una cierta respuesta en frecuencia del altavoz (o de la vía, en caso de que esta tenga dos o más altavoces) en formato **.frd**, cuya elaboración queda a cargo del diseñador, con las herramientas para medición y exportación que considere oportunas.

Se hace así para tener la máxima flexibilidad para promediar, o suavizar, o lo que fuere que entiende el diseñador que representa mejor el comportamiento del altavoz que va a filtrar y ecualizar.

Es importante tener en cuenta que si los niveles relativos entre los diversos altavoces se respetan en estas curvas, los niveles de atenuación que se obtengan con la herramienta DSD también podrán usarse para nivelar las vías en el programa de convolución que ejecute los filtros.

Debe tenerse en cuenta que el nombre de archivo empleado será el que se use para componer, junto con la clase de filtro, el nombre de los filtros de salida.

Elección de las frecuencias de corte y del tipo de crossover

Hay dos tipos principales de filtro: Filtros de fase lineal (linear phase, LP) y filtros de fase mínima (minimum phase, MP). Dentro de los de fase mínima podemos optar entre Butterworth de cualquier orden, y Linkwitz-Riley de cualquier orden par.

Debe tenerse en cuenta que los filtros de fase lineal imparten a la señal un retardo que es intrínseco al filtro (ie. no depende del hardware usado), por lo que no deben mezclarse filtros LP y MP en diferentes cortes de una misma caja acústica.

En los filtros MP es posible indicar varias frecuencias de corte pasaaaltos, a fin de añadir a una vía los retardos de las vías inferiores. Añadiendo los mismo pasaaaltos con los que se cortan estas reproducimos el efecto de un filtro activo en cascada.

Confección de los archivos de proyecto

La carpeta **example** del paquete contiene un archivo ejemplo **_ejemplo.xof** que se puede copiar (este u otro ya elaborado) a una carpeta de trabajo, que será preferentemente aquella en que se tengan los archivos de medición, y editarlo a conveniencia.

Se han de cambiar el nombre a estos archivos por otros significativos, y se han de editar para asignarles los parámetros adecuados.

En cuanto a los nombres, el autor suele llamarlos por ejemplo **t.xof**. Es decir, con un prefijo que aluda a la vía (**t**, **m**, **w** por tweeter, mid, woofer), pero nada de esto es preceptivo, salvo la extensión del archivo (**.xof**).

Opciones por defecto

En el directorio de DSD está el archivo **dsdxof.ini**, con las opciones por defecto. Los archivos de guión específicos tienen precedencia sobre estas opciones. Un modo conveniente de operar es hacer archivos de guión que contengan solo los parámetros específicos que varíen respecto a las opciones por defecto.

Los parámetros de línea de órdenes tienen a su vez precedencia sobre lo anterior, de modo que pueden omitirse de los guiones la frecuencia de muestreo y la clase de filtro, a fin de emplear un solo guión para diversos filtros con los mismos cortes.

Parámetros

Se detalla a continuación el significado de los distintos parámetros, agrupados por el área de operación, que se expresa en el prefijo del nombre de cada parámetro:

GS, General Settings

GSLExp

Es la potencia de dos que expresa la longitud final del filtro. Es sabido que la operación FFT (transformada rápida de Fourier) requiere operandos cuya longitud sea una potencia de dos. Valores habituales serán *15* o *16*, que resultan en filtros de 2^{15} o 2^{16} coeficientes, respectivamente.

GSFs

Es la frecuencia de muestreo para la que se diseña el filtro. Puede omitirse si se da como segundo parámetro al llamar al programa.

GSLExpCalc

Es la potencia de dos que expresa la longitud de filtro usada en la fase de cálculo. En general será mayor que ***GSLExp*** para obtener mayor precisión.

FS File Settings

FSInputFile

Nombre del archivo **.frd** de la medición de la vía que corresponda.

FSNormFile

Archivo con los valores de normalización de niveles, para la posterior aplicación de ganancias por vía. Por defecto **niveles.txt**.

FSOutPcmFilter

Valor booleano (*true* or *false*) que indica si se generan filtros en formato raw **.pcm**. El formato de los filtros es ‘float 32’.

FSOutPcmExt

Extensión de los archivo de salida raw pcm (suele ser **.raw** or **.pcm**).

FSOutWavFilter

Valor booleano (*true* or *false*) que indica si se generan filtros en formato **.wav**.

FSOutWavDepth

Profundidad de bits de los filtros en formato **.wav**.

CF Crossover Filter

Debe tenerse en cuenta que, si bien los woofers o los tweeters no tienen tradicionalmente corte en el extremo de la banda, el filtrado digital permite o aconseja poner cortes en esos extremos, a criterio del diseñador, para algunas estrategias de ecualización de fase, o para mejorar los filtros de reconstrucción de los convertidores (apodizing filters).

CFClass

Clase de filtro (*lp* o *mp*). Puede omitirse si se da como tercer parámetro al llamar al programa.

CFLengthFactor

Para filtros *lp*, es el factor de longitud del impulso generado. Este factor multiplica al parámetro **GSFs/CFLowF** o **GSFs/CFHighF** (frecuencia de muestreo / frecuencia de corte), y permite generar filtros de igual pendiente a ambos extremos de la banda con la mínima longitud posible en cada extremo, y por tanto con mínimo pre-ringing.

En caso de que este factor sea demasiado alto pueden llegar a generarse filtros de menor pendiente en el lado izquierdo, si la longitud total del filtro no permite obtener la misma pendiente.

CFLowType

Para filtros *mp*, tipo del filtro pasaaltos (que filtrará el extremo izquierdo de la vía —low—). Puede ser *B* (Butterworth) o *LR* (LinkwitzRiley). No tiene efecto si **CFClass** es *lp*. Debe darse entre llaves, al tratarse de un “cell array”.

Puede darse como “cell array” de varios valores si se van a dar varios cortes pasaaltos para simular un filtro en cascada o para aplicar a un tweeter el retardo que provoca en el woofer su pasaaltos natural.

CFLowOrder

Es el orden del filtro pasaaltos *mp*. No tiene efecto si **CFClass** es *lp*.

Puede darse como vector de varios valores si se van a dar varios cortes pasaaltos para simular un filtro en cascada.

CFLowF

Frecuencia de corte correspondiente. Un valor 0 indica que no hay corte en este lado (p.ej. woofers).

Puede darse como vector de varios valores si se van a dar varios cortes pasaaltos para simular un filtro en cascada. Cuando el archivo de gui3n se use para filtros de fase lineal se usar3 solo el primer valor del vector como frecuencia de corte.

CFLowAsMP

En caso de que se implemente un pasaaltos butterworth en el woofer, indica si debe seguirse la misma curva de corte en los filtros de fase lineal, de modo que la curva de respuesta sea id3ntica para *mp* y *lp*. Debe darse un valor booleano.

CFHighType

Para filtros *mp*, tipo del filtro pasabajos (que filtrar3 el extremo derecho de la v3a —high—). Puede ser *Butterworth* o *LinkwitzRiley*. No tiene efecto si **CFClass** es *lp*.

CFHighOrder

Es el orden del filtro pasabajos *mp*. No tiene efecto si **CFClass** es *lp*.

CFHighF

Un valor 0 indica que no hay corte en este lado (p.ej. tweeters).

TW Transition Window

La estrategia general de ecualizaci3n y filtrado conjunto que lleva a cabo el programa puede implicar ecualizaciones con ganancias muy elevadas si se intenta ecualizar fuera de la banda pasante. Esto no es un problema si en los extremos de la banda hay un crossover, pero en el caso de tweeters y woofers puede ocurrir que en el extremo sin crossover haya anomal3as en la respuesta nominal debidas al ruido de medici3n o a artefactos de la interpolaci3n de nuevos puntos de frecuencia, que den lugar a filtros an3malos al invertir la respuesta. Para poner l3mites a esta ecualizaci3n y est3 el siguiente grupo de par3metros.

TWLimitEndLow

Es el l3mite inferior de la ecualizaci3n. Los valores de magnitud a frecuencias inferiores a este l3mite no se ecualizan. Si es cero se toma como l3mite el primer bin de frecuencia por encima de cero.

TWLimitBeginLow

La curva de respuesta de c3lculo tiene una transici3n suave desde este punto hasta **TWLimitEndLow**. Si este par3metro es 0 o es menor que **TWLimitEndLow** se ignora. Si el valor es v3lido prevalece sobre **TWIntervalLow**.

TWIntervalLow

Define el rango de transici3n como un intervalo en octavas desde **TWLimitEndLow**.

TWLimitEndHigh

Es el límite superior de la ecualización. Los valores de magnitud a frecuencias superiores a este límite no se ecualizan. Si es muy alto se toma como límite el primer bin de frecuencia por encima de cero.

TWLimitBeginHigh

La curva de respuesta de cálculo tiene una transición suave desde este punto hasta ***TWLimitEndHigh***. Si este parámetro es 0 o es mayor que ***TWLimitEndHigh*** se ignora. Si el valor es válido prevalece sobre ***TWIntervalHigh***.

TWIntervalHigh

Define el rango de transición como un intervalo en octavas desde ***TWLimitEndHigh***.

PS Plot Settings

Estos valores definen algunos aspectos de los gráficos de salida.

PSFLow

Extremo izquierdo de frecuencia.

PSFHigh

Extremo derecho de frecuencia.

PSVTop

Valor máximo de presión sonora en los gráficos (dB).

PSVStep

Escalones de presión sonora en los gráficos (dB).

PSVRange

Rango total de presiones sonoras de salida (dB).

PSPos

Posición en unidades normalizadas al tamaño de la pantalla (entre 0 y 1), como vector fila de las dos coordenadas. $[0,0]$ es la posición de la esquina superior izquierda.

PSSize

Tamaño en unidades normalizadas al tamaño de la pantalla (entre 0 y 1), como vector fila de las dos coordenadas.

PSOutRaster

Valor booleano (*true* or *false*) que indica si se generan gráficos en formato raster.

PSOutRasterExt

Extensión del archivo de gráficos raster.

PSOutVector

Valor booleano (*true* or *false*) que indica si se generan gráficos en formato vectorial.

PSOutVectorExt

Extensión del archivo de gráficos vectoriales.

PSShow

Muestra el gráfico en pantalla y detiene el programa para examinarlo.

Ejecución del programa DSD

En una terminal se cambiará a la carpeta de trabajo (`'cd [carpeta de trabajo]'`), o bien se dará el parámetro del archivo de guión con su ruta completa, sin extensión.

Al ejecutar `'dsdxof <archivo_de_guión>'` se generará el filtro **.pcm** y los gráficos explicativos de la vía correspondiente.

GSFs (frecuencia de muestreo) y **CFClass** (tipo de filtro, *mp* o *lp*) pueden darse como parámetros adicionales que tendrán precedencia sobre el guión. La frecuencia de muestreo se da como su valor numérico. Puede además añadirse el parámetro *nopause*, que evitará la pausa para mostrar gráficos en pantalla:

```
'dsdxof <archivo_de_guión> [fs <valor_numérico>] [class <mp|lp>]
[nopause]'
```

Por ejemplo, una posible llamada al programa podría ser:

```
'dsdxof t fs 44100 class lp'
```

Que calcularía un filtro según lo indicado en el archivo **t.xof** del directorio actual, con filtros para una **GSFs** de *44100*, de fase lineal.

Los parámetros no son posicionales, de modo que puede darse uno solo de ellos, o en distinto orden, pero deben ir siempre a continuación del nombre del archivo de guión, que sí es posicional.

Es correcto `'dsdxof t fs 44100'` y `'dsdxof t'` pero no `'dsdxof class lp t'`.

El nombre de los filtros generados será:

xo-<clase_de_filtro>-<nombre_del_frd_de_la_medición>.pcm

dentro de un subdirectorio (respecto a aquel en que esté el archivo de guión) cuyo nombre es la frecuencia de muestreo.

Cálculos múltiples desde un script de octave

Al poder especificar como parámetros la frecuencia de muestreo y el tipo de filtro (*lp* o *mp*) es posible hacer un script para calcular de una sola vez filtros *lp* y *mp* para varias frecuencias de muestreo, para todas las vías del altavoz, con un archivo de guión por vía en que se especifiquen los parámetros básicos (cortes, etc.) que se repiten. Puede consultarse el script **calc_example** de la carpeta **example** para ver los detalles, o para modificarlo adaptándolo al caso del usuario.

Funciones del paquete DSD

audioaxe

Configura una gráfica de respuesta en frecuencia con un formato convencional y obtiene sus ejes.

```
audioaxe(magtop, magstep, flow, fhigh, plotitle)
```

```
F          = Vector de frecuencias.
dBmag      = Vector de magnitudes en dB.
magtop     = Máximo de la magnitud (dB).
magrange   = Rango visible de la magnitud (dB).
magstep    = Escalones de dB a efectos de rejilla y rotulación.
flow       = Límite inferior de frecuencias (Hz).
fhigh      = Límite superior de frecuencias (Hz).
plotitle   = Título de la gráfica.
```

audioplot

Dibuja una gráfica de respuesta en frecuencia con un formato convencional.

```
audioplot(F, dBmag, magtop, magstep, flow, fhigh, plotitle)
```

```
F          = Vector de frecuencias.
dBmag      = Vector de magnitudes en dB.
magtop     = Máximo de la magnitud (dB).
magrange   = Rango visible de la magnitud (dB).
magstep    = Escalones de dB a efectos de rejilla y rotulación.
flow       = Límite inferior de frecuencias (Hz).
fhigh      = Límite superior de frecuencias (Hz).
plotitle   = Título de la gráfica.
```

biqshelving

Obtiene los coeficientes del filtro IIR asociado a un filtro shelving tal como se define en www.linkwitzlab.com. La pendiente se limita a la ausencia de overshoot, con un máximo de 6 dB/oct. Las ganancias en la banda pasante son siempre positivas.

```
[b,a] = biqshelving(fs, f1, f2, type)
```

```
[b,a]      = Coeficientes del filtro IIR.
fs         = Frecuencia de muestreo.
f1         = Frecuencia de inicio de la pendiente.
f2         = Frecuencia final de la pendiente.
type       = Valor de cadena entre: lowShelf o highShelf.
```

centerimp

Aumenta la longitud de un impulso centrándolo. El impulso original debe tener longitud impar.

```
imp = centerimp(imporig,m)
```

```
imp        = Coeficientes del filtro FIR.
imporig    = Impulso a centrar. Debe ser de longitud impar.
m          = Longitud final del impulso.
```

crossButterworth

Obtiene el filtro FIR de un filtro Butterworth de orden n.

```
imp = crossButterworth(Fs,m,nl,fl,nh,fh)

imp      = Coeficientes del filtro FIR.
Fs       = Frecuencia de muestreo.
m        = Número de muestras.
nl       = Orden del filtro pasaaltos.
fl       = Frecuencia de corte inferior (pasaaltos). 0 para pasabajos.
nh       = Orden del filtro pasabajos.
fh       = Frecuencia de corte superior (pasabajos). 0 para pasaaltos.
```

crossLinear

Obtiene el filtro FIR windowed sinc de fase lineal y alta pendiente, con ventana Blackman-Harris. Genera un filtro de longitud efectiva igual a un cierto número de ciclos de señal (a la frecuencia de corte), centrado en un vector de ceros de longitud m. m siempre es par, y el filtro como tal siempre es impar, de modo que el centrado tiene un desplazamiento de una muestra hacia el pasado.

```
imp = crossLinear(Fs,m,nc,fl,fh)

imp      = Coeficientes del filtro FIR.
Fs       = Frecuencia de muestreo.
m        = Número de muestras.
nc       = Número de ciclos del impulso.
fl       = Frecuencia de corte inferior (pasaaltos). 0 para pasabajos.
fh       = Frecuencia de corte superior (pasabajos). 0 para pasaaltos.
```

crossLinkwitzRiley

Obtiene el filtro FIR de un filtro Linkwitz-Riley de orden nl, nl par.

```
imp = crossLinkwitzRiley(Fs,m,nl,fl,nh,fh)

imp      = Coeficientes del filtro FIR.
Fs       = Frecuencia de muestreo.
m        = Número de muestras.
nl       = Orden del filtro pasaaltos.
fl       = Frecuencia de corte inferior (pasaaltos). 0 para pasabajos.
nh       = Orden del filtro pasabajos.
fh       = Frecuencia de corte superior (pasabajos). 0 para pasaaltos.
```

crossLRmag

Obtiene la magnitud de los filtros Linkwitz-Riley pasabajos y pasaaltos con pendiente dada sobre un semiespectro. El espaciado de frecuencias es arbitrario.

```
[magL,magH] = crossLRmag(F,fc,slope)

magL      = Vector columna con la magnitud del pasabajos.
magH      = Vector columna con la magnitud del pasaaltos.
F         = Vector columna con las frecuencias del semiespectro.
fc        = Frecuencia de corte.
slope     = Pendiente en dB/oct.
```

dB2mag

Pasa un vector de decibelios a magnitud.

```
b = dB2mag(a)

b      = Magnitud.
a      = Decibelios.
```

delta

Obtiene un impulso de longitud ***m*** con valor ***l*** en su primera muestra.

```
imp = delta(m)

imp      = Coeficientes del filtro FIR.
m        = Número de muestras.
```

deltacentered

Obtiene un impulso de longitud ***m*** con valor ***l*** en su muestra central.

```
imp = deltacentered(m)

imp      = Coeficientes del filtro FIR.
m        = Número de muestras. Debe ser impar.
```

frjoin

Une dos respuestas en magnitud sobre el semiespectro, mezclándolas en un intervalo de índices dado.

```
ssp = frjoin(ssp1,ssp2,k1,k2)

ssp      = Vector columna con la magnitud de la mezcla.
ssp1     = Vector columna con la respuesta a mezclar por la izquierda.
ssp2     = Vector columna con la respuesta a mezclar por la derecha.
k1       = Primer índice del intervalo.
k2       = Segundo índice del intervalo.
```

gainpcm

Aplica una cierta ganancia en dB a un archivo **.pcm** y lo guarda.

```
gainpcm (filename, gaindB)

filename = Nombres del archivo pcm.
gaindB   = Ganancia a aplicar (dB).
```

loadfrd

Carga datos de respuesta en frecuencia desde un archivo **.frd**.

Se ignoran las líneas con texto no numérico.

```
[freq, magdB, pha] = loadfrd (filename)

freq      = Vector de frecuencias.
magdB     = Magnitud en dB.
pha       = Fase.
filename  = nombre completo del archivo .frd.
```

mag2dB

Pasa un vector de magnitud o potencia a decibelios .

```
b = mag2dB(a)

b      = Decibelios.
a      = Magnitud.
```

minexcphsp

Obtiene el espectro de fase mínima y el pasatodo con el exceso de fase a partir de un espectro completo.

```
[minph, excph] = minexcphsp(sp)

minph      = Espectro completo de fase mínima con la misma magnitud de
             espectro que imp.
excph      = Espectro completo pasatodo de exceso de fase.
sp         = Espectro completo. Longitud par.
```

minphsp

Obtiene el espectro de fase mínima a partir de un espectro completo.

```
minph = minphsp(sp)

minph      = Espectro completo de fase mínima con la misma magnitud que
             sp.
sp         = Espectro completo. Longitud par.
```

savepcm

(Tomada de DRC-fir) Escribe archivos **.pcm**.

```
savepcm(pcm, fname)

pcm        = Vector del impulso.
fname      = Nombre de archivo .pcm.
```

semiblackman

Obtiene la mitad derecha de una ventana Blackman de longitud ***m***.

```
w = semiblackman(m)

w          = Ventana.
m          = Número de muestras.
```

semisp

Obtiene el espectro de las frecuencias positivas a partir de un espectro completo.

```
ssp = semisp(wsp)

ssp        = Semiespectro entre 0 y  $m/2$ .
wsp        = Espectro completo entre 0 y  $m-1$  ( $m$  par).
```

trwcos

Genera ventanas de transición complementarias en un intervalo dado, según una función “raised cosine” en escala de frecuencias logarítmica.

```
[trw1, trw2] = trwcos(n1, n2)

trw1       = Ventana de transición de izquierda a derecha.
trw2       = Ventana de transición de derecha a izquierda.
n1         = Índice del extremo izquierdo de la ventana.
n2         = Índice del extremo derecho de la ventana.
```

wholesplp

Obtiene el espectro simétrico completo a partir del espectro de las frecuencias positivas.

```
wsp = wholesplp(ssp)
```

```
    wsp      = Espectro completo entre 0 y m-1 (m par).  
    ssp      = Semiespectro entre 0 y m/2.
```

wholespmp

Obtiene el espectro causal completo a partir del espectro de las frecuencias positivas.

```
wsp = wholespmp(ssp)
```

```
    wsp      = Espectro completo entre 0 y m-1 (m par).  
    ssp      = Semiespectro entre 0 y m/2.
```