

Tema 5

Procesadores de efectos

Operaciones o filtros que corresponden a técnicas de procesamiento que se aplican sobre algunas propiedades para modificarlas, a veces, es inevitable al modificar una alterar otra.

Procesadores de altura

Tienen como objetivo la detección o modificación de la altura de los sonidos, por lo que la base de los métodos pasa por encontrar su frecuencia fundamental y, en su caso, alterarla y cambiar los valores de las frecuencias parciales de sus espectros.

Detección de la altura

Objetivo conocer el valor de la frecuencia fundamental de un sonido y seguir su evolución temporal. Una señal que contiene un sonido musical es analizado para detectar qué notas, con sus alturas y duraciones, han originado dicho sonido. Es una **conversión de audio a partitura**.

Dos categorías:

Busqueda del periodo fundamental del sonido en el dominio temporal (luego se convierte en la frecuencia fundamental como $f_0 = 1/T_0$),

busqueda de la f_0 directamente en el espectro de la señal.

Transposición

Consiste en cambiar la altura del sonido haciendo que sea más agudo o más grave, manteniendo las relaciones entre las frecuencias de los parciales

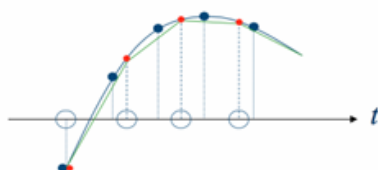
Ajustes microtonales: modificar levemente la frecuencia.

Intervalos tonales: trasponer ascendente o descendente una altura

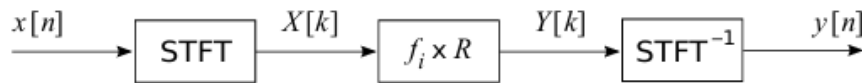
Ejemplo. Si tenemos un sonido cuyo espectro consta de los cuatro primeros armónicos con frecuencias 50 (fundamental), 100, 150 y 200 Hz; su transposición en una sexta menor ascendente equivale (en la afinación justa) a multiplicar todas ellas por $8/5$, dando lugar a 80, 160, 240 y 320 Hz; donde la proporción de f_0 , $2f_0$, $3f_0$ y $4f_0$ entre las frecuencias se mantiene. □

Para hacer esto en el dominio temporal, se reproduce la señal a velocidad distinta de la que fue grabada o muestreada. Si usamos menos muestras de las tomadas (ascendente) o más (descendente)

Ejemplo. Si se toman 4 de cada 5 muestras, las frecuencias parciales de la onda se verán elevadas en $5/4$ de las originales; es decir, habremos transpuesto una tercera ascendente (ver Fig. 5.2). Esta técnica produce un cambio de la frecuencia de muestreo efectiva. En el caso de transposiciones ascendentes hay que llevar cuidado porque la nueva $f'_s < f_s$ y, por lo tanto, también lo será la nueva Nyquist. En este ejemplo, $f'_s = \frac{4}{5}f_s$ y Nyquist será $f'_s/2 = \frac{2}{5}f_s$. Así, todas las frecuencias del espectro de la señal que se hallaran entre $2f_s/5 < f < f_s/2$ causarían *aliasing* y deberían ser filtradas previamente para evitarlo. □



Se puede trabajar en el dominio de la frecuencia, calcular el espectro de la señal y luego desplazar sus frecuencias, recuperar la señal modificada mediante la transformada inversa de Fourier



El desplazamiento de cada parcial linealmente proporcional, dependiendo de la relación de transposición deseada

Armonizadores

Producen una o varias señales transpuestas cuya relación armónica con la señal de entrada se fija de antemano y las señales resultantes se mezclan con la original

Ejemplo. Si de un sonido obtenemos dos copias transpuestas con las relaciones $R_{III} = 5/4$ y $R_V = 3/2$, respectivamente, y las sumamos, obtendremos un acorde I + III + V, que es una triada mayor, a partir de la señal monofónica original. □

Vibrato

modulación de altura a baja frecuencia

La técnica para implementar un vibrato sobre una señal cualquiera es insertar una línea de retardo variable controlada por un oscilador de baja frecuencia (LFO, low frequency oscillator). El LFO hará variar t_D , y oscila entre $t_D - AD$ y $t_D + AD$.

Ejemplo. Si queremos aplicar un vibrato de $f_m = 1$ Hz, variando el t_D central de 3 ms en $AD = \pm 2$ ms, el LFO creará una señal moduladora sinusoidal entre -2 y +2 que se sumará a t_D para que el retardo oscile entre 1 y 5 ms, una vez por segundo. En un sistema digital con $f_s = 44.100$ Hz, esto supondrá que el número de muestras del retardo, $D[n]$, se irá modificando periódicamente para retrasar la señal entre $D = 44$ muestras (según $D = t_D / f_s$ cuando $t_D = 0,001$ s) y $D = 220$ muestras para 0,005 s. □

Procesadores de la dinámica

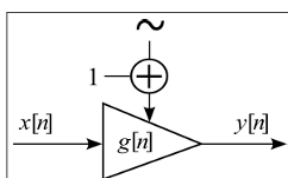
la ganancia es controlada automáticamente por medio de alguna señal externa o por el propio nivel de la señal de entrada

Se basa en un sistema de detección de nivel de amplitud, un algoritmo para obtener un factor de ganancia a partir del resultado del seguidor de envolvente y un multiplicador a la señal de entrada

Procesador	Actúa si...	Umbral	Relación de ganancia
Limitador	$X > \text{umbral}$	Θ_L grande	$R_L = n:1$ con n grande
Compresor	$X > \text{umbral}$	Θ_C grande	$R_C = n:1$ con n pequeña
Expansor	$X < \text{umbral}$	Θ_E pequeño	$R_E = 1:n$ con n pequeña
Puerta de ruido	$X < \text{umbral}$	Θ_P pequeño	$R_P = 1:n$ con n grande

Trémolo

Como el vibrato, pero ahora se modula la Amplitud de la señal



Un oscilador de baja frecuencia genera una onda cuya amplitud A_g será la ganancia máxima a aplicar

$g[n] = 1$, y oscilará entre $1-A_g$ y $1+A_g$ mientras $A_g < 1$

Ejemplo. Supongamos que tenemos una onda de amplitud constante -6 dBFS, que es la mitad del valor máximo que podemos digitalizar. Si aplicamos un trémolo debemos preocuparnos por que la nueva amplitud máxima no supere el límite de amplitud, por lo que no deberá suponer una amplificación mayor de $+6$ dB.

Compresores/Limitadores

La misión de un compresor es reducir la diferencia entre sus amplitudes mínima y máxima. La misión de los limitadores es evitar que se alcance el nivel de saturación de un equipo. Impide que la amplitud se acerque peligrosamente a un nivel prohibido.

Procesamiento de los compresores y limitadores

La reducción del nivel de la señal que se pasa del umbral se controla mediante una tasa de compresión (RC).

El algoritmo se ejecuta cuando su nivel supera el umbral:

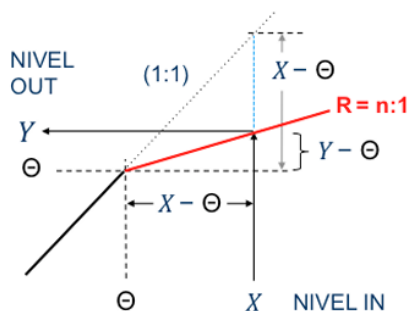
$\Delta A_{IN} = X - \Theta_C$, siendo X el nivel en dBFS de la señal, $X = 20 \log_{10} \frac{x[n]}{A_{max}}$

de manera que lo que sobra en:

$$\Delta A_{OUT} = Y - \Theta_C$$

es el resultado de aplicar la compresión en la entrada:

$$\Delta A_{OUT} = \frac{\Delta A_{IN}}{R_C} = \frac{X - \Theta_C}{R_C}$$



$$R_C = \frac{\Delta A_{IN}}{\Delta A_{OUT}} = \frac{X - \Theta_C}{Y - \Theta_C}$$

$$Y = \Theta_C + \frac{1}{R_C} (X - \Theta_C)$$

$$R_C = \frac{\log_{10} \frac{\hat{x}}{\theta_c}}{\log_{10} \frac{\hat{y}}{\theta_c}}$$

$$g[n] = \frac{\hat{y}}{\hat{x}} \text{ será}$$

$$g[n] = \left(\frac{\hat{x}}{\theta_c} \right)^{\frac{1}{R_C} - 1}$$

$$\hat{y} = \hat{x} \left(\frac{\hat{x}}{\theta_c} \right)^{\frac{1}{R_C} - 1}$$

Ejemplo. Supongamos que tenemos una señal a la que aplicamos un compresor con $R_C = 4:1$ y $\Theta_C = -8$ dBFS. Mientras el nivel de la señal esté por debajo de los -8 dB, el compresor no actuará y pasará sin ninguna modificación. Cualquier exceso sobre este nivel, se verá dividido por 4. Si en un momento dado, el nivel fuera -3 dB, ello supondría un exceso de $\Delta A_{IN} = X - \Theta_C = -3 - (-8) = +5$ dB sobre el umbral. Por tanto, la reducción será de $\Delta A_{OUT} = \Delta A_{IN} / R_C = 5/4 = +1,25$ dB, y el nivel de salida será $Y = -8 + 1,25 = -6,75$ dB. □

Un limitador es exactamente igual que un compresor, pero con una tasa de compresión muy grande.

Aspectos prácticos de estos procesadores

Alteración de los ataques cortos: los compresores incorporan un tiempo de ataque, como el tiempo que tarda en empezar a actuar la reducción de ganancia después de que la señal haya superado el umbral

Encendidos y apagados frecuentes (efecto bombeo): tiempo de liberación, t_R por lo que la compresión sigue actuando un tiempo después de que la señal baje su nivel por debajo del umbral

Entrada brusca de la atenuación: Con rodilla, la compresión entra suavemente porque la tasa de compresión va creciendo suavemente desde un poco por debajo del umbral, hasta alcanzar RC

Expansores y Puertas

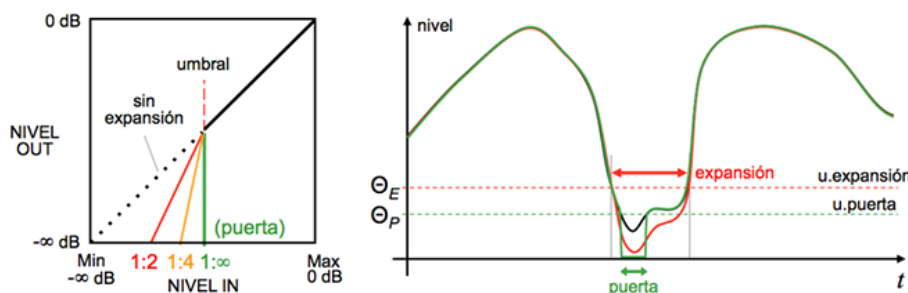
Es aumentar el rango dinámico de unas señales, es decir, la diferencia entre sus niveles máximo y mínimo. La forma de aumentar la diferencia entre esos niveles es reduciendo el volumen de las partes de menor amplitud.

Procesamiento de los expansores / Puertas

Mismo sistema que compresores y limitadores, con dos diferencias

El umbral suele ser mucho menor que el de compresión

Los umbrales de expansión suelen ser $E < -40$ dB



Ejemplo. R_E indica cuánto se atenúa la amplitud del sonido que entra por debajo del umbral. Una relación $R_E = 1:4$ para una señal que esté 3 dB por debajo del umbral producirá una señal que estará 12 dB por debajo de ese umbral en la salida. Si $\Theta_E = -40$ dBFS y el nivel de entrada fuera $X = -43$ dBFS, la salida (según la Ec. (5.3), pero usando los parámetros de expansión) tendría un nivel $Y = \Theta_E + \frac{1}{R_E}(X - \Theta_E) = -40 + 4(-43 + 40) = -40 - 12 = -52$ dBFS. \square

Uso combinado

Ejemplo. Supongamos que $\Theta_C = -10$ dBFS y $R_C = 4:1$, para una amplitud de la entrada $X = 0$ dB, el exceso de nivel de la entrada será $X - \Theta_C = +10$ dB. La salida será $Y = -10 + 10/4 = -7,5$ dBFS. Es decir, al máximo nivel de la entrada, la salida no supera los $-10(1 - \frac{1}{4})$ dB, por tanto, el limitador nunca entrará en funcionamiento si $\Theta_L \geq -7,5$ dBFS. \square

Procesadores del tiempo

Alargan o encogen la duración de una señal sonora, y luego describiremos diferentes tipos de ecos

Estiramiento/Encogimiento: expansión o contracción de la escala de tiempos sin modificar las alturas ni sus espectros

Tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. En el dominio temporal existen diversas técnicas, como la reproducción a velocidad variable o la granulación.

Reproducción a velocidad variable: la señal sea reproducida en un tiempo diferente a través de una modificación en el muestreo expresado como:

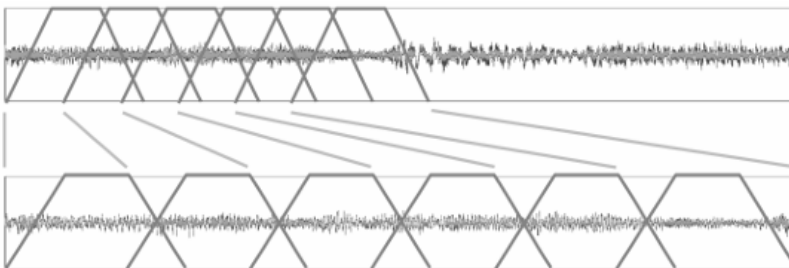
$$n T_{s,NEW} = n T_{s,IN} / v \quad v > 1 \text{ Encogimiento; } v < 1 \text{ estiramiento}$$

Hay que transformar f_{sNew} en f_{sOut} .

Si $v < 1$, $f_{sIn} > f_{sNew} < f_{sOut}$.

Si $v > 1$, $f_{sIn} < f_{sNew} > f_{sOut}$.

Granulación: partir la señal en pequeños trozos de unos pocos milisegundos, aplicandoles una ventana que se va desplazando con solapamiento y con una determinada envolvente



Retardos: uso de líneas de retardo para crear gran variedad de procesadores

$$t_D = D T_s = D / f_s.$$

Ejemplo. En un sistema que trabaje con una $f_s = 48 \text{ kHz}$, un retardo de $D = 24$ muestras, corresponde a un $t_D = 24/48000 = 0,0005 \text{ s}$ (0,5 ms) y, al contrario, un $t_D = 1 \text{ ms}$ se logra retrasando la señal en $D = t_D \times f_s = 48$ muestras. \square

Hay dos tipos, líneas de retardo donde el tiempo de retardo es fijo, y otras donde el tiempo de retardo es variable

Si $D = 1$, tendremos un filtro de pasa-baja (si restamos las muestras será pasa-alta)

Si $D = 2$, tendremos filtros elimina-banda o pasa-banda

Si $t_D = 1 \text{ ms}$, efectos de filtros de peine

Cortos: $t_D < 10 \text{ ms}$ (filtros de una única banda de paso o peines)

Medios $10 \text{ ms} < t_D < 50 \text{ ms}$. Resaltan la señal dando sonoridad

Largos: $t_D > 50 \text{ ms}$. Crean ecos percibidos como repeticiones del sonido original

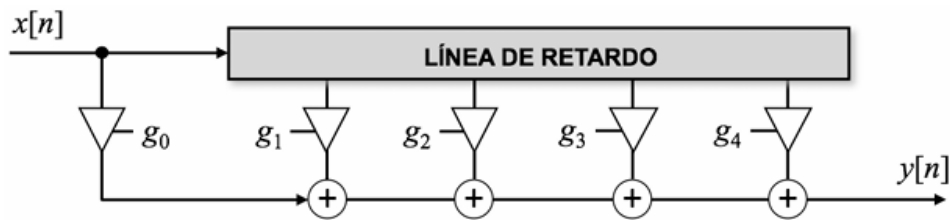
Ecos Simples

Para construir ecos, tenemos que tener un valor de D tal que $t_D > 50 \text{ ms}$ y su ecuación del filtro es:

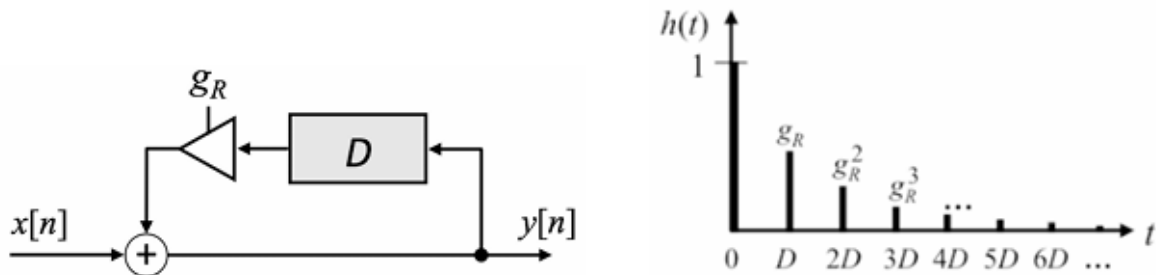
$$y[n] = x[n] + g_R \cdot x[n - D].$$

Ecos Múltiples Contables (multi-tap)

Si queremos tener mas de 1 eco controlado, tendremos que aplicar un retardo múltiple.



Ecos Múltiples:



$$y[n] = x[n] + g_R \cdot y[n - D]$$

El tiempo durante el que se podrán oír los ecos se puede calcular de la siguiente forma:

$$t_{r60} = t_D \times \frac{60}{-20 \log_{10} g_R}$$

Ejemplo. Si $g_R = 0,6$, el denominador (que está en dB) valdrá 3. Si $t_D = 200$ ms obtenemos $t_{r60} = 2,7$ s. Si aumentamos la ganancia hasta $g_R = 0,8$ entonces $t_{r60} = 6,2$ s y si disminuimos $g_R = 0,4$ tendremos que $t_{r60} = 1,5$ s. Todo ello con el mismo valor de t_D , que influye directa y linealmente en t_{r60} . Si en la última configuración duplicamos t_D hasta 400 ms, entonces se duplicará también $t_{r60} = 3$ s. \square

Procesadores de la situación

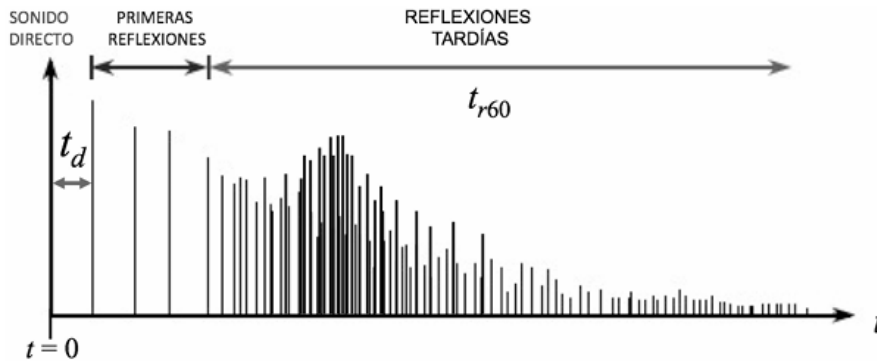
Las técnicas incluyen efectos como el control del panorama o de la distancia aparente para posicionar una fuente sonora en el espacio. Por otra parte, se usan también las llamadas reverberaciones.

Reverberaciones: resultado de múltiples reflexiones del sonido en un recinto acústico. Llegan al oyente en masa con retardos menores de 50 ms

Tiempo de retardo inicial (td): diferencia en tiempo entre que nos llega el sonido directo y su primera copia (< 50 ms)

Primeras reflexiones: son las que se reciben a partir del primer reflejo en las superficies (entre 5 y 20)

Reflexiones tardías: se distribuyen más aleatoriamente y mucho más abundantemente
Tiempo de reverberación: tiempo durante el que se oyen las reverberaciones.



Existen unidades de reverberación especiales que tratan de crear sonoridades exóticas, como las reverberaciones puenteadas o las inversas. Estas cortan las reflexiones tardías antes de su duración natural.

Reverberadores analíticos: simulan múltiples reflexiones mediante la generación de copias del sonido usando filtros peine de tiempos medios y pasa-todas

Reverberadores por auralización: se replica el proceso sonoro de un espacio acústico mediante la convolución de la señal

Ecualizadores: proceso mediante el cual se modifica el espectro de un sonido, atenuando o aplicando determinadas bandas de frecuencias de la señal. No solo son capaces de atenuar sino también de amplificar (filtros activos)

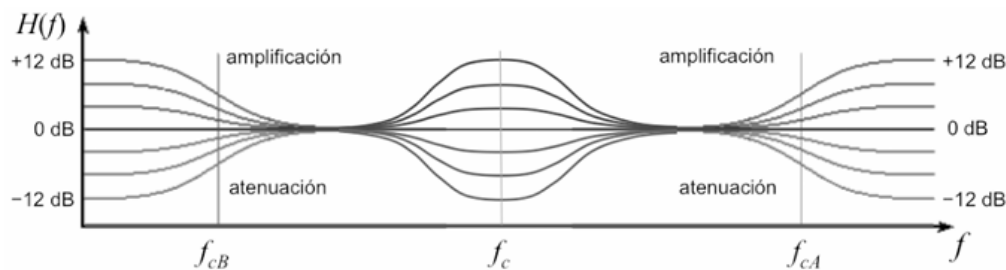
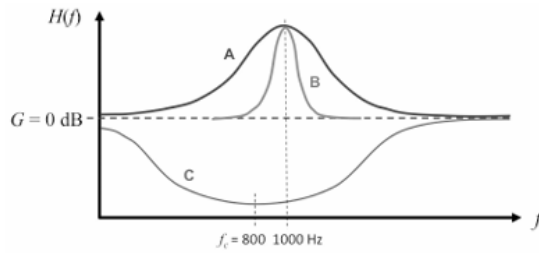


Figura 5.19: Respuesta en frecuencia de filtros pasa-baja, pasa-banda y pasa-alta en ecualizadores gráficos. f_{cB} y f_{cA} corresponden, respectivamente, a las frecuencias de corte de los filtros pasa-baja y pasa-alta. f_c es la frecuencia central del pasa-banda.

Ecualizadores gráficos: conjunto de filtros pasa-banda dispuestos en paralelo, cada uno de ellos centrado en una frecuencia f_c fija. El usuario controla la ganancia en cada una de las bandas de frecuencias. Interfaz intuitiva. Lo normal es que tengan filtros cuya frecuencia esté separada por una octava

Ecualizadores paramétricos: son más flexibles aunque también más difíciles de manejar. Constan de un filtro pasa banda en el que no solo se puede modificar la ganancia sino su frecuencia central y el ancho de banda

Ejemplo. La curva A corresponde a un comportamiento de amplificación con gran ancho de banda $Q = 1$, $f_c = 1$ kHz y $G > 0$ dB. El caso B corresponde a un ajuste con la misma ganancia y frecuencia pero con una $Q = 4$, por tanto menor ancho de banda, $W = f_c/4 = 250$ Hz. El caso C es totalmente diferente, pues atenúa ($G < 0$ dB) alrededor de 800 Hz y en un ancho de banda mucho mayor ($Q = 0,8$), igual a $800/0,8 = 1000$ Hz en 800 ± 500 Hz. \square



Wah-wah: efecto popular entre guitarristas, consiste en un filtro pasa-banda de f_c variable y de banda estrecha. El valor de la f_c se suele controlar con un pedal

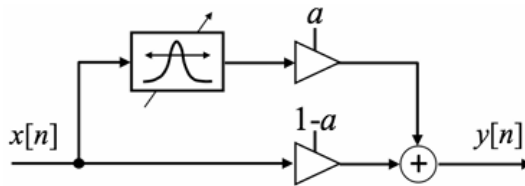


Figura 5.23: Esquema de un wah-wah digital, implementado como un pasa-banda de frecuencia central variable.

Flanger: se crea mezclando la señal con una copia de ella misma con un retardo de los que consideramos cortos ($1 < t_D < 15$ ms) pero que cambia constante y cíclicamente

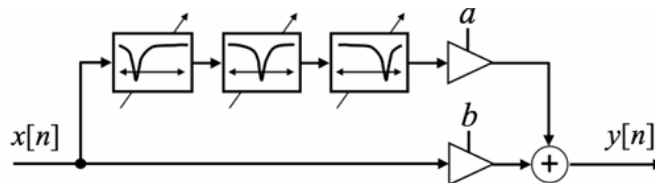


Figura 5.24: Esquema de un phaser digital, implementado como una cascada de filtros eliminabanda de frecuencia central variable, con coeficientes a y b que controlan los volúmenes relativos de efecto y señal seca, respectivamente.

Flanger digital usa una configuración de tipo peine IIR con una línea de retardo de tiempo variable $D[n]$. La ecuación del filtro es:

$$y[n] = x[n] + g_R y[n - D[n]]$$

Siendo $D[n] = D_0 + A_D \sin(2\pi f_m n / f_s)$

Ejemplo. Supongamos que el retraso D_0 fuera el número de muestras que haga retrasar la señal 2 ms. Con una señal muestreada a $f_s = 44.100$ Hz, este número es $D_0 = f_s \times t_D = 44.100 \times 0,002 = 88$ muestras. Si queremos que el LFO module este retraso estableciendo un límite inferior al t_D de 1 ms y que oscile dos veces por segundo, este oscilador debe crear una onda de amplitud $A_D = 44$ muestras con una frecuencia $f_m = 2$ Hz: $D = 88 + 44 \sin(4\pi n / f_s)$. \square

La diferencia entre el anger y el phaser está en que en el phaser las muescas se distribuyen arbitrariamente a lo largo de las frecuencias y en el flanger los refuerzos están igualmente espaciados en el espectro

Chorus: pretende que un instrumento suene como si hubiese varios instrumentos iguales tocados al mismo tiempo. Se usa un retardo múltiple para obtener el efecto de un conjunto limitado de sonidos, y se van modificando ligeramente de forma continua mediante una señal aleatoria de baja frecuencia

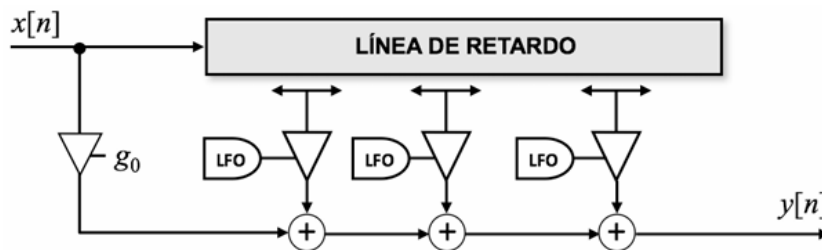


Figura 5.26: Implementación de un *chorus* digital. Las flechas bidireccionales representan puntos de acceso variables a la línea de retardo y los LFO son osciladores de baja frecuencia.

Tema 6

El estándar MIDI

- Los cables que unen los dispositivos;
- Los conectores de esos cables y los que tienen que incorporar los dispositivos;
- La manera de transmitir los mensajes por los cables;
- El tipo de mensajes que pueden intercambiar y su codificación.

La parte hardware de la especificación MIDI

MIDI tiene puertos y conexiones especiales para conectarlos a cables MIDI.

Tiene 3 tipos de puertos, IN, OUT y THRU

MIDI IN: el procesador interno del equipo recibe la información enviada desde otros aparatos

MIDI OUT: transmite a otros la información que el mismo genera

MIDI THRU: envía una copia de lo que recibe por el IN

Configuraciones y canales

Un sistema MIDI puede estar formado por varios dispositivos unidos por cables MIDI