

Aplicaciones de Filtros digitales

clase 14

Temas

- Filtros Peine
 - Filtro peine inverso
 - Filtro peine con realimentación positiva
 - Filtro peine con realimentación negativa
- Filtros Pasa-Todos
- Aplicación a síntesis de cuerda pulsada
- Reverberadores
- Efectos basados en retardos

Filtros peine

Filtros peine

- Constituyen **unidades básicas de procesamiento** en muchas aplicaciones en audio para generar y transformar sonidos:
 - Efectos en donde se necesite combinar copias de la señal original (echo, flanging, phasing, reverb).
 - En síntesis, para crear señales con espectros armónicos.
- Son filtros recursivos de **implementación muy sencilla**. Requieren un par de operaciones aritméticas para obtener cada muestra de la salida. Permiten la **síntesis de señales con espectros complejos**. “Dan mucho por muy poco”.

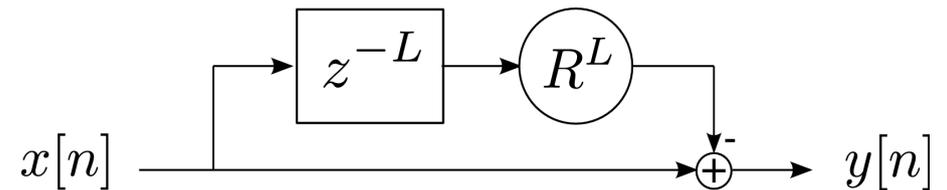
Filtros peine realimentados hacia adelante

(Feedforward Comb, FIR Comb o Inverse Comb)

Ecuación en recurrencia

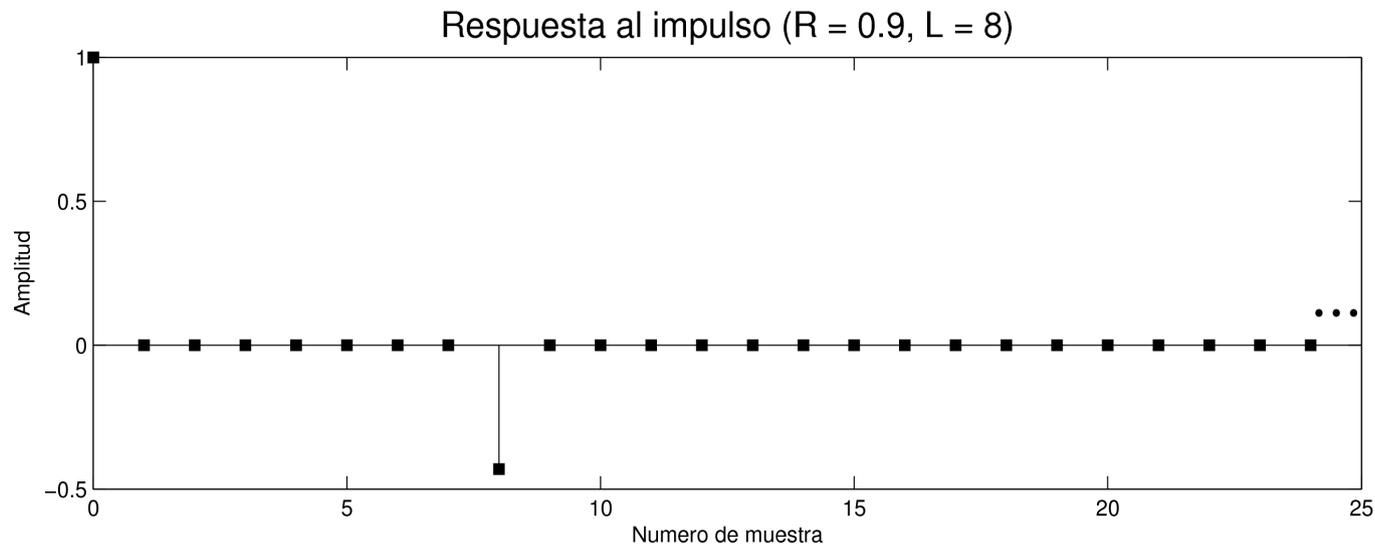
$$y[n] = x[n] - R^L x[n - L]$$

Diagrama de bloques



Respuesta al impulso

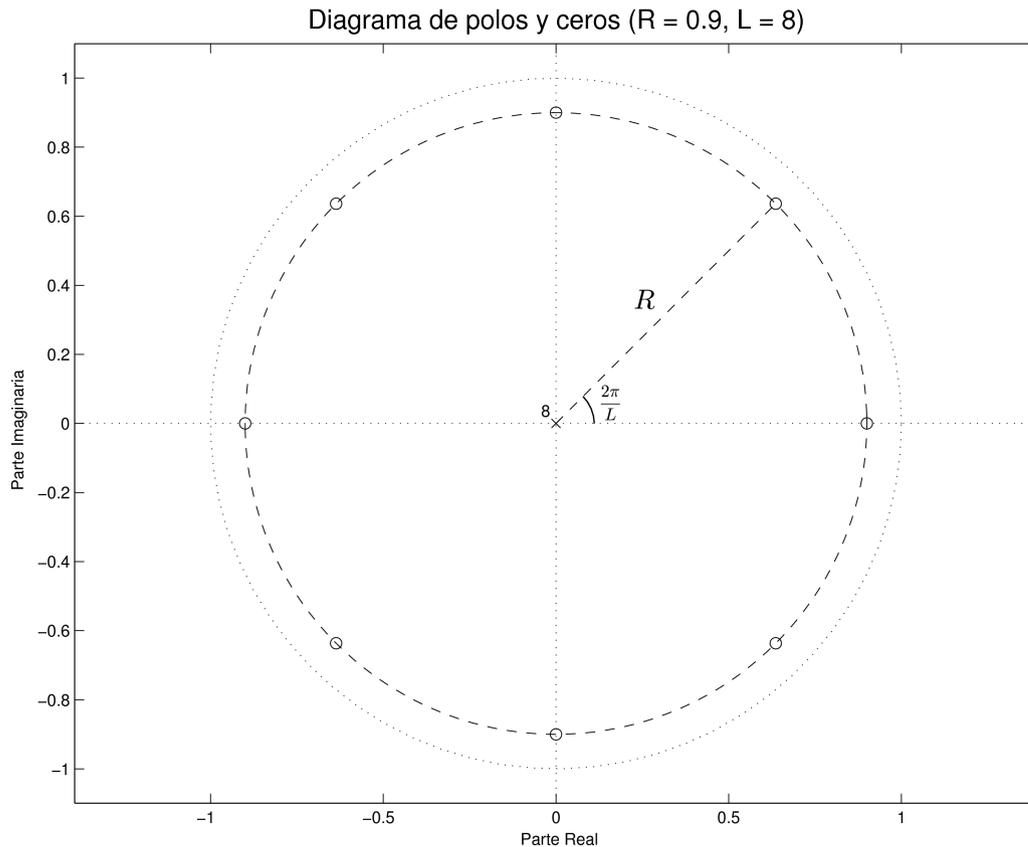
$$h[n] = \delta[n] - R^L \delta[n - L]$$



Filtros peine realimentados hacia adelante

Función de Transferencia

$$H(z) = 1 - R^L z^{-L} = \frac{z^L - R^L}{z^L}$$



Ceros

$$z^L - R^L = 0 \Rightarrow$$
$$z = R e^{j2\pi k/L}, \quad k = 0, \dots, L - 1$$

Polos

$$z^L = 0 \Rightarrow$$
$$z = 0, \quad \text{Multiplicidad } L$$

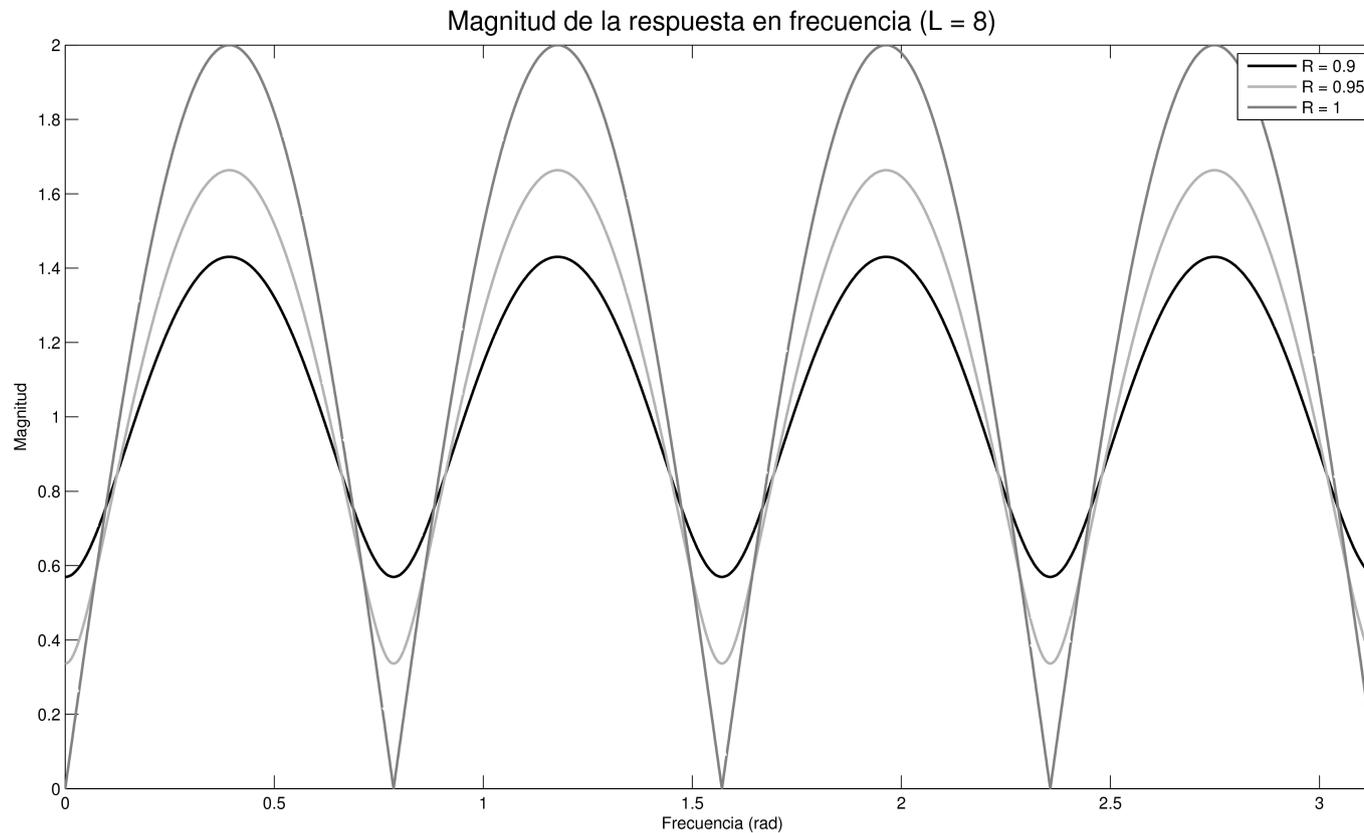
Filtros peine realimentados hacia adelante

Respuesta en frecuencia

$$H(e^{j\theta}) = 1 - R^L e^{j\theta}$$

Magnitud de la respuesta en frecuencia

$$|H(e^{j\theta})| = \sqrt{1 + R^{2L} - 2R^L \cos(\theta L)}$$



Filtros peine

(Feedback Comb, Comb)

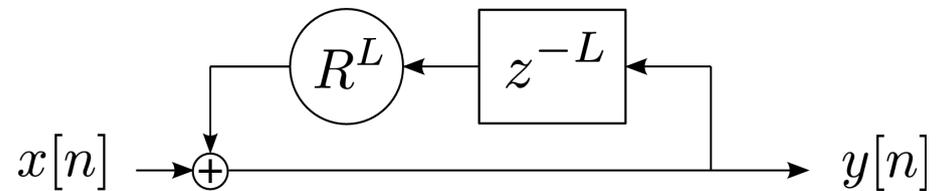
Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n] + R^L y[n - L]$$

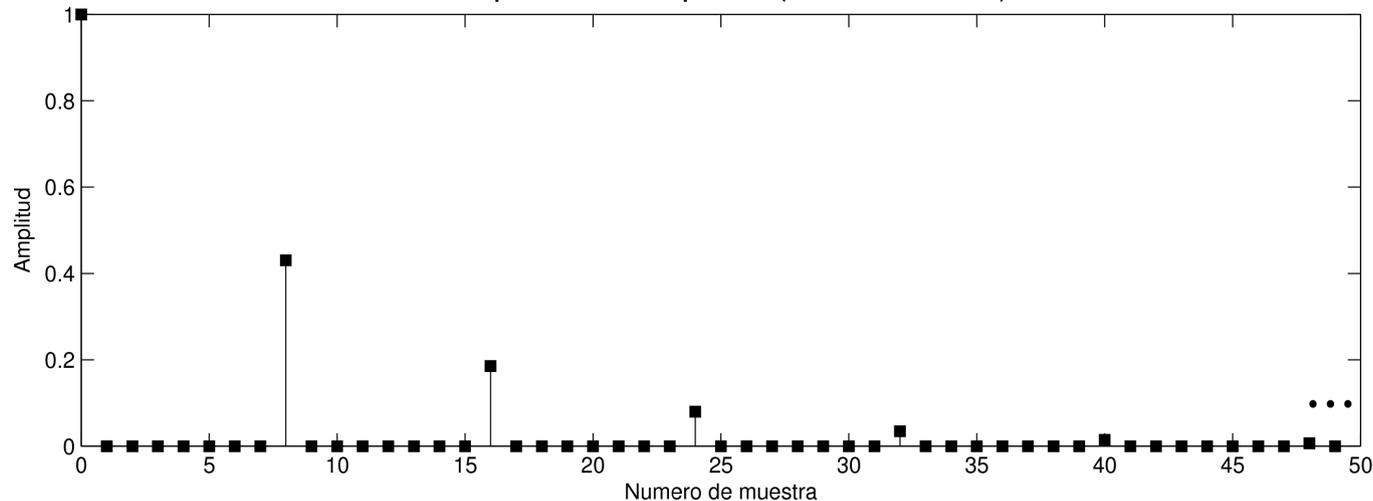
Respuesta al impulso

$$h[n] = \begin{cases} R^{kL} & \text{si } n = kL, \quad k = 0, 1, \dots \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Diagrama de bloques



Respuesta al impulso (R = 0.9, L = 8)

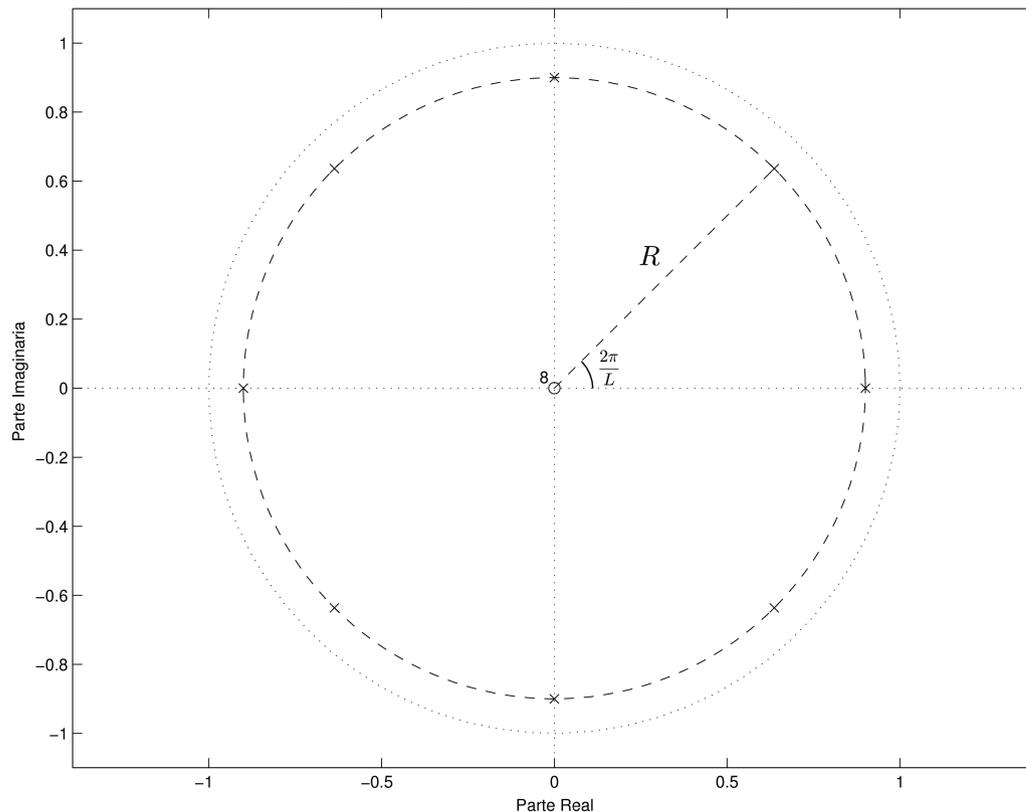


Filtros peine

Función de Transferencia

$$H(z) = \frac{1}{1 - R^L z^{-L}} = \frac{z^L}{z^L - R^L}$$

Diagrama de polos y ceros (R = 0.9, L = 8)



Ceros

$$z^L = 0 \Rightarrow$$

$$z = 0, \quad \text{Multiplicidad } L$$

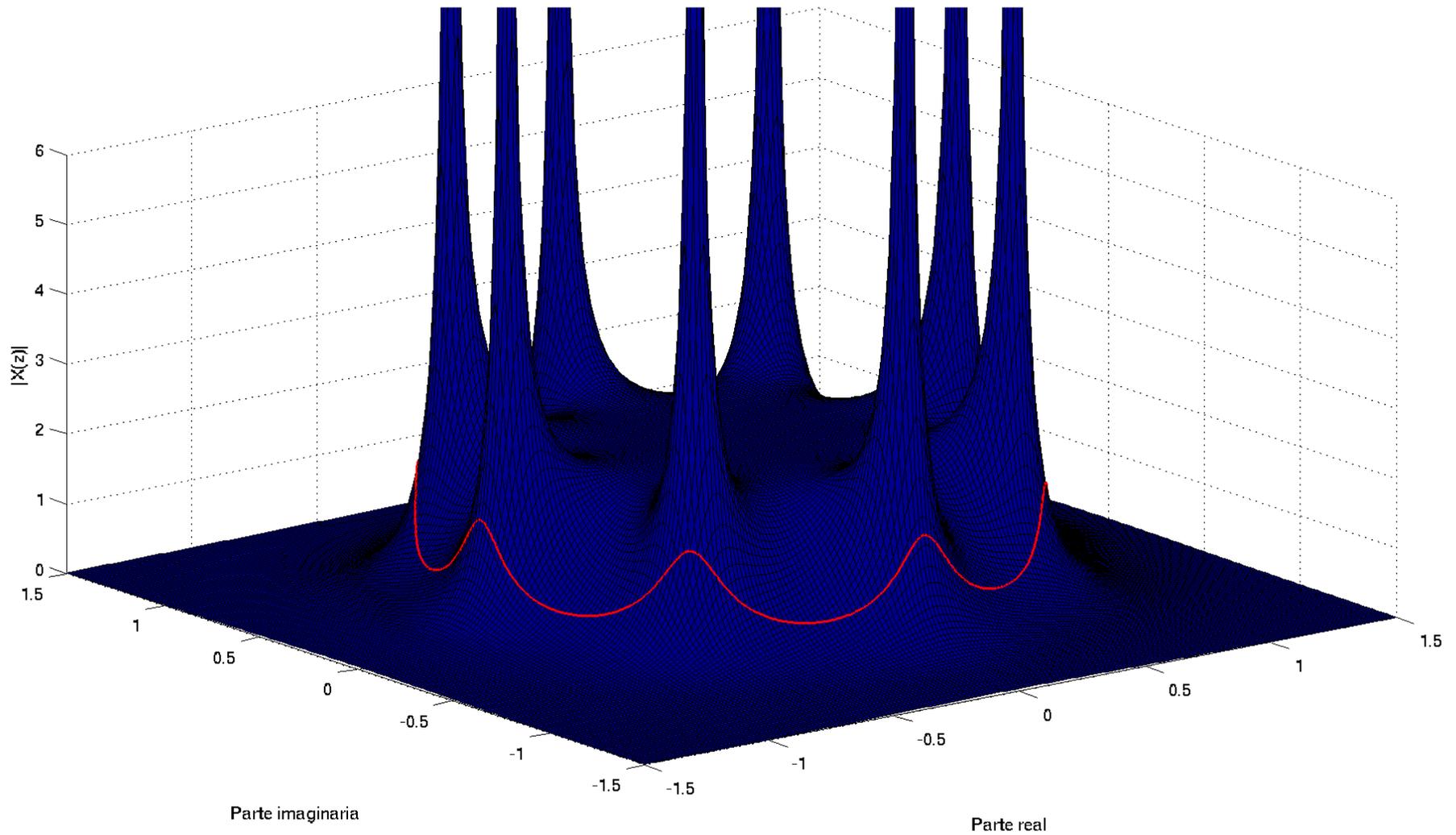
Polos

$$z^L - R^L = 0 \Rightarrow$$

$$z = R e^{j2\pi k/L}, \quad k = 0, \dots, L - 1$$

Filtros peine

Función de Transferencia



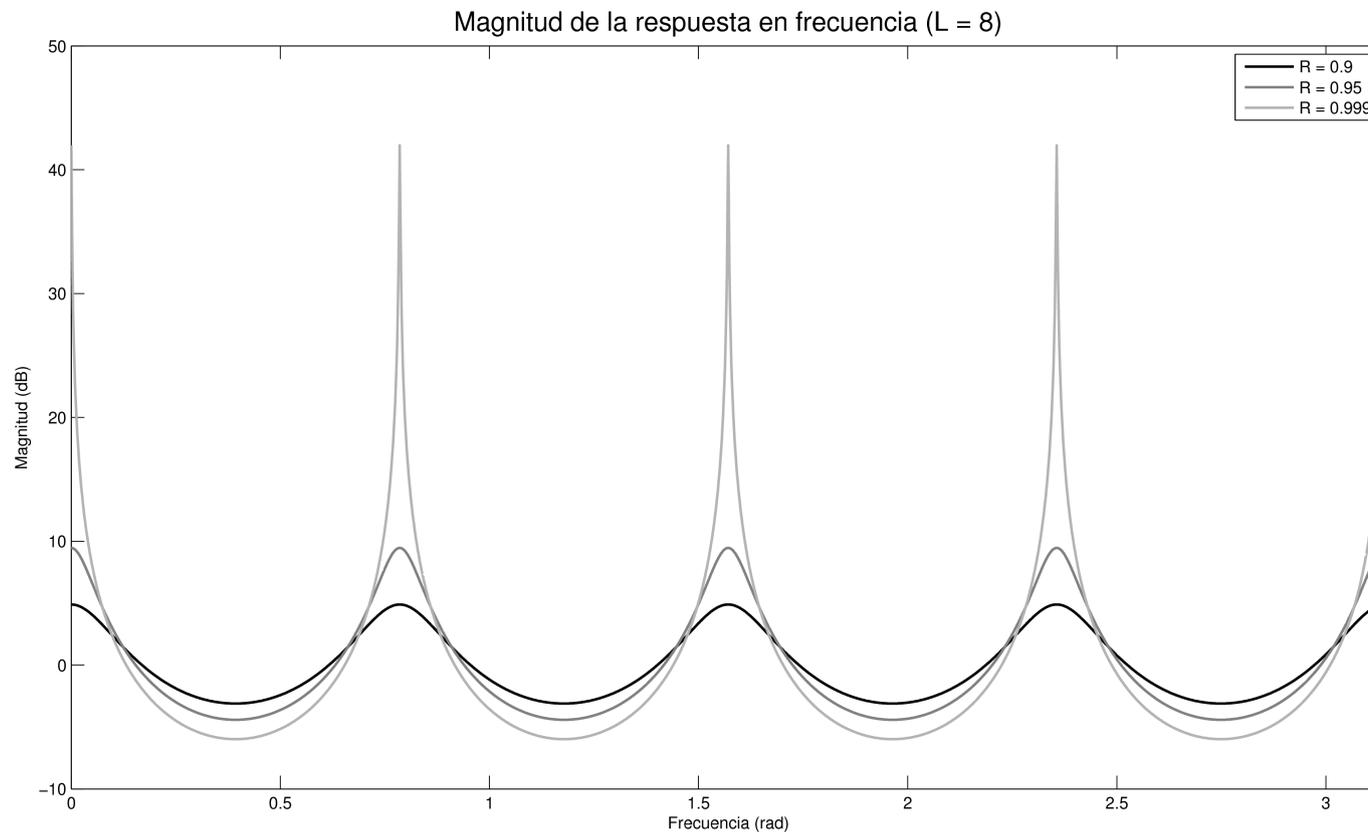
Filtros peine

Respuesta en frecuencia

$$H(e^{j\theta}) = \frac{1}{1 - R^L e^{-j\theta}}$$

Magnitud de la respuesta en frecuencia

$$|H(e^{j\theta})| = \frac{1}{\sqrt{1 + R^{2L} - 2R^L \cos(\theta L)}}$$



Filtros peine

Comparación con el filtro comb inverso:

- Tienen funciones de transferencia inversas. Equivale a cambiar los polos por ceros y los ceros por polos en el diagrama de polos y ceros.
- Las respuestas en frecuencia son inversas.

Observaciones:

- El espectro tiene **frecuencias de resonancia** en múltiplos de la frecuencia fundamental $2\pi/L$ radianes.
- Una aplicación directa es en el **modelado de señales armónicas**. La frecuencia fundamental de la señal armónica es f_s/L Hertz.
- Permite generar espectros complejos con solo 2 operaciones (una suma y una multiplicación). Por ejemplo, con una línea de retardo de 40 muestras se logra un espectro con 20 frecuencias de resonancia.

Filtros peine con realimentación negativa

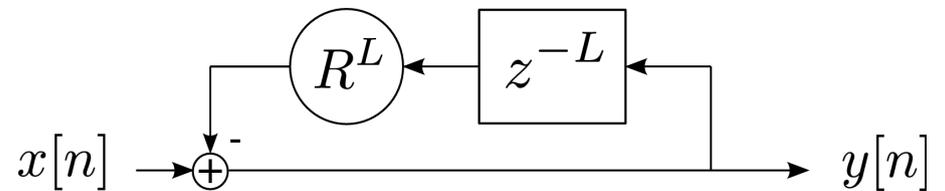
Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n] - R^L y[n - L]$$

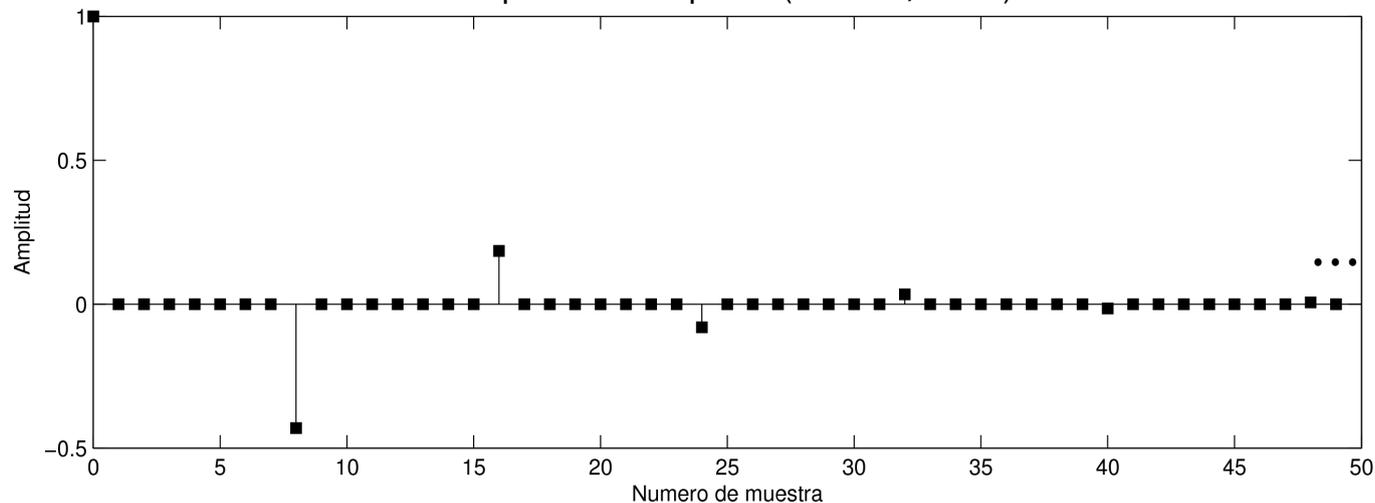
Respuesta al impulso

$$h[n] = \begin{cases} (-1)^k R^{kL} & \text{si } n = kL, \quad k = 0, 1, \dots \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Diagrama de bloques



Respuesta al impulso (R = 0.9, L = 8)

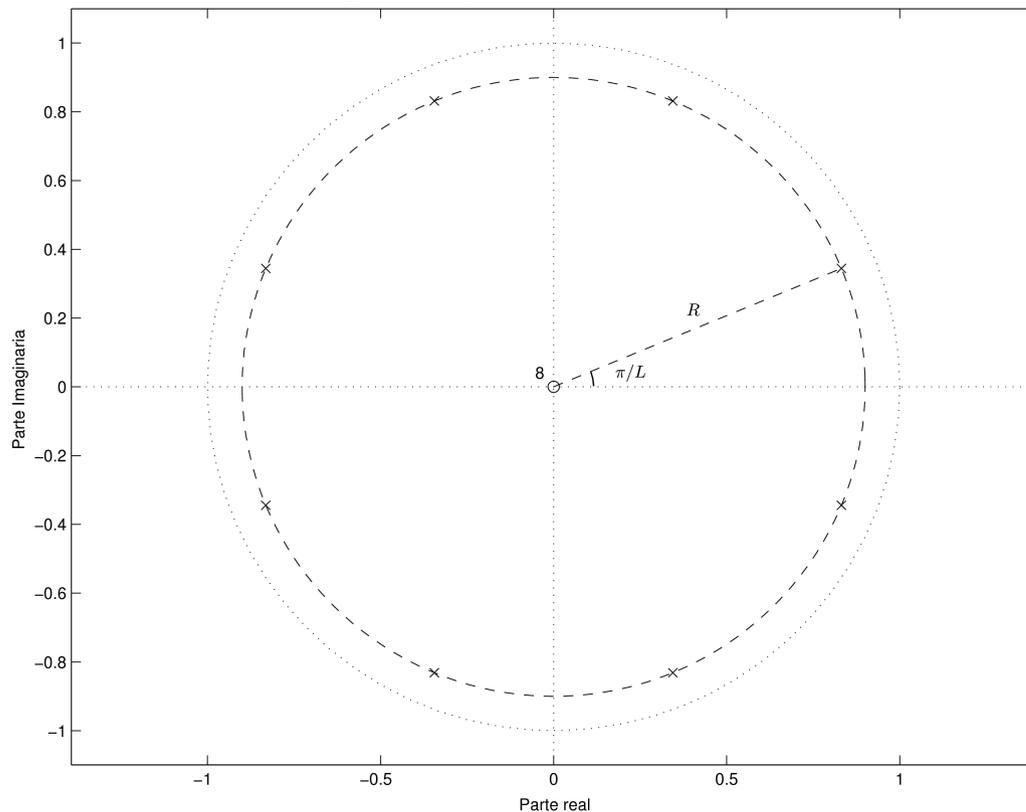


Filtros peine con realimentación negativa

Función de Transferencia

$$H(z) = \frac{1}{1 + R^L z^{-L}} = \frac{z^L}{z^L + R^L}$$

Diagrama de polos y ceros (R = 0.9, L = 8)



Ceros

$$z^L = 0 \Rightarrow$$

$$z = 0, \quad \text{Multiplicidad } L$$

Polos

$$z^L + R^L = 0 \Rightarrow$$

$$z = R e^{j(2k+1)\pi/L}, \quad k = 0, \dots, L - 1$$

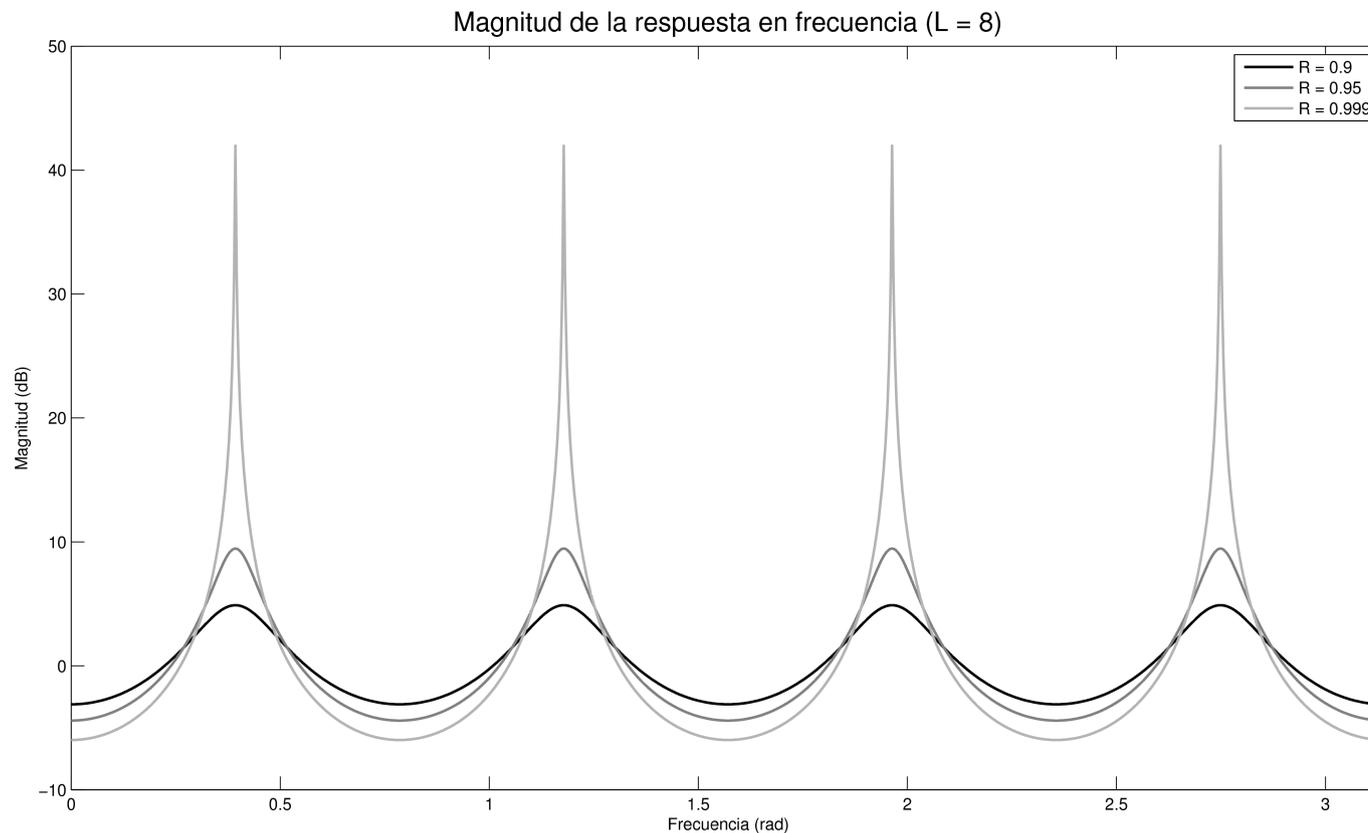
Filtros peine con realimentación negativa

Respuesta en frecuencia

$$H(e^{j\theta}) = \frac{1}{1 + R^L e^{-j\theta}}$$

Magnitud de la respuesta en frecuencia

$$|H(e^{j\theta})| = \frac{1}{\sqrt{1 + R^{2L} + 2R^L \cos(\theta L)}}$$



Filtros peine con realimentación negativa

Comparación con el filtro peine:

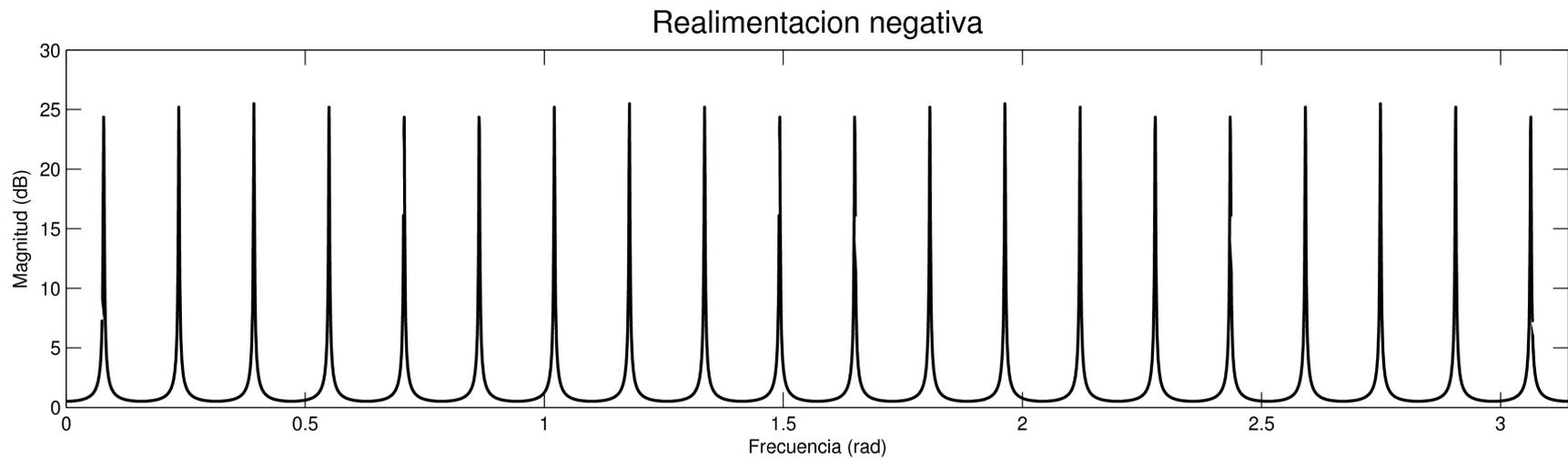
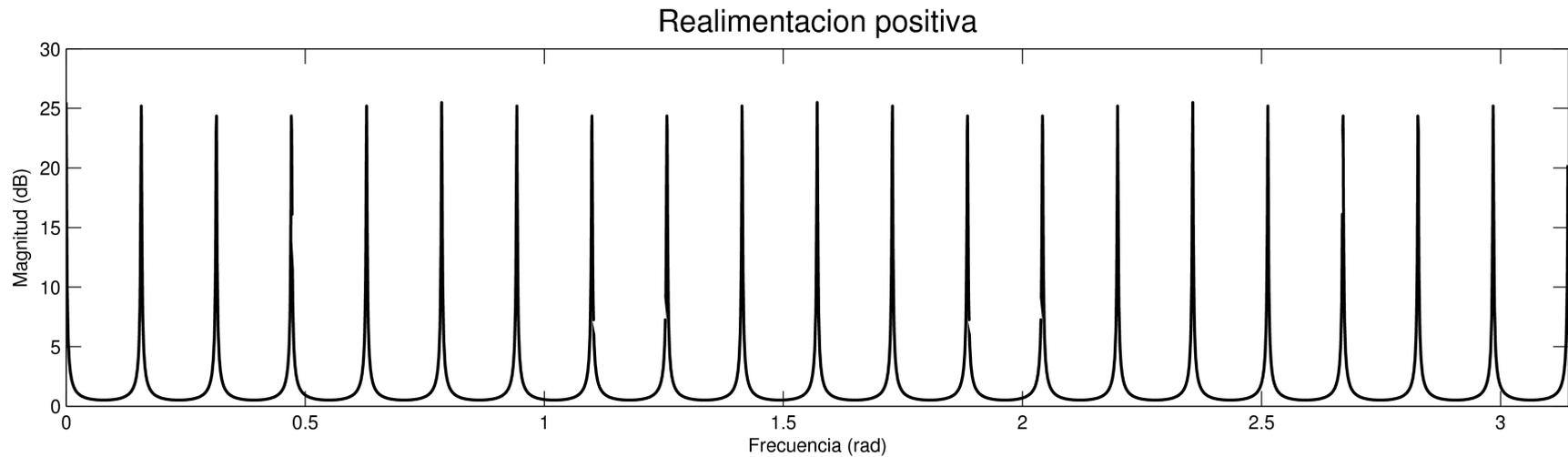
- El diagrama de polos y ceros es una rotación de ángulo π/L radianes respecto al del filtro peine con realimentación positiva.

Observaciones:

- El espectro tiene **frecuencias de resonancia** en múltiplos impares de la frecuencia fundamental π/L radianes.

Filtros peine

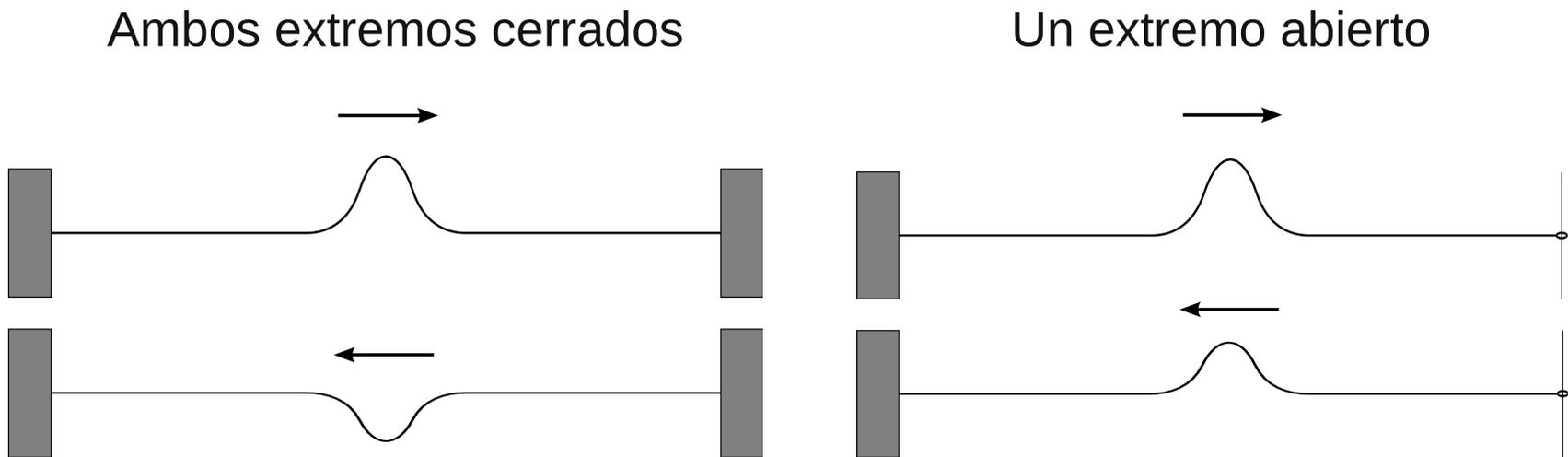
Filtros peine usando una línea de retardo de 40 muestras ($L = 40$, $R = 0.999$).



Analogía con ondas estacionarias

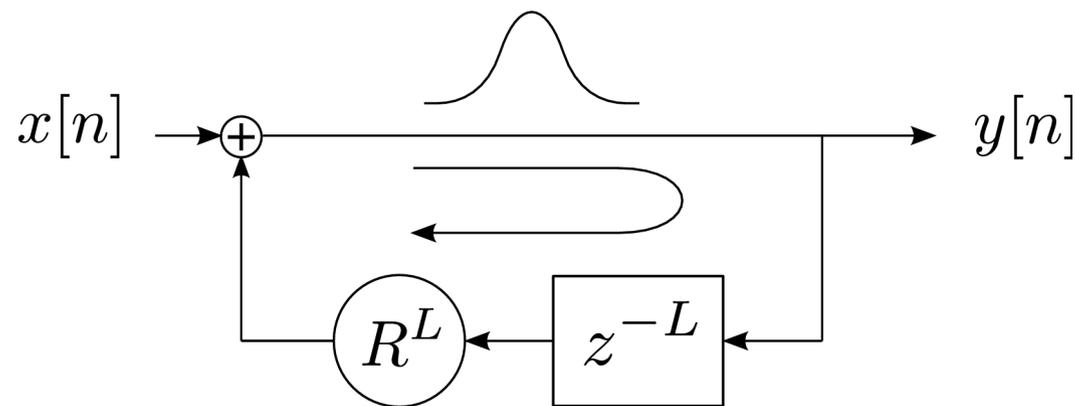
Onda viajera. Por ejemplo, aire en un cilindro o onda en una cuerda.

- Si el extremo es cerrado, la onda reflejada se invierte (cambia de signo).
- Si el extremo es abierto, la onda reflejada no se invierte.
- En el recorrido, el medio absorbe energía, haciendo que la onda sufra atenuación.



Analogía con ondas estacionarias

- El filtro peine suma a cada muestra de la entrada una versión retardada y atenuada de la salida.
- La salida atenuada y retardada puede compararse con el retorno de una onda viajera.
- El retardo L es el tiempo de ida y vuelta de la onda en muestras. La atenuación puede compararse con la pérdida de energía de la onda en el tiempo (atenuación R por muestra).

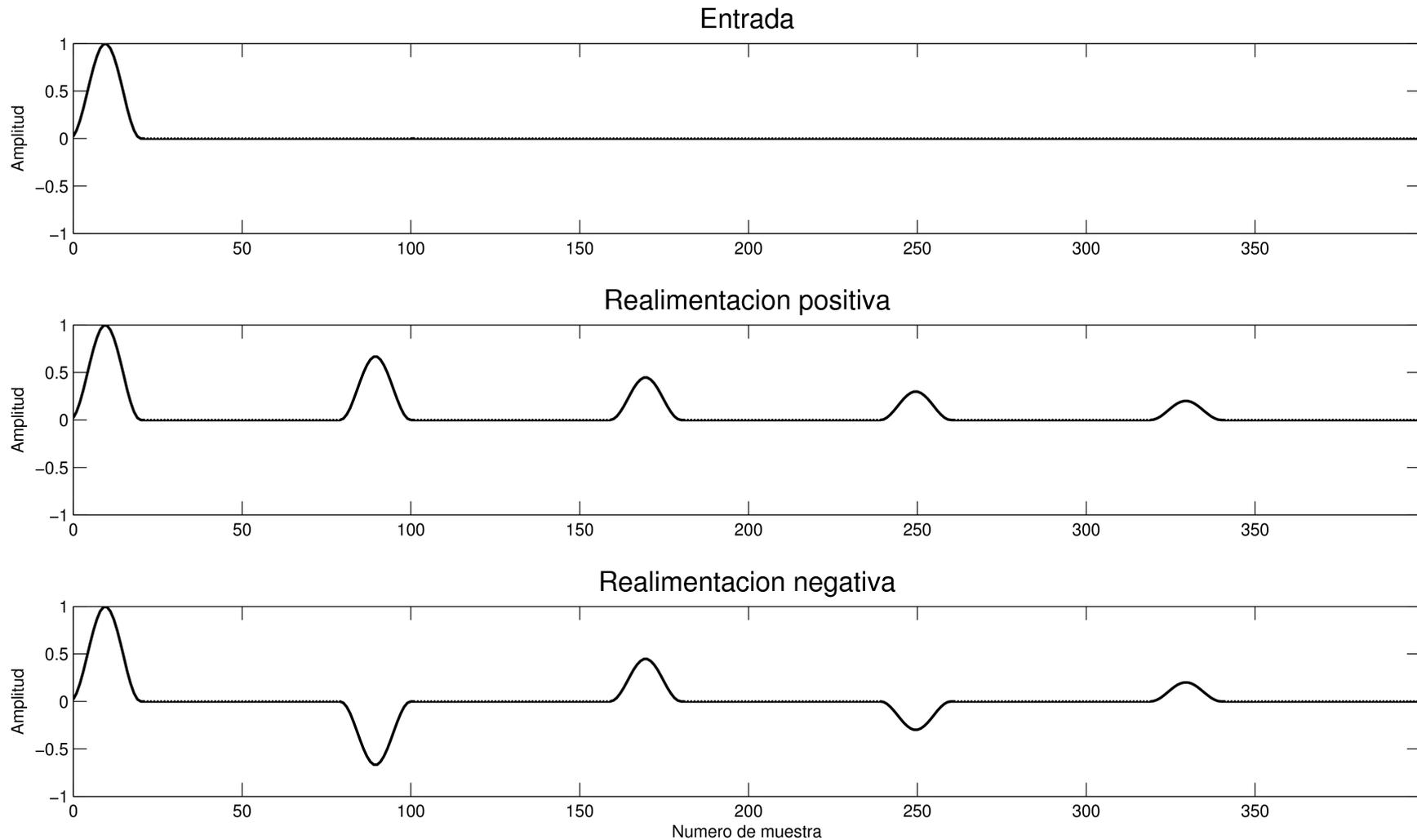


Analogía con ondas estacionarias

- El filtro peine con realimentación positiva modela los ecos de ondas viajantes en medios con los **dos extremos abiertos** o los **dos extremos cerrados**.

(no tiene sentido pensar en una cuerda con los dos extremos abiertos, así que la analogía es solo con los dos extremos fijos en ese caso)
- El filtro peine con realimentación negativa modela los ecos de ondas viajantes en medios con **un extremo cerrado y el otro abierto**.
- La longitud del medio (tubo de aire, cuerda) es $L/2$. Así el tiempo de recorrido de ida y vuelta es L .

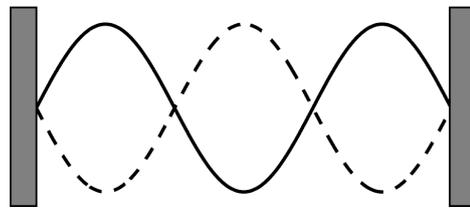
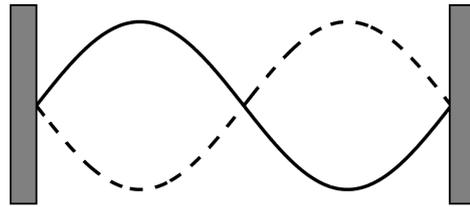
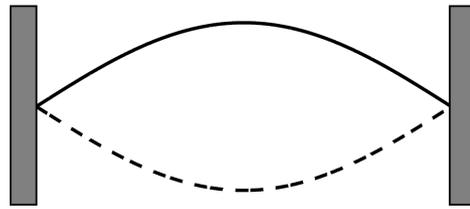
Analogía con ondas estacionarias



Analogía con ondas estacionarias

Modos de vibración

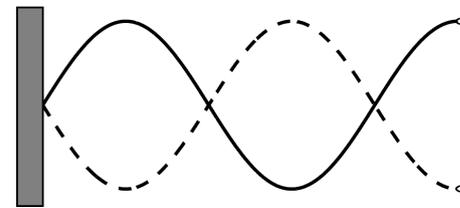
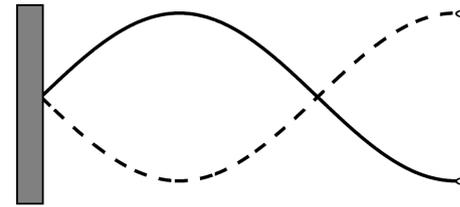
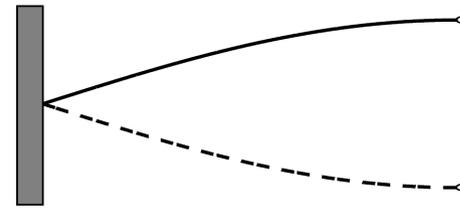
Los dos extremos
fijos



$$\lambda_k = \frac{2L}{k} \quad \left(2L, L, \frac{2L}{3}, \frac{L}{2}, \dots \right)$$

$$\theta_k = \frac{\pi k}{L} \quad \left(\frac{\pi}{L}, \frac{2\pi}{L}, \frac{3\pi}{L}, \dots \right)$$

Un extremo fijo y
otro abierto



$$\lambda_k = \frac{4L}{2k-1} \quad \left(4L, \frac{4L}{3}, \frac{4L}{5}, \frac{4L}{7}, \dots \right)$$

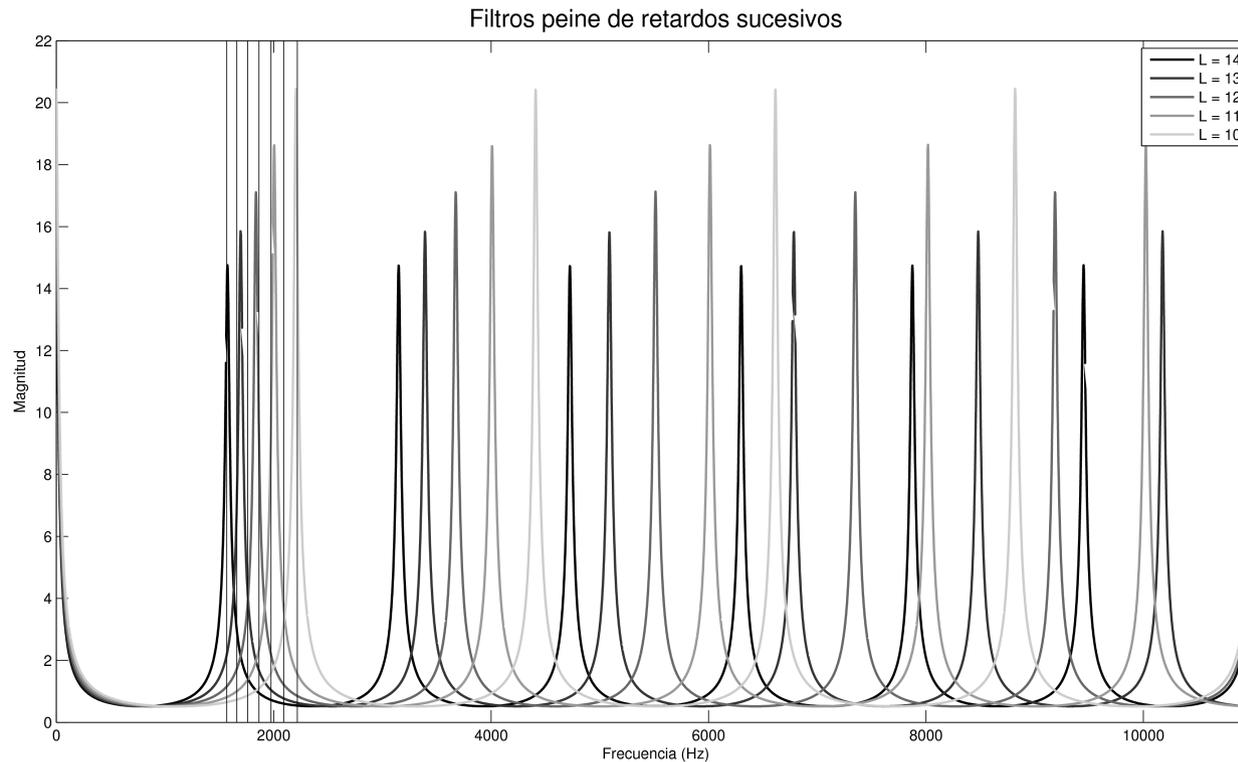
$$\theta_k = \frac{\pi(2k-1)}{2L} \quad \left(\frac{\pi}{2L}, \frac{3\pi}{2L}, \frac{5\pi}{2L}, \dots \right)$$

Resolución

Frecuencia fundamental : $f_0 = \frac{f_s}{L}$

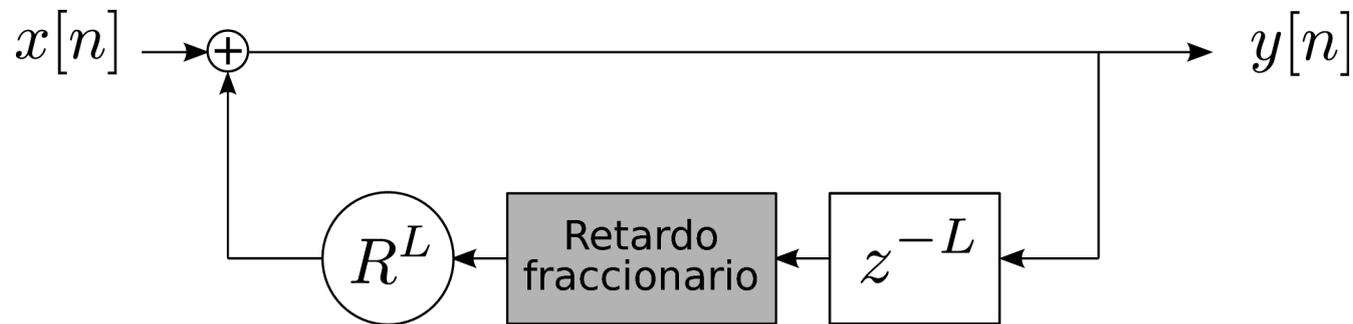
Ejemplo: Si $f_s = 22050 Hz$:

- $L = 14 \implies f_0 = 1575 Hz$ (G6 : 1567,98 Hz)
- $L = 13 \implies f_0 = 1696 Hz$ (G#6 : 1661,22 Hz)



Resolución

Para que el filtro peine sea usable para síntesis de sonidos con espectro armónico, hay que encontrar la forma de introducir retardos fraccionarios arbitrarios. El filtro no puede alterar la magnitud.



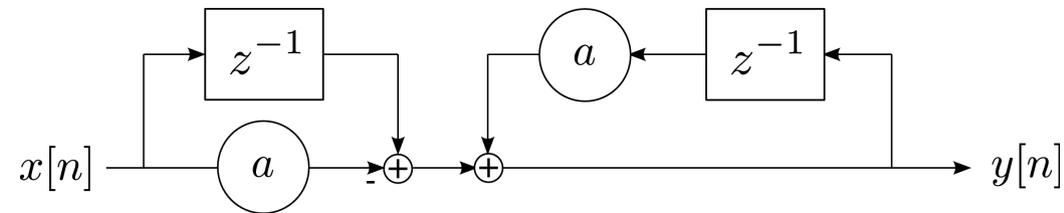
Filtros pasa-todos

Filtro pasa-todos de primer orden

Ecuación en recurrencia

$$y[n] - ay[n - 1] = -ax[n] + x[n - 1]$$

Diagrama de bloques



Función de transferencia

$$H(z) = \frac{z^{-1} - a}{1 - az^{-1}} = \frac{1 - az}{z - a}$$

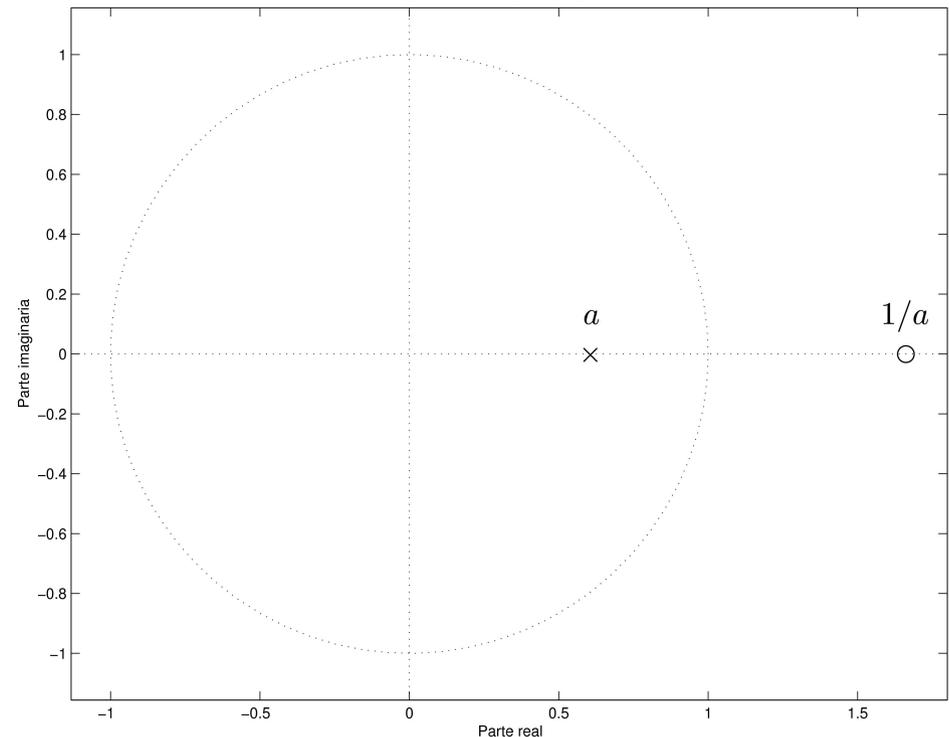
Ceros:

$$1 - az = 0 \quad \Rightarrow \quad z = \frac{1}{a}$$

Polos:

$$z - a = 0 \quad \Rightarrow \quad z = a$$

Diagrama de polos y ceros



Filtro pasa-todos de primer orden

Respuesta en frecuencia

1 - Se evalúa la función de transferencia en el círculo unidad

$$H(e^{j\theta}) = \frac{e^{-j\theta} - a}{1 - ae^{-j\theta}} = \frac{e^{-j\theta/2} - ae^{j\theta/2}}{e^{j\theta/2} - ae^{-j\theta/2}}$$

2 – Se observa que consiste en el cociente entre un complejo y su conjugado

$$H(e^{j\theta}) = \frac{re^{j\Psi(\theta)}}{re^{-j\Psi(\theta)}} \implies \begin{cases} |H(e^{j\theta})| = 1 \\ \angle H(e^{j\theta}) = 2\Psi(\theta) \end{cases}$$

3 – Se desarrolla el numerador usando la ecuación de Euler para encontrar la fase

$$re^{j\Psi(\theta)} = (1 - a)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - j(1 + a)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

4 – La fase de la respuesta en frecuencia es el doble de la del numerador

**Respuesta en frecuencia
en notación polar**

$$|H(e^{j\theta})| = 1$$

$$\angle H(e^{j\theta}) = -2\arctan\left(\frac{1+a}{1-a}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

Filtro pasa-todos de primer orden

Respuesta en fase

$$\phi(\theta) = -2 \arctan \left(\frac{1+a}{1-a} \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$$

Definiendo $\delta = \frac{1+a}{1-a}$

la respuesta en fase es

$$\phi(\theta) = -2 \arctan \left(\delta \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$$

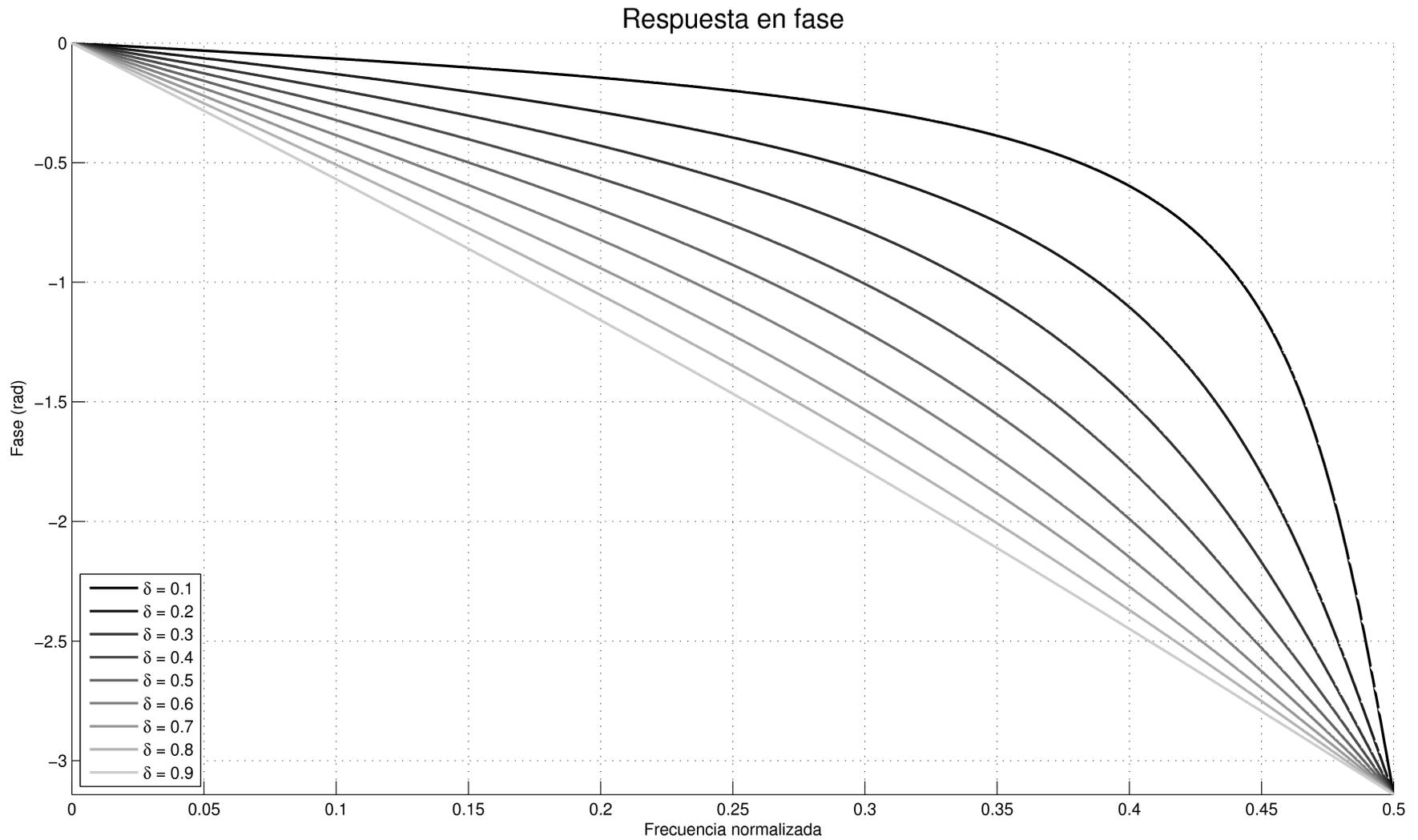
Retardo de fase

Cantidad de muestras que el filtro retarda cada componente espectral.

$$\tau_{\phi}(\theta) = -\frac{\phi(\theta)}{\theta} \qquad \tau_{\phi}(\theta) = \frac{2}{\theta} \arctan \left(\delta \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$$

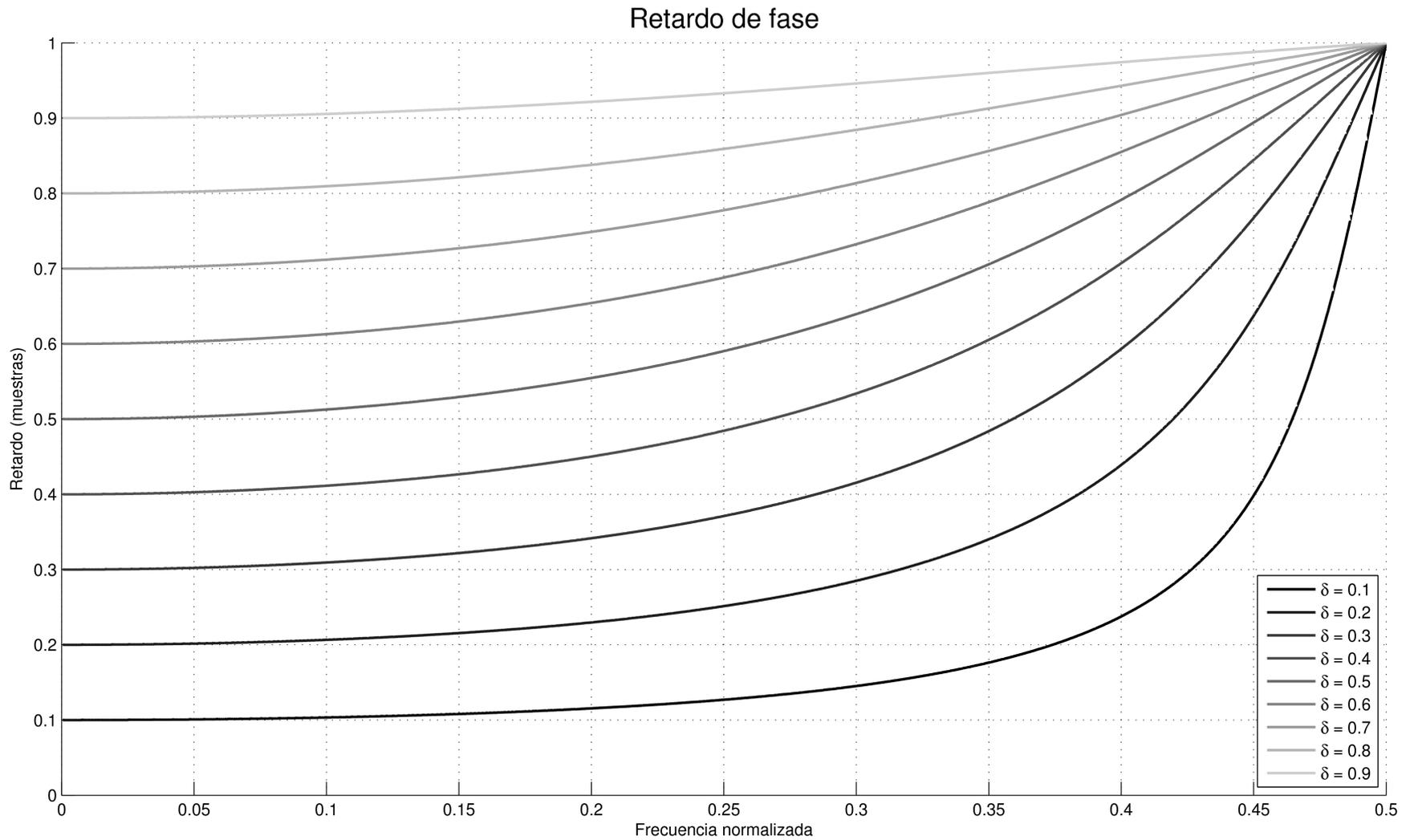
Filtro pasa-todos de primer orden

Respuesta en fase



Filtro pasa-todos de primer orden

Retardo de fase



Filtro pasa-todos de primer orden

Respuesta en fase

Objetivo:

- Encontrar un filtro que logre **retardos fraccionarios** arbitrarios.
- Idealmente, el retardo debería ser el mismo para todas las frecuencias. En otras palabras, el filtro debería ser de **fase lineal**.
- Además, se quiere controlar el retardo. Dado cierto retardo de fase, se quiere encontrar el coeficiente a para poder implementar el filtro.

Filtro pasa-todos:

- No es de fase lineal. Equivalentemente, el retardo de fase no es constante. Introduce retardos distintos en distintas frecuencias

Filtro pasa-todos de primer orden

Respuesta en fase – Aproximación lineal en bajas frecuencias

En bajas frecuencias, la respuesta en fase se puede aproximar a lineal. Teniendo en cuenta que

$$\theta \approx 0 \implies \tan \theta \approx \theta, \arctan \theta \approx \theta$$

la fase y retardo de fase se pueden aproximar por

$$\phi(\theta) \approx -\theta\delta \qquad \tau_\phi(\theta) \approx \delta$$

- El **retardo de fase** vale **delta** en bajas frecuencias (ver figura del retardo de fase).
- a debe ser menor que 1 para que el filtro sea **estable**, y por lo tanto, *delta* es siempre positivo.
- No tiene sentido implementar retardos mayores de 1 porque la parte entera puede ser implementada fácilmente con la línea de retardo. Se restringe *delta* a ser menor que 1.

Filtro pasa-todos de primer orden

Respuesta en fase – Aproximación lineal en bajas frecuencias

Observaciones:

- El error es muy pequeño en frecuencias menores a $0.05f_s$. (0.0031 muestras para $\delta = 0.5$ muestras). El error crece con la frecuencia, donde no se cumple la hipótesis para linealidad.
- El error es menor para valores de retardo cerca de 0 o 1 que para valores cerca de 0.5 (un retardo fraccionario implica interpolar la señal, y la interpolación es mas imprecisa en valores lejanos a valores de muestras conocidos).
- Dado el retardo δ requerido, el coeficiente a del filtro se calcula como:

$$a = \frac{\delta - 1}{\delta + 1}$$

Aplicaciones

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

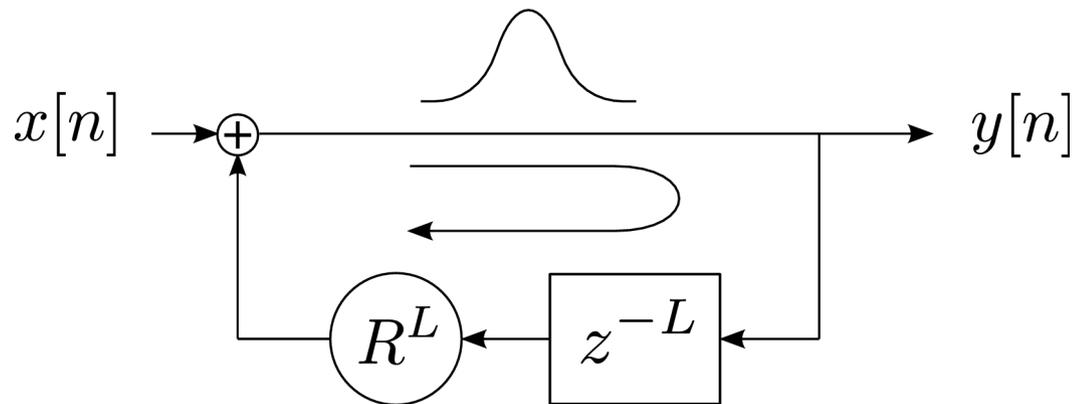
Kevin Karplus, Alex Strong. "Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres". Computer Music Journal (MIT Press), 7(2): 43–55, 1983.

- Emplean un **filtro peine para sintetizar sonidos de cuerda pulsada**. Una cuerda en un instrumento tiene ambos extremos fijos, así que se emplea un filtro peine con realimentación positiva.
- Incluyen un **pasabajos** para hacer que el **espectro varíe en el tiempo** atenuando mas rápidamente las altas frecuencias.
- Incluyen un filtro **pasa-todos** para **afinar** el instrumento a cualquier frecuencia deseada.

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

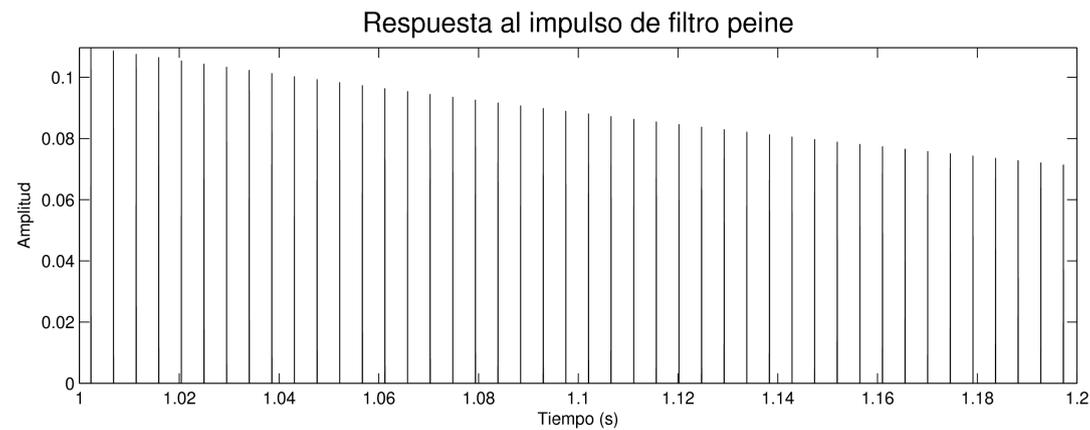
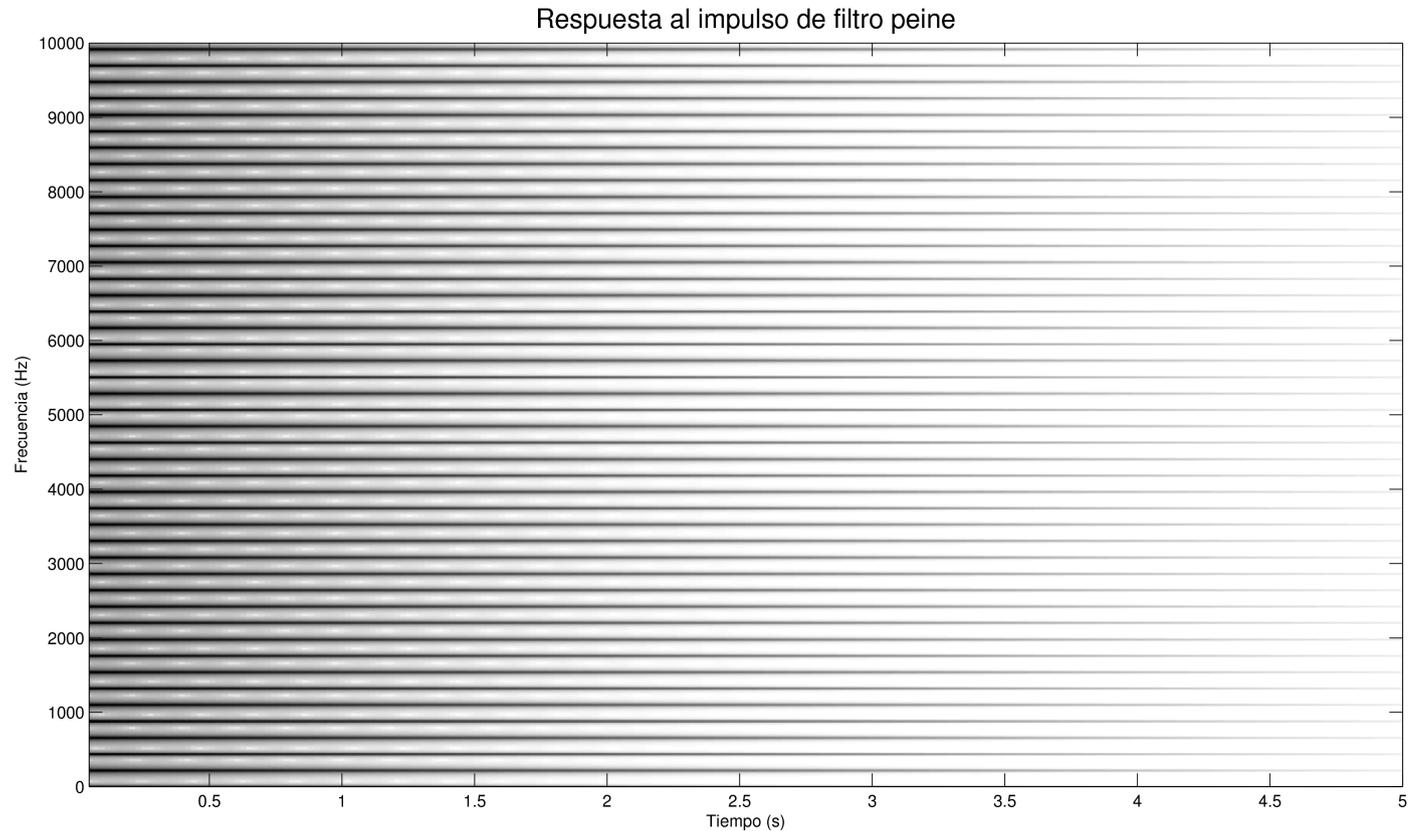
Modelado de la onda estacionaria en una cuerda

- Una cuerda fija en sus dos extremos soporta patrones de onda estacionaria. El comportamiento de un filtro peine es similar.
- Una cuerda no vibra por siempre. Eso está modelado en el filtro peine por el factor de atenuación, haciendo que la amplitud de la forma de onda decaiga un factor R cada por muestra.



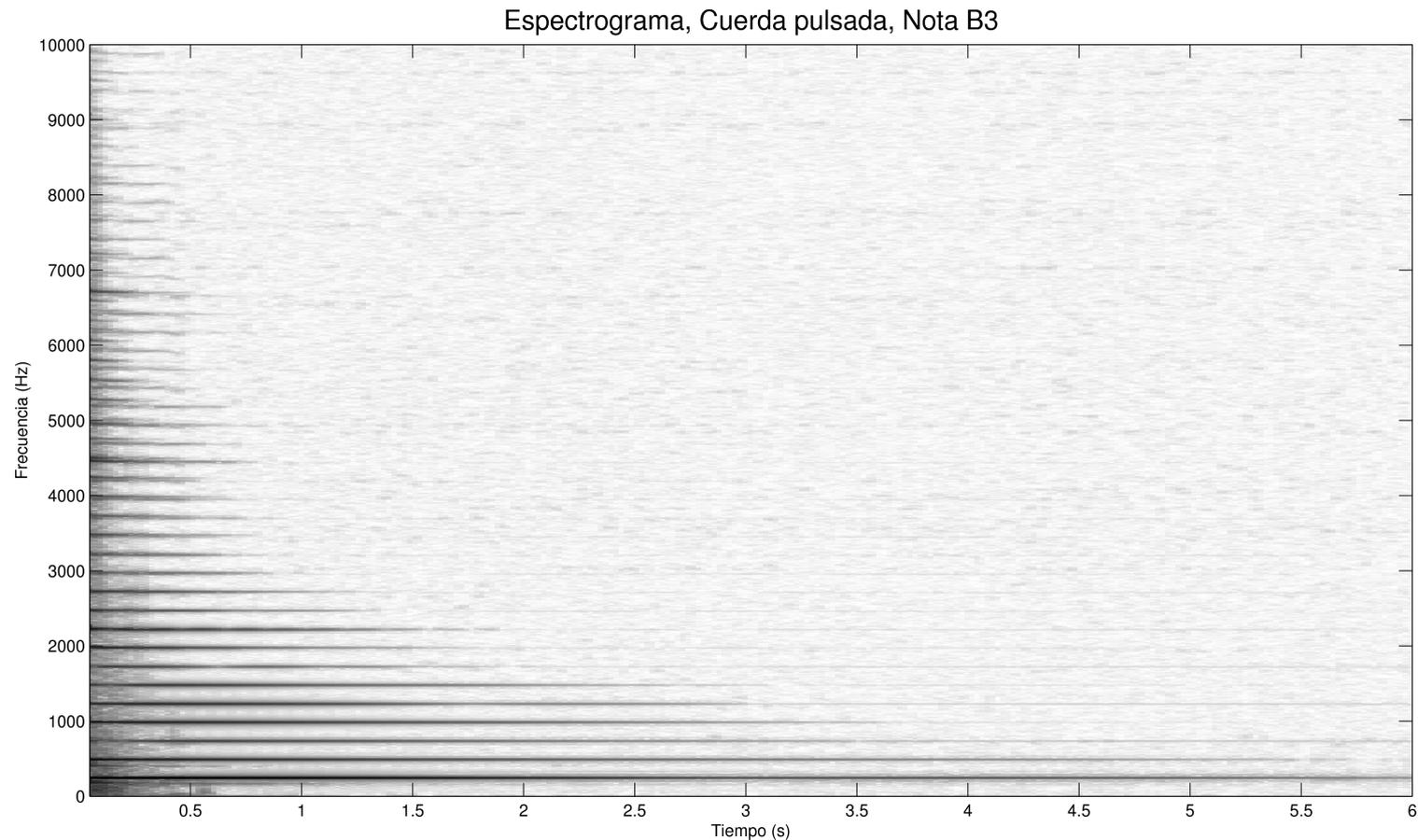
Se podría esperar que la respuesta al impulso suene como la pulsación de una cuerda.

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas



Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

Espectrograma de cuerda pulsada

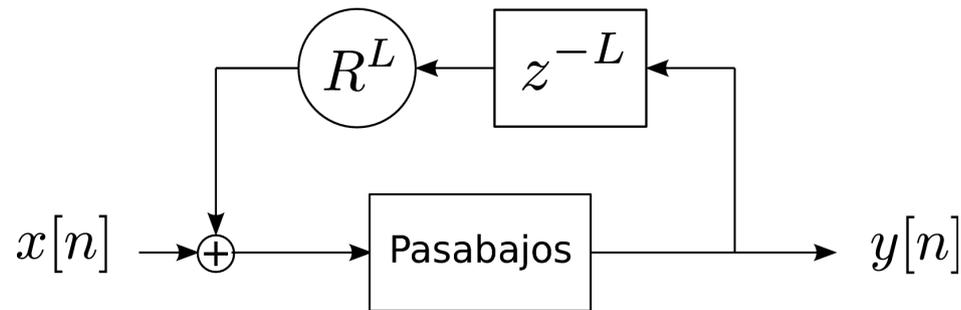


El espectro varía en el tiempo. Las frecuencias mas altas se atenúan mas rápidamente

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

Implementación del espectro variable en el tiempo

- Inclusión de un filtro pasabajos en el lazo. Cada vez que la salida retorna, sus componentes de alta frecuencia se atenúan.



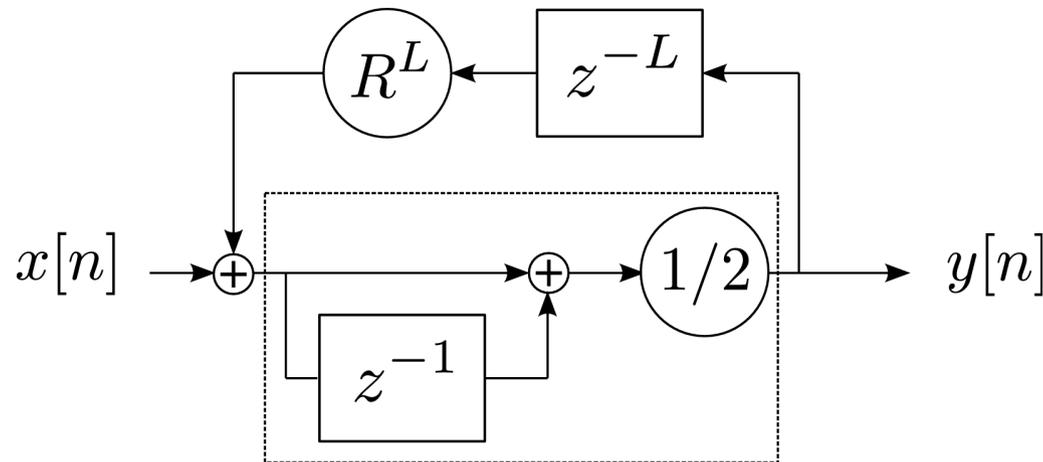
Características deseables del filtro

- El roll-off debe ser lento así las altas frecuencias no se atenúan demasiado rápidamente.
- Debe ser de fase lineal para no complicar demasiado el sistema. La distorsión de fase puede ser crítica dado que se encuentra en un lazo cerrado.

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

Implementación del espectro variable en el tiempo

Se propone usar como filtro pasabajos un filtro de media móvil de primer orden.



Ecuación de recurrencia

$$y[n] = \frac{1}{2}x[n] + \frac{1}{2}x[n - 1]$$

Respuesta en frecuencia

$$H(e^{j\theta}) = e^{-j\theta/2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

Observaciones sobre el filtro de media móvil:

- Es de fase lineal. Introduce un **retardo de $\frac{1}{2}$ muestra** igual en todas las frecuencias.
- El retardo adicional introducido por el filtro de media móvil cambia el retardo total del bucle. Ahora es $L + 1/2$ muestras en lugar de L muestras. La frecuencia fundamental generada es por lo tanto

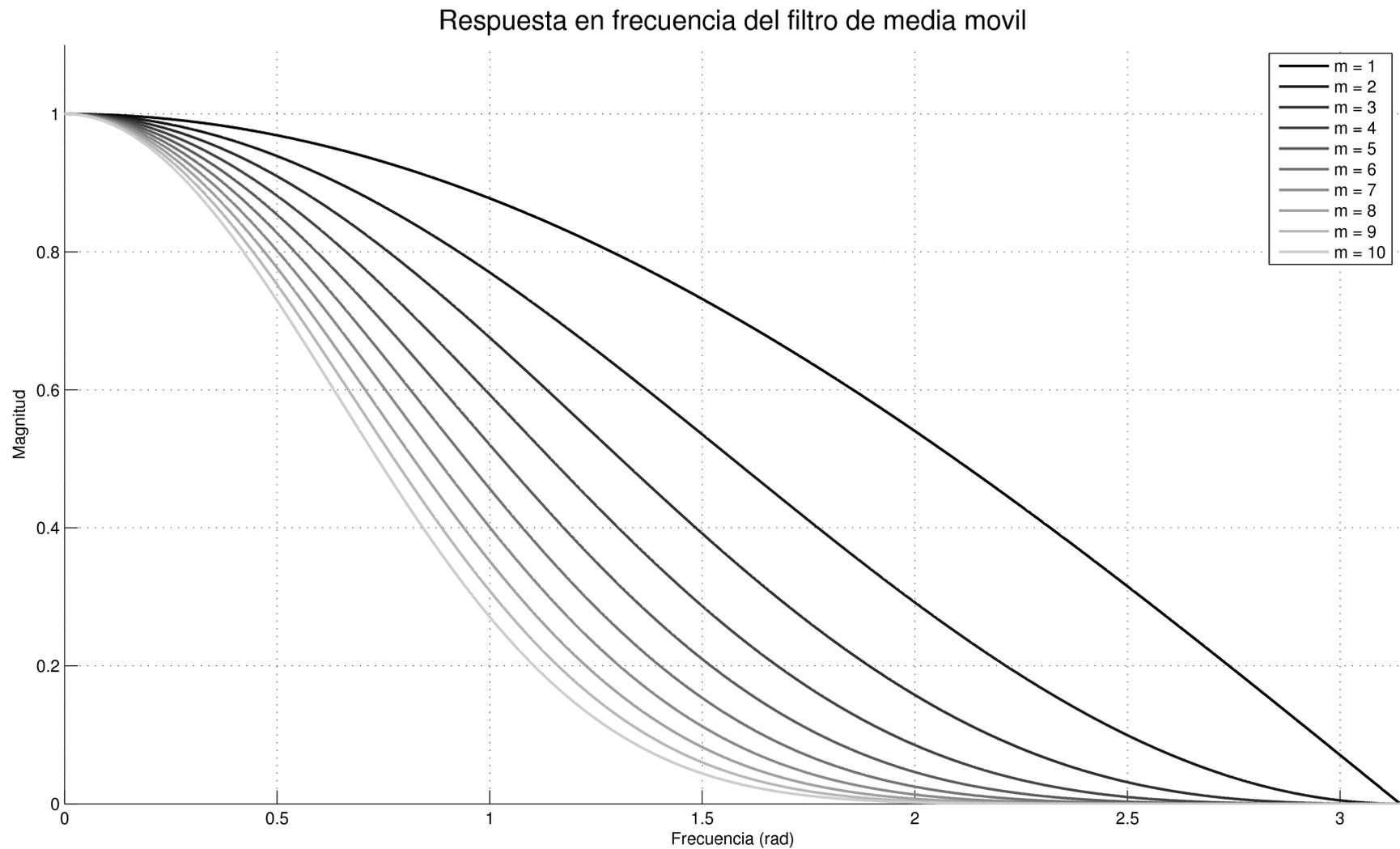
$$f_0 = \frac{f_s}{L + \frac{1}{2}}$$

- Por cada vuelta en el bucle, la señal se filtra con el pasabajos. Luego de m vueltas alrededor del bucle, el espectro de la señal fue multiplicado por

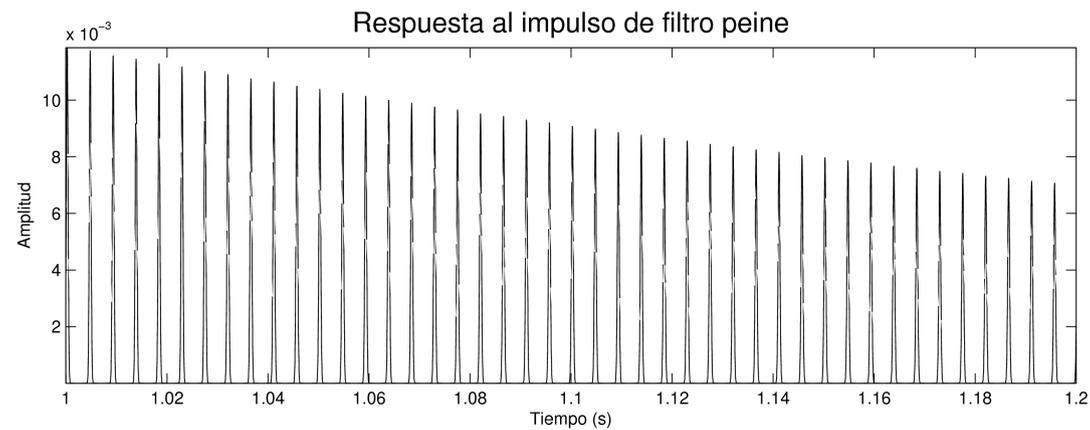
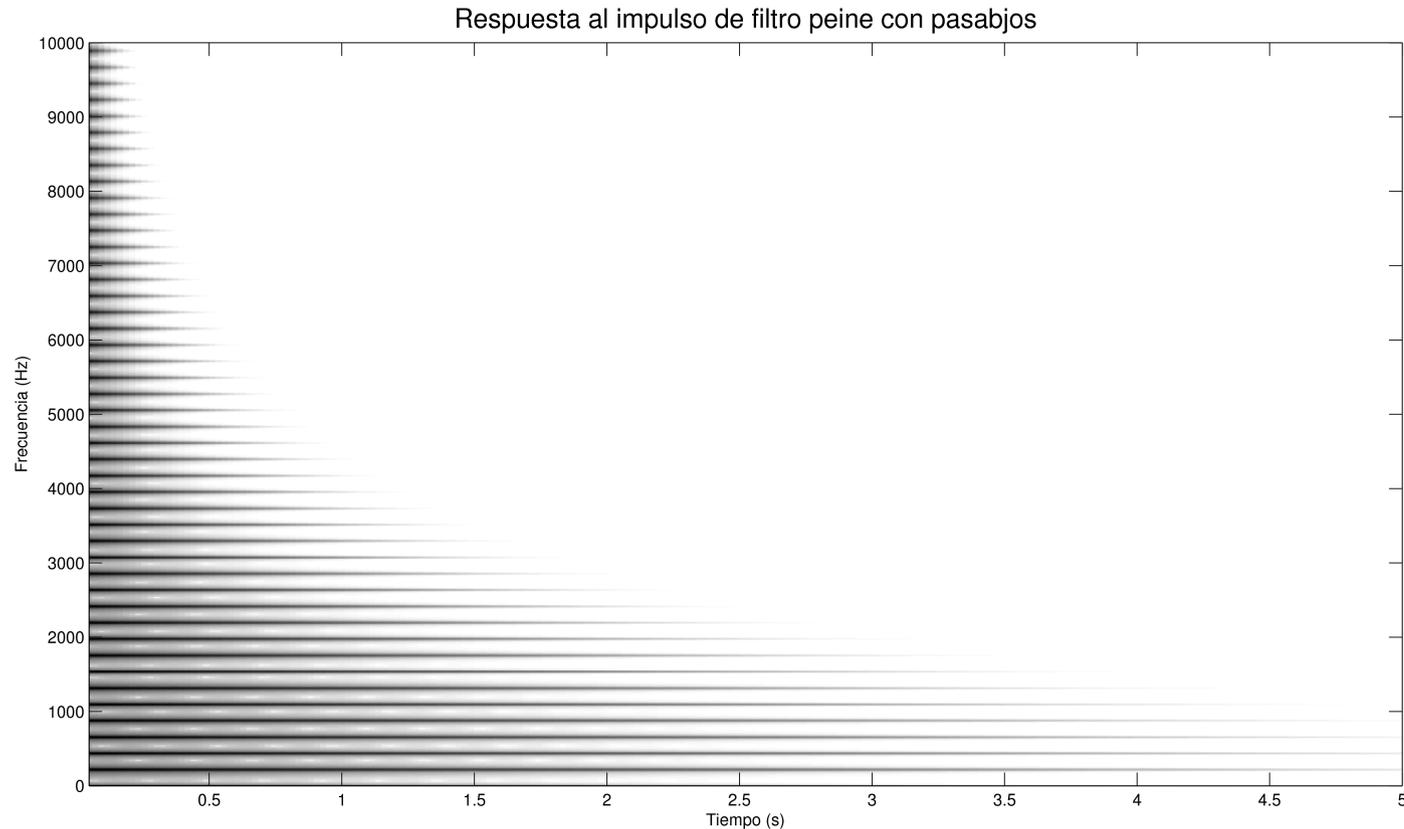
$$|H(e^{j\theta})|^m$$

Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

Implementación del espectro variable en el tiempo



Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas



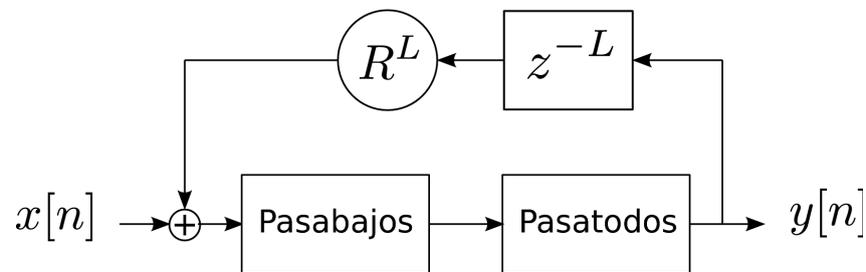
Aplicación: síntesis de cuerdas pulsadas

Afinación

- Las frecuencias fundamentales posibles de ser generadas son

$$f_0 = \frac{f_s}{L + \frac{1}{2}}$$

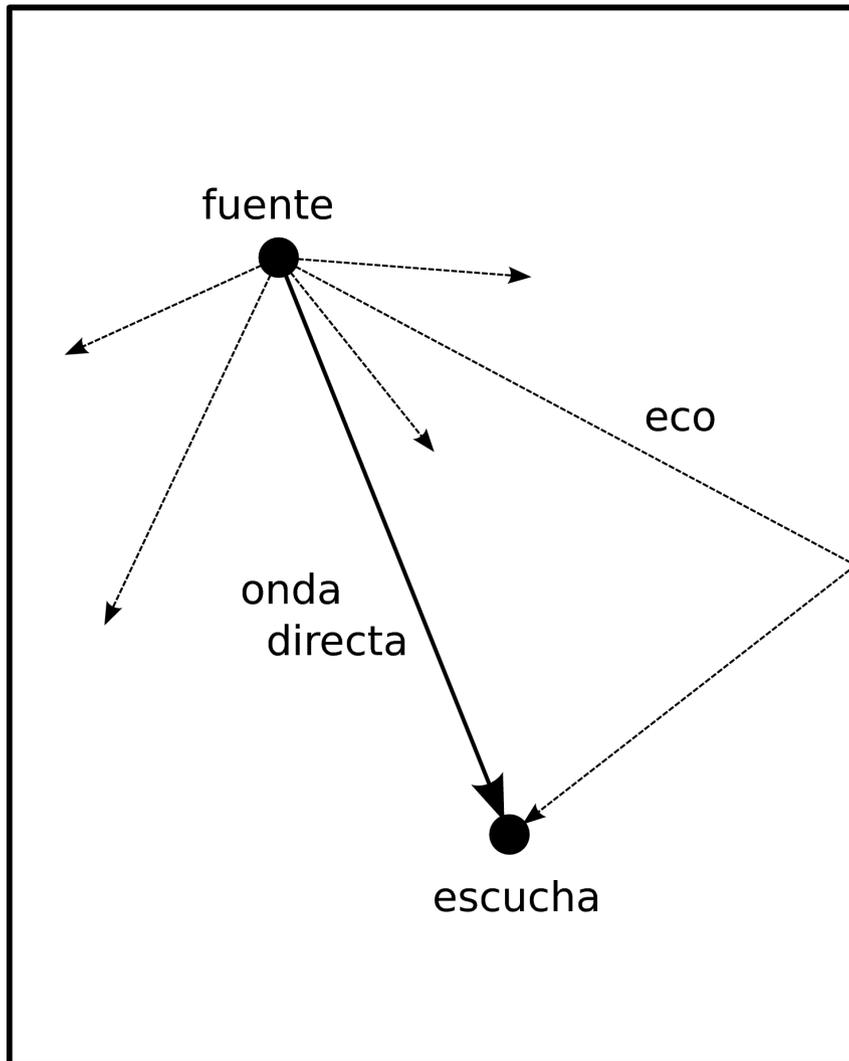
- Se agrega un todo polos en el bucle para lograr retardos arbitrarios, y por lo tanto, frecuencias fundamentales arbitrarias.



- El pasatodos se afina especificando su retardo de fase (*delta*) para obtener la frecuencia fundamental deseada

$$f_0 = \frac{f_s}{L + \frac{1}{2} + \delta}$$

Reverberadores



Reverberación es lo que le ocurre a un sonido cuando recorre el camino desde la fuente a los oídos de un escucha.

La reverberación en un cuarto es el producto de la superposición de muchos ecos.

Reverberadores

J. A. Moorer, “About This Reverberation Business”, Computer Music Journal, vol. 3, no. 2, pp. 13-28, 1979.

Modelo matemático del eco

Pensando en encontrar una transformación que provea el efecto general de eco y no en reproducir el sonido exacto de un entorno en particular, se pueden hacer las siguientes aproximaciones:

- El eco consiste en versiones repetidas del sonido original.
- Cada copia llega un tiempo fijo luego de la anterior.
- Cada copia llega con una atenuación R fija respecto a la copia anterior.

$$y[n] = x[n - L] + Rx[n - 2L] + R^2x[n - 3L] + \dots$$

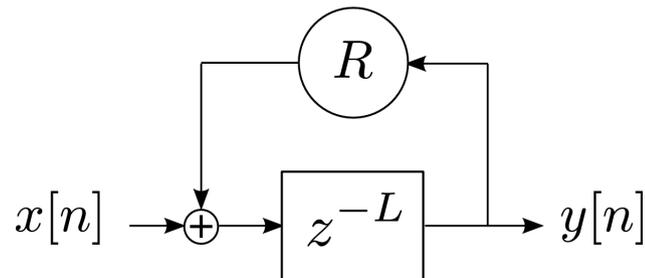
Reverberadores

Modelo matemático del eco

La relación entre las transformadas de la señal original y el eco

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{z^{-L}}{1 - Rz^{-L}}$$

Excepto por el retardo, es igual a la función de transferencia de un filtro peine.



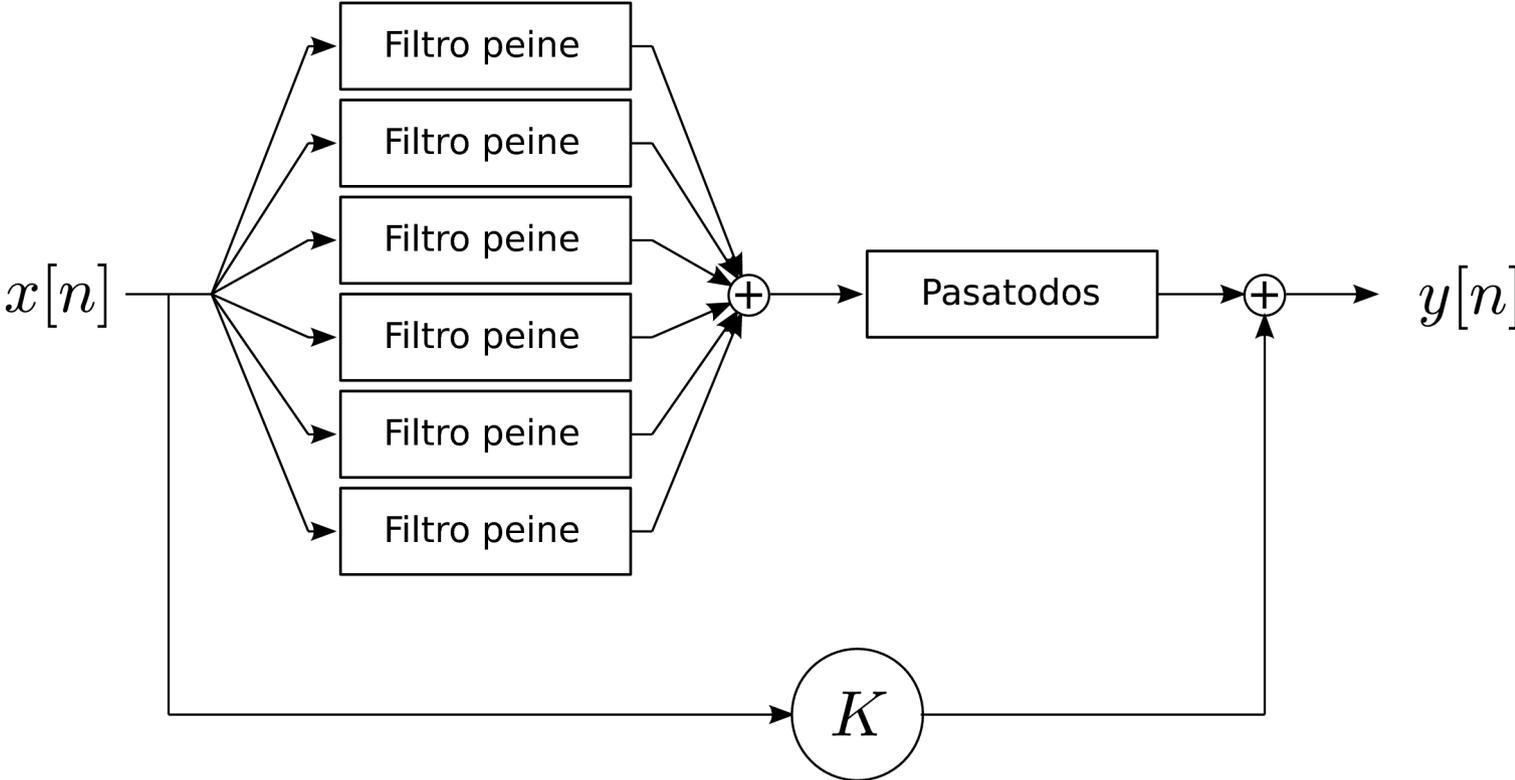
Reverberadores

Observaciones sobre el modelo

- En este caso, el retardo del filtro modela el **tiempo de ida y vuelta de la onda de sonido en un cuarto** y no en la longitud de un instrumento como en el ejemplo anterior (60 ms vs 1 ms o frecuencias de resonancia del orden de 20 Hz vs 1 kHz).
- En un cuarto típico hay **muchas fuentes reflectoras de sonido**. No alcanza con un solo filtro peine, se deben combinar varios para obtener un sonido realista.
- Al usar varios filtros peine, hay que **evitar la regularidad**. Se recomienda que los retardos de los distintos filtros sean números primos entre si.

Reverberadores

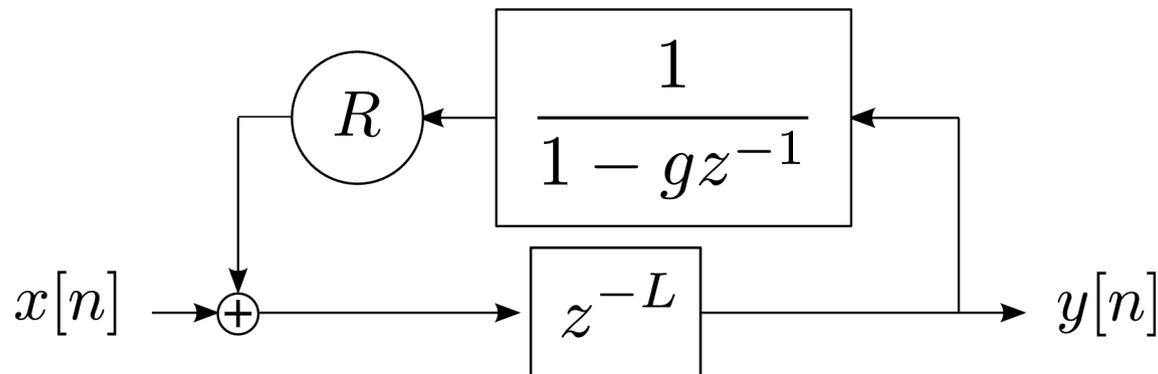
Modelo de Moorer



Reverberadores

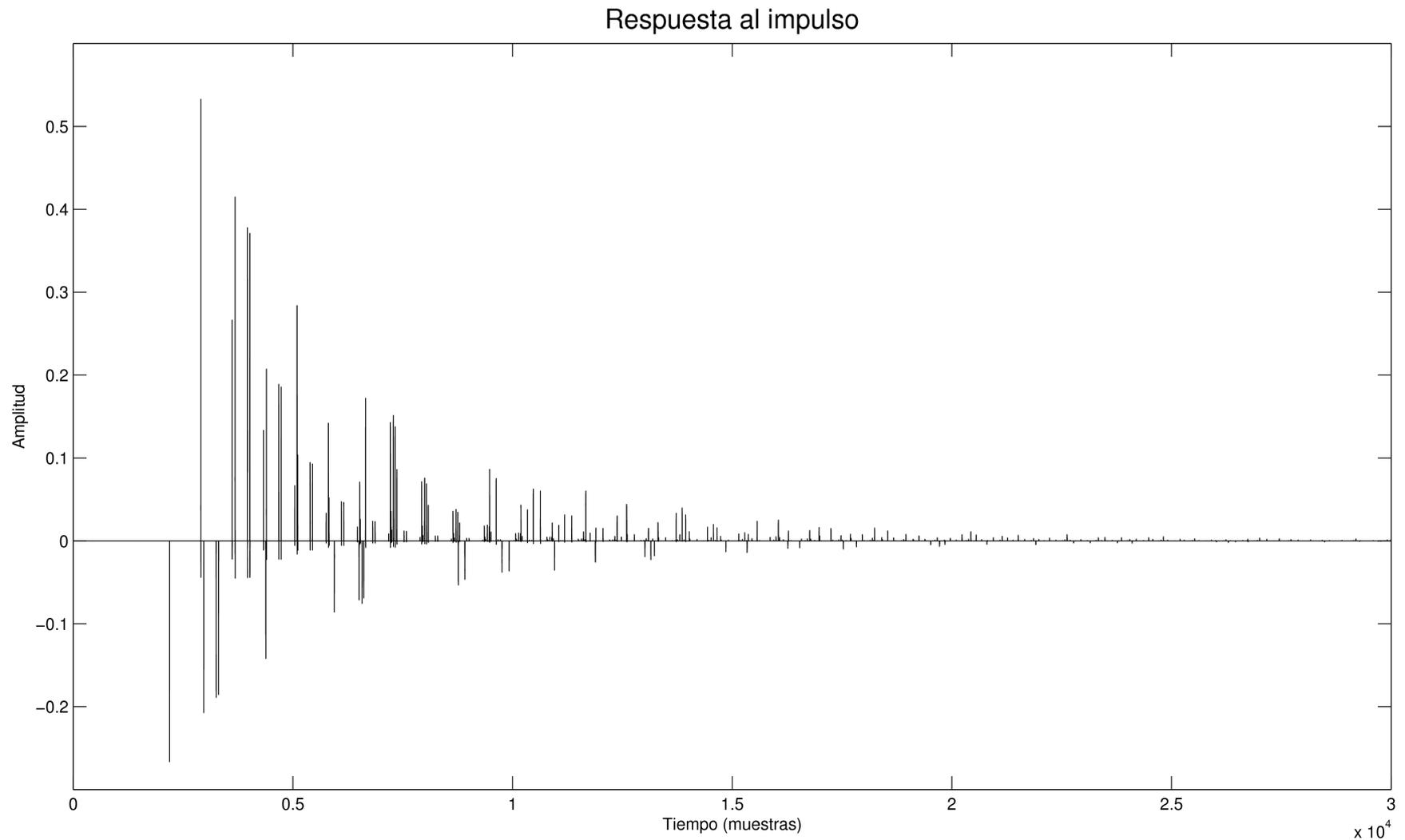
Observaciones sobre el modelo de Moorer

- Seis filtros peine en paralelo (las salidas se suman), cada uno con sus parámetros.
- El camino directo con ganancia K representa la **onda directa**.
- Filtro pasatodos para “difusión” del sonido de los ecos.
- Refinamiento de los filtros peine incluyendo un filtro pasabajos en el bucle. Modela la **absorción del sonido**, las frecuencias mas altas son absorbidas mas rapidamente. Emplea un pasabajos IIR de primer orden.



Reverberadores

Respuesta al impulso



Efectos basados en retardos

Familia de efectos de audio digital basados en el filtro peine inverso

- *Eco*: suma de la señal original con una copia retardada y atenuada.
- *Vibrato*: señal original con retardo variable en el tiempo.
- *Flanger*: suma de la señal original con una copia con retardo variable periódico. El resultado es equivalente al filtrado con filtros notch en relación armónica.
- *Phaser*: Filtrado con filtros notch pero en relación no armónica.
- *Chorus*: suma de la señal original con una copia con retardo y amplificación variables y aleatorios.

Efectos basados en retardos

FIR Comb positivo

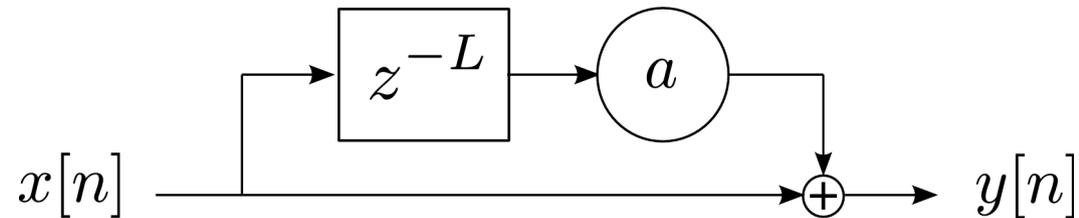
Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n] + ax[n - L]$$

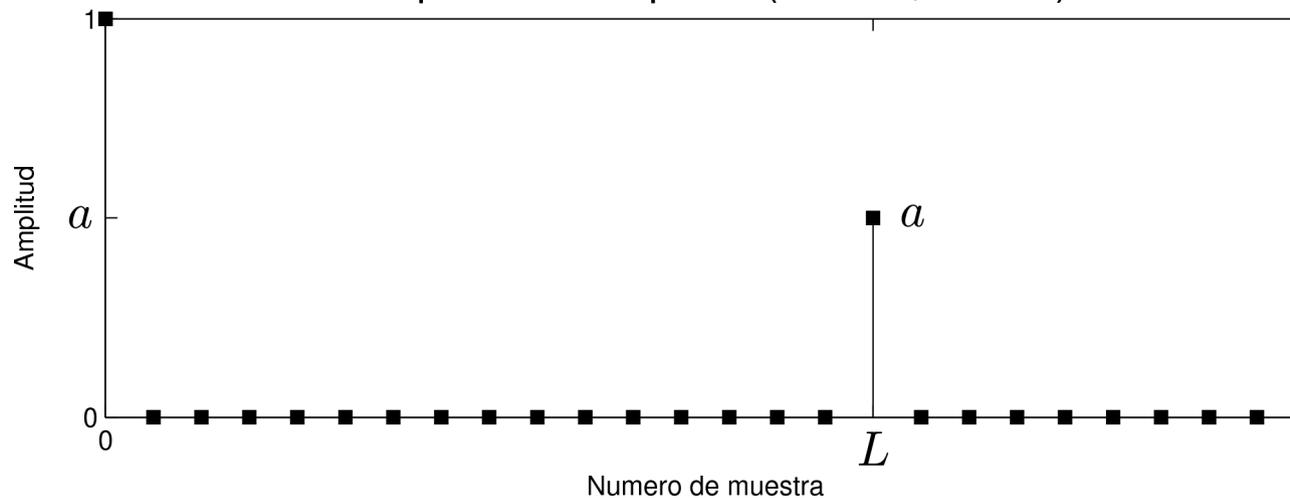
Respuesta al impulso

$$h[n] = \delta[n] + a\delta[n - L]$$

Diagrama de bloques



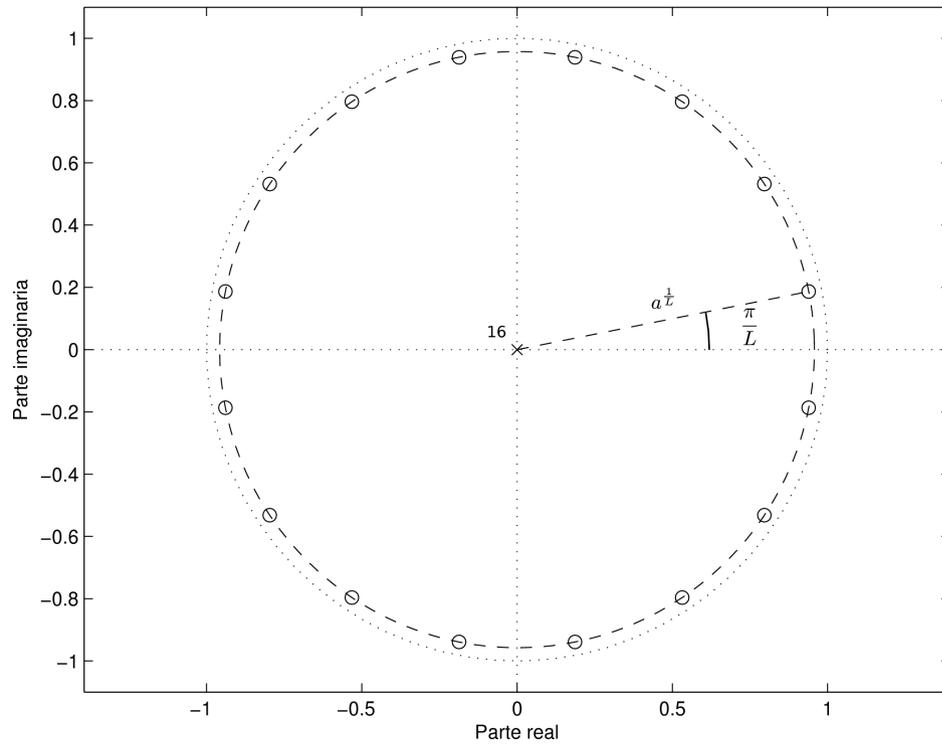
Respuesta al impulso ($a = 0.5, L = 16$)



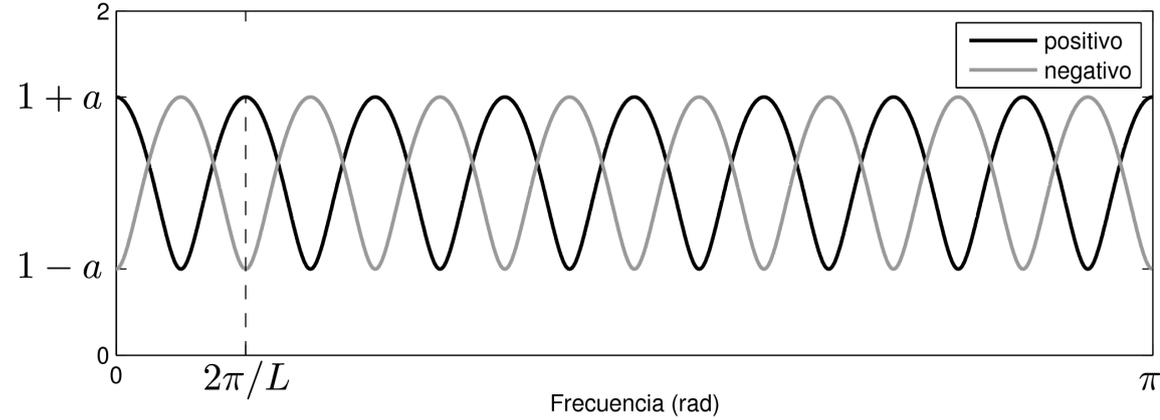
Efectos basados en retardos

FIR Comb positivo

Diagrama de polos y ceros ($a = 0.5$, $L = 16$)



Magnitud de la respuesta en frecuencia ($a = 0.5$, $L = 16$)



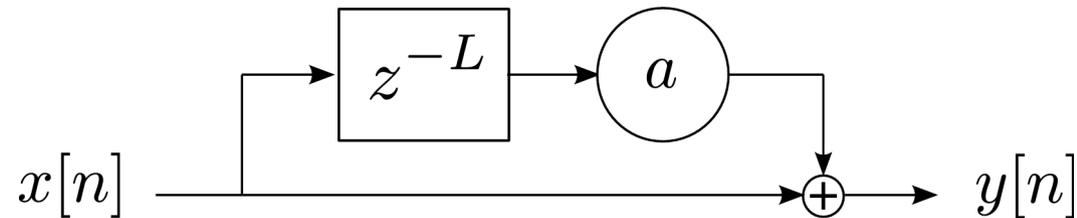
Efectos basados en retardos

Eco

Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n] + ax[n - L]$$

Diagrama de bloques



- El eco consiste en una única reflexión. Se implementa con el filtro peine.
- El retardo L representa el tiempo de ida y vuelta hasta la superficie reflectora ($L * fs$ segundos), y a representa la pérdida en la reflexión y la propagación.
- Si el tiempo de retardo es grande (100 ms), la señal directa y la señal retardada se perciben separadas. El efecto es un eco.
- Si el tiempo de retardo es pequeño (10 ms), la señal directa y la señal retardada no se perciben separadas. Se produce un cambio de timbre.

Efectos basados en retardos

Vibrato

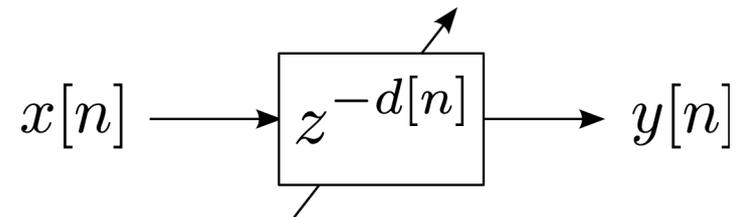
Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n - d[n]]$$

Retardo variable

$$d[n] = \frac{D}{2}(1 - \cos(\theta_v n))$$

Diagrama de bloques

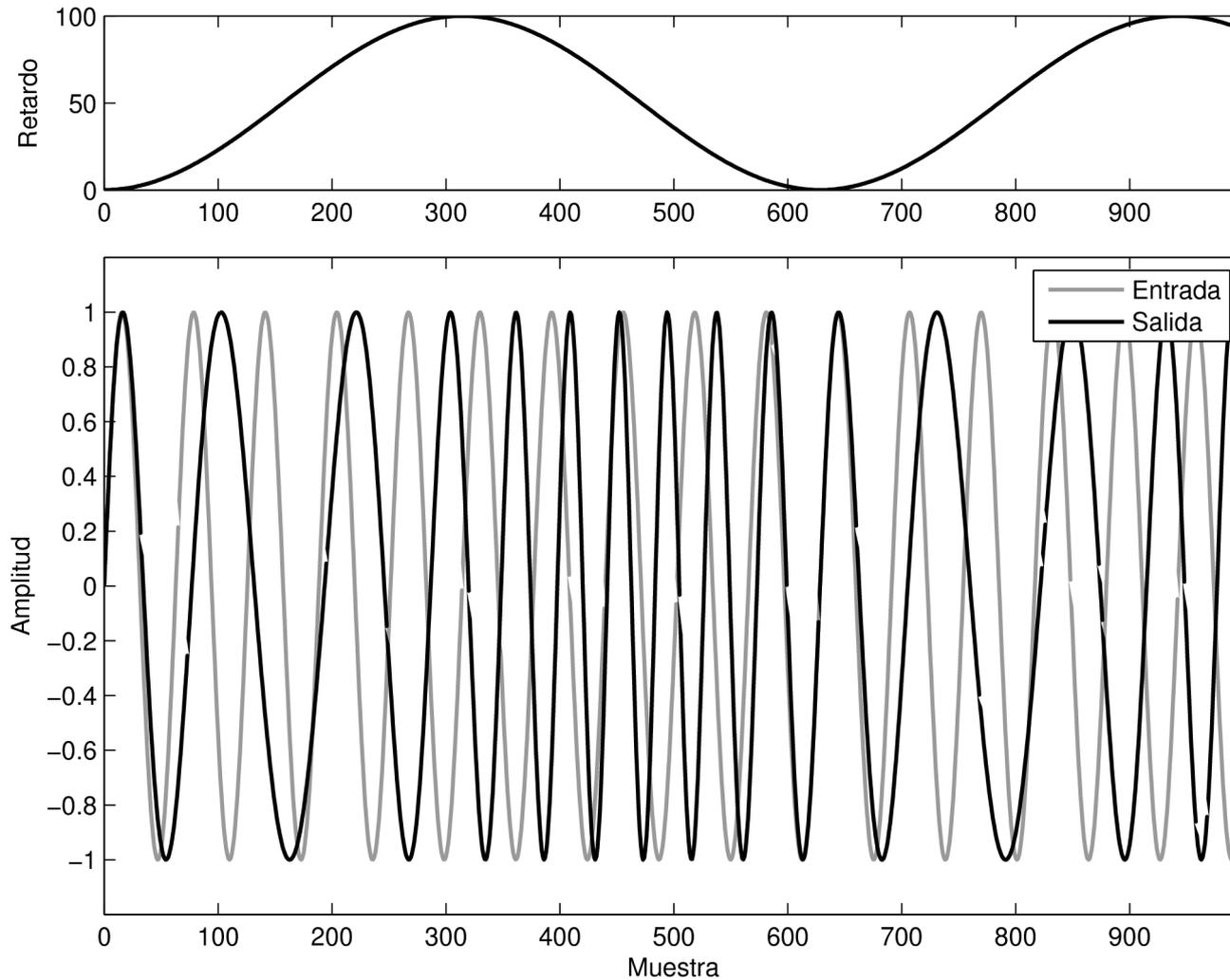


- La salida es la señal de entrada con retardo variable.
- El retardo varía en forma sinusoidal. Para que la variación sea suave, no es posible restringir solo a retardos enteros, hay que usar retardos fraccionarios. Se implementan usando filtros interpolantes (ej.: todo-polos).
- La frecuencia y la amplitud del retardo es la frecuencia y la amplitud del vibrato.

Efectos basados en retardos

Vibrato

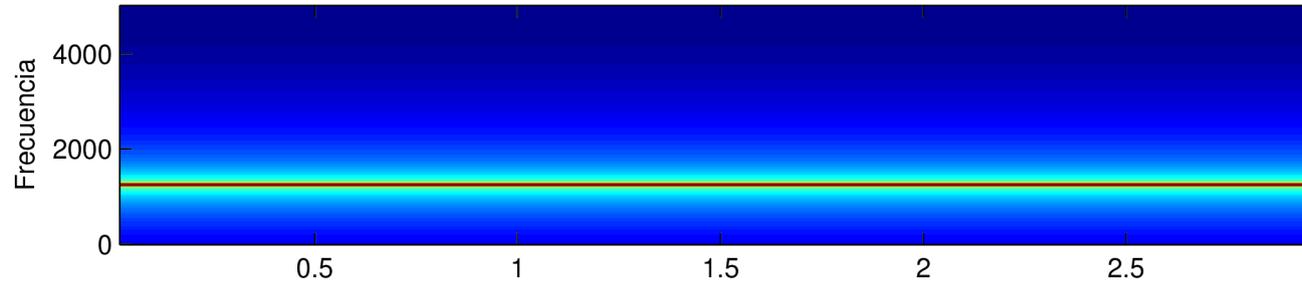
$$\text{Retardo: } d[n] = (D/2)(1 - \cos(\theta_v n))$$



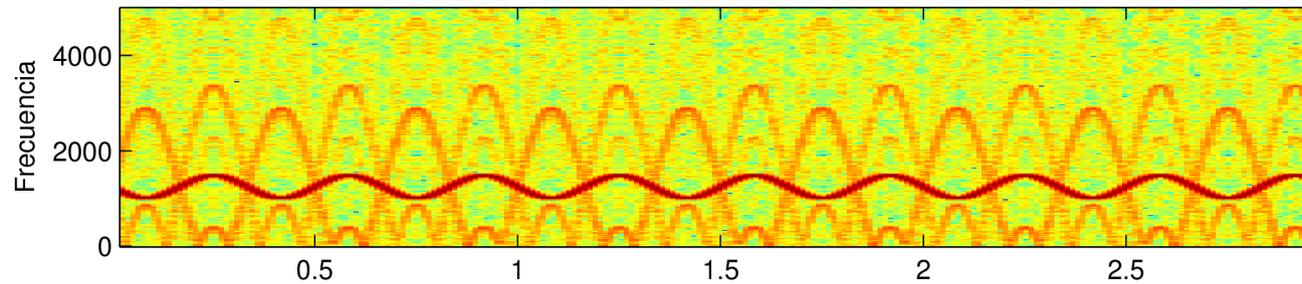
Efectos basados en retardos

Vibrato

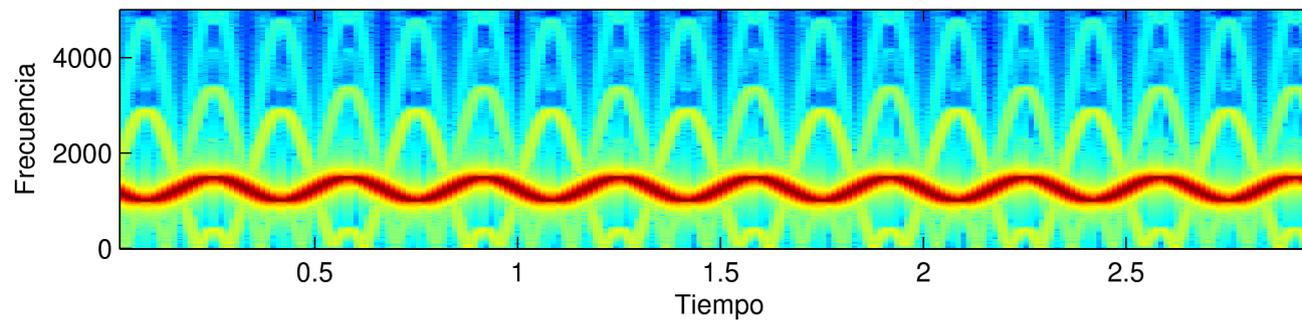
Espectrograma de la entrada



Espectrograma de la salida (sin usar interpolacion)



Espectrograma de la salida (con interpolacion)



Efectos basados en retardos

Flanger

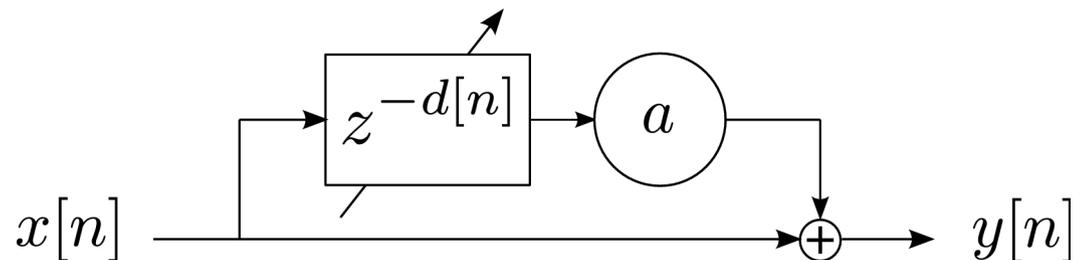
Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n] + ax[n - d[n]]$$

Retardo variable

$$d[n] = \frac{D}{2} (1 - \cos(\theta_v n))$$

Diagrama de bloques

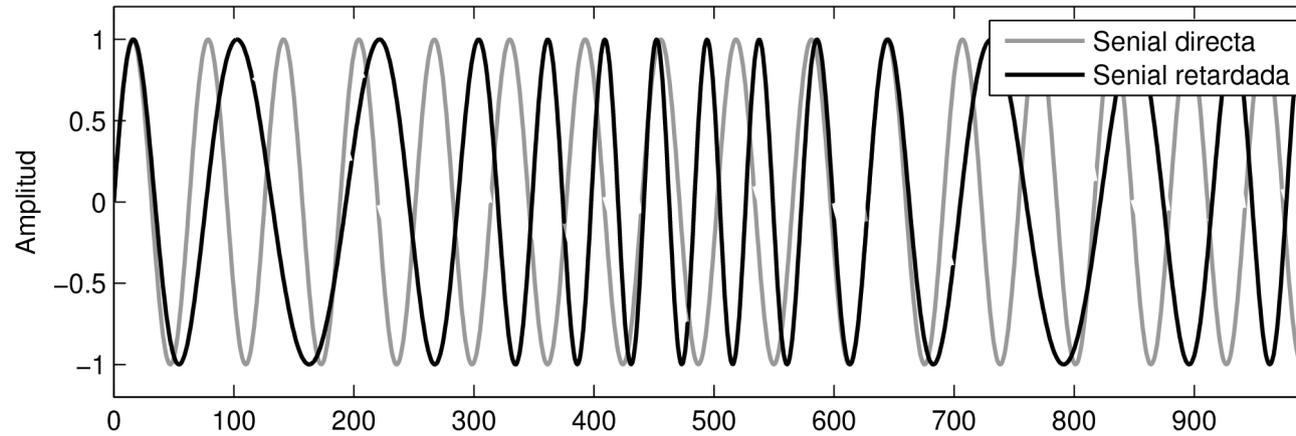


- La salida es la suma de la señal directa y la señal de entrada con retardo variable periódico (sinusoidal, triangular). El retardo variable se implementa con interpolación.
- El retardo variable genera interferencia constructiva y destructiva variable.
- Consiste en el filtrado con un filtro peine variable. Esto equivale a filtrar la señal con filtros notch de frecuencia variable. Los filtros notch se encuentran en relación armónica.

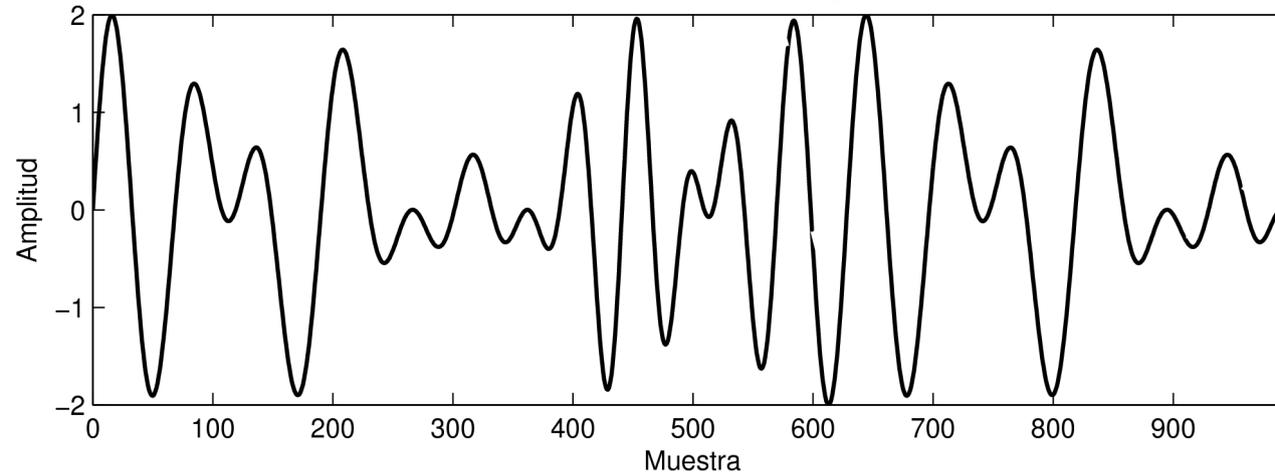
Efectos basados en retardos

Flanger

Senial directa y senial con retardo variable

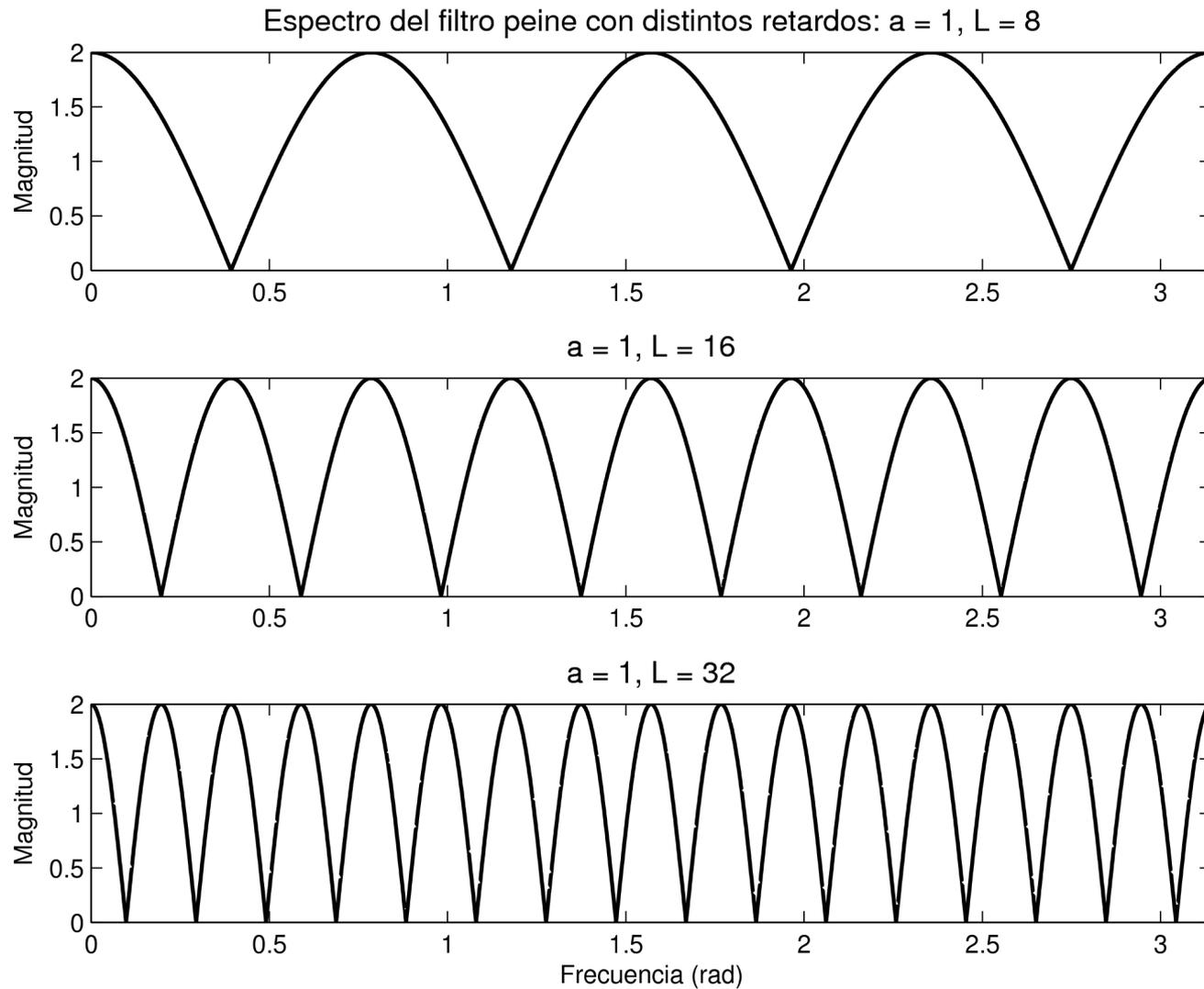


Sinusoide con flanger



Efectos basados en retardos

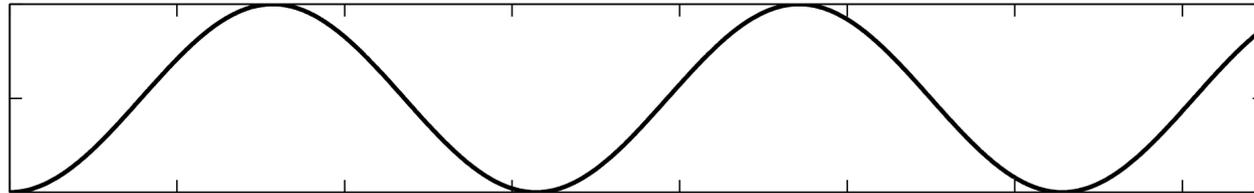
Flanger



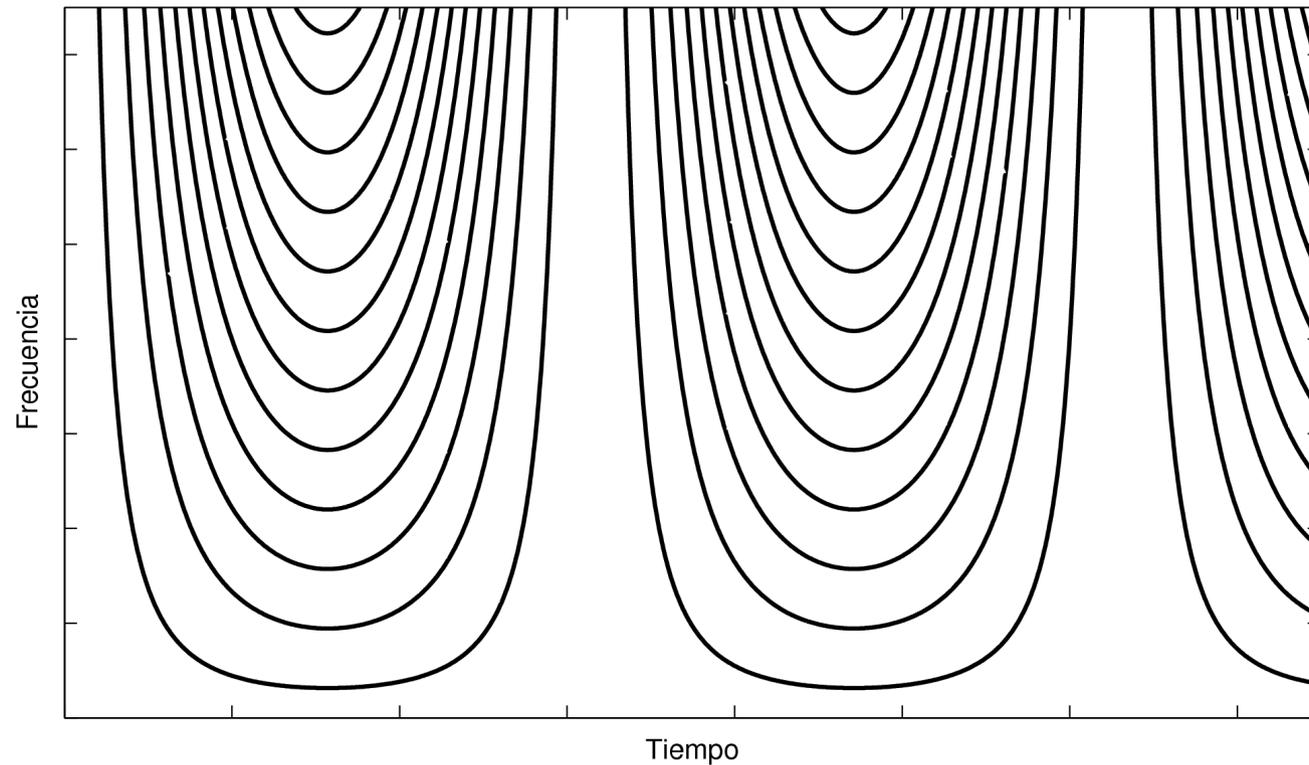
Efectos basados en retardos

Flanger

Retardo $d[n]$

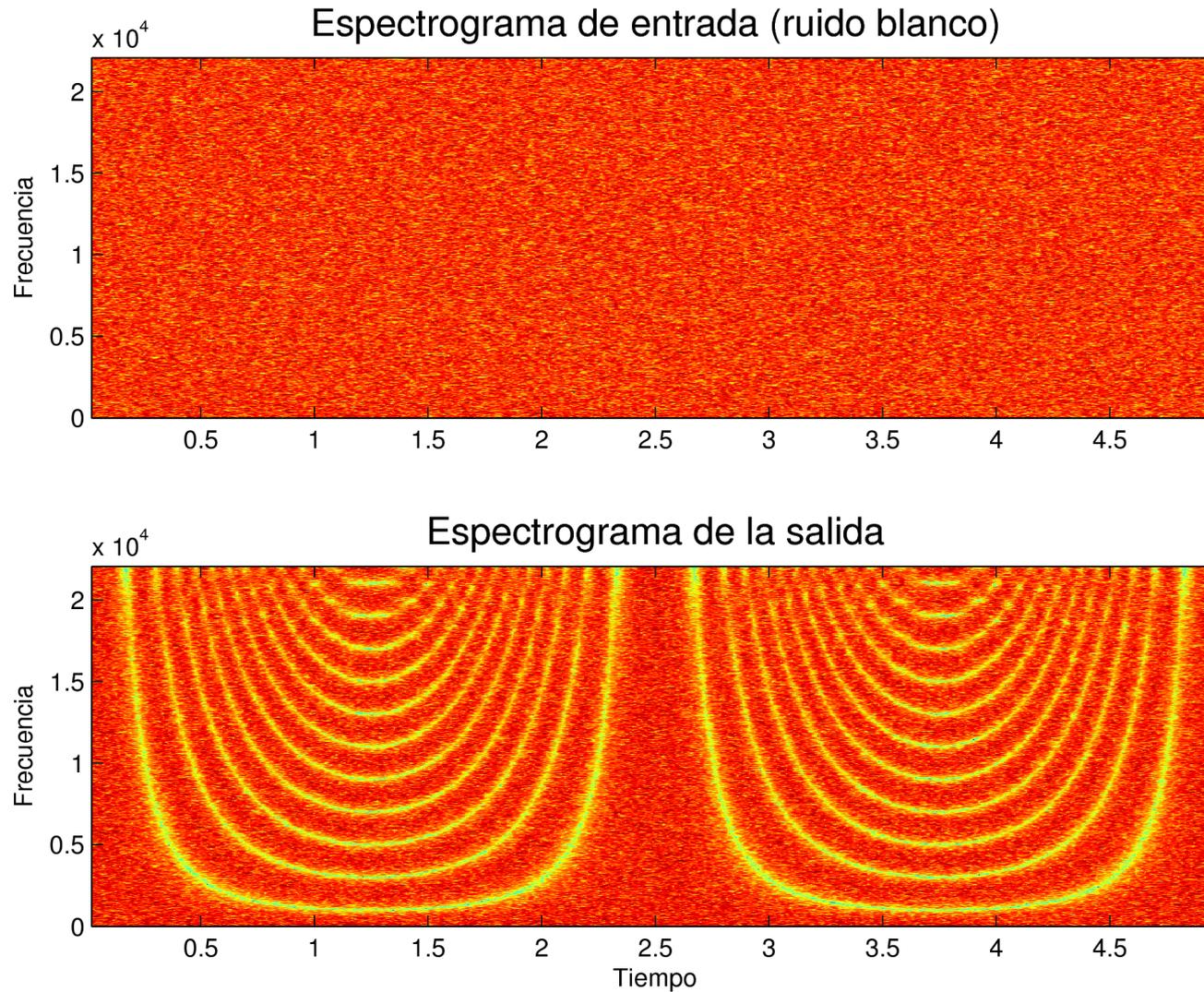


Flanger: frecuencia de los filtros notch



Efectos basados en retardos

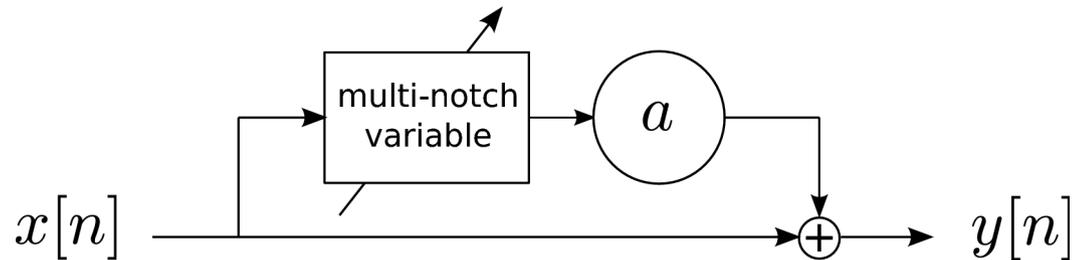
Flanger



Efectos basados en retardos

Phaser

Diagrama de bloques



- Similar al flanger. Consiste en el filtrado con filtros notch de frecuencia variable.
- Los filtros notch no se encuentran en relación armónica. No se puede implementar usando un filtro peine, hay que realizar el filtrado con filtros notch explícitamente.
- Se implementa con filtros notch en cascada cuya frecuencia varía simultáneamente

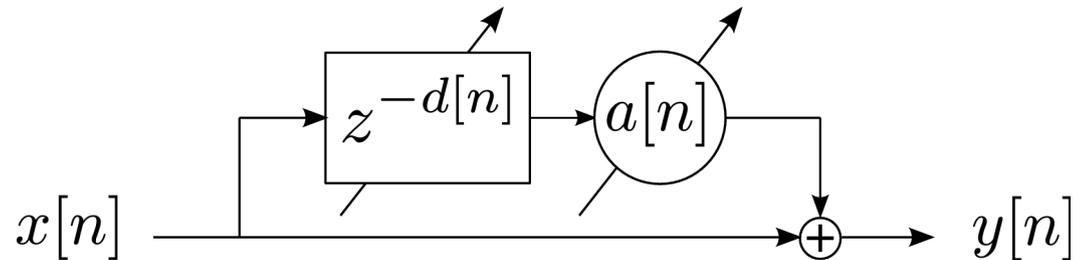
Efectos basados en retardos

Chorus (doubling)

Ecuación en recurrencia

$$y[n] = x[n] + a[n]x[n - d[n]]$$

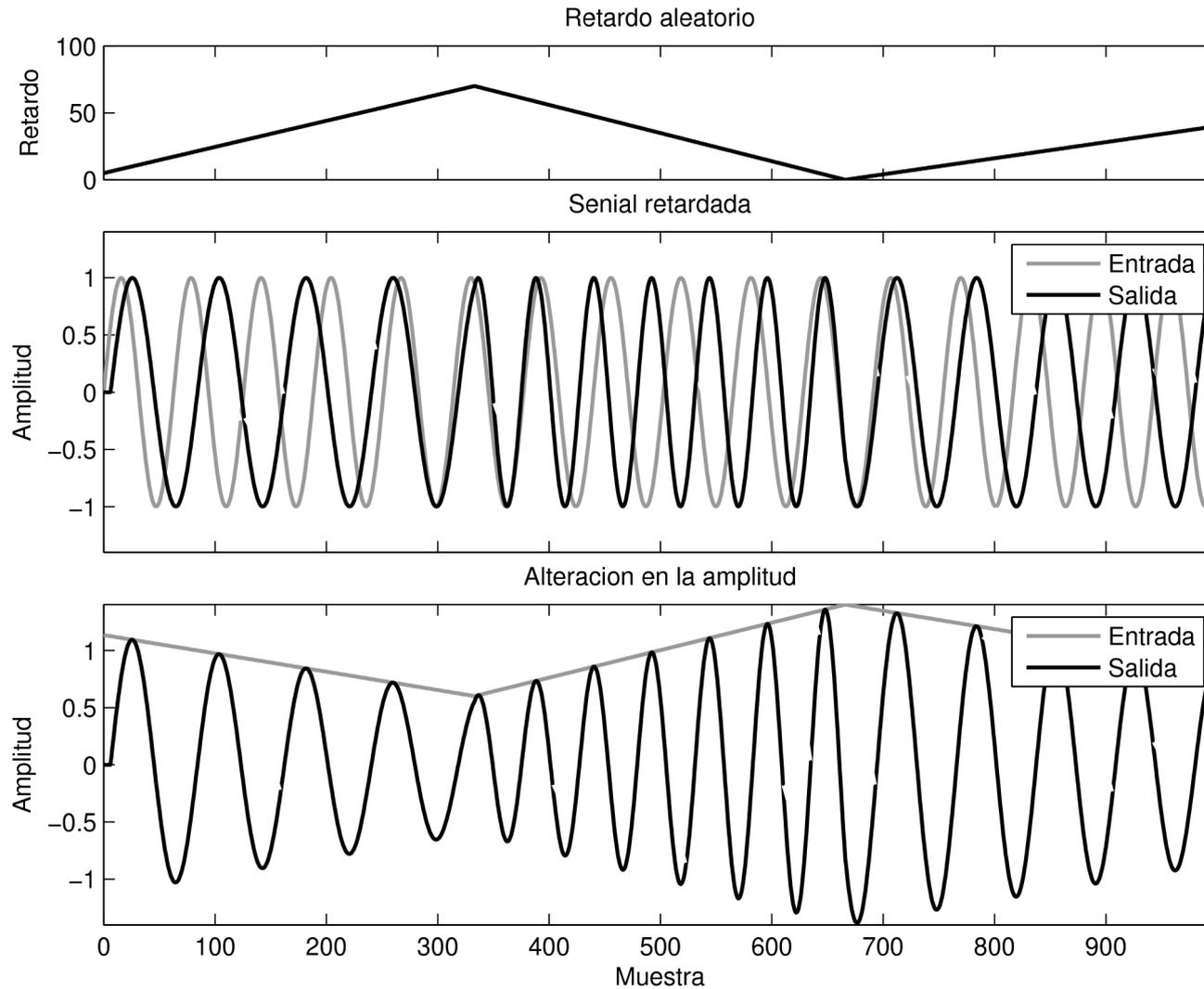
Diagrama de bloques



- El retardo y la amplitud son variables. Varían en forma lenta y aleatoria.
- Simula dos o mas instrumentos sonando juntos y sincronizados.

Efectos basados en retardos

Chorus (doubling)



Bibliografía

- Steiglitz, Ken, "*Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music*", 1996, Prentice Hall.
 - Cap 6: Comb and string filters
 - Cap. 14: Audio and musical applications
- Smith, Julius, "*Physical Audio Signal Processing*", 2004, W3K Publishing.
 - Cap. 2: Acoustic modeling with delay
 - Cap. 3: Artificial reverberation
 - Cap. 5: Time-varying delay effects
- Orfanidis, S., "*Introduction to Signal Processing*", 1995, Prentice Hall.
 - Cap. 8: Signal processing applications