Métodos de diseño de filtros FIR (2da Parte)

Procesamiento de señales

.UBAfiuba
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Débora P. Copa ● Dra. Cecilia G. Galarza
IIBM LPSC

Filtros FLG Óptimos

Filtros FLG Óptimos

Equiripple y Cuadrados mínimos

Función costo

Cuadrados mínimos (LS, *Least Squares*)

$$\min_{h(n)\in\mathcal{F}} \int_0^{+\pi} E^2(\omega)d\omega$$

Equirriple

$$\min_{h(n)\in\mathcal{F}} \max_{\omega\in S} |E(\omega)|,$$

Error Ponderado

$$E(\omega) = V(\omega)|A_d(\omega) - A(\omega)|,$$

Filtros FLG Equiripple

Grado L del polinomio para distintos tipos FLG

$$A(\omega) = Q(\omega)P(\omega) \quad \text{donde} \quad P(\omega) = \sum_{k=0}^{L} \alpha_k \cos(\omega k) = \sum_{k=0}^{L} \alpha'_k (\cos(\omega))^k,$$

Polinomio de orden L

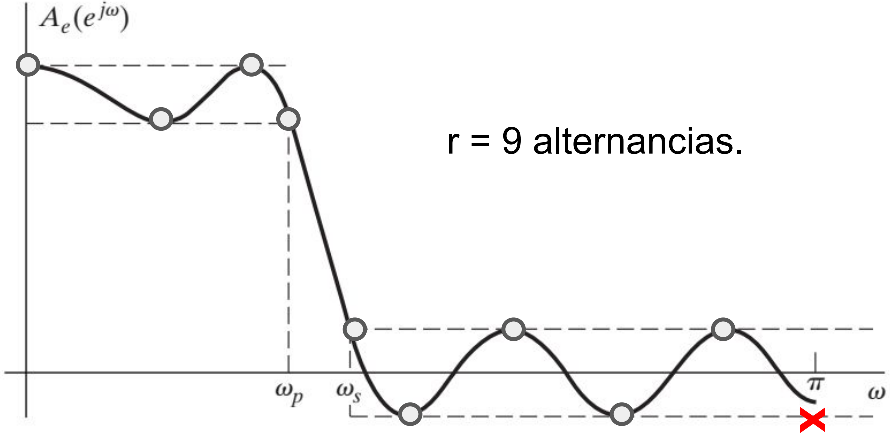
	M impar	M par
sim	$\alpha_k = \begin{cases} h\left(\frac{M-1}{2}\right) & k=0 \\ 2h\left(\frac{M-1}{2}-k\right) & 1 \le k \le \frac{M-1}{2} \end{cases}$ $Q(\omega)=1 \quad , \quad L=\frac{M-1}{2}$	$\alpha_k = \begin{cases} h(\frac{M}{2}-1) & k=0 \\ 4h\left(\frac{M}{2}-k\right)-\alpha_{k-1} & 1 \le k \le \frac{M}{2}-2 \\ 4h(0) & k=\frac{M}{2}-1 \end{cases}$ $Q(\omega)=\cos(\frac{\omega}{2}) \quad , \quad L=\frac{M}{2}-1$
asim	$\alpha_k = \begin{cases} 2h(0) & k=\frac{M-3}{2} \\ 4h(1) & k=\frac{M-5}{2} \\ \alpha_{k+2}+4h(\frac{M-3}{2}-k) & 1 \le k \le \frac{M-7}{2} \\ \frac{1}{2}\alpha_2+2h(\frac{M-3}{2}) & k=0 \end{cases}$ $Q(\omega)=\sin(\omega) \quad , \quad L=\frac{M-3}{2}$	$\alpha_k = \begin{cases} 4h(0) & k=\frac{M}{2}-1 \\ \alpha_{k+1}+4h(\frac{M-2}{2}-k) & 1 \le k \le \frac{M}{2}-2 \\ \frac{1}{2}\alpha_1+2h(\frac{M-2}{2}) & k=0 \end{cases}$ $Q(\omega)=\sin\frac{\omega}{2} \quad , \quad L=\frac{M}{2}-1$

Número de alternancias en la condición óptima: ***r >= L+2***

Filtros FLG Equiripple
Teorema de las alternancias

Las alternancias deben cumplir:

- Máximos y mínimos locales que llegan al mismo error dentro de cada banda
- Puntos de cruce en las frecuencias límites (wp y ws).
- Eventualmente en 0 y pi (si es que allí se llega al máximo error)



r = 9 alternancias.

EJEMPLO (FLG, N=14)

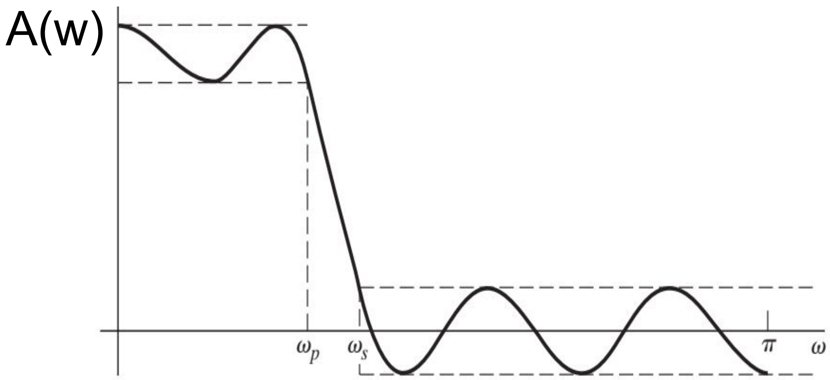
Si el filtro está en la condición óptima, debe cumplir

r >= L+2

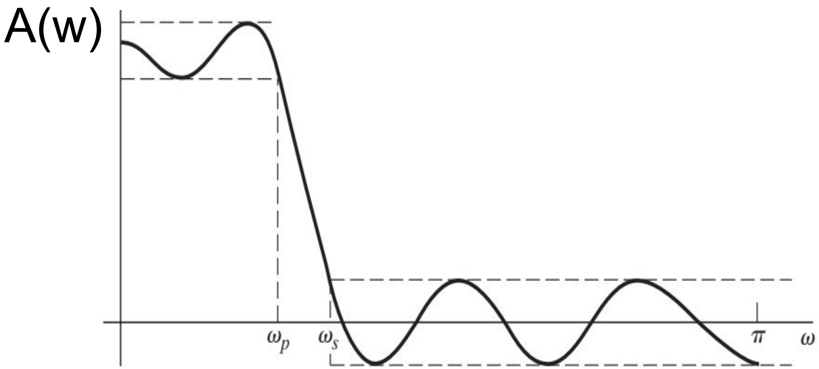
Filtros FLG Equiripple
Teorema de las alternancias

Ejemplo: cuántas alternancias hay?

a)



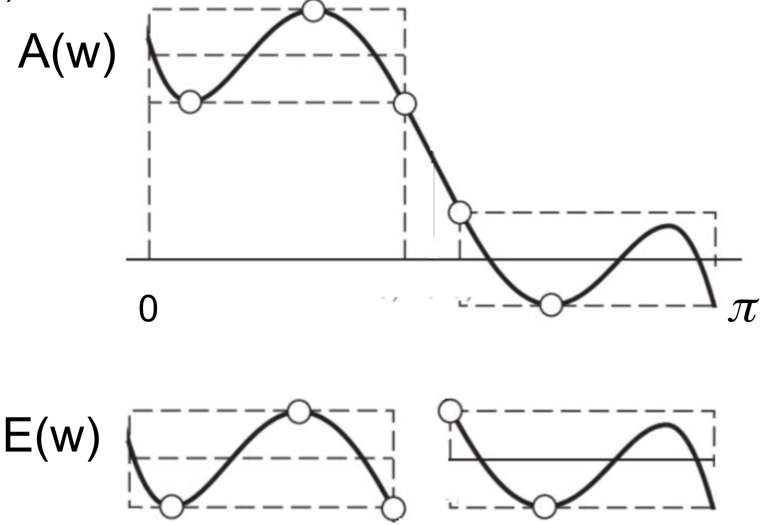
b)



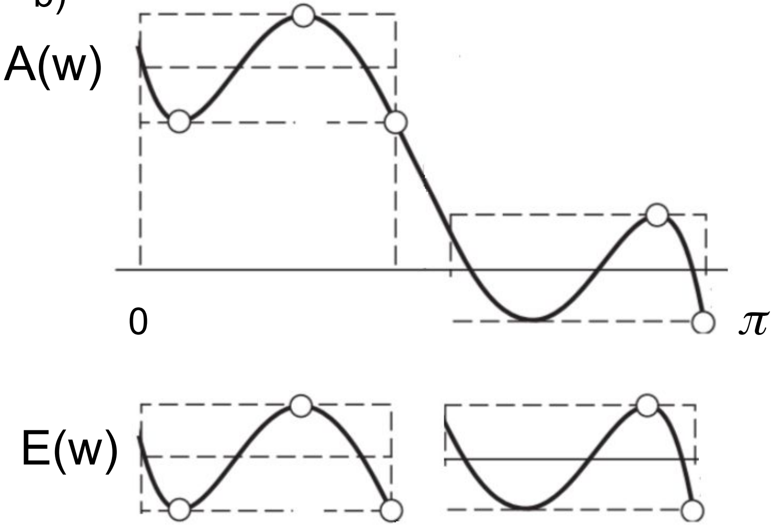
Filtros FLG Equiripple
Teorema de las alternancias

Ejemplo: en cuáles se llega a la condición óptima?

a)



b)



Filtros FLG Equiripple
Herramientas disponibles

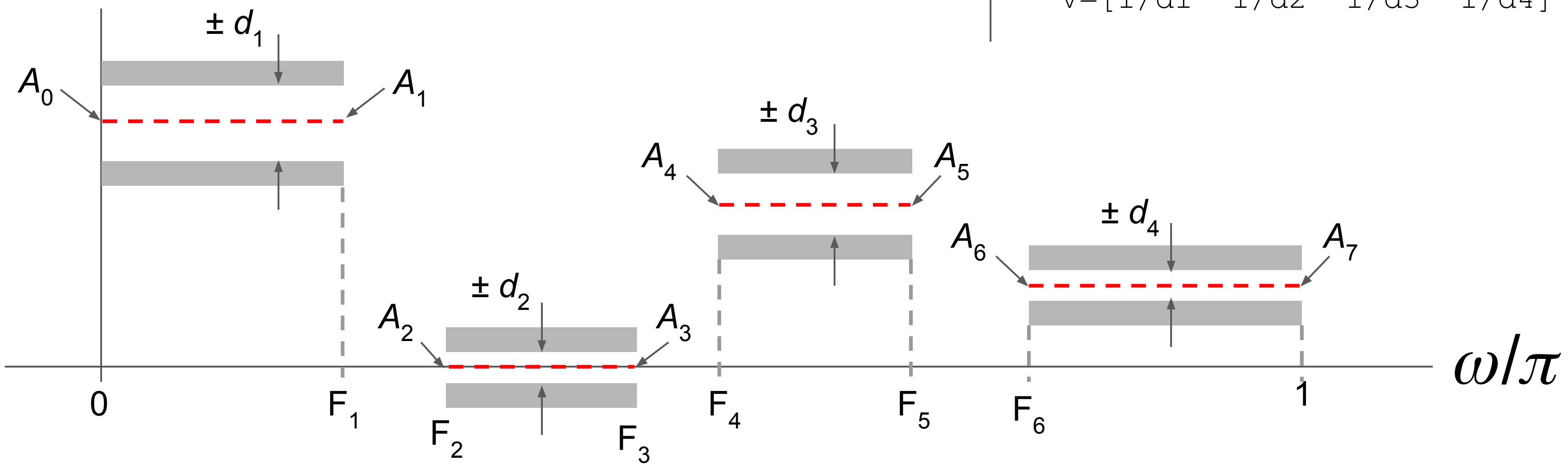
Equirriple

`h = firpm(N,F,A,V)` MATLAB

`h = remez(N,F,A,V)` OCTAVE

Parámetros

```
F=[0 F1 F2 F3 F4 F5 F6 1]
A=[A0 A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7]
V=[1/d1  1/d2  1/d3  1/d4]
```



Filtros FLG Equiripple
Orden del filtro aproximado

¿Qué largo (orden +1) debe tener el filtro?

Existen algunas fórmulas empíricas para comenzar el diseño. Una es la aproximación de Kaiser.

$$\hat{M} = \frac{-20\log_{10}\left(\sqrt{\delta_1 \delta_2}\right) - 13}{14.6\,\Delta f} + 1 \qquad ; \Delta f = \Delta\omega/2\pi$$

Luego puede ajustarse hasta alcanzar las especificaciones deseadas

Clase anterior (Actividad 4)

Actividad 4

Diseño de un filtro FLG Equiripple

1) Implementar un filtro pasa bajos utilizando el método de diseño óptimo *Equiripple*. Grafique *h*(n), $|H(\omega)|$ y el diagrama de polos y ceros.

   Nota: para obtener el orden, utilice la aproximación de Kaiser y luego vaya modificando el orden hasta cumplir con la especificación.

2) Grafique la función amplitud $A(\omega)$ y verifique experimentalmente si se cumple el teorema de las alternancias.

$$0{,}96 \leq |H(\omega)| \leq 1{,}04 \qquad 0 \leq |\omega| \leq 0{,}45\pi$$

$$|H(\omega)| \leq 0{,}1 \qquad 0{,}5\pi \leq |\omega| \leq \pi$$

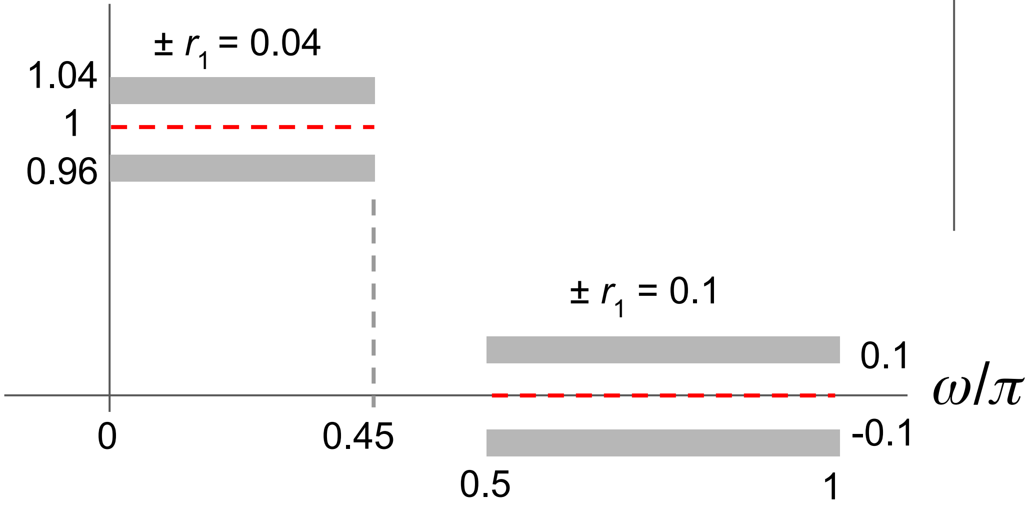
Actividad 4

Especificaciones y parámetros de diseño

Especificaciones

$$0{,}96 \leq |H(\omega)| \leq 1{,}04 \qquad 0 \leq |\omega| \leq 0{,}45\pi$$

$$|H(\omega)| \leq 0{,}1 \qquad 0{,}5\pi \leq |\omega| \leq \pi$$



Equirriple

```
h = firpm(N,F,A,V)
```
MATLAB

```
h = remez(N,F,A,V)
```
OCTAVE

Parámetros

```
F=[0 0.45 0.5 1]

A=[1 1 0 0]

V=[1/0.04  1/0.1]
```

Actividad 4
Especificaciones y parámetros de diseño

Determinación del orden con la aproximación empírica de Kaiser

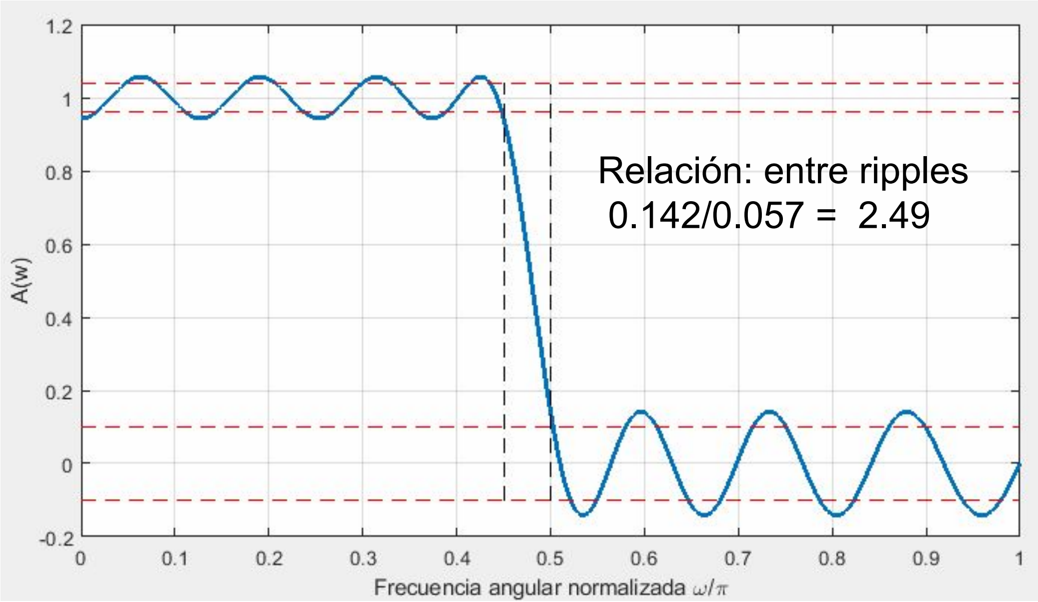
$$\hat{M} = \frac{-20\log_{10}\left(\sqrt{\delta_1\delta_2}\right) - 13}{14.6\,\Delta f} + 1$$

; $\Delta f = \Delta\omega/2\pi$

```
wp = 0.45*pi
ws = 0.5*pi
r1 = 0.04
r2 = 0.1

df = abs(wp - ws) / 2/pi
M = ( -20*log10( sqrt(r1*r2) ) - 13 ) / (14.6 * df ) + 1

M = 31.008
M = ceil(M)
  = 32

N = 31
```

Actividad 4
Filtro diseñado (con orden empírico)

Determinación del orden con la aproximación empírica de Kaiser

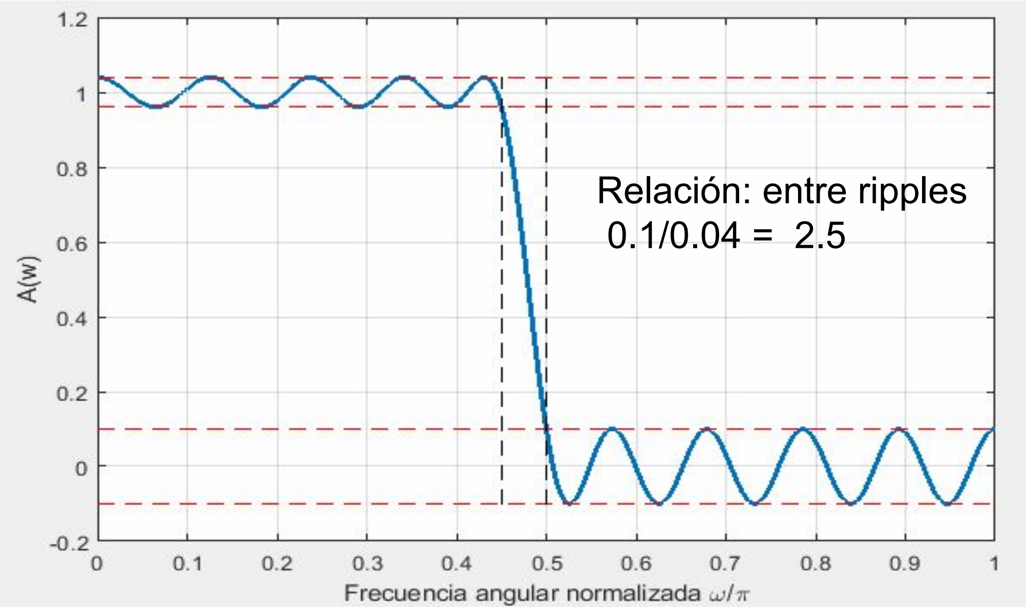


- M=32, orden N=31
- Filtro FLG tipo II
- Orden de polinomio Cheby L = M/2 -1 = 15
- Alternancias contadas: r = 17
- L + 2 = 17
- Se cumple la condición óptima
- Relación entre Ripples r2/r1=2.5, cumple.
- Pero no cumplen la especificación de ripples
- **Hay que ajustar M**

Actividad 4

Filtro diseñado (luego de ajustar el orden)

Determinación del orden con la aproximación empírica de Kaiser



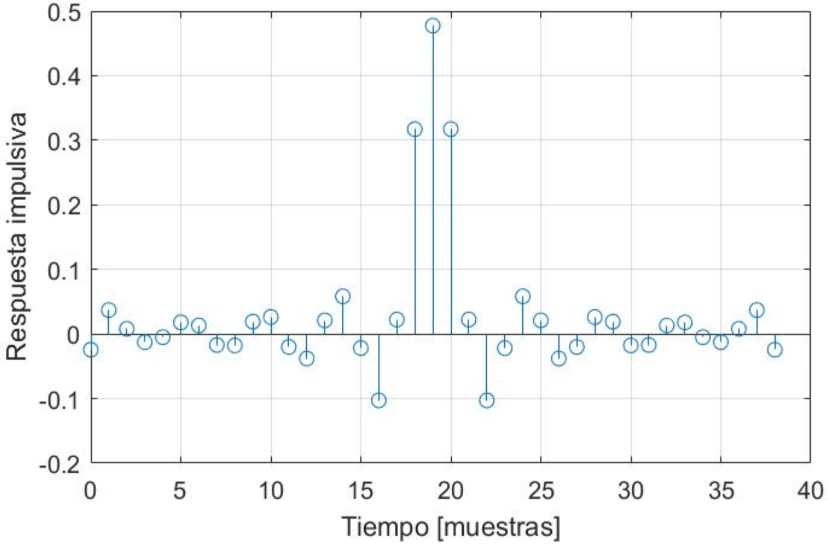
- Incrementamos M hasta que el ripple se ajusta a las tolerancias
- Esto se logra para M = 39, orden N=38
- Filtro FLG tipo I
- L = (M-1)/2 = 19
- Se sigue cumpliendo el teorema de las alternancias

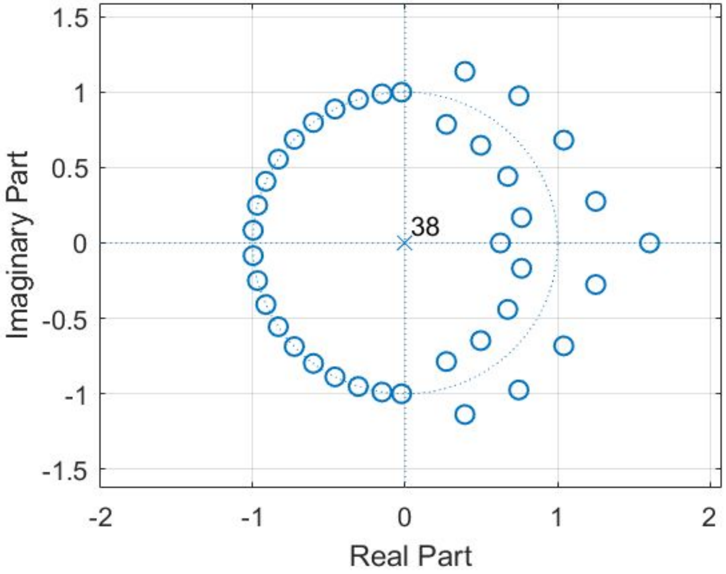
r = 21

L + 2 = 19 + 2 = 21

Actividad 4

Diseño de un filtro LP FLG Equiripple





Actividad 4
Diseño de un filtro LP FLG Equiripple

Procedimiento

1. Definir especificaciones (ripples, frecuencias, amplitudes)
2. Definir parámetros de firpm() (F, A, V)
3. Calcular orden N aproximado desde aproximación empírica (ej orden de Kaiser)
4. Implementar filtro h = firpm(N, F, A, V)
5. Verificar cumplimiento de alternancias
6. Modificar orden N para ajustar mejor a las especificaciones

Herramientas para diseño de filtros óptimos LS

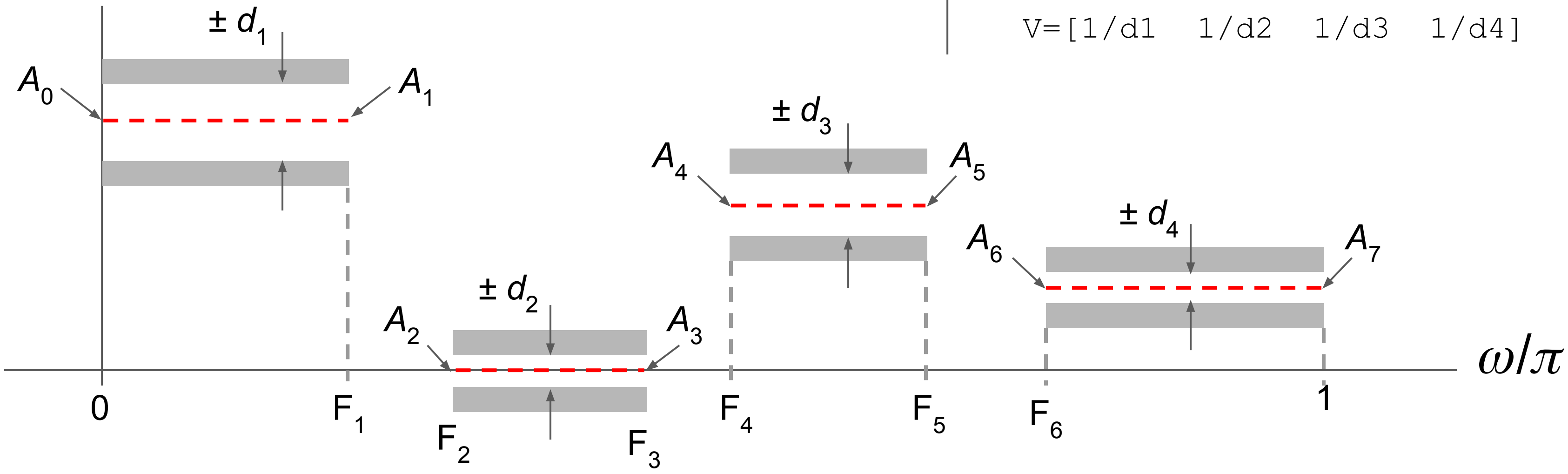
Filtros FLG LS
Herramientas de diseño

Mismos parámetros que equirriple
Mismo procedimiento

Aunque distintas características (se optimizan con diferentes criterios)

LS

`h = firls(N,F,A,V)` MATLAB / OCTAVE



Parámetros

```
F=[0 F1 F2 F3 F4 F5 F6 1]
A=[A0 A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7]
V=[1/d1 1/d2 1/d3 1/d4]
```

Métodos de diseño de filtros IIR (2da Parte)

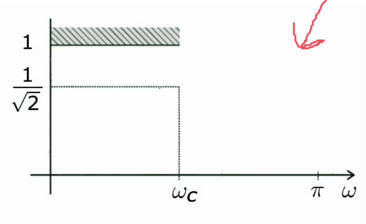
Procesamiento de señales

FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Débora P. Copa ● Dra. Cecilia G. Galarza
IIBM LPSC

Métodos de diseño de filtros IIR

Discreto

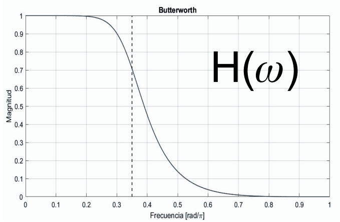


Definición de especificaciones

Diseño IIR

?

discreto



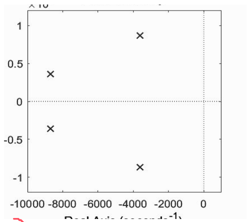
Coeficientes del filtro H(z)
b: numerador
a: denominador

Transformación
$\omega \leftrightarrows \Omega$

$H(\Omega)$
- Butterworth, Chebyshev,
- Transformación en frec.

continua

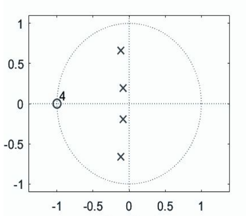
H(s)



cont

Transformación
s ⇆ z

H(z)



discreto

Métodos de diseño de filtros IIR

Flujo de diseño

Especificaciones en tiempo discreto $\delta_p \; \delta_s \; \omega_p \; \omega_s$

cont

Transformación a tiempo continuo $\omega \longrightarrow \Omega$

cheby

Diseño de filtro analógico $H(s)$

cont

Discretización del filtro diseñado $s \longrightarrow z$

Métodos de diseño de filtros IIR

Flujo de diseño

1. Especificaciones en tiempo discreto — $\delta_p \; \delta_s \; \omega_p \; \omega_s$
2. Transformación a tiempo continuo — $\omega \rightarrow \Omega$
3. Diseño de filtro analógico — $H(s)$
4. Discretización del filtro diseñado — $s \rightarrow z$

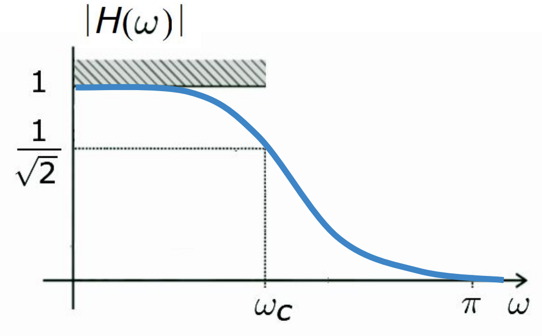
Métodos de diseño de filtros IIR
Especificaciones en tiempo discreto

Butterworth pasa bajos

Parámetros:

ω_c frecuencia de corte

N orden

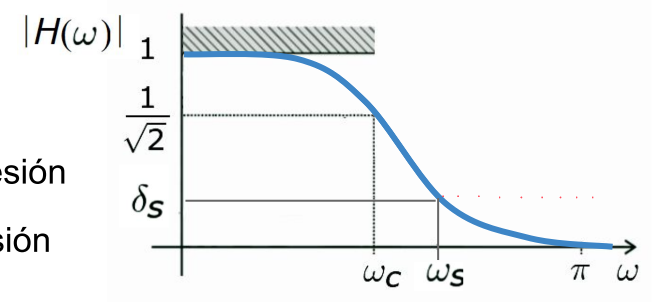


Parámetros:

ω_c frecuencia de corte

ω_s frecuencia de supresión

δ_s tolerancia de supresión



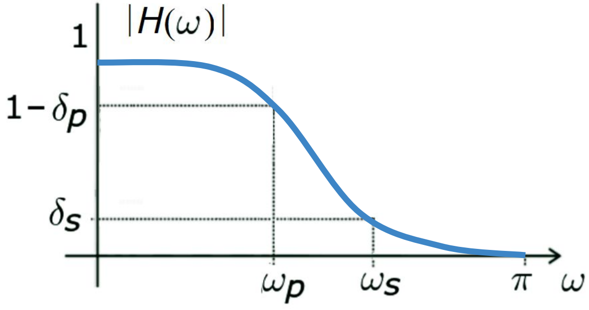
Parámetros:

ω_p frecuencia de paso

ω_s frecuencia de supresión

δ_p tolerancia de paso

δ_s tolerancia de supresión



Métodos de diseño de filtros IIR

Flujo de diseño

Especificaciones en tiempo discreto $\delta_p \; \delta_s \; \omega_p \; \omega_s$

↓

Transformación a tiempo continuo $\omega \longrightarrow \Omega$

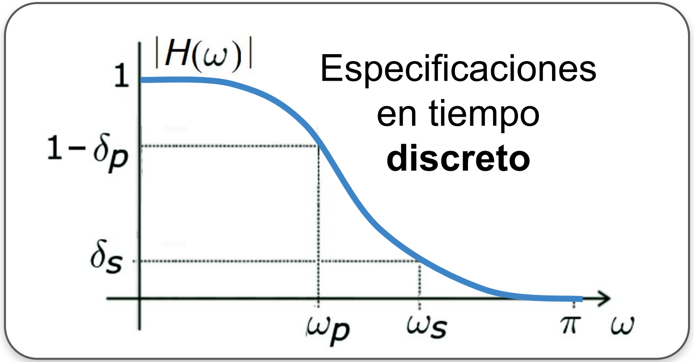
↓

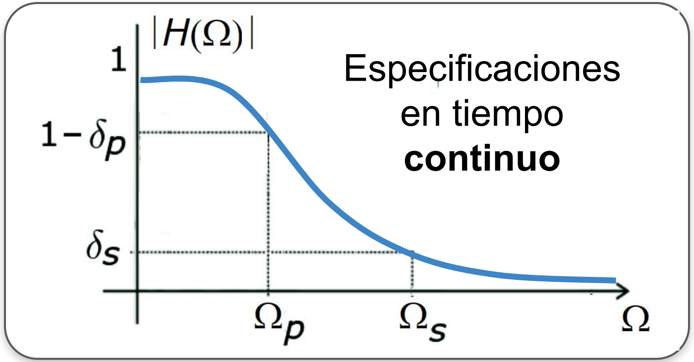
Diseño de filtro analógico $H(s)$

↓

Discretización del filtro diseñado $s \longrightarrow z$

Métodos de diseño de filtros IIR
Transformación a tiempo continuo





Transformación bilineal (ω,Ω)

$$\begin{cases} \Omega_p = \dfrac{2}{T}\tan\left(\dfrac{\omega_p}{2}\right) \\[2ex] \Omega_s = \dfrac{2}{T}\tan\left(\dfrac{\omega_s}{2}\right) \end{cases}$$

Si Volvemos a discreto "T" no importa

T: período de muestreo

Métodos de diseño de filtros IIR

Flujo de diseño

Especificaciones en tiempo discreto $\delta_p \, \delta_s \, \omega_p \, \omega_s$

↓

Transformación a tiempo continuo $\omega \rightarrow \Omega$

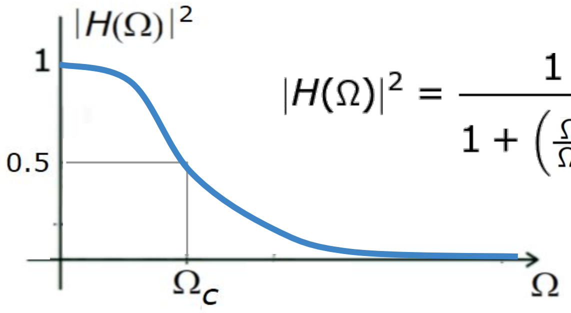
↓

Diseño de filtro analógico $H(s)$

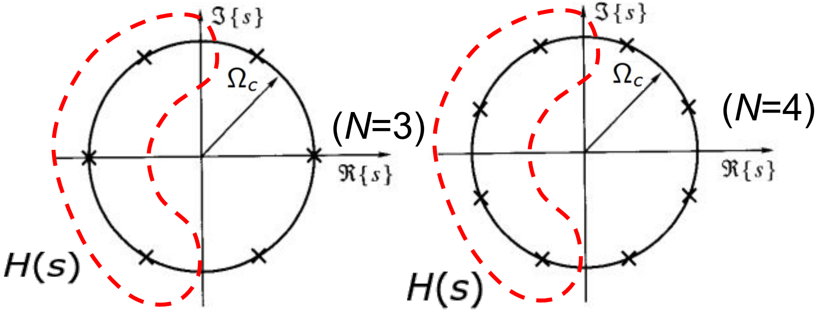
↓

Discretización del filtro diseñado $s \rightarrow z$

Butterworth pasa bajos



$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}}$$



filtro de 2N
solo polos

$$H(s)H(-s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{j\Omega_c}\right)^{2N}}$$

Polos

Radio cte.

$$s_k = \Omega_c \, e^{j\frac{(N+1+2k)\pi}{2N}}$$

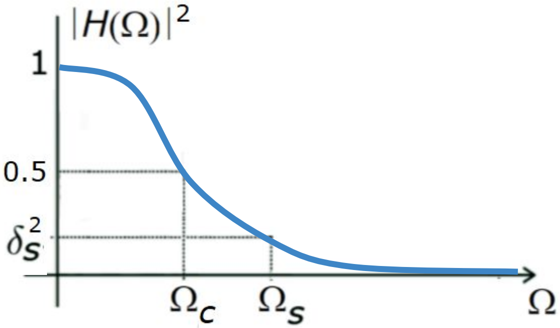
$$0 \leq k \leq 2N-1$$

Transferencia (H(0)=1)

$$H(s) = \prod_{k=0}^{N-1} \frac{-s_k}{(s - s_k)}$$

Butterworth pasa bajos

Respuesta en frecuencia (al cuadrado)



$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}}$$

Orden del filtro

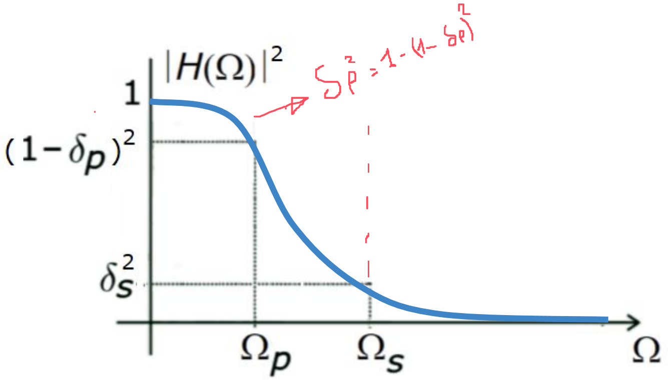
$\frac{1-\delta_s^2}{\delta_s^2}$

$$N = \frac{1}{2}\frac{\log(\frac{1}{\delta_s^2} - 1)}{\log \frac{\Omega_s}{\Omega_c}}$$

$\Delta w \uparrow \propto \frac{1}{N \downarrow}$

Butterworth pasa bajos

Respuesta en frecuencia (al cuadrado)



$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1+\left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}}$$

Orden del filtro

$$N \geq \underbrace{\frac{\log\left[\left(\frac{(1-\delta_p)^{-2}-1}{\delta_s^{-2}-1}\right)^{1/2}\right]}{\log\left[\Omega_p/\Omega_s\right]}}_{N}$$

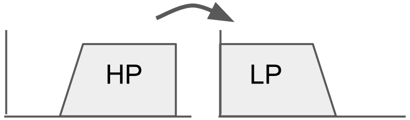
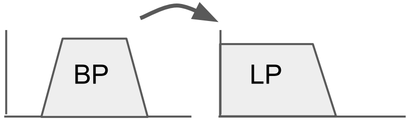
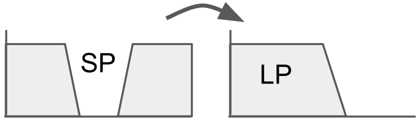
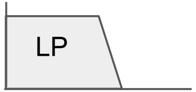
Frecuencia de corte aproximada

$$\frac{\Omega_p}{\left[(1-\delta_p)^{-2}-1\right]^{\frac{1}{2N}}} \leq \Omega_c \leq \frac{\Omega_s}{\left[\delta_s^{-2}-1\right]^{\frac{1}{2N}}}$$

$$\Omega_c \simeq \frac{1}{2}\left(\frac{\Omega_p}{\left[(1-\delta_p)^{-2}-1\right]^{\frac{1}{2N}}} + \frac{\Omega_s}{\left[\delta_s^{-2}-1\right]^{\frac{1}{2N}}}\right)$$

Métodos de diseños de filtros IIR

Diseño de filtro analógico

Etapa	Pasa altos (HP)	Pasa banda (BP)	Suprime banda (BS)
1) Transformación en frecuencia de especificaciones	$\tilde{\Omega} = \frac{1}{\Omega}$ 	$\tilde{\Omega} = \frac{\Omega_h \Omega_l - \Omega^2}{\Omega(\Omega_h - \Omega_l)}$ 	$\tilde{\Omega} = \frac{\Omega(\Omega_h - \Omega_l)}{\Omega_h \Omega_l - \Omega^2}$ 
2) Diseño de pasa bajos auxiliar	 Especificaciones	Butterworth Chebyshev-I Chebyshev-II Elíptico Otros	$H_{lp}(\tilde{s})$ Transferencia
3) Transformación en frecuencia de la transferencia	$\tilde{s} = \frac{1}{s}$ $H_{lp}(\tilde{s}) \rightarrow H_{hp}(s)$	$\tilde{s} = \frac{s^2 + \Omega_h \Omega_l}{s(\Omega_h - \Omega_l)}$ $H_{lp}(\tilde{s}) \rightarrow H_{bp}(s)$	$\tilde{s} = \frac{s(\Omega_h - \Omega_l)}{s^2 + \Omega_h \Omega_l}$ $H_{lp}(\tilde{s}) \rightarrow H_{bs}(s)$

Métodos de diseño de filtros IIR

Flujo de diseño

1. Especificaciones en tiempo discreto — $\delta_p \; \delta_s \; \omega_p \; \omega_s$
2. Transformación a tiempo continuo — $\omega \longrightarrow \Omega$
3. Diseño de filtro analógico — $H(s)$
4. Discretización del filtro diseñado — $s \longrightarrow z$

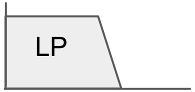
Transformación bilineal (*s*, *z*)

$$s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1} \quad , \quad z = \frac{1+\frac{T}{2}s}{1-\frac{T}{2}s}$$

Métodos de diseño de filtros IIR

Discretización del filtro diseñado

Butterworth pasa bajos



Transferencia H(s)

$$H(s) = \prod_{k=0}^{N-1} \frac{-s_k}{(s - s_k)}$$

$$s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}$$

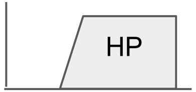
Bilineal

Transferencia H(z)

$$H(z) = \prod_{k=0}^{N-1} \frac{s_k}{(s_k - \frac{T}{2})} \frac{(1 + z^{-1})}{(1 - z_k z^{-1})}$$

$$z_k = \frac{1 + \frac{T}{2} s_k}{1 - \frac{T}{2} s_k}$$

Butterworth pasa altos



Transferencia H(s)

$$H(s) = \prod_{k=0}^{N-1} \frac{s}{(s - \tilde{s}_k)}$$

$$s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}$$

Bilineal

Transferencia H(z)

$$H(z) = \prod_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(1 - \frac{T}{2}\tilde{s}_k)} \frac{(1 - z^{-1})}{(1 - z_k z^{-1})}$$

$$z_k = \frac{1 + \frac{T}{2} \tilde{s}_k}{1 - \frac{T}{2} \tilde{s}_k}$$

Actividad 1

Actividad 1
Tipos de Filtros IIR

Se requiere diseñar un *filtro discreto IIR, pasa bajos,* tipo **Butterworth**, con δ_p=0.2, δ_s=0.1, ω_p= 0.32π , ω_s= 0.6π.

1) Encuentre las especificaciones para el dominio continuo (Ω).
2) Encuentre el orden *N* y la frecuencia de corte Ω_c que cumple con las especificaciones.
3) Encuentre los polos del filtro *H*(*s*) y grafique el diagrama de polos y ceros en el plano ***s***.
4) Encuentre la transferencia *H*(z) en el dominio discreto con sus polos, ceros y el factor de escalamiento. Grafique los polos y ceros en el plano ***z***.
5) Determine los coeficientes *a* y *b* de *H*(z) y grafique la respuesta en frecuencia de tiempo discreto $|H(\omega)|$. Verifique el cumplimiento de las especificaciones. Ayuda: `coef = poly(raices)`

Actividad 1
Tipos de Filtros IIR

Ω_p= 0.5498 rad/s

Ω_s= 1.3764 rad/s

N = 2.817 $\rightarrow$ 3

Ω_c = 0.6225 rad/s (media)

A = 0.074 escalamiento

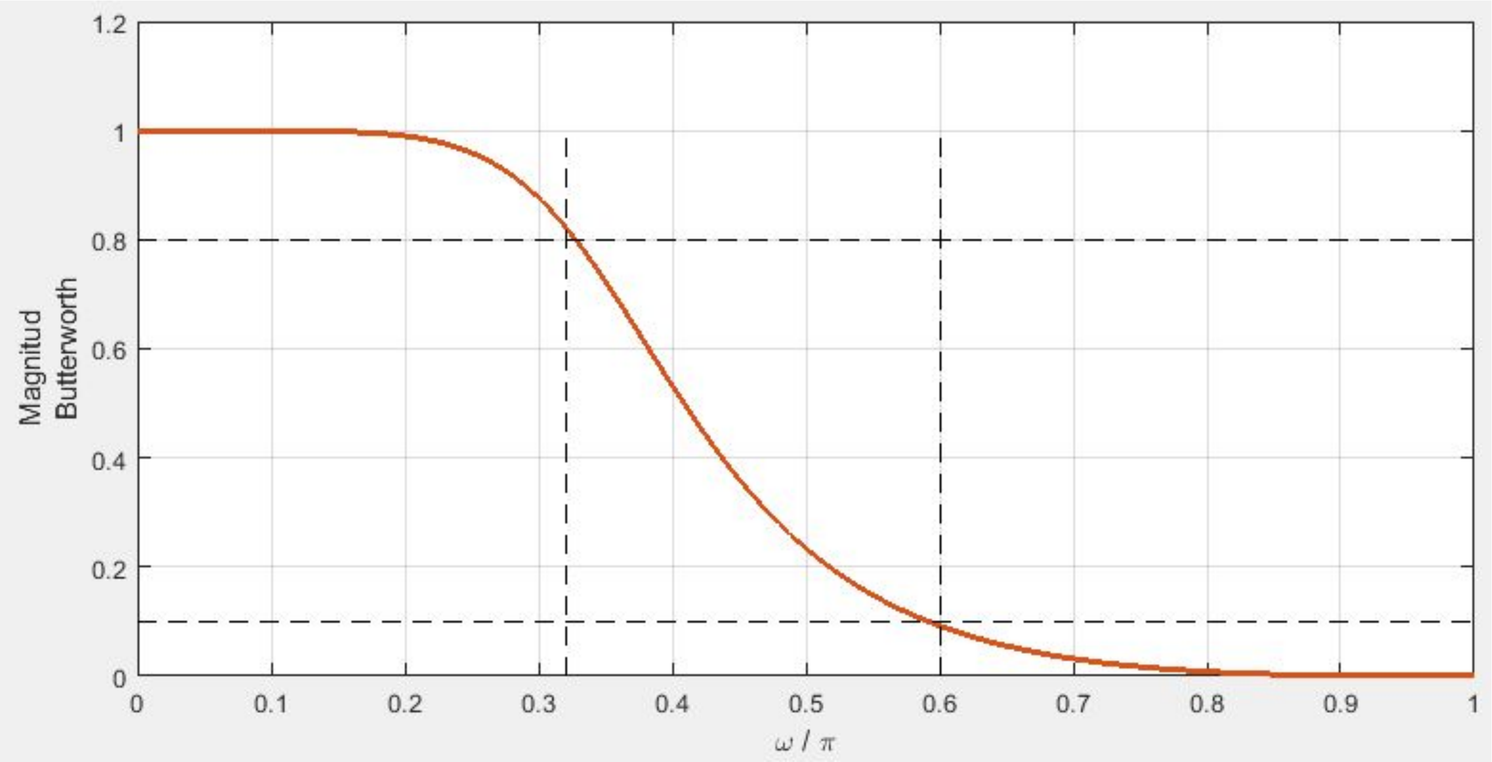
a = {1 -0.8420 0.5223 -0.0885} denominador

b = { 0.0739 0.2219 0.2219 0.0739} numerador

Actividad 1

Tipos de Filtros IIR

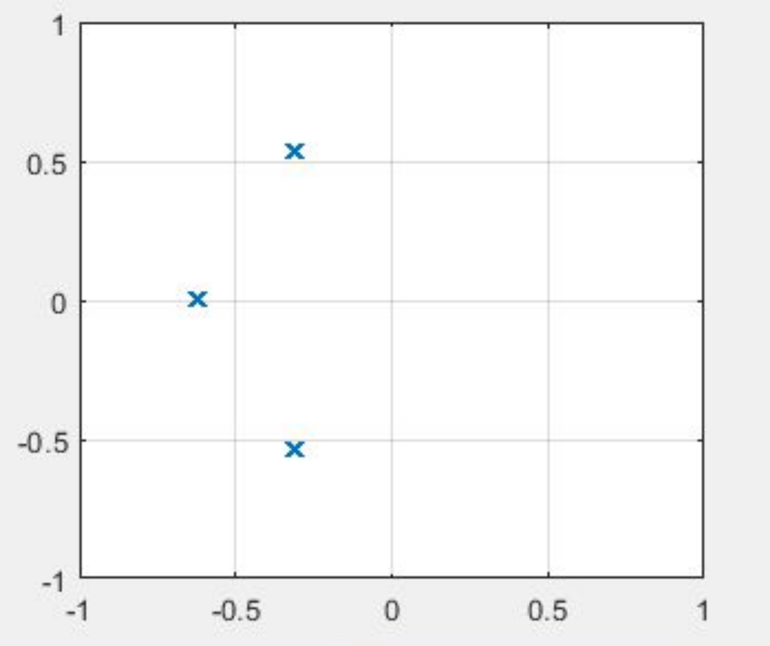
$|H(\omega)|$



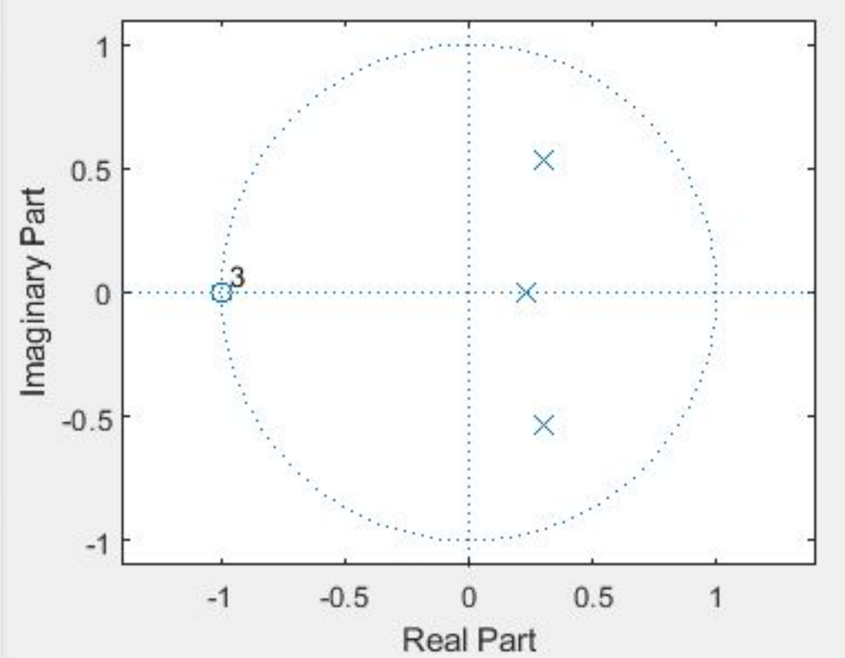
Actividad 1

Tipos de Filtros IIR

H(s)



H(z)



Actividad 2

Actividad 2

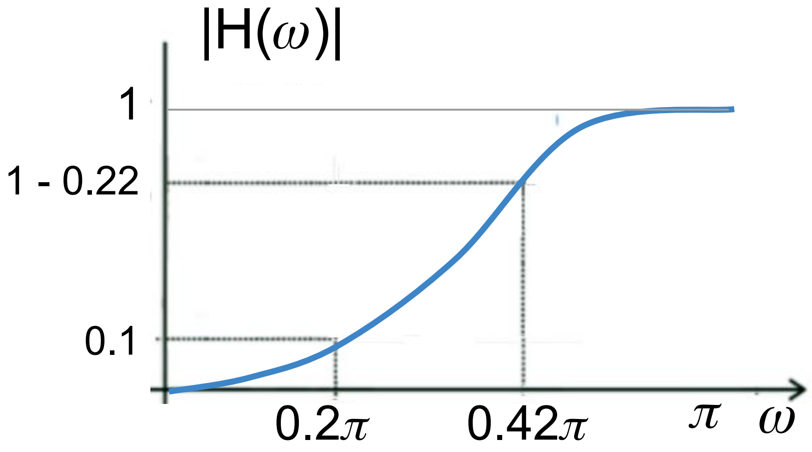
Tipos de Filtros IIR

Se requiere diseñar un *filtro discreto, pasa altos, IIR* tipo **Butterworth**, con las especificaciones que se indican en la figura.

1) Determine las especificaciones para el dominio continuo y haga el diseño de pasa altos a partir de un pasa bajos prototipo aplicando la transformación en frecuencia. Grafique el diagrama de polos y ceros tanto del pasa alto como del pasa bajos prototipo.

2) Haga la discretización del filtro y grafique el diagrama de polos y ceros en el plano z. Determine también la ganancia que resulte de la discretización.

3) Grafique la respuesta en frecuencia del pasa altos discreto $|H(\omega)|$ y verifique las especificaciones iniciales.



Actividad 2
Tipos de Filtros IIR

$\Omega_p = 0.7756$ rad/s

$\Omega_s = 0.3249$ rad/s

$\Omega_p' = 1.2892$ rad/s

$\Omega_s' = 3.0777$ rad/s

$N = 2.8936 \rightarrow 3$

$\Omega_c' = 1.4091$ rad/s (media)

LP prototipo

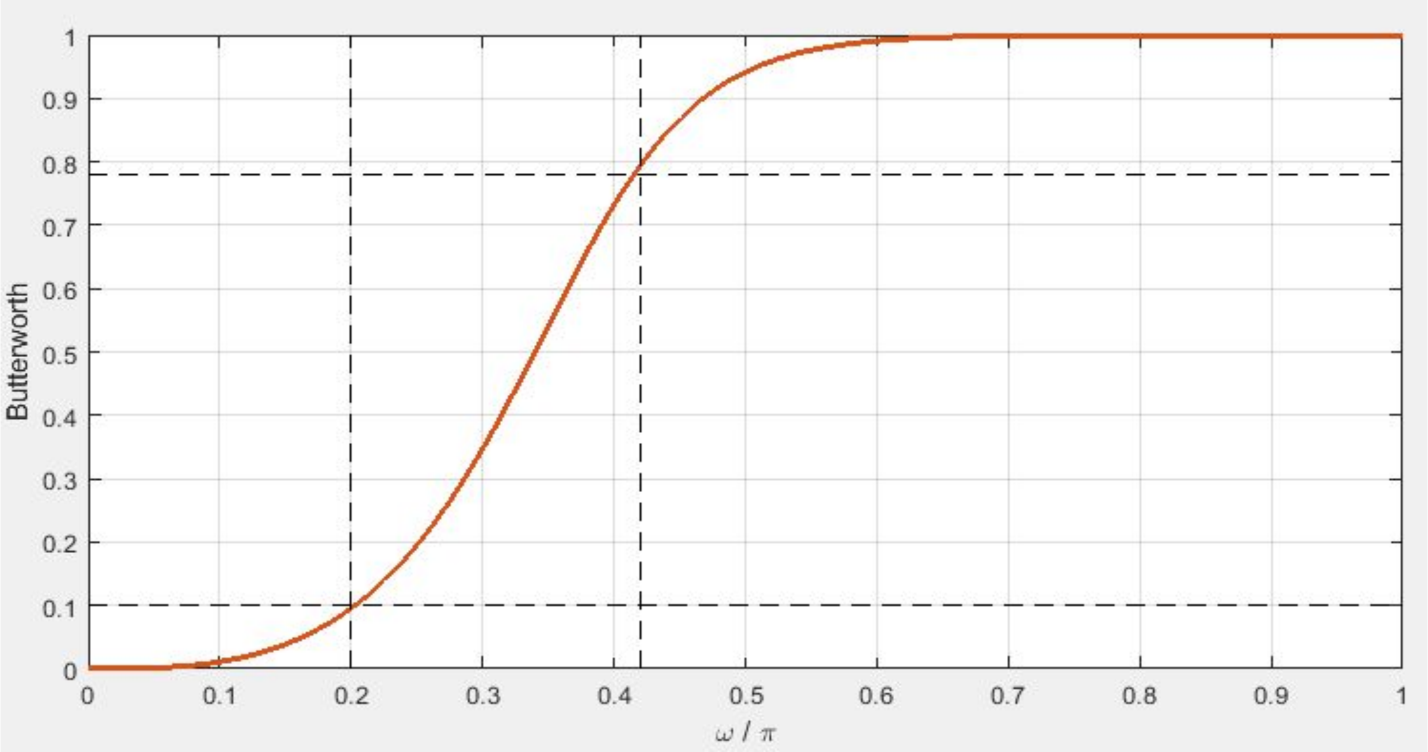
A = 0,2642 escalamiento

a = {1 -0.6184 0.4349 -0.0609}

b = {0.2642 -0.7928 0.7928 -0.2642}

Actividad 2
Tipos de Filtros IIR

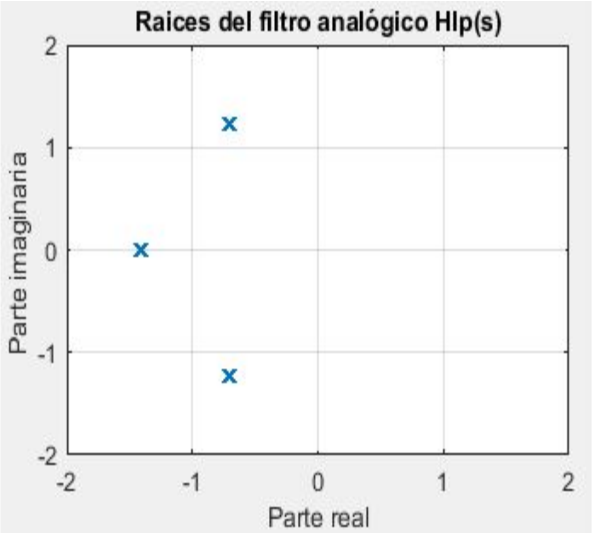
$|H(\omega)|$



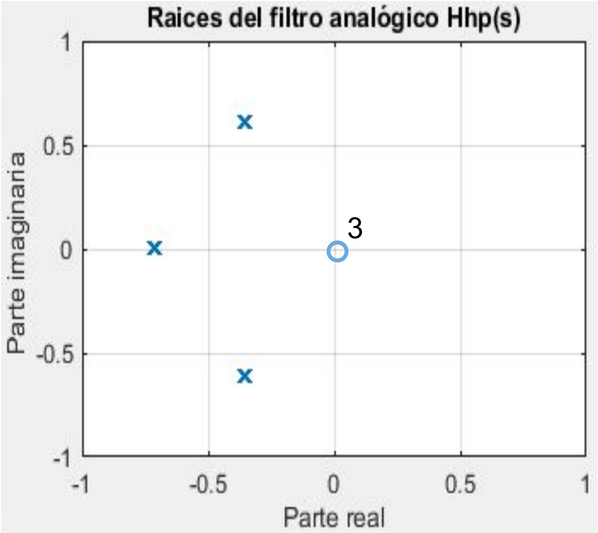
Actividad 2

Tipos de Filtros IIR

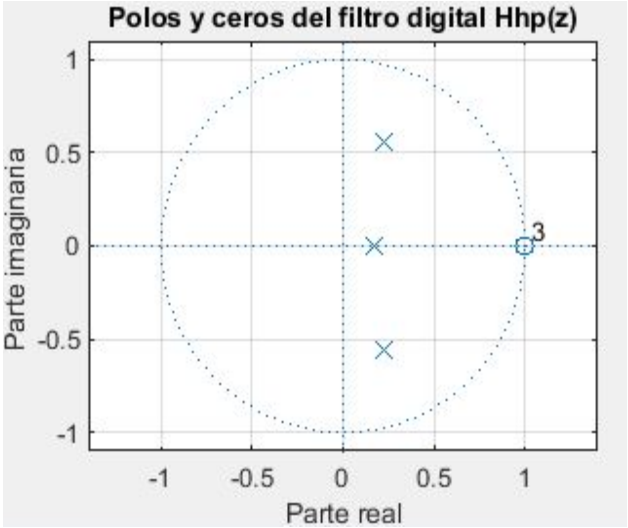
$|H_{LP}(s)|$



$|H_{HP}(s)|$



$|H_{HP}(z)|$



Funciones de MATLAB/OCTAVE

Métodos de diseño de filtros IIR
Funciones de MATLAB/OCTAVE

Transferencia $$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \ldots}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \ldots}$$

$$\mathbf{b} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ \ldots \ ]$$
$$\mathbf{a} = [1 \ a_1 \ a_2 \ \ldots \ ]$$

Respuesta en frecuencia

```
[H,w] = freqz(b,a,nfft);  % w frecuencia angular [rad] (0-2pi)
                          % H respuesta en frecuencia
                          % nfft cantidad de puntos de w
```

Polos y ceros en el plano z

```
zplane(b,a)
```

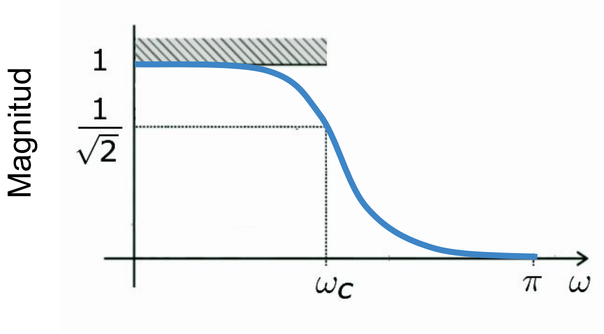
Retardo de grupo

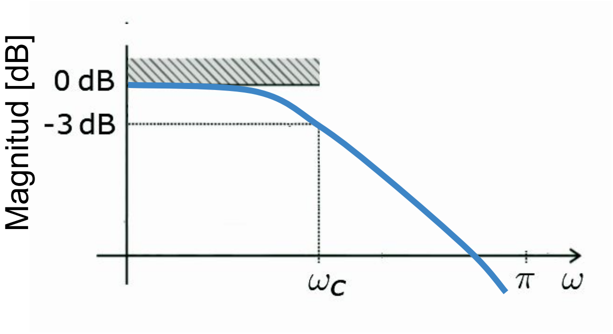
```
gd = grpdelay(b,a,w);
```

Métodos de diseño de filtros IIR
Prototipo de filtros pasa bajos

Especificaciones

Butterworth



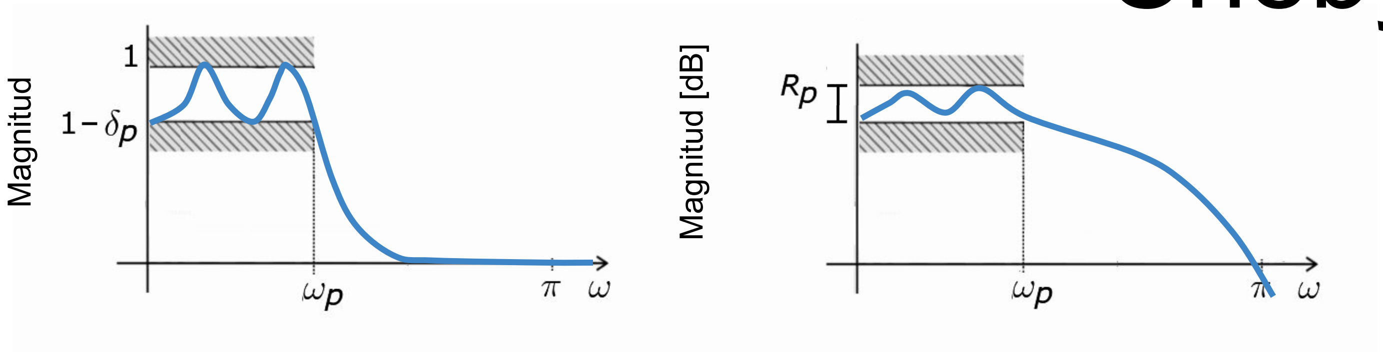



```
[b,a] = butter(N,Wc);          % Wc frecuencia normalizada en pi [0,1]
                               % N orden del filtro
```

Métodos de diseño de filtros IIR
Prototipo de filtros pasa bajos

Especificaciones

Chebyshev-I

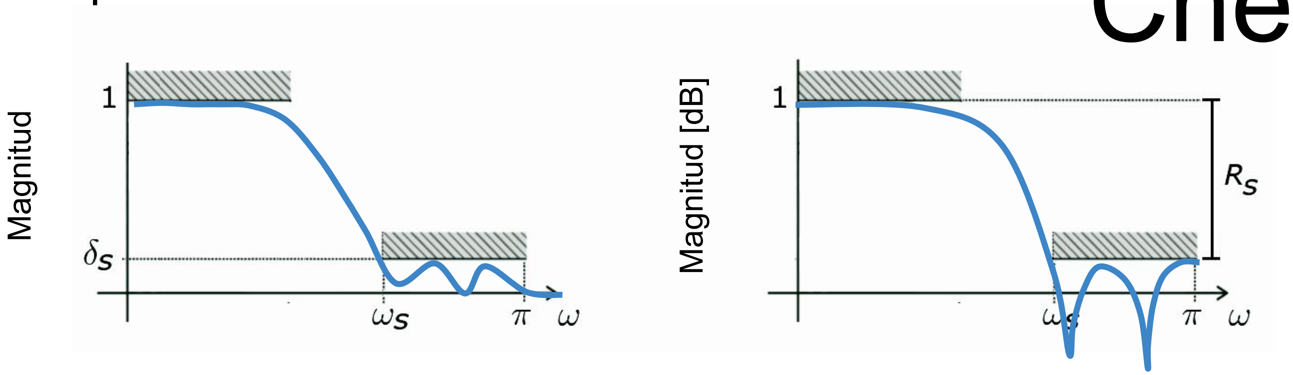



```
[b,a] = cheby1(N,Rp,Wp);  % Wp frecuencia (paso) normalizada en pi [0,1]
                          % N orden del filtro
                          % Rp = -20*log10(1-delta_p); ripple de paso
```

Métodos de diseño de filtros IIR
Prototipo de filtros pasa bajos

Especificaciones

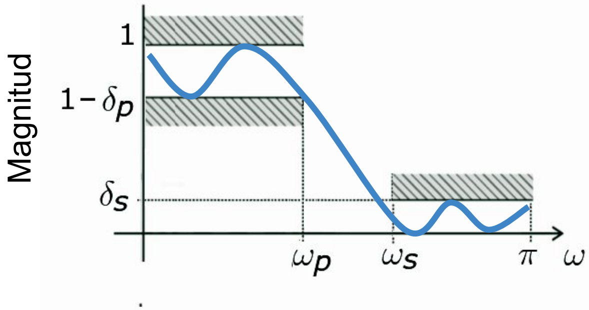
Chebyshev-II

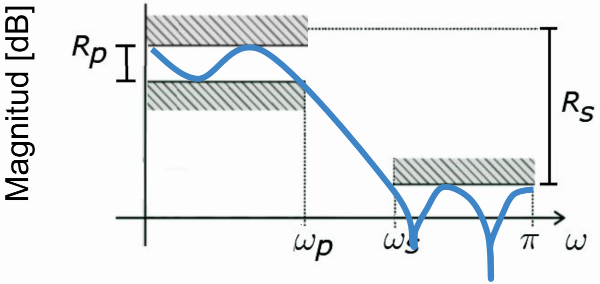



```
[b,a] = cheby2(N,Rs,Ws); % Ws frecuencia (sup) normalizada en pi [0,1]
                         % N orden del filtro
                         % Rs = -20*log10(delta_s); ripple de sup
```

Métodos de diseño de filtros IIR
Prototipo de filtros pasa bajos

Especificaciones





Elíptico

```
[b,a] = ellip(N,Rp,Rs,Wp);  % Wp frecuencia (paso) normalizada en pi [0,1]
                            % N orden del filtro
                            % Rp = -20*log10(1-delta_p); ripple de paso
                            % Rs = -20*log10(delta_s); ripple de sup
```

Algunos ejemplos IIR con MATLAB

Algunos ejemplos IIR con MATLAB

Tipos de Filtros IIR

Utilizar las funciones de Matlab para obtener los coeficientes de un *filtro discreto IIR* tipo **Butterworth** con $\omega_c = 0.35\pi$ y $N=4$, graficar:

1) La respuesta en frecuencia $|H(\omega)|$

cia

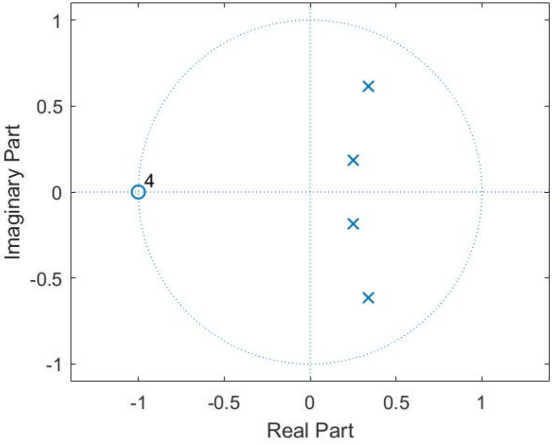
2) Los polos y ceros en el plano 'z'
3) La respuesta en fase $\Phi(\omega)$
4) Retardo de grupo

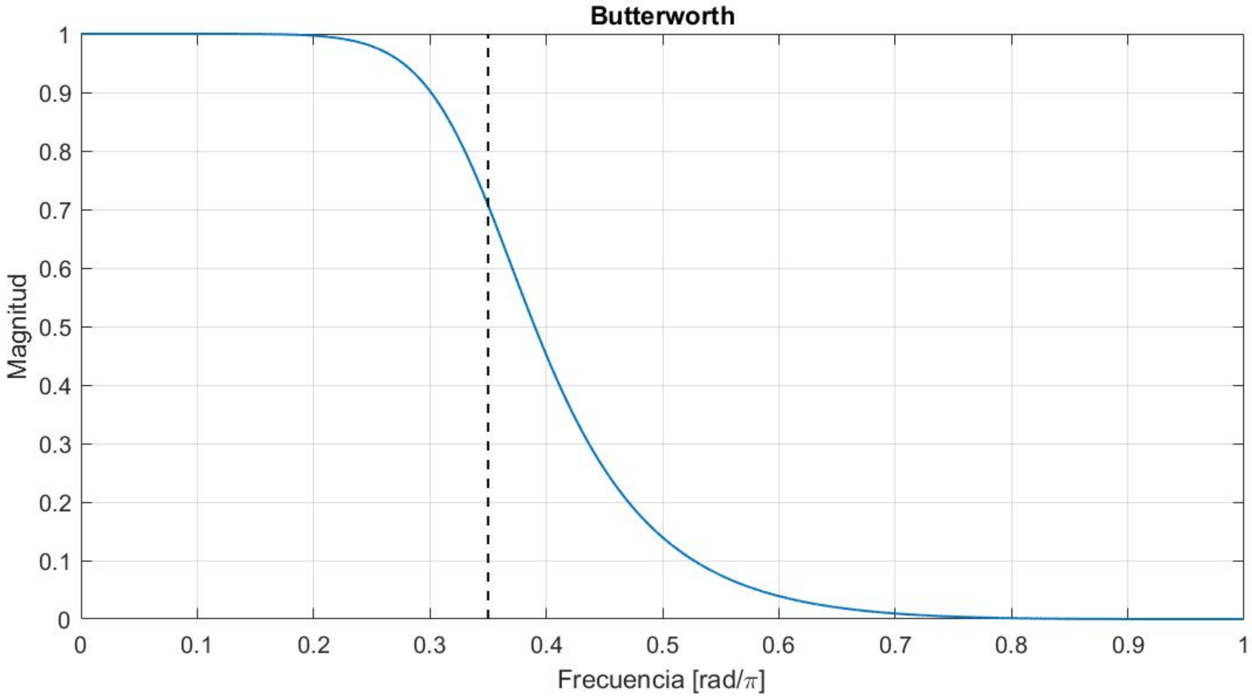
Algunos ejemplos IIR con MATLAB
Tipos de Filtros IIR

Butterworth

N=4

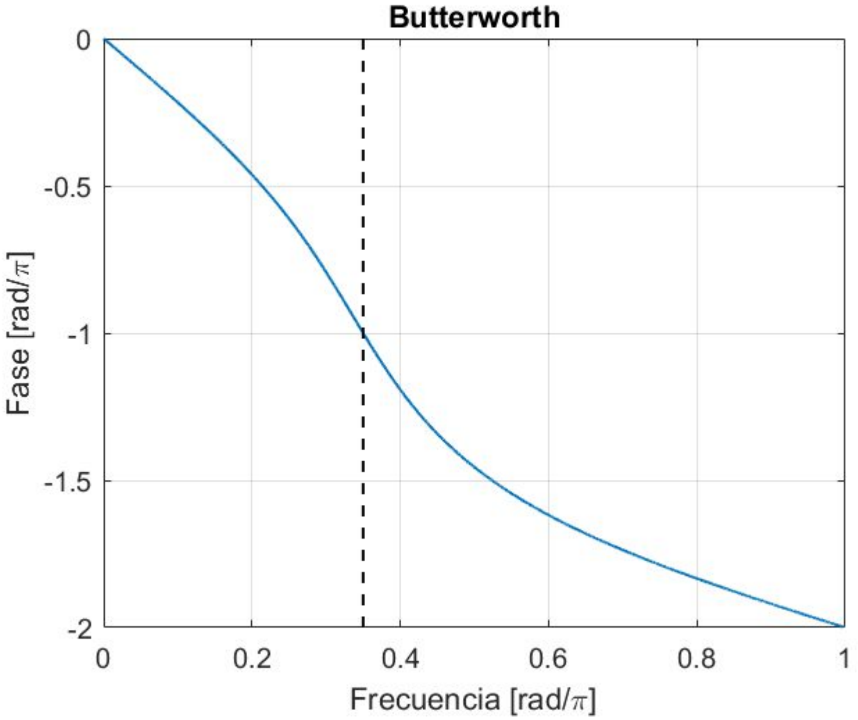
ω_c= 0.35π

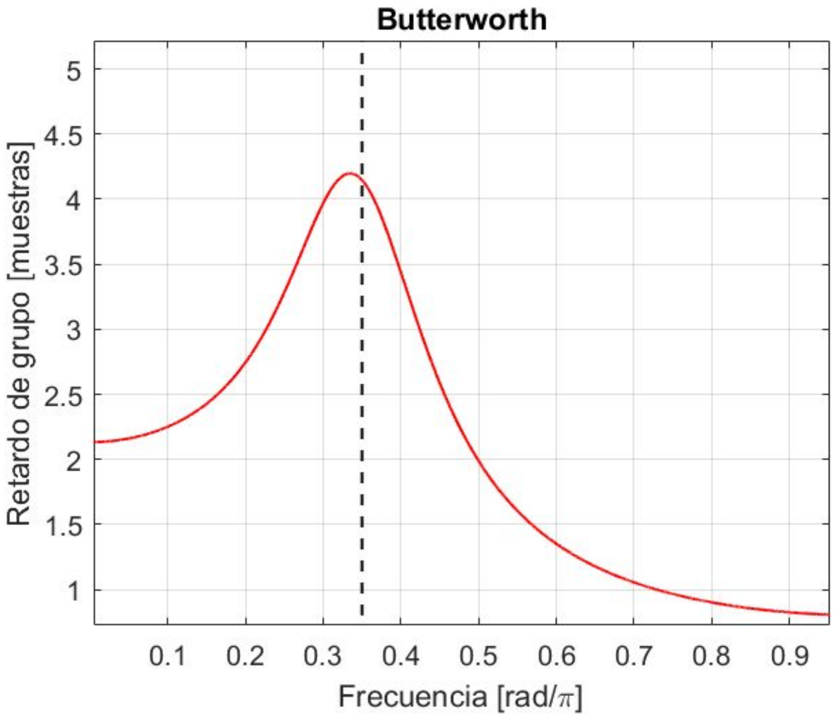




Algunos ejemplos IIR con MATLAB
Tipos de Filtros IIR

Butterworth





Algunos ejemplos IIR con MATLAB

Tipos de Filtros IIR

Utilizar las funciones de Matlab para obtener los coeficientes de un filtro IIR tipo **Chebyshev-I**, con δ_p=0.1, ω_p= 0.4π y N=4, graficar:

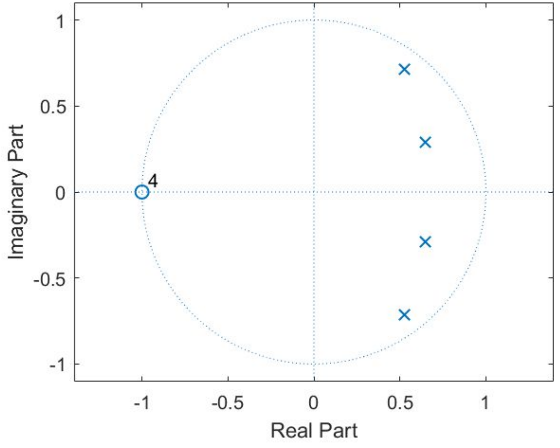
1) La respuesta en frecuencia $|H(\omega)|$
2) La respuesta en fase $\Phi(\omega)$
3) Los polos y ceros en el plano 'z'
4) Retardo de grupo

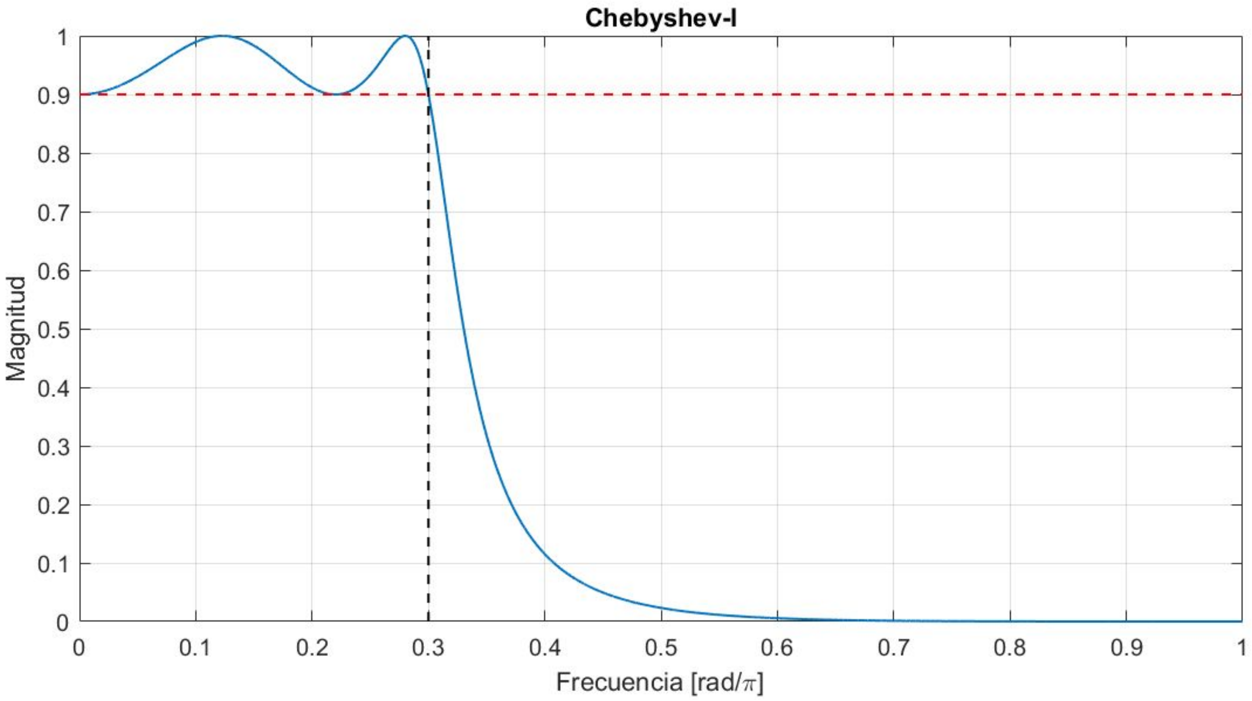
Chebyshev-I

N=4

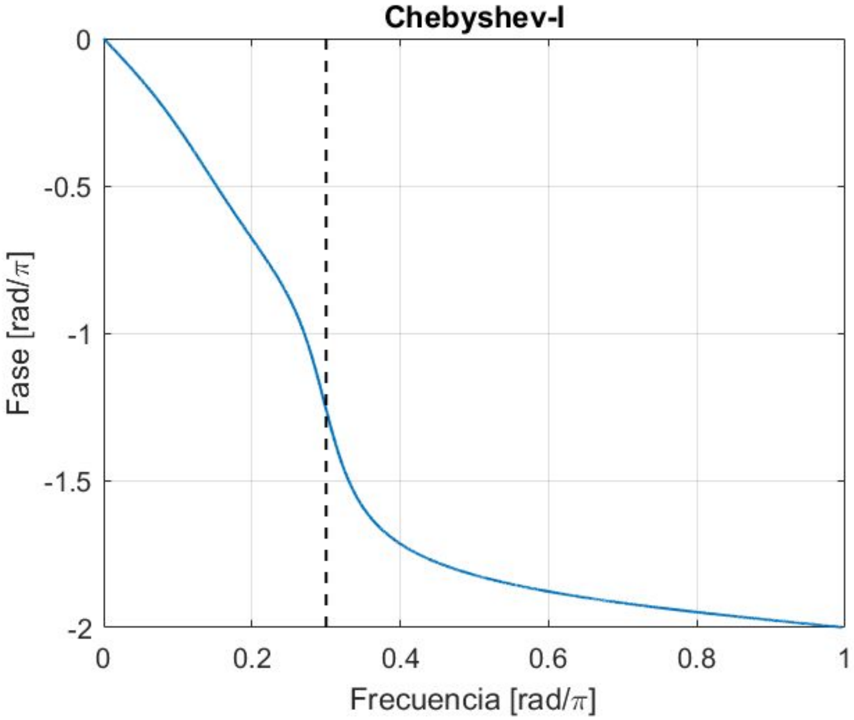
δ_p=0.1

ω_p= 0.4π

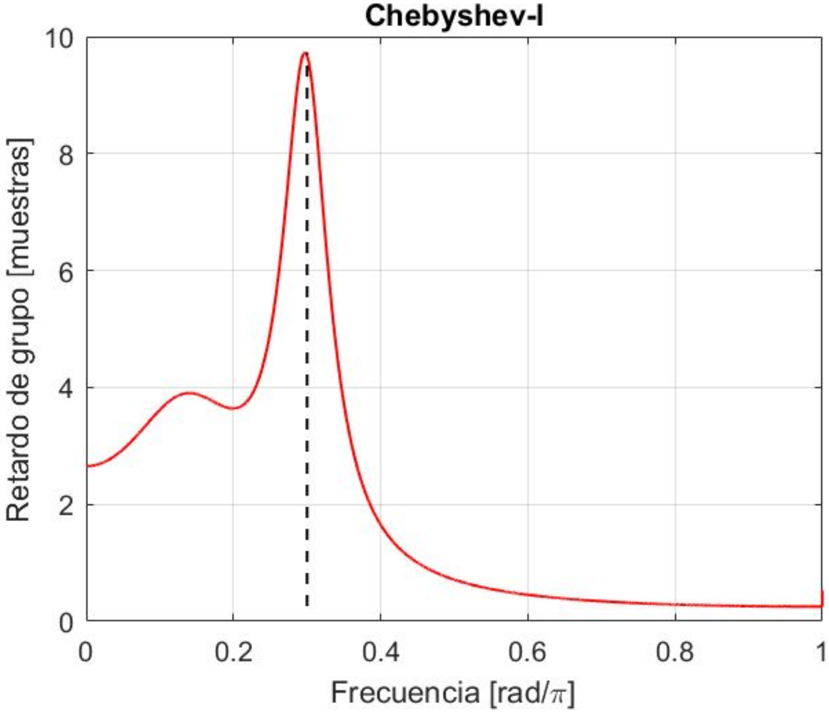




Chebyshev-I



Chebyshev-I
Fase [rad/π]
0
-0.5
-1
-1.5
-2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
Frecuencia [rad/π]



Chebyshev-I
Retardo de grupo [muestras]
10
8
6
4
2
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
Frecuencia [rad/π]

Algunos ejemplos IIR con MATLAB

Tipos de Filtros IIR

Utilizar las funciones de Matlab para obtener los coeficientes de un filtro IIR tipo **Chebyshev-II**, con δ_s=0.2, ω_s= 0.65π y N=4, graficar:

1) La respuesta en frecuencia $|H(\omega)|$
2) La respuesta en fase $\Phi(\omega)$
3) Los polos y ceros en el plano ‘z’
4) Retardo de grupo

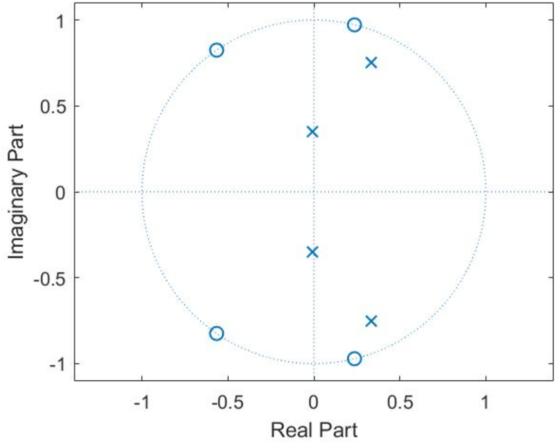
Algunos ejemplos IIR con MATLAB
Tipos de Filtros IIR

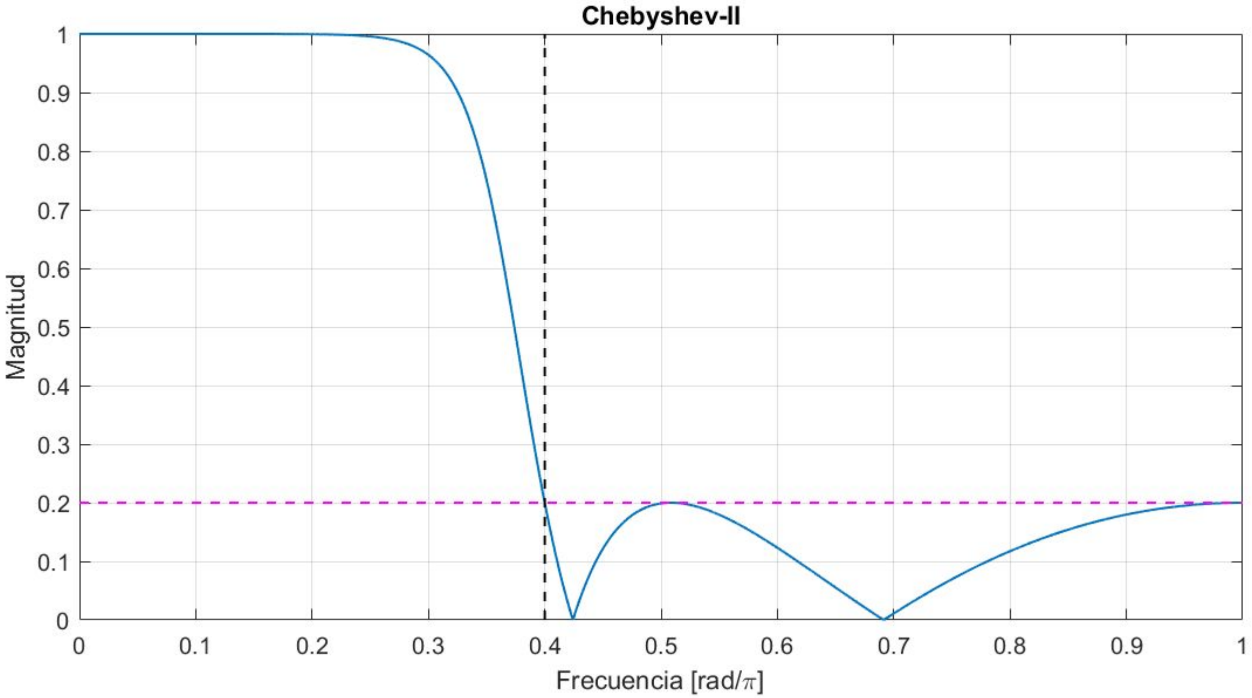
Chebyshev-II

N=4

δ_s=0.2

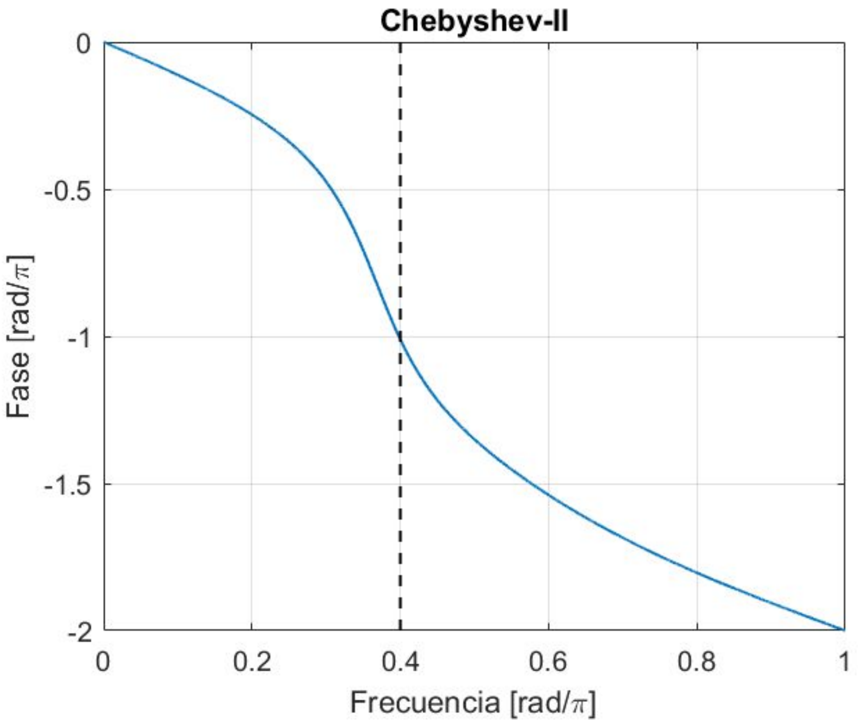
ω_s= 0.65π

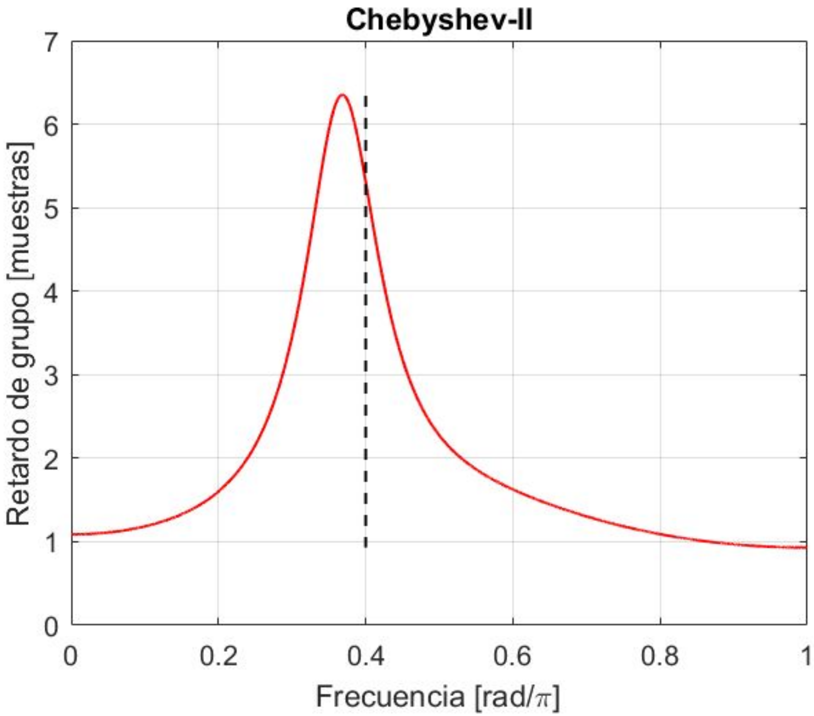




Algunos ejemplos IIR con MATLAB
Tipos de Filtros IIR

Chebyshev-II





Algunos ejemplos IIR con MATLAB

Tipos de Filtros IIR

Utilizar las funciones de Matlab para obtener los coeficientes de un filtro IIR tipo **Elíptico**, con δ_p=0.1, δ_s=0.2, ω_p= 0.4π y N=4, graficar:

1) La respuesta en frecuencia $|H(\omega)|$
2) La respuesta en fase $\Phi(\omega)$
3) Los polos y ceros en el plano ‘z’
4) Retardo de grupo

Algunos ejemplos IIR con MATLAB

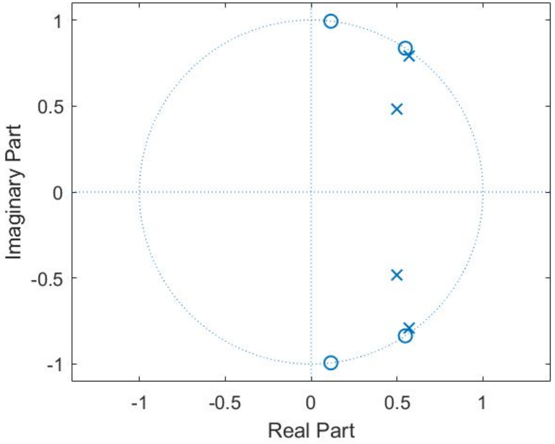
Tipos de Filtros IIR

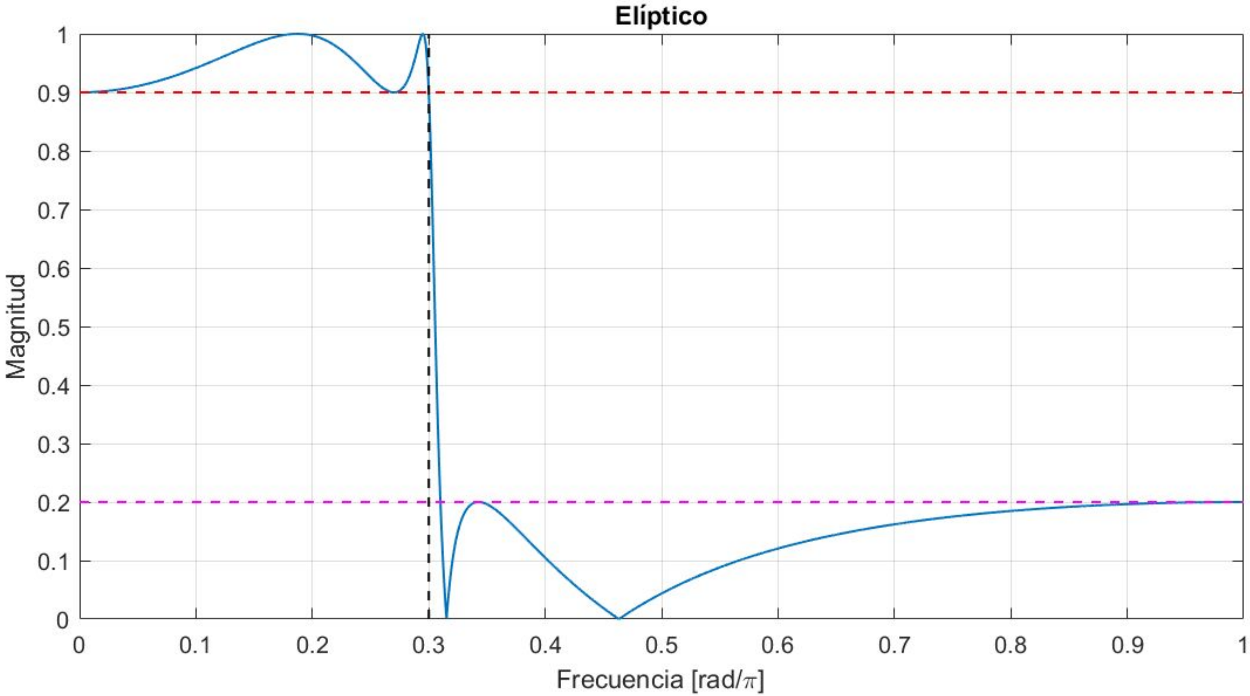
Elíptico

N=4

δ_p=0.1, δ_s=0.2

ω_p= 0.4π





Algunos ejemplos IIR con MATLAB
Tipos de Filtros IIR

Elíptico