



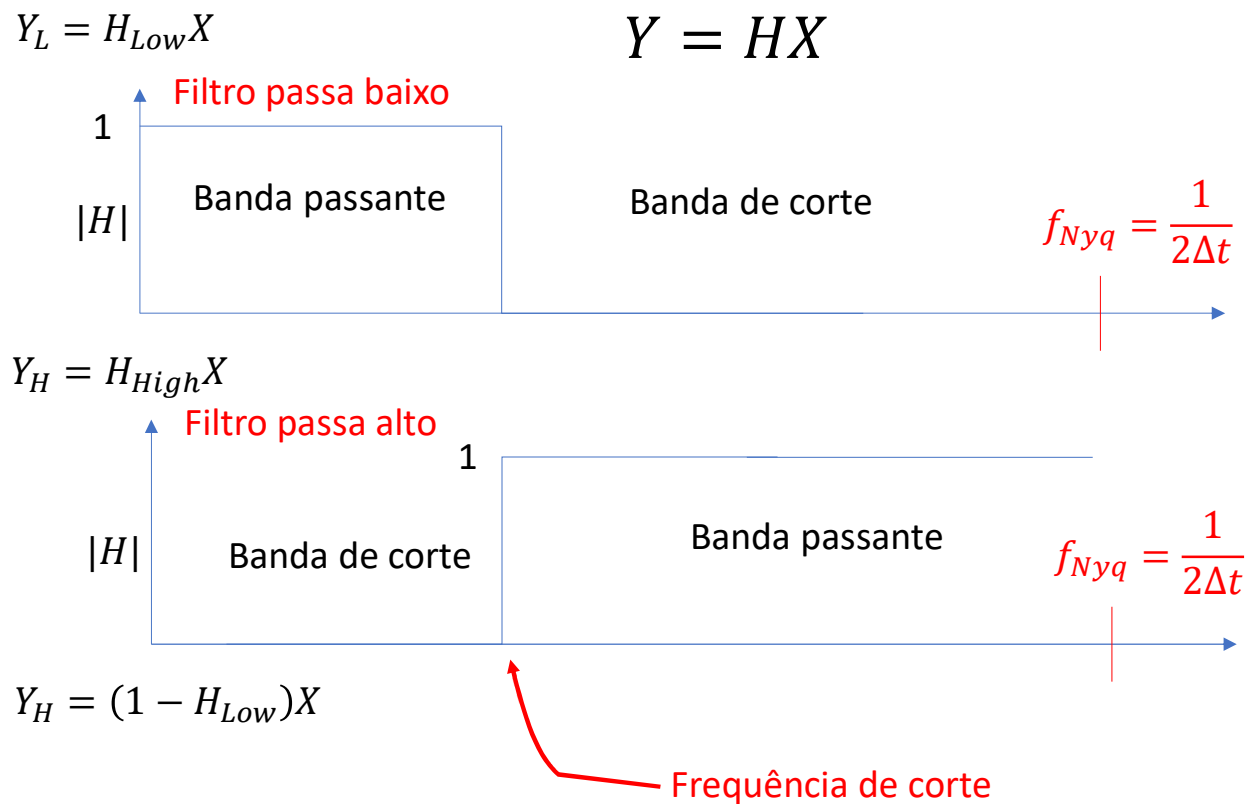
Ciências
ULisboa

Modelação Numérica

Aula 5

Filtros de media móvel

Filtro perfeito (resposta em amplitude)



Média móvel

$$y_k = \sum_{n=0}^N x_n h_{k-n} \implies y = x * h$$

$$Y = \mathcal{F}(y) = \mathcal{F}(x * h) = \mathcal{F}(x)\mathcal{F}(h) = XH$$

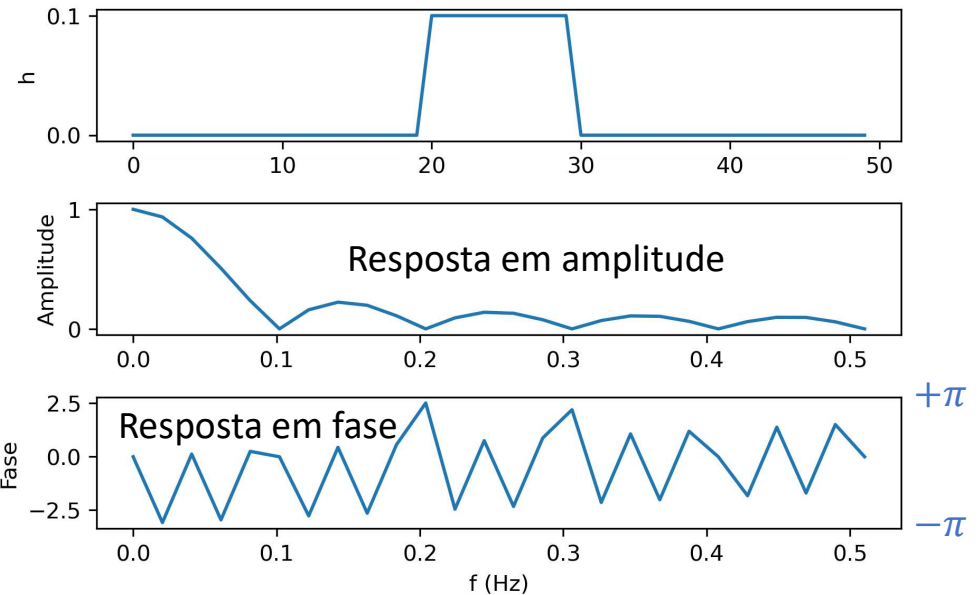
$H = \mathcal{F}(h)$ é a **função de transferência** do filtro

Atenção: $H \in \mathbb{C}$ (complexo)

```

import numpy as np;import matplotlib.pyplot as plt
from time import process_time
from scipy import fft
N=50;dt=1
t=np.linspace(0,dt*(N-1),N)
nh=10;k0=20 #só altera a fase
h=np.zeros((N))
h[k0:k0+nh]=1/nh
H=fft.fft(h)
fNyq=1/(2*dt); df=2*fNyq/(N-1)
freq=np.arange(0,fNyq+df,df)
fig,ax=plt.subplots(nrows=3)
ax[0].plot(t,h);ax[0].set_ylabel('h')
H=fft.fft(h)
ax[1].plot(freq,np.abs(H[0:N//2+1])) #não se escala por N//2!
ax[1].set_ylabel('Amplitude')
Fase=np.arctan2(np.imag(H),np.real(H))
ax[2].plot(freq,Fase[0:N//2+1])
ax[2].set_ylabel('Fase');plt.xlabel('f (Hz)')
fig.tight_layout()

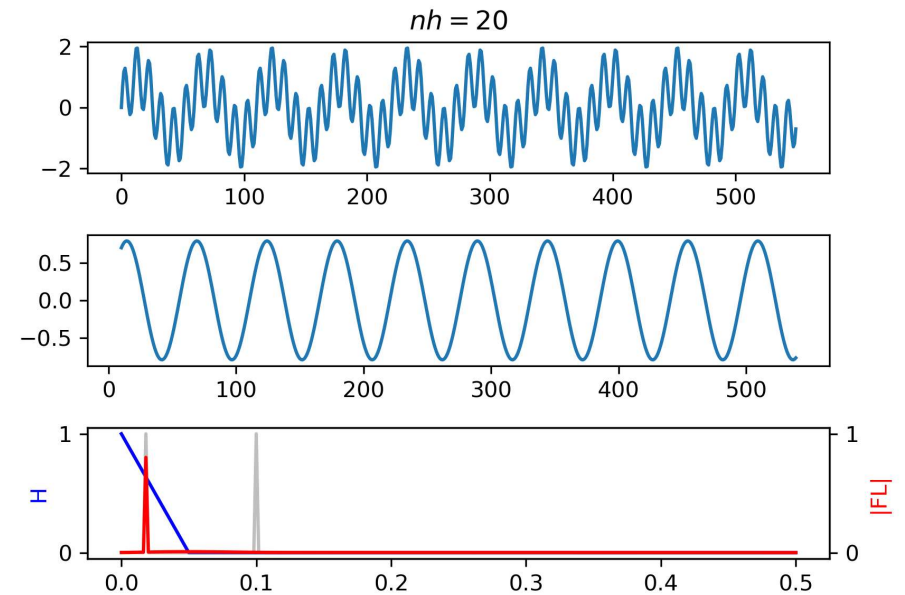
```



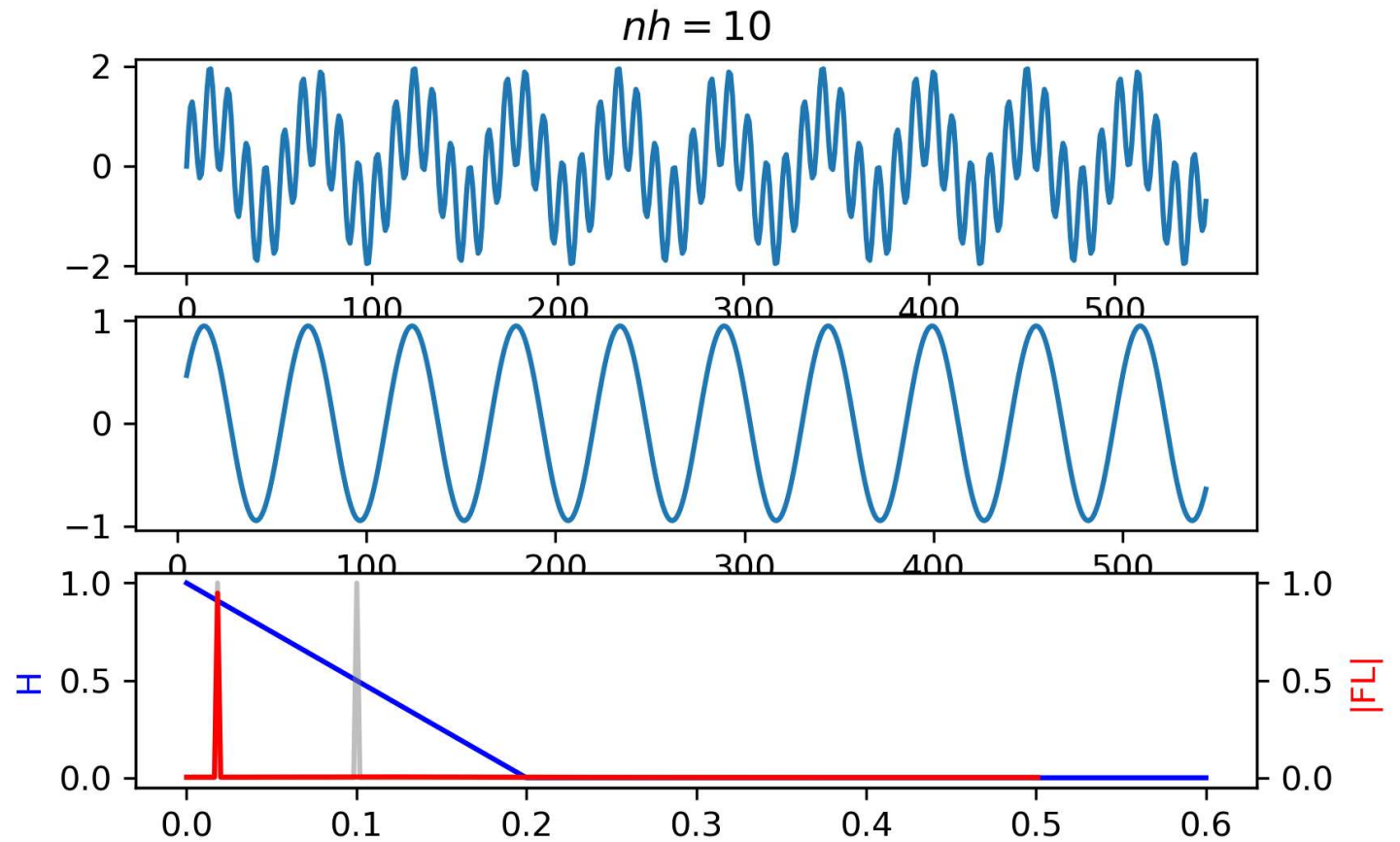
```

N = 550;dt = 1;T1 = 10;T2 = 55 # cf N=T1*T2
t = np.arange(0, dt*N, dt)
f = np.sin(2*np.pi*t/T1)+np.sin(2*np.pi*t/T2)
nh = 20
h = np.ones(nh)/nh
fig, ax = plt.subplots(nrows=3)
fL = np.convolve(f, h, mode='same')
fH=f-fL
ax[0].plot(t, f)
ax[1].plot(t[nh//2:-nh//2], fL[nh//2:-nh//2])
H = fft.fft(h)
fNyq = 1/(2*dt)
df = 2*fNyq/(2*(nh//2))
freqH = np.arange(0, fNyq+df, df)
ax[2].plot(freqH, np.abs(H[0:len(freqH)]), color='blue')
axt = ax[2].twinx()
F = fft.fft(f)
FL = fft.fft(fL)
fNyq = 1/(2*dt)
df = 2*fNyq/(2*(N//2))
freq = np.arange(0, fNyq+df, df)
axt.plot(freq, np.abs(F[0:N//2+1]/(N//2)), color='gray', alpha=0.5)
axt.plot(freq, np.abs(FL[0:N//2+1]/(N//2)), color='red')
axt.set_ylabel('|FL|', color='red')
ax[2].set_ylabel('H', color='blue')
ax[0].set_title(r'$nh=%3i$' % nh)
fig.tight_layout()

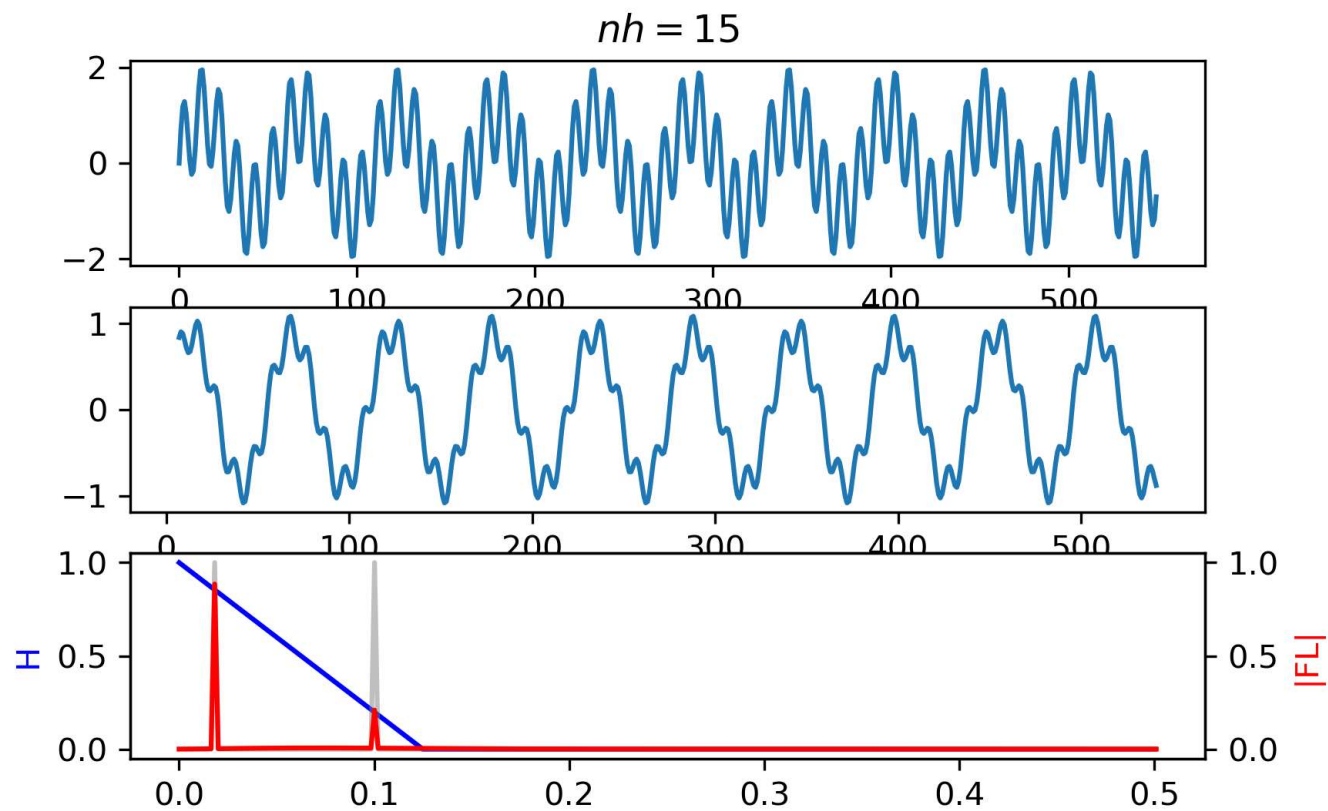
```



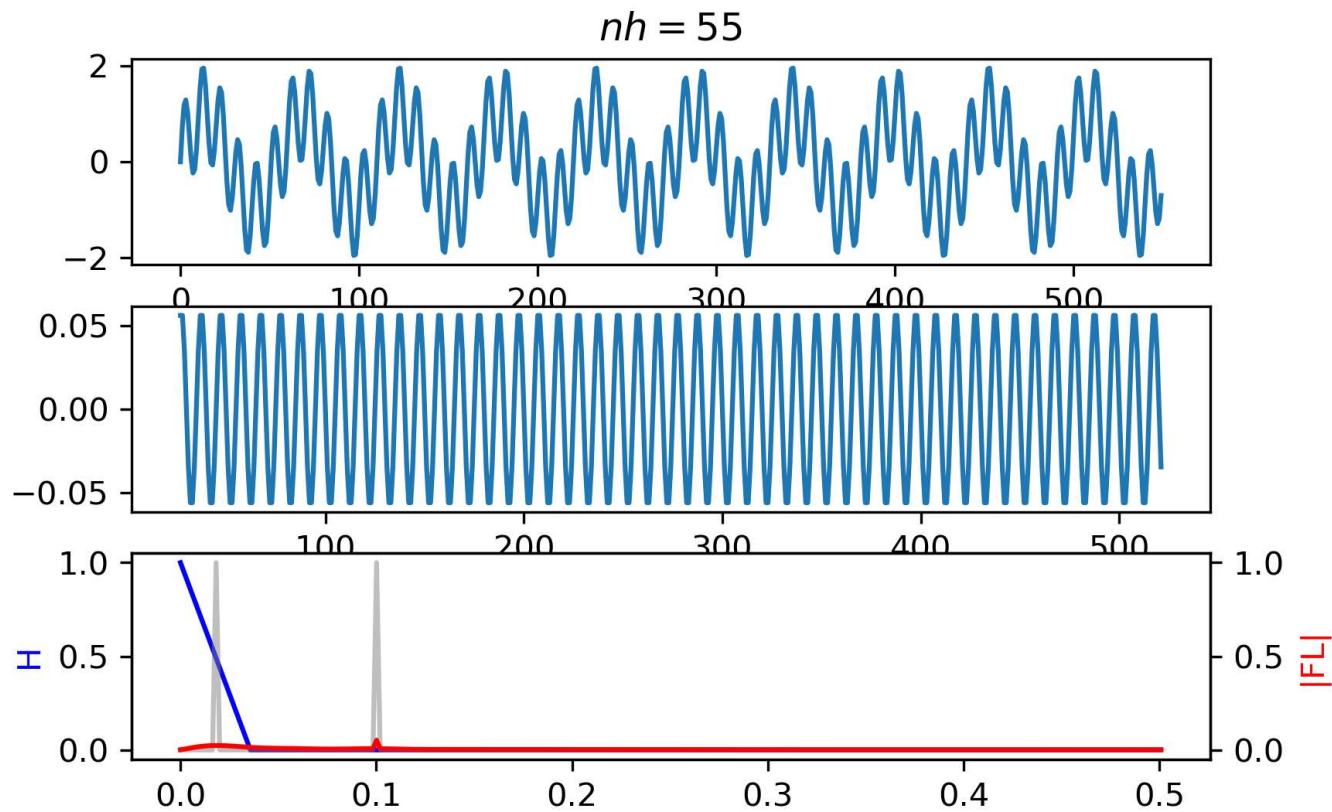
Outros **nh** (T1=10 ; T2=55)



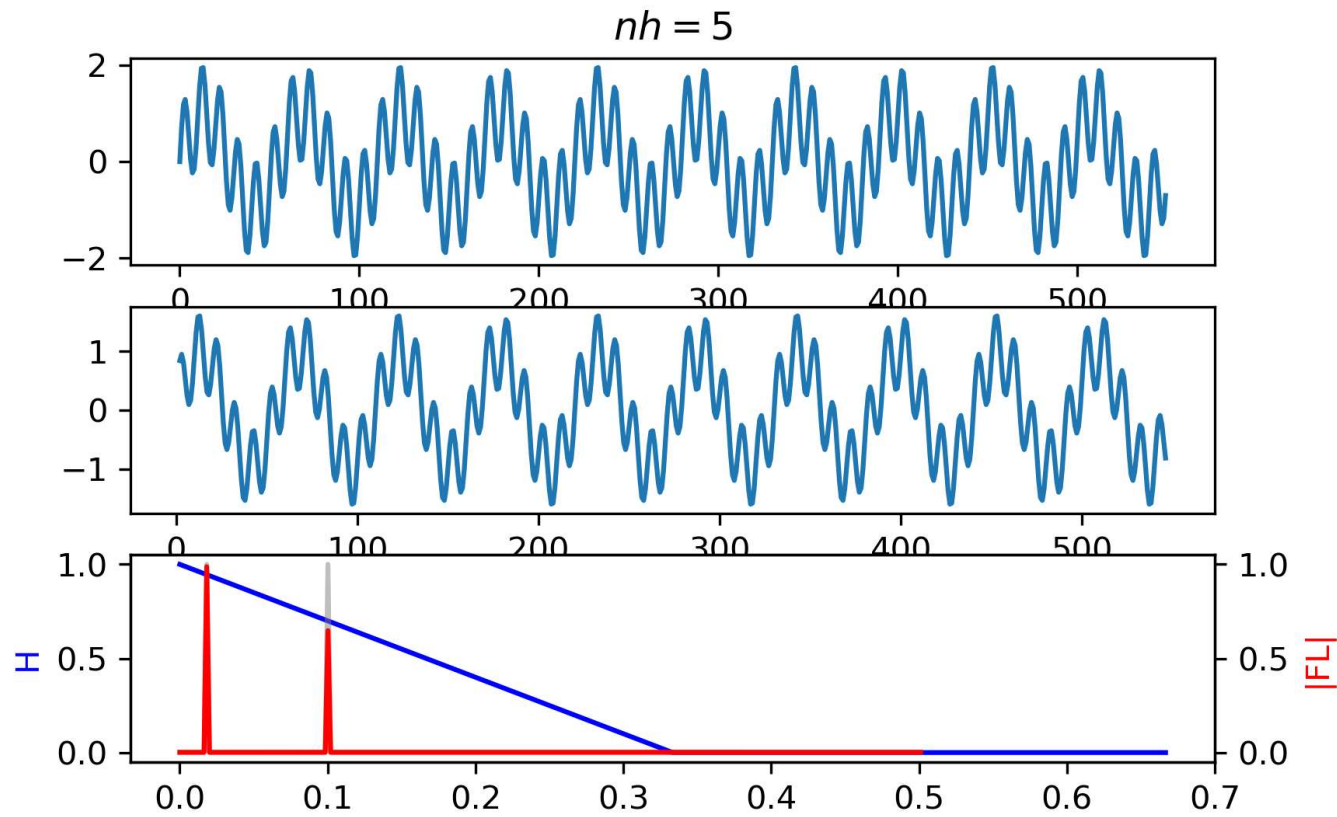
Outros **nh** (**T1=10 ; T2=55**)



Outros **nh** (T1=10 ; T2=55)



Outros **nh** (**T1=10 ; T2=55**)



Notem que

```
ax[1].plot(t[nh//2:-nh//2], fL[nh//2:-nh//2])
```

Estamos a esconder a zona de fronteira

Mas quando fizemos

```
FL = fft.fft(fL)
```

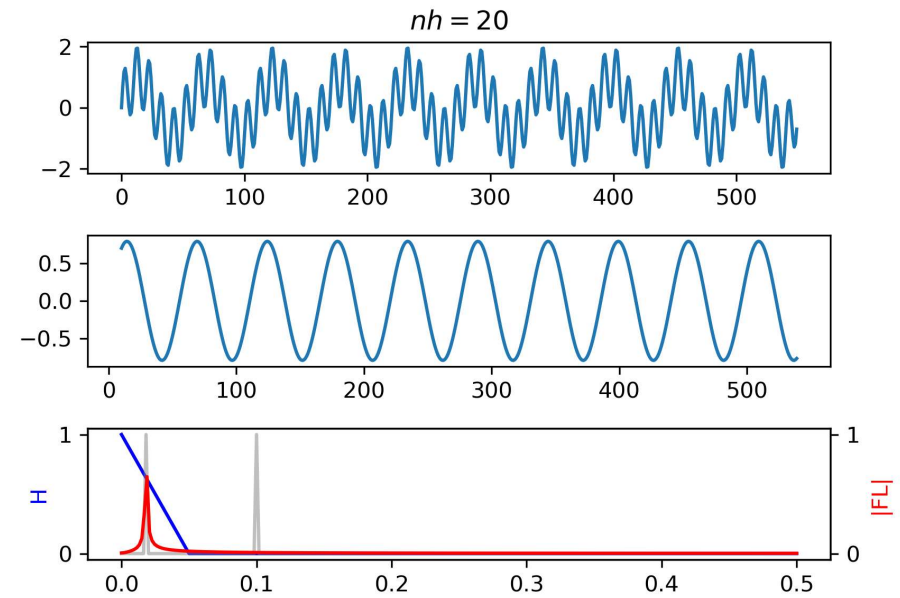
Usámos todos os pontos...

“Limpendo” a fronteira

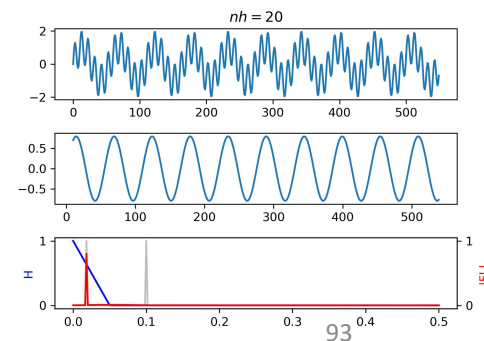
```

N = 550; dt = 1; fNyq = 1/(2*dt)
T1 = 10; T2 = 55 # cf N=T1*T2
t = np.arange(0, dt*N, dt)
f = np.sin(2*np.pi*t/T1)+np.sin(2*np.pi*t/T2)
nh = 20
h = np.ones((nh))/nh
fig, ax = plt.subplots(nrows=3)
fL = np.convolve(f, h, mode='same')
fH=f-fL
ax[0].plot(t, f)
ax[1].plot(t[nh//2:-nh//2], fL[nh//2:-nh//2])
H = fft.fft(h)
df = 2*fNyq/(2*(nh//2)); freqH=np.arange(0, fNyq+df, df)
ax[2].plot(freqH, np.abs(H[0:len(freqH)]), color='blue')
axt = ax[2].twinx()
F = fft.fft(f); FL = fft.fft(fL[nh//2:-nh//2])
NFL=len(FL)
dfL = 2*fNyq/(2*(NFL//2)); freqL = np.arange(0, fNyq+dfL, dfL)
df = 2*fNyq/(2*(N//2)); freq = np.arange(0, fNyq+df, df)
axt.plot(freq, np.abs(F[0:N//2+1]/(N//2)), color='gray', alpha=0.5)
axt.plot(freqL, np.abs(FL[0:NFL//2+1]/(NFL/2)), color='red')
axt.set_ylabel('|FL|', color='red')
ax[2].set_ylabel('H', color='blue')
ax[0].set_title(r'$nh=%3i$' % nh); fig.tight_layout()

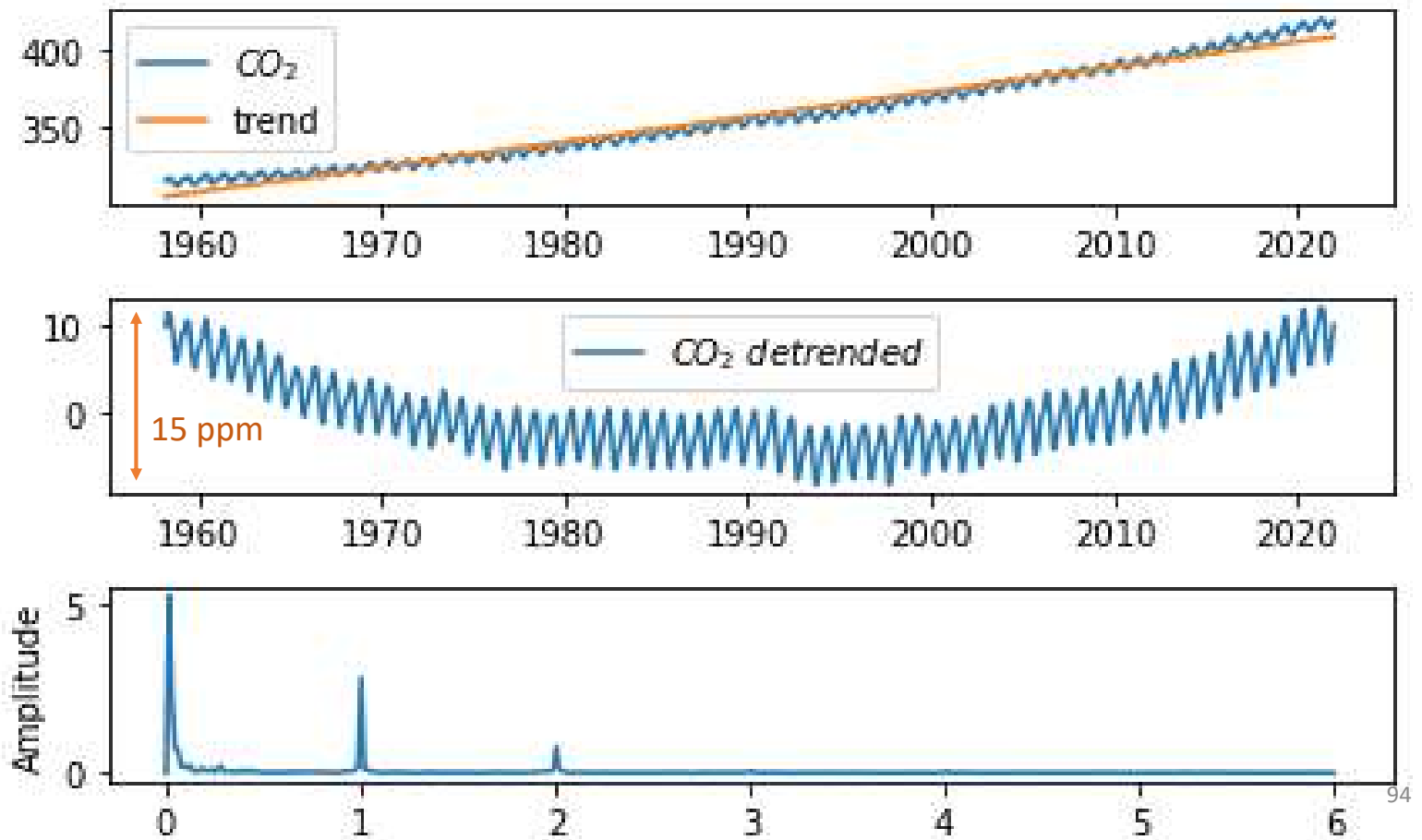
```



Análise exata (a menos do erro de arredondamento)

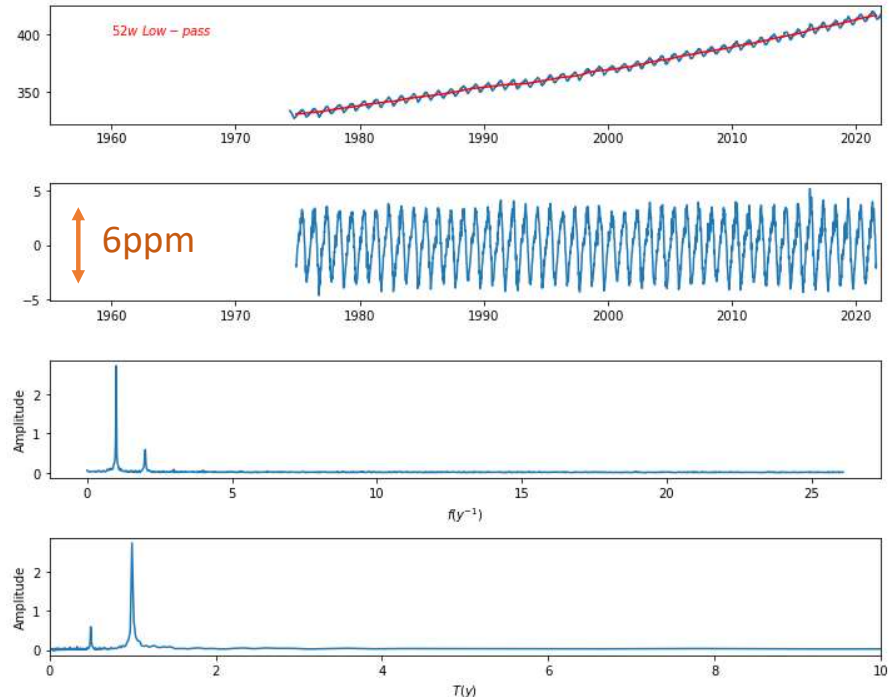


De volta a Mauna Loa



Média móvel (e passa alto)

```
t=np.copy(year); dt=7/365.25
nh=52
h=np.ones((nh))/nh
co2LP=np.convolve(co2I,h,mode='same')
fig,ax=plt.subplots(nrows=4)
ax[0].plot(t,co2I)
ax[0].plot(t[nh//2:-nh//2],\
           co2LP[nh//2:-nh//2])
co2DT=co2I-co2LP
ax[1].plot(t[nh//2:-nh//2],\
           co2DT[nh//2:-nh//2])
f=co2DT[nh//2:-nh//2];N=len(f)
F=fft.fft(f)
fNyq=1/(2*dt); df=2*fNyq/(N-1)
freq=np.arange(0,fNyq+df,df)
ax[2].plot(freq,np.abs(F[0:N//2+1])/(N//2))
ax[2].set_ylabel('Amplitude')
ax[2].set_xlabel(r'$f$ (y-1)$')
ax[3].plot(1/freq,np.abs(F[0:N//2+1])/(N//2))
ax[3].set_ylabel('Amplitude')
ax[3].set_xlabel(r'$T$ (y)$')
ax[3].set_xlim(0,10)
fig.tight_layout()
```

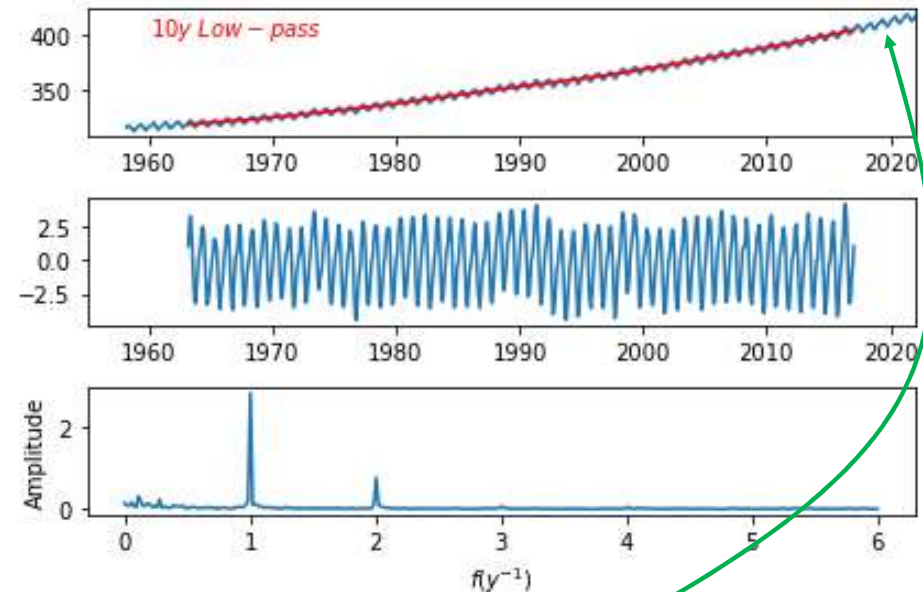


19

Eliminando baixas frequências

Voltaremos a este assunto (filtros)

```
ny=10; nh=12*ny
h=np.ones((nh))/nh
co2LP=np.convolve(co2,h,mode='same')
fig,ax=plt.subplots(nrows=3)
ax[0].plot(t,co2)
ax[0].plot(t[nh//2:-nh//2],co2LP[nh//2:-nh//2],color='red')
co2DT=co2-co2LP
ax[1].plot(t[nh//2:-nh//2],co2DT[nh//2:-nh//2])
f=co2DT[nh//2:-nh//2];N=len(f) #efeito de fronteira
ax[0].text(1960,400,r'$%2i y\ Low-pass$' % ny,color='red')
ax[0].set_xlim(1955,2022);ax[1].set_xlim(1955,2022)
F=fft.fft(f)
fNyq=1/(2*dt); df=2*fNyq/(N-1)
freq=np.arange(0,fNyq+df,df)
ax[2].plot(freq,np.abs(F[0:N//2+1])/(N//2))
ax[2].set_ylabel('Amplitude');ax[2].set_xlabel(r'$f (y^{-1})$')
fig.tight_layout()
```



Transformada discreta de Fourier

Transformada discreta de Fourier

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-2\pi i n k / N}$$

*transformada discreta **inversa** de Fourier*

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{2\pi i n k / N}$$

$\{f_n\}$ e $\{F_k\}$ têm o mesmo número de termos (N), e a mesma **informação!** (*a menos do erro de arredondamento*)

A transformada discreta (com N termos)...

Quando a função é **discretizada** (amostrada a intervalo regular) existe um **período mínimo** (ou **frequência máxima**) que pode ser representado. Se ela tem um número finito de termos, também existe um **período máximo** (**frequência mínima**, para além de 0). Logo temos uma série **discreta** e **finita** (e com erro de arredondamento).

Na prática a análise numérica de dados reais refere-se sempre a esse tipo de série. Nesse caso tanto a representação da função (transformada inversa) como o cálculo dos coeficientes (transformada) envolve **somatórios** (não integrais) com um número finito de termos.

Propriedades da Transformada Discreta de Fourier

Linearidade

A transformada de uma combinação linear de funções é a mesma combinação linear de transformadas

$$\begin{aligned}G &= \mathcal{F}(g), H = \mathcal{F}(h) \Rightarrow \mathcal{F}(ag + bh) = aG + bH \\g &= g(t), h = h(t); G = G(f), H = H(f) \\t &\equiv \text{tempo}, f \equiv \text{frequência}\end{aligned}$$

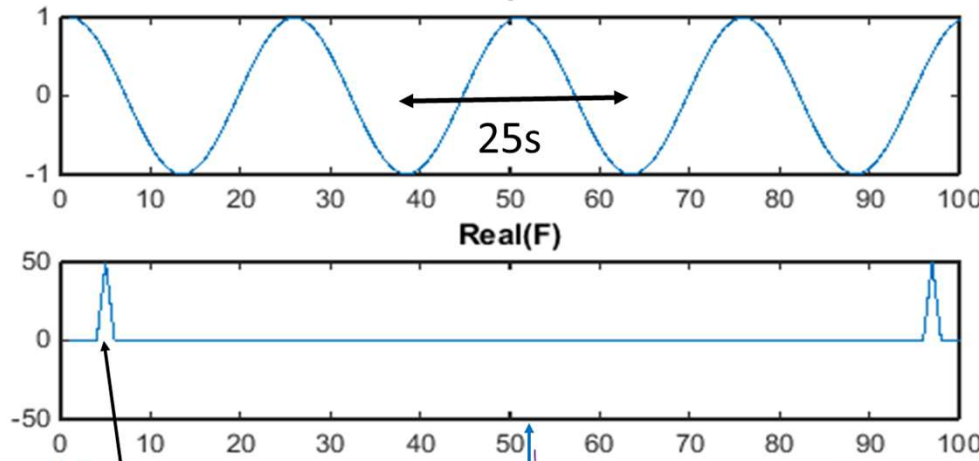
Translação

$$S(f) = \mathcal{F}(s(t)) \Rightarrow \mathcal{F}(s(t - a)) = e^{-if a} S(f)$$

Escalamento

$$S = \mathcal{F}(s(t)) \Rightarrow \mathcal{F}(s(at)) = \frac{1}{a} S\left(\frac{f}{a}\right)$$

Interpretando o **espectro**: frequências



$$= \sum_{k=-N/2}^{N/2} c_k e^{i2\pi kt/T}$$

$$f(n) = \cos \frac{2\pi nt}{25}$$

$$n = 0 \dots N - 1$$

$$N = 100$$

$n > 0$ (red arrow pointing to the right peak in the spectrum)
 $n < 0$ (purple arrow pointing to the left peak in the spectrum)
 $n = 51 = (N/2 + 1)$ (blue arrow pointing to the central peak in the spectrum)

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, \quad c_n = \frac{a_n - ib_n}{2}, \quad c_{-n} = \frac{a_n + ib_n}{2}$$

Média (frequência=0)

$$f = \frac{5 - 1}{50} f_{Nyq} = \frac{1}{25} s^{-1} f = \frac{1}{2\Delta t} = f_{Nyquist}$$

6

Transformada discreta de Fourier

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{2\pi i n k / N}$$

$\{f_n\}$ e $\{F_k\}$ têm o mesmo número de termos (N)

F_0 é proporcional à média da série

F_k, F_{-k} representam a harmónica k (frequência $\frac{f_{Nyq}k}{\frac{N}{2}}$)

indicando que existe um número **ímpar** de termos em F_k . Mas só são calculados N termos e N pode ser par. Se for esse o caso **não é calculado** o termo correspondente a $-f_{Nyq}$.

Em geral,

Tanto série $\{f_n\}$ com a sua transformada de Fourier $\{F_k\}$ são **séries complexas**.

Mesmo que $\{f_n\}$ seja real, $\{F_k\}$ é complexa.

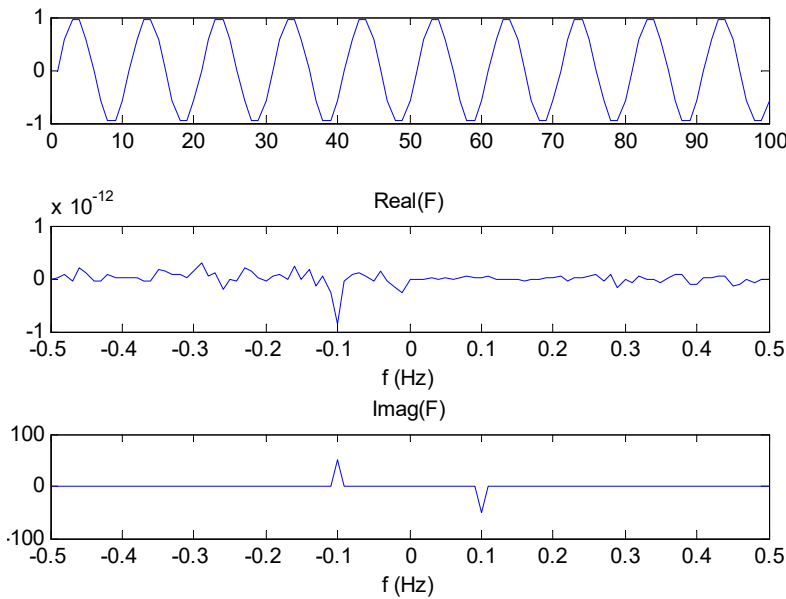
Casos especiais, se $\{f_n\}$ for real e

Par $f_n = f_{-n}$: $\{F_k\}$ é real e simétrica

Ímpar $f_n = -f_{-n}$: $\{F_k\}$ é imaginária e anti-simétrica

Casos especiais

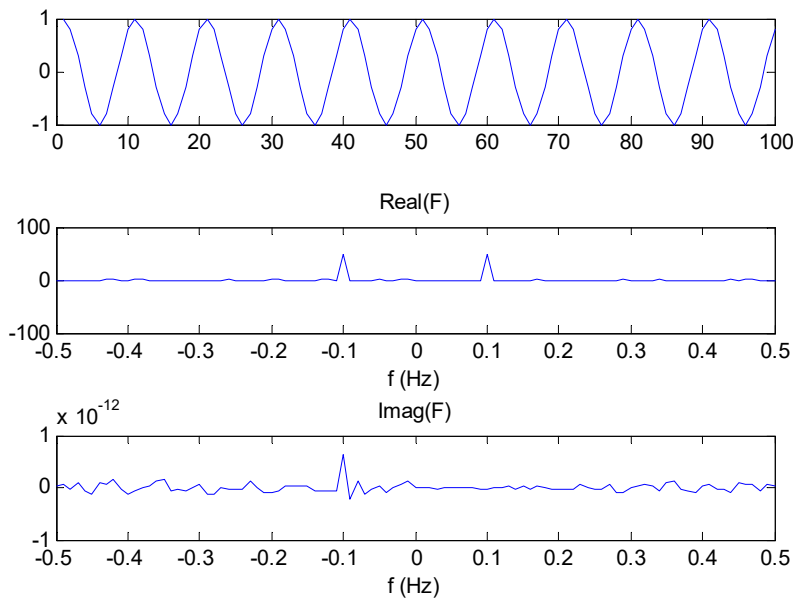
$$\sin(x) = -\sin(-x)$$



Transformada imaginária, anti-simétrica

$$(c_k = ir_k = -ir_{-k})$$

$$\cos(x) = \cos(-x)$$



Transformada real, simétrica

$$(c_k = r_k = r_{-k})$$

Filtros de Fourier

Se desenharmos diretamente $H(\omega)$, podemos fazer:

$$X = \mathcal{F}(x)$$

$$Y = HX$$

$$y = \mathcal{F}^{-1}(Y)$$

Como a **fft** é **muito** eficiente, o método permite implementar filtros quase-ideais.

Mas atenção: H (tal com X) é **complexo** e tem que ser definido em **todo** o domínio $[-f_{Nyq}, f_{Nyq}]$ com as simetrias adequadas.