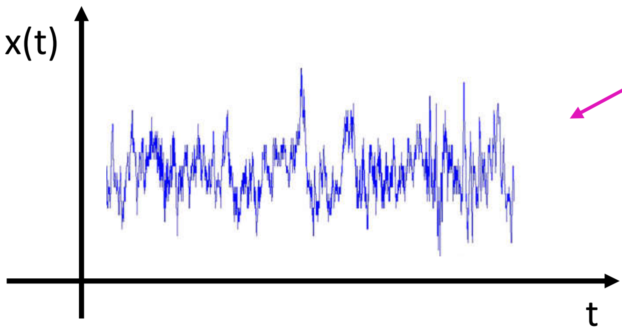
Amostragem de sinais contínuos

Amostragem de sinais contínuos

INTRODUÇÃO



Tem muitas frequências

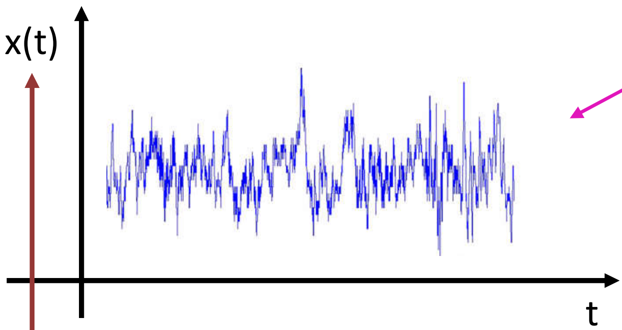
$$x(t) \longrightarrow \boxed{A/D} \longrightarrow x[n]$$

Como as frequências analógicas são mapeadas nas frequências digitais?

$$x(t) \longrightarrow \boxed{A/D} \longrightarrow x[n]$$

Amostragem **Quantização**

Como cada um desses processos afeta o sinal?



Tem muitas frequências

x(t) → A/D → x[n]

Como as frequências analógicas são mapeadas nas frequências digitais?

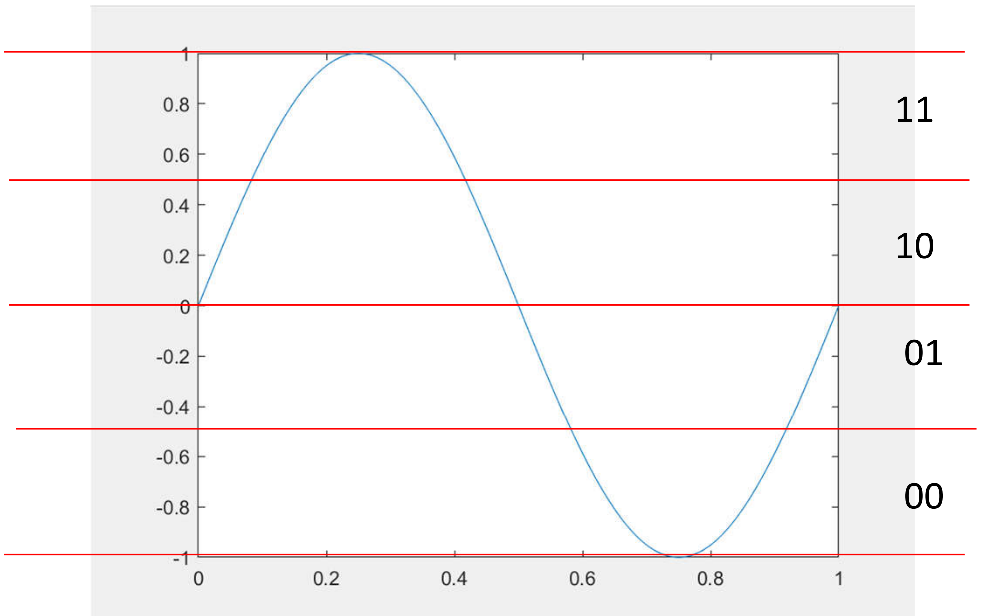
x(t) → A/D → x[n]

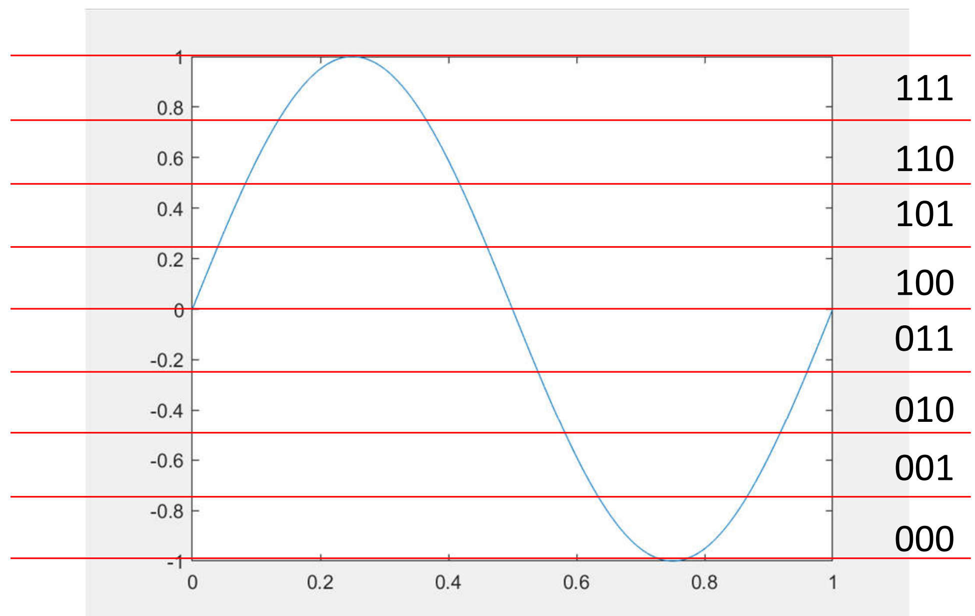
Amostragem **Quantização**

Como cada um desses processos afeta o sinal?

Amostragem de sinais contínuos

QUANTIZAÇÃO

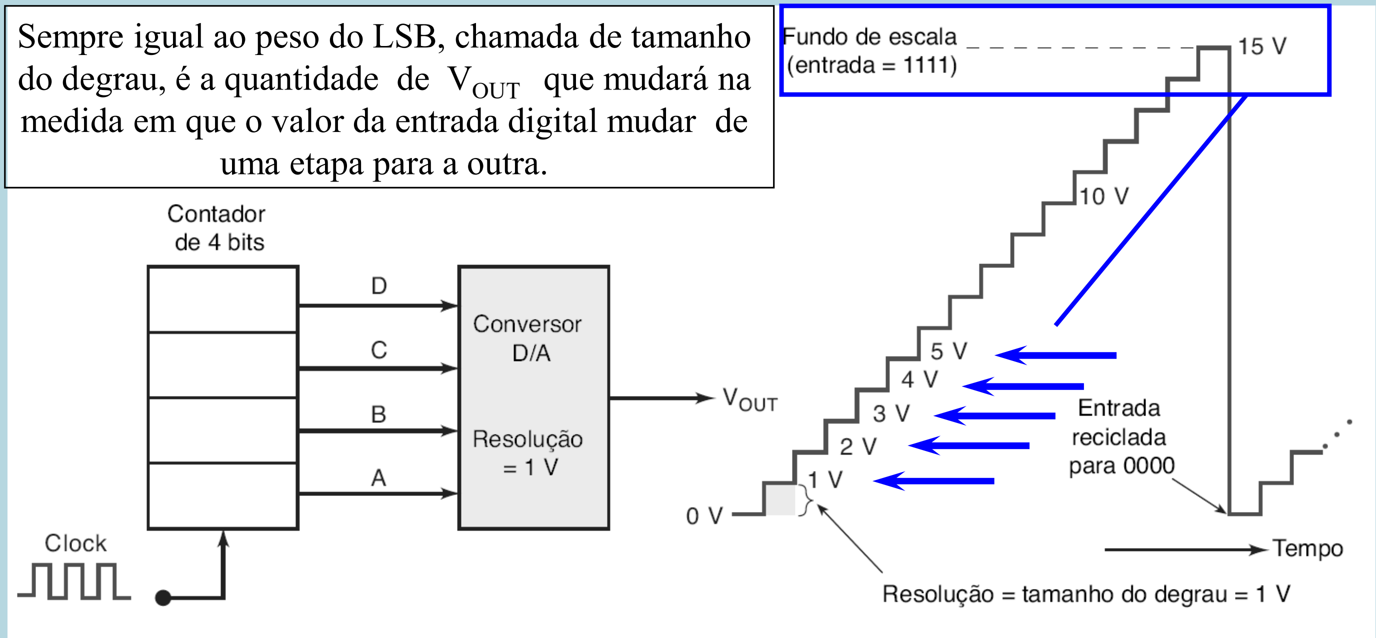

11
10
01
00
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

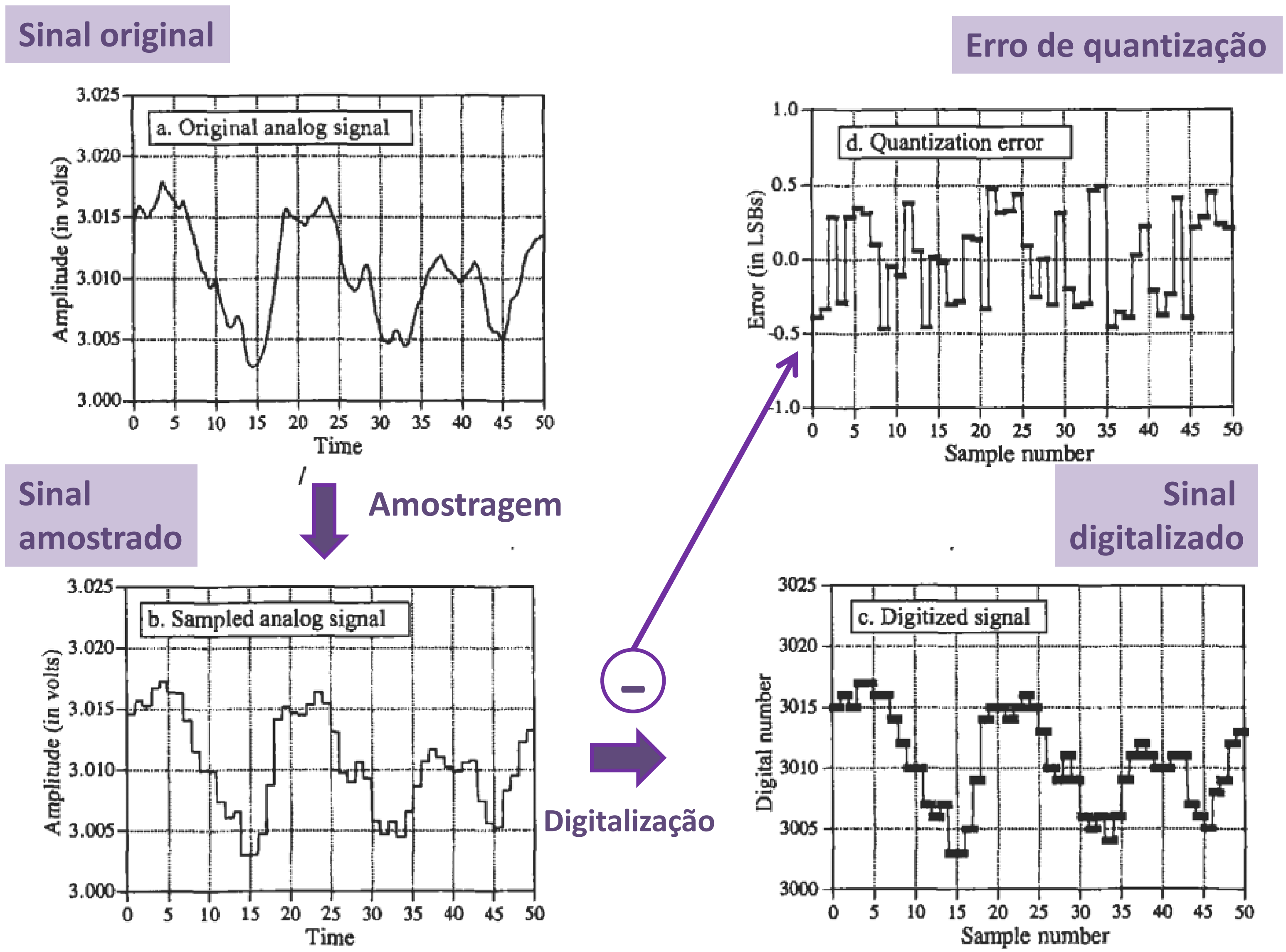

111
110
101
100
011
010
001
000
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

11-2 Conversão Digital-Analógica

- A resolução de um conversor D/A é definida como a menor alteração que pode ocorrer na saída analógica como resultado de uma mudança em uma saída digital.
- Resolução é o mesmo que o fator de proporcionalidade entrada/saída DAC.

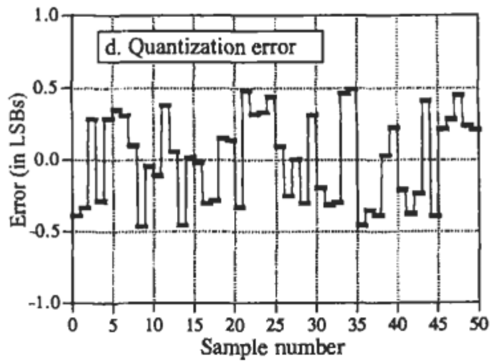
Sempre igual ao peso do LSB, chamada de tamanho do degrau, é a quantidade de V_{OUT} que mudará na medida em que o valor da entrada digital mudar de uma etapa para a outra.





Sinal original
a. Original analog signal
Amplitude (in volts)
3.025
3.020
3.015
3.010
3.005
3.000
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50
Time
Amostragem
Sinal amostrado
b. Sampled analog signal
Amplitude (in volts)
Time
Digitalização
Erro de quantização
d. Quantization error
Error (in LSBs)
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
Sample number
Sinal digitalizado
c. Digitized signal
Digital number
3025
3020
3015
3010
3005
3000
Sample number

Quantização



- Erro de quantização é semelhante ao ruído

- Em muitos casos o erro de quantização equivale a adição de ruído randômico ao sinal

- Sendo o erro de quantização um ruído randômico!

Quantização

- Os valores da variável dependente serão expressos em “degraus”, ou seja , nem todos os valores dentro de uma faixa são permitidos

- O tamanho desse degrau dependerá, do tipo de conversor utilizado e do tamanho do seu fundo de escala (LSB)

Amostragem de sinais contínuos

AMOSTRAGEM PERIÓDICA

Amostragem periódica

- Apesar de existirem outros métodos, a **amostragem periódica** é a maneira mais utilizada de se obter um sinal discreto no tempo
  - $x_c(t)$: sinal continuo, analógico
  - A titulo de simplificação, vamos considerar **oscilações harmônicas** com amplitude **A**, frequência **F** e fase θ. Assim $x_c(t)$ será

Para entender como a amostragem afeta um sinal, vamos ver como afeta uma única frequência

$$x_c(t) = A\cos(2\pi F t + \theta) = A\cos(\Omega t + \theta)$$
$$\Omega = 2\pi F$$

Amostragem periódica

$$x_c(t) = A\cos(2\pi F t + \theta) = A\cos(\Omega t + \theta)$$
$$\Omega = 2\pi F$$

Sinal Analógico

Sinal Discreto

$$x[n] = A\cos(2\pi f n + \theta) = A\cos(\omega n + \theta)$$
$$\omega = 2\pi f$$

Amostragem periódica

$$x_c(t) = A\cos(2\pi F t + \theta) = A\cos(\Omega t + \theta)$$
$$\Omega = 2\pi F$$

$$t = nTa = \frac{n}{F_a}$$

Como relacionar?

$$x[n] = x_c(nT) \qquad -\infty < n < \infty$$

$$x[n] = A\cos(2\pi f n + \theta) = A\cos(\omega n + \theta)$$
$$\omega = 2\pi f$$

$$x_c(nT) \equiv x[n] = A\cos(2\pi F n T a + \theta) = A\cos\left(\frac{2\pi n F}{F_a} + \theta\right)$$

Comparando

$$f = \frac{F}{F_a}$$

$$\omega = \Omega T a$$

Amostragem periódica

- A amostragem periódica estabelece uma <u>relação entre a variável continua **t** e a variável discreta **n**</u>

$$t = nTa = \frac{n}{F_a}$$

- Existe também uma relação entre a variável continua **F** **(ou Ω=2πF)** e a variável discreta **f** **(ou ω=2πf)**

Amostragem periódica

$$f = \frac{F}{F_a}$$

$$\omega = \Omega T a$$

- No sinal continuo, da definição do cosseno

$$-\infty < F < \infty$$
$$-\infty < \Omega < \infty$$

AMOSTRAGEM

- No sinal discreto

$$-\frac{1}{2} < f < \frac{1}{2}$$
$$-\pi < \omega < \pi$$

Amostragem periódica

- Comparando

$$f = \frac{F}{F_a} \qquad -\frac{1}{2} < f < \frac{1}{2} \qquad -\pi < \omega < \pi \qquad \Rightarrow \qquad -\frac{1}{2} < \frac{F}{Fa} < \frac{1}{2}$$

- Como Fa=1/Ta

$$-\frac{1}{2Ta} = \boxed{-\frac{F_a}{2} \leq F \leq \frac{F_a}{2}} = \frac{1}{2Ta}$$

- Que é equivalente a

$$-\frac{\pi}{Ta} = -\pi F_a \leq \Omega \leq \pi F_a = \frac{\pi}{Ta}$$

Amostragem periódica

- A amostragem periódica de um sinal analógico implica no **mapeamento** do intervalo infinito de freqüências **F** em um intervalo finito de freqüências **f**

- Isto leva ao fato de existir uma frequência máxima, ou frequência de corte, no sinal amostrado

$$F \frac{Fa}{2} \frac{1}{2Ta_{\max}}$$

$$\Omega \frac{\pi}{Ta_{\max}}$$

Amostragem periódica

- Um dos problemas da amostragem é justamente determinar **Fa**, para que **Fmax** esteja presente no sinal amostrado

$$F_a > 2F_{\max}$$

- Com Fa escolhida dessa maneira, qualquer freqüência presente no sinal analógico será mapeada em uma senóide de tempo discreto com freqüências dadas por:

$$-\frac{1}{2} \leq f_i = \frac{F_i}{F_a} \leq \frac{1}{2}$$

- A frequencia $F_N \geq 2F_{\max}$ é conhecida como frequencia de **Nyquist**

Teorema da amostragem de Nyquist

- *Aliasing* pode ser evitado se o sinal for corretamente amostrado

- $x_c(t)$ não pode ter informação acima de uma determinada freqüência Ω_N (ou Ω_0)

- $X(\Omega)=0$, se $|\Omega| \geq \Omega_0$ $\Rightarrow$ $\boldsymbol{\Omega_a=2\,\Omega_0}$

Ω_N também chamada de Ω_0

Teorema da amostragem de Nyquist

- A freqüência Ω_N é chamada freqüência de Nyquist, e recomenda-se que a frequencia de amostragem seja maior que **$2\Omega_N$, Teorema de Nyquist**

Teorema de Nyquist

Seja $x_c(t)$ um sinal com banda limitada

$X_c(\Omega) = 0$ para $|\Omega| \geq \Omega_N$

Logo, $x_c(t)$ é unicamente determinado pelas suas amostras e consequentemente $x[n] = x_c(nT)$

$$\Omega_a = \frac{2\pi}{T_a} \geq 2\Omega_N$$

Exemplo 1

- Sendo $x[n] = \cos(\frac{3\pi}{4} n)$ obtida da amostragem de $x(t) = \cos(300\pi t)$ encontre a freqüência de amostragem Fa.

$$\boxed{x[n] = x_c(nTa)}$$

Exemplo 1

Exemplo 1

$x[n] = \cos\left(\frac{3\pi}{4} n\right)$ $\quad$ $x(t) = \cos(300\pi t)$ $\quad$ Fa ?

$x[n] = x_c(nTa)$ $\quad$ $Fa = \frac{1}{Ta}$

$x[n] = x_c(nTa) = \cos(300\pi \underset{\hookrightarrow nTa}{t}) = \cos(300\pi n Ta) =$

$= x[n] = \cos\left(\frac{3\pi}{4} n\right)$

$\therefore \overset{100}{\cancel{300}} \cancel{\pi} \cancel{n} Ta = \frac{\cancel{3}\cancel{\pi}}{4} \cancel{n} \rightarrow 100 \underbrace{Ta}_{\frac{1}{Fa}} = \frac{1}{4}$

$\frac{100}{Fa} = \frac{1}{4}$

$\boxed{Fa = 400 \text{ amostras}/s}$

Exemplo 2

100

Considere o sinal analógico x(t) amostrado a $\boxed{\text{Fs=200 Hz}}$ para obter x[n]. Determine x[n] e sua Transformada de Fourier (DTFT).

$$x(t) = 4 + 2\cos\left(\underbrace{\boxed{150}}_{2F}\pi t + {}^{\pi}/_{3}\right) + 4\sin(\underbrace{\boxed{350}}_{2F}\pi t)$$

75

175

Vai ter aliasing!!!!!

Exemplo 2

- x[n]

$$T_s = \frac{1}{F_s} = \frac{1}{200} = 0{,}005$$

$$t = nT_s$$

$$x(t) = 4 + 2\cos\left(150\pi t + {}^{\pi}/_{3}\right) + 4\sin(350\pi t)$$

$$x[n] = 4 + 2\cos\left(150\pi 0{,}005n + {}^{\pi}/_{3}\right) + 4\sin(350\pi 0{,}005n)$$

$$x[n] = 4 + 2\cos\left(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3}\right) + 4\sin(1{,}75\pi n)$$

$$-\frac{1}{2} < f < \frac{1}{2}$$
$$-\pi < \omega < \pi$$

$$x[n] = 4 + 2\cos\left(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3}\right) + 4\sin(1{,}75\pi n - 2\pi)$$

$$\boxed{x[n] = 4 + 2\cos\left(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3}\right) - 4\sin(0{,}25\pi n)}$$

Exemplo 2

- $X(\omega)$

$$x[n] = 4 + 2\cos\left(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3}\right) - 4\sin(0{,}25\pi n)$$

Exemplo 2

$$\cos\theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$$

$$sen\theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$$

X(ω)

$$x[n] = 4 + 2\cos\left(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3}\right) - 4\sin(0{,}25\pi n)$$

$$x[n] = 4 + 2\left(\frac{e^{j(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3})} + e^{-j(0{,}75\pi n + {}^{\pi}/_{3})}}{2}\right) - 4\left(\frac{e^{j(0{,}25\pi n)} - e^{-j(0{,}25\pi n)}}{2j}\right)$$

$$x[n] = 4 + e^{j^{\pi}/_{3}} e^{j0{,}75\pi n} + e^{-j^{\pi}/_{3}} e^{-j0{,}75\pi n} - \frac{2}{j} e^{j0{,}25\pi n} + \frac{2}{j} e^{-j0{,}25\pi n}$$

$$\frac{j}{j}$$

$$x[n] = 4 + e^{j^{\pi}/_{3}} e^{j0{,}75\pi n} + e^{-j^{\pi}/_{3}} e^{-j0{,}75\pi n} - \frac{2}{j} e^{j0{,}25\pi n} + \frac{2}{j} e^{-j0{,}25\pi n}$$

Exemplo 2

- X(ω)

$$x[n] = 4 + e^{j\pi/3}e^{j0{,}75\pi n} + e^{-j\pi}$$

TABLE 3.1 *Some common DTFT pairs*

Signal Type	*Sequence* $x(n)$	DTFT $X(e^{j\omega})$, $-\pi \leq \omega \leq \pi$
Unit impulse	$\delta(n)$	1
Constant	1	$2\pi\delta(\omega)$
Unit step	$u(n)$	$\frac{1}{1-e^{-j\omega}} + \pi\delta(\omega)$
Causal exponential	$\alpha^n u(n)$	$\frac{1}{1-\alpha e^{-j\omega}}$
Complex exponential	$e^{j\omega_0 n}$	$2\pi\delta(\omega-\omega_0)$
Cosine	$\cos(\omega_0 n)$	$\pi[\delta(\omega-\omega_0)+\delta(\omega+\omega_0)]$
Sine	$\sin(\omega_0 n)$	$j\pi[\delta(\omega+\omega_0)-\delta(\omega-\omega_0)]$
Double exponential	$\alpha^{\|n\|}u(n)$	$\frac{1-\alpha^2}{1-2\alpha\cos(\omega)+\alpha^2}$

Note: Since $X(e^{j\omega})$ is periodic with period 2π, expressions over only the primary period of $-\pi \leq \omega \leq \pi$ are given.

Exemplo 2

- X(ω)

$$x[n] = 4 + e^{j\pi/3} e^{j0,75\pi n} + e^{-j\pi/3} e^{-j0,75\pi n} + 2je^{j0,25\pi n} - 2je^{-j0,25\pi n}$$

$$X(\omega) = 8\pi\delta(\omega) + 2\pi e^{j\pi/3}\delta(\omega - 0,75\pi) + 2\pi e^{-j\pi/3}\delta(\omega + 0,75\pi) + 4j\pi\delta(\omega - 0,25\pi) - 4j\pi\delta(\omega + 0,25\pi),$$
$$-\pi \leq \omega \leq \pi$$

Complex exponential	$e^{j\omega_0 n}$	$2\pi\delta(\omega - \omega_0)$

X(ω)

$$x[n] = 4 + e^{j\pi/3} e^{j0{,}75\pi n} + e^{-j\pi/3}$$

$$X(\omega) = 8\pi\delta(\omega) + 2\pi e^{j\pi/3}\delta(\omega - 0{,}75\pi) +$$

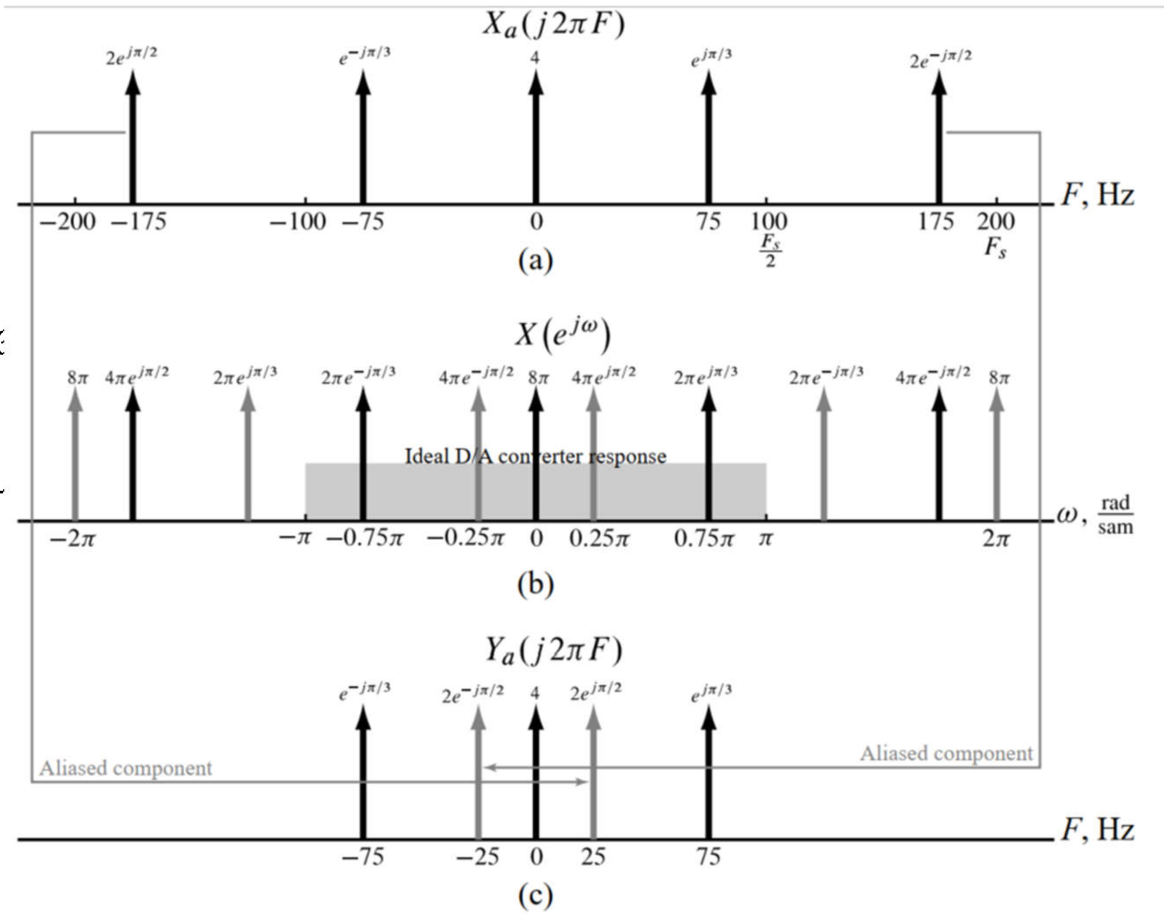


FIGURE 3.15 *Fourier transforms of the sinusoidal signals $x_a(t)$, $x(n)$, and $y_a(t)$*

X(ω)

$$x[n] = 4 + e^{j\pi/3} e^{j0{,}75\pi n} + e^{-j\pi/3}$$

$$X(\omega) = 8\pi\delta(\omega) + 2\pi e^{j\pi/3}\delta(\omega - 0{,}75\pi) +$$

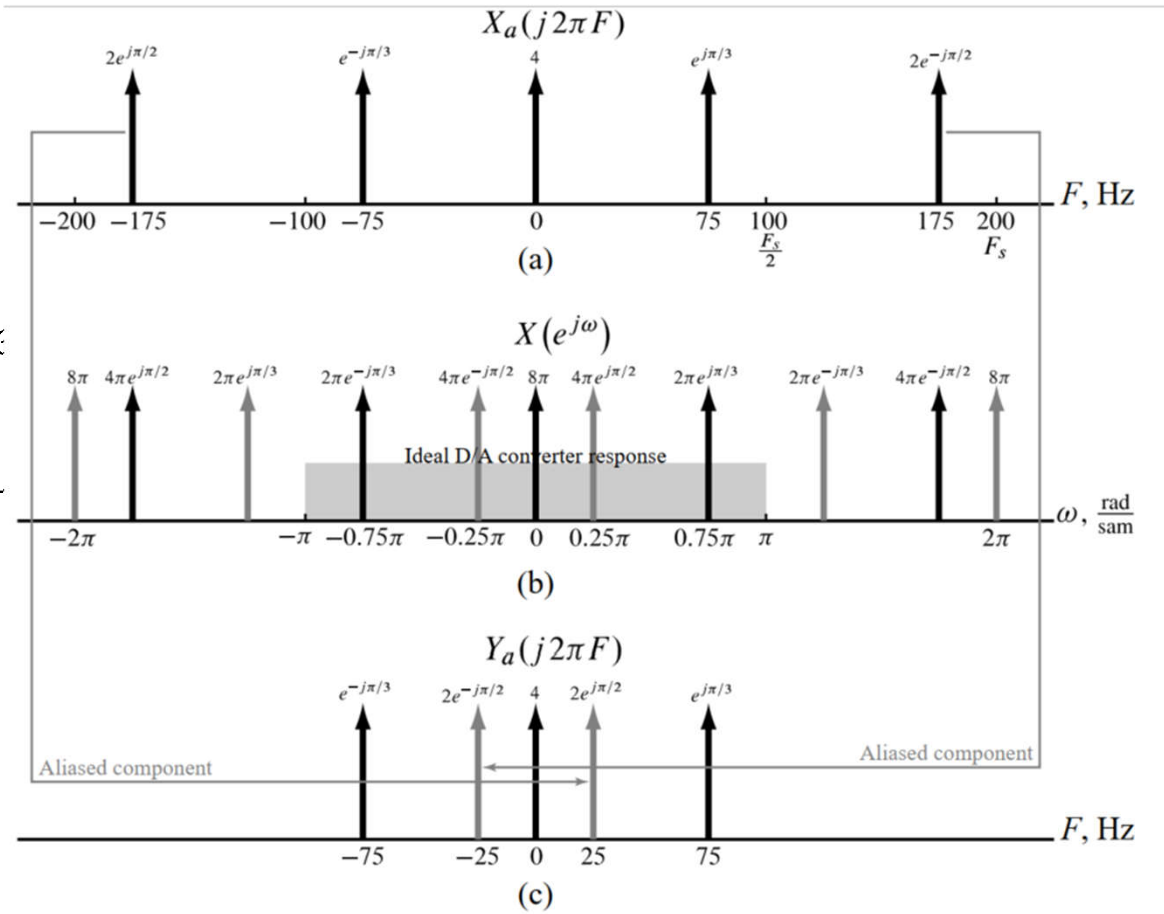


FIGURE 3.15 *Fourier transforms of the sinusoidal signals $x_a(t)$, $x(n)$, and $y_a(t)$*

Amostragem de sinais contínuos

REPRESENTAÇÃO DA AMOSTRAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

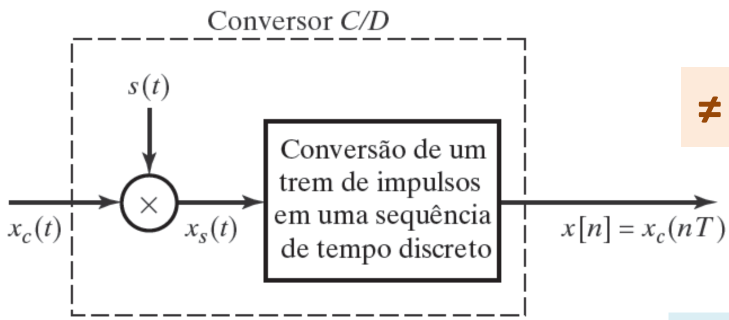
Representação da amostragem no domínio da frequência

- É conveniente representar o processo de amostragem em 2 estágios:
  - Um modulador de trem de pulsos
  - Seguido pela conversão do trem de pulsos em uma sequência

Oppenheim • Schafer

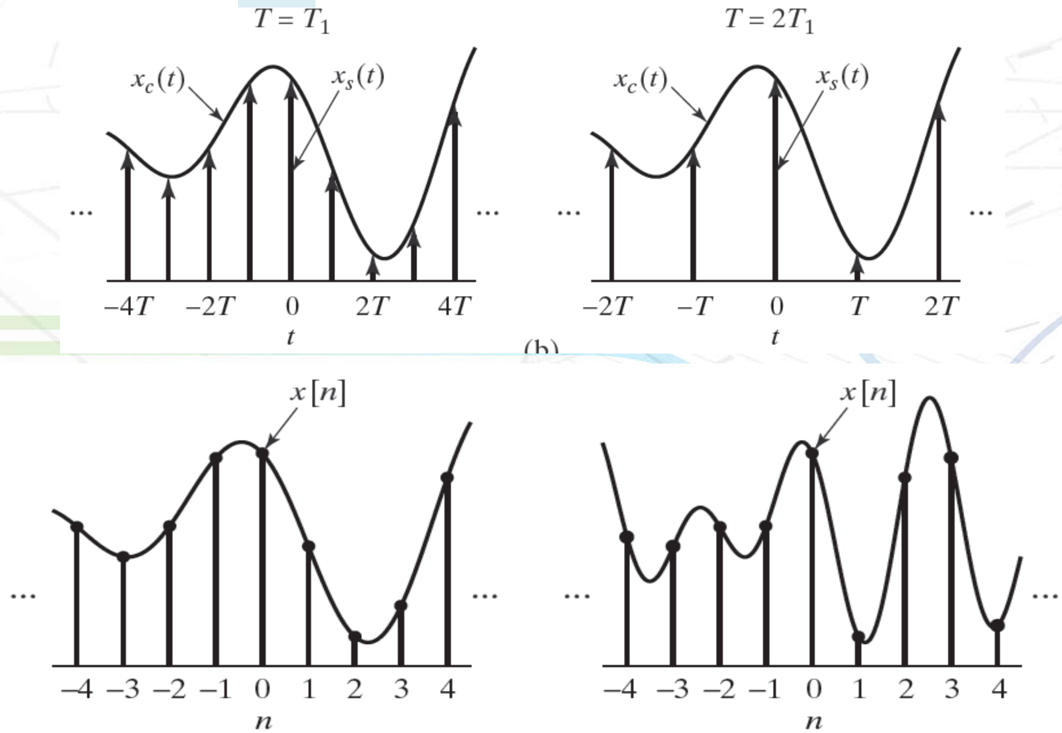
Processamento em tempo discreto de sinais

3ª edição



≠ entre x[n] e x_s(t)??

Fs **Fs/2**

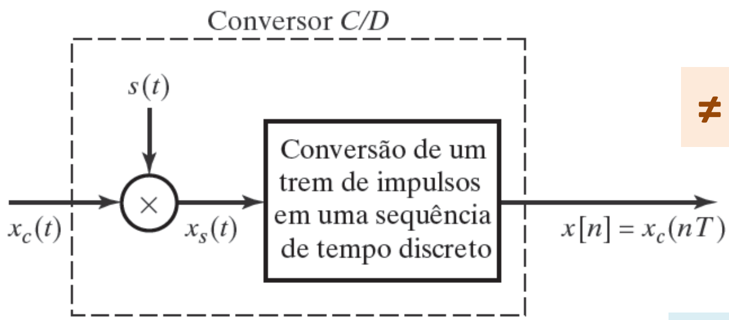


Oppenheim • Schafer

Processamento em tempo discreto de sinais

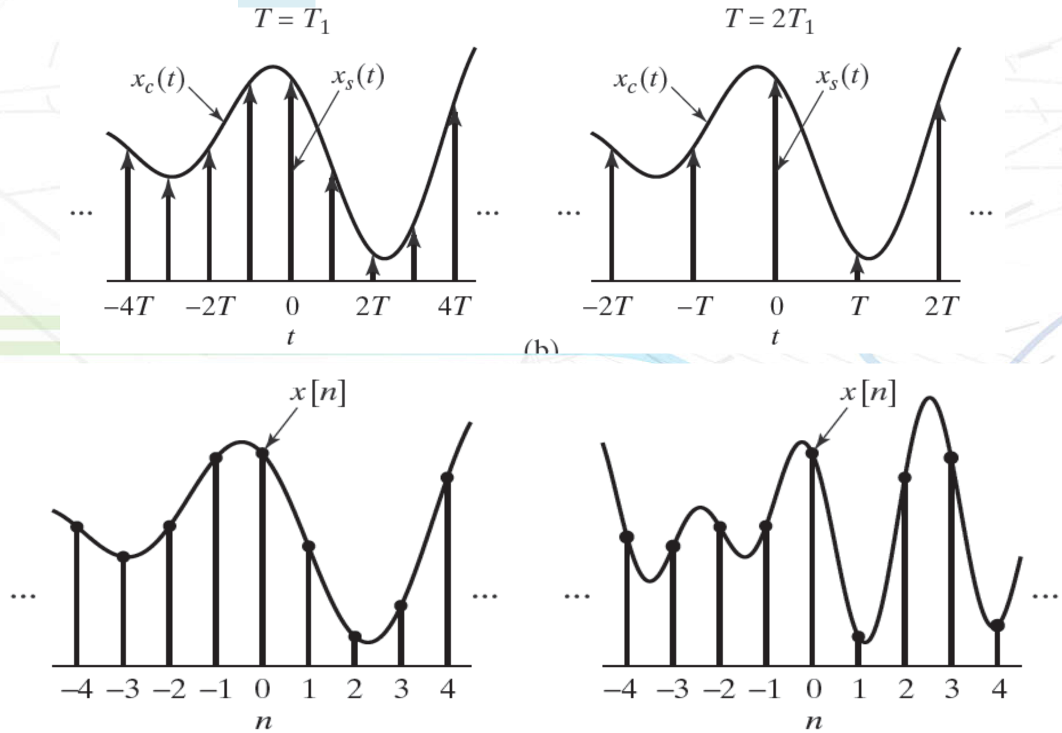
3ª edição

≠ entre x[n] e $x_s(t)$??



Fs

Fs/2



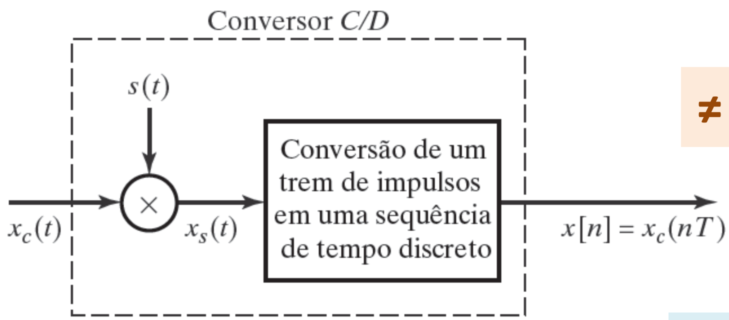
$$x_s(t) = x_c(t)s(t)$$
$$= x_c(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT).$$

Oppenheim • Schafer

Processamento em tempo discreto de sinais

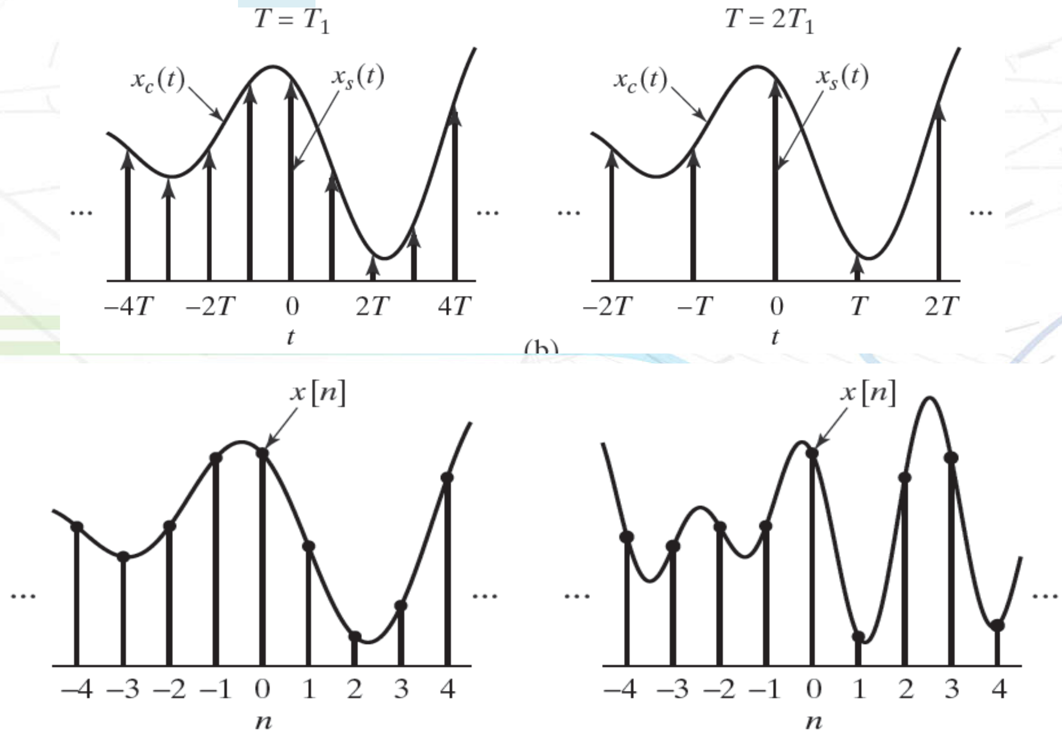
3ª edição

≠ entre $x[n]$ e $x_s(t)$??



Fs

Fs/2



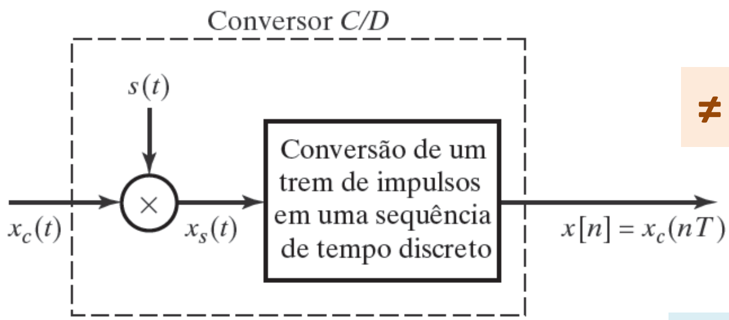
$$x_s(t) = x_c(t)s(t) = x_c(t)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT).$$

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_c(nT)\delta(t-nT).$$

Oppenheim • Schafer

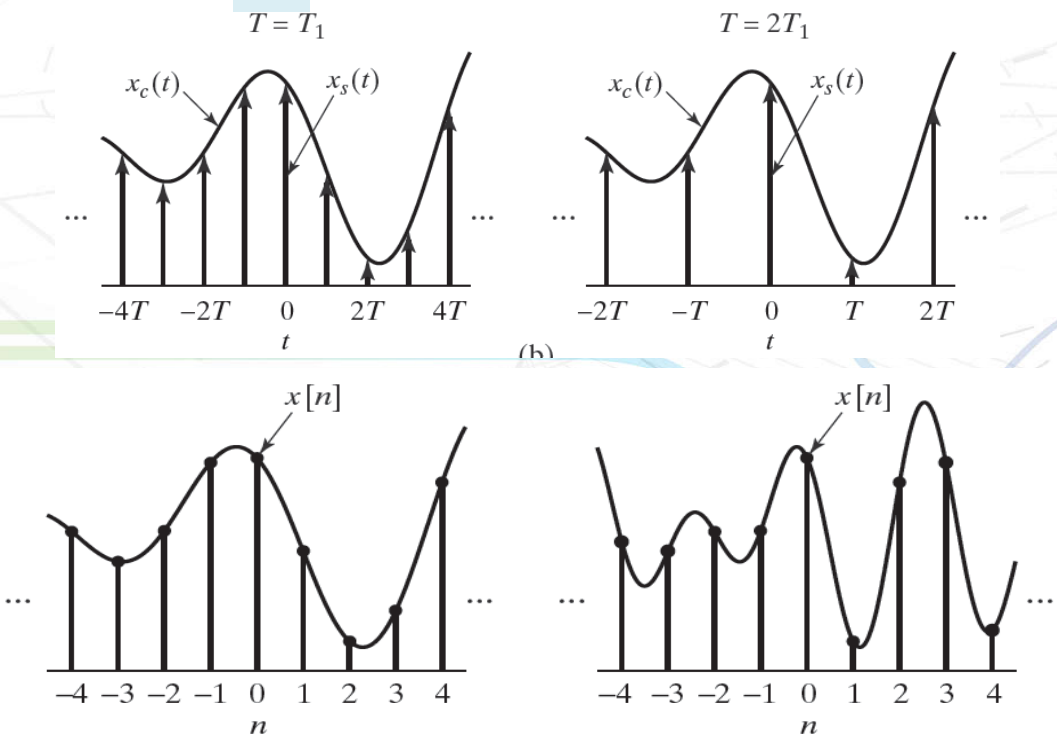
Processamento em tempo discreto de sinais

3ª edição



≠ entre x[n] e $x_s(t)$??

Fs **Fs/2**



$$x_s(t) = x_c(t)s(t) = x_c(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT).$$

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_c(nT)\delta(t - nT).$$

X[n]???

$x[n]=x_s(nT)$

Representação da amostragem no domínio da frequência

- $x_s(t)$ é um sinal continuo, mais especificamente um trem de pulsos que tem valores não nulos para múltiplos de T

- O primeiro passo para encontrar a relação no domínio da frequência entre a entrada $x_c(t)$ e a saída x[n], vamos primeiro considerar a **relação entre $x_c(t)$ e $x_s(t)$**

Representação da amostragem no domínio da frequência

- $\Omega_a=2\pi/T$, é a frequência de amostragem em radianos

Depende do sinal

- Como $X_s(\Omega)= X_c(\Omega)*S(\Omega)$, logo:

convolução

$$X_s(j\Omega) = \frac{1}{2\pi} X_c(j\Omega) * S(j\Omega)$$

Relação entre a TF da entrada e da saída do modulador de trem de pulsos

A TF de um trem de pulsos é também um trem de pulsos

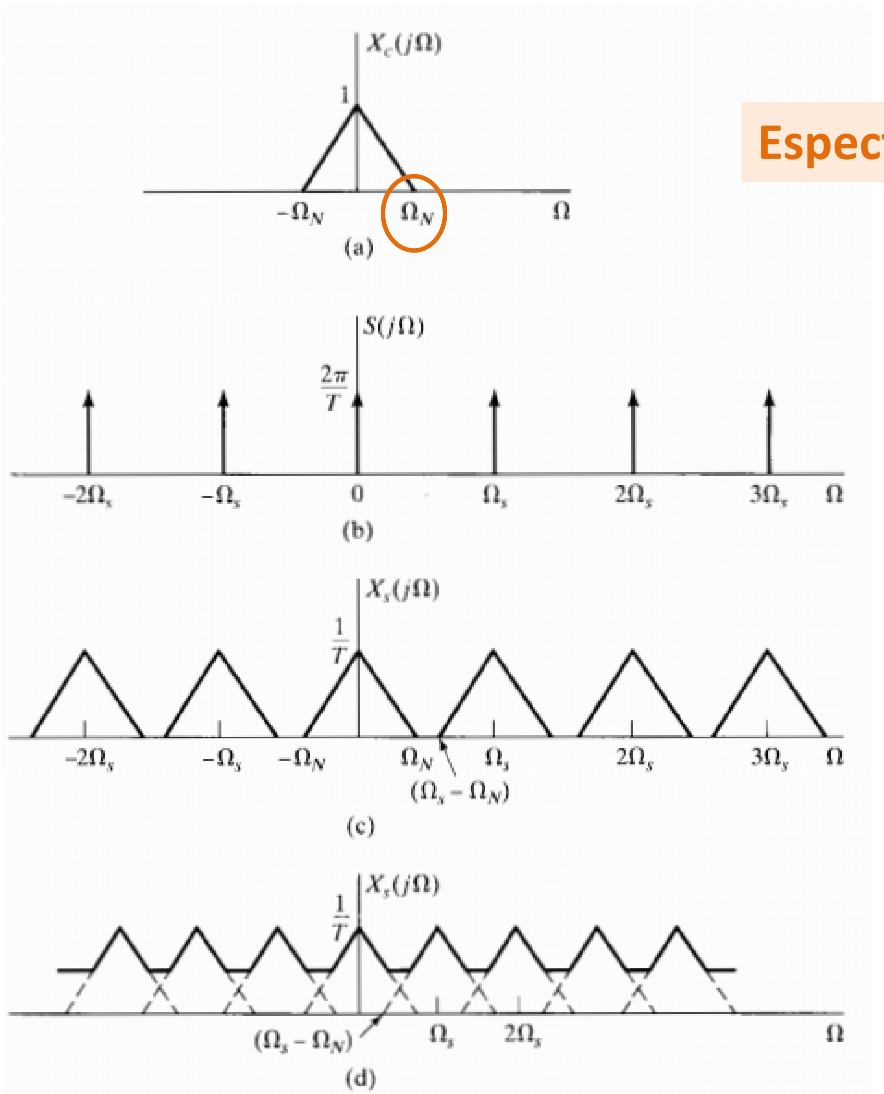
$$S(j\Omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - k\,\Omega_s)$$

$\Omega s = \Omega a$

Representação da amostragem no domínio da frequência

$$X_s(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_c(j(\Omega - k\,\Omega_s))$$

- Indica que a TF de $x_s(t)$ é formado por cópias periodicamente repetidas da TF de $x_c(t)$



Espectro do sinal original

Espectro do trem de pulsos (função de amostragem)

Espectro do sinal amostrado com $\Omega_a > 2\Omega_N$

Espectro do sinal amostrado com $\Omega_a < 2\Omega_N$

Representação da amostragem no domínio da freqüência

- Sendo a maior freqüência presente na TF do sinal original $\mathbf{\Omega_N}$
- Fica evidente da figura que com $\mathbf{\Omega_s > 2\Omega_N}$ as replicas de $X_c(\Omega)$ não se sobrepõem, ou seja <u>há uma replica de $X_c(\Omega)$ a cada múltiplo inteiro de Ω_a</u>
  - É possível recuperar $x_c(t)$ a partir de $x_s(t)$, utilizando um filtro **passa baixas**

Representação da amostragem no domínio da freqüência

- Se $\boldsymbol{\Omega_s < 2\Omega_N}$ as cópias de $X_c(\Omega)$ se sobrepoem
  - Não é possível recuperar $x_c(t)$ a partir de $x_s(t)$

- Com $\boldsymbol{\Omega_s < 2\Omega_N}$ o sinal reconstruído $x_r(t)$ apresenta uma distorção em relação a $x_c(t)$, essa distorção é conhecida como ***aliasing***

Exemplo 2

- Verifique se ocorrerá *aliasing* na seguinte situação

$$x_c(t) = \cos(2250\pi t)$$
$$Fa = 1000Hz$$

Exemplo 2

Exemplo 2 Verificar se há aliasing na seguinte situação

$$x_c(t) = \cos(2250\pi t)$$

$$F_a = 1000\,Hz \rightarrow T_a = \frac{1}{F_a} = 10^{-3}\,s$$

Para verificar 2 etapas:

1) Encontrar $x[n]$ com F_a dada
2) Reconstruir $x_c(t)$ usando $n = t/T_a$. Tem q ser possível encontrar o msm sinal

1) $x[n] = x_c(nT_a) = \cos(2250\pi n 10^{-3}) = \cos(2{,}25\pi n)$

$$= \cos(2\pi n + 0{,}25\pi n) = \boxed{\cos\left(\frac{\pi}{4} n\right) = x[n]}$$

2) Reconstrução $\quad t = nT_a \rightarrow n = \frac{t}{T_a}$

$$x_c(t) = x[n = t/T_a] = \cos\left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{t}{T_a}\right) = \cos\left(\frac{\pi}{4}\,\frac{t}{10^{-3}}\right)$$

$$x_c(t) = \cos(250\pi t)$$

$\neq$ do sinal original

$\downarrow$

Tem aliasing

Exemplo 3

- Seja $x_c(t) = \sin c\,(300\pi t)$ determine qual a frequência de amostragem ideal considerando sua TF dada a seguir

$$X(\Omega) = \begin{cases} \frac{1}{300}, & \text{se } |\Omega| \le 300\pi \\ 0, & \text{se } |\Omega| > 300\pi \end{cases}$$

Exemplo 3 Qual a freq de amostragem ideal para $x_c(t) = sinc\,(300t\pi)$ com

$$X(\Omega) = \begin{cases} 1/300, & se\ |\Omega| \le 300\pi \rightarrow \text{freq de corte} \\ 0, & se\ |\Omega| > 300\pi \end{cases} \qquad \Omega_0 = 300\pi$$

$$\Omega_a > 2\Omega_0$$

$$\Omega_a > 2\ 300\pi \rightarrow \boxed{\Omega_a > 600\pi}$$

$$\Omega_a = 2\pi F_a \rightarrow F_a = \frac{\Omega_a}{2\pi} = \frac{600\cancel{\pi}}{2\cancel{\pi}} = 300$$

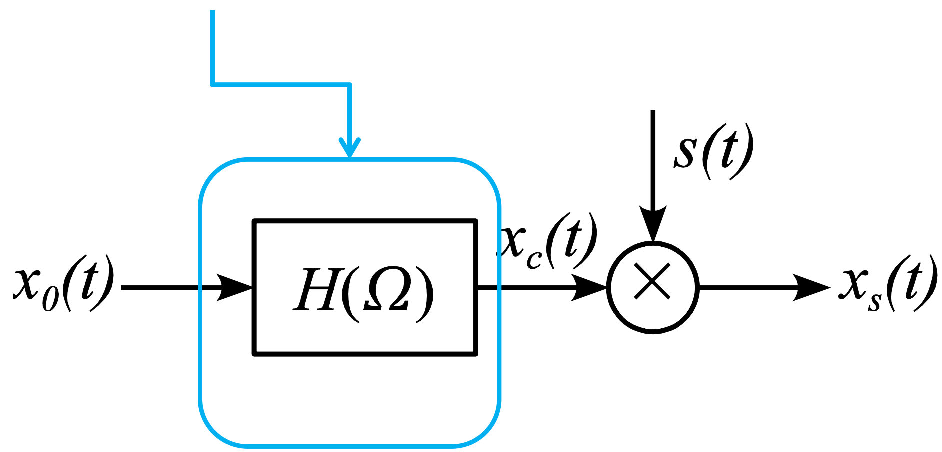
$$\boxed{F_a = 300Hz}$$

Amostragem de sinais contínuos

FILTRAGEM ANTIALIASING

Filtragem *antialiasing*

- Quando o sinal não é limitado é necessário limitá-lo antes
  - Filtro PB em Ω_0
  - FILTRAGEM *ANTIALIASING*



Filtragem *antialiasing*

- Filtro ideal

$$H(\Omega) = \begin{cases} 1 \quad se \quad |\Omega| \le \Omega_0 \\ 0 \quad se \quad |\Omega| > \Omega_0 \end{cases}$$

$x_c(t)$ ➡ $X_c(\Omega) = X_0(\Omega)H(\Omega) =$

$$= X_c(\Omega) = X_0(\Omega)H(\Omega) = \begin{cases} X_0(\Omega) \quad se \quad |\Omega| \le \Omega_0 \\ 0 \quad se \quad |\Omega| > \Omega_0 \end{cases}$$

Filtragem *antialiasing*

- Sinal **não terá freqüências acima de Ω_0**
- **Escolher** adequadamente a **freqüência de corte do filtro**
- Pode haver **perda na informação** quando algumas freqüências são descartadas
  - Pouca perda porque freq. altas tem energia mais baixa
- **Filtro ideal não existe → boas aproximações**

Amostragem de sinais contínuos

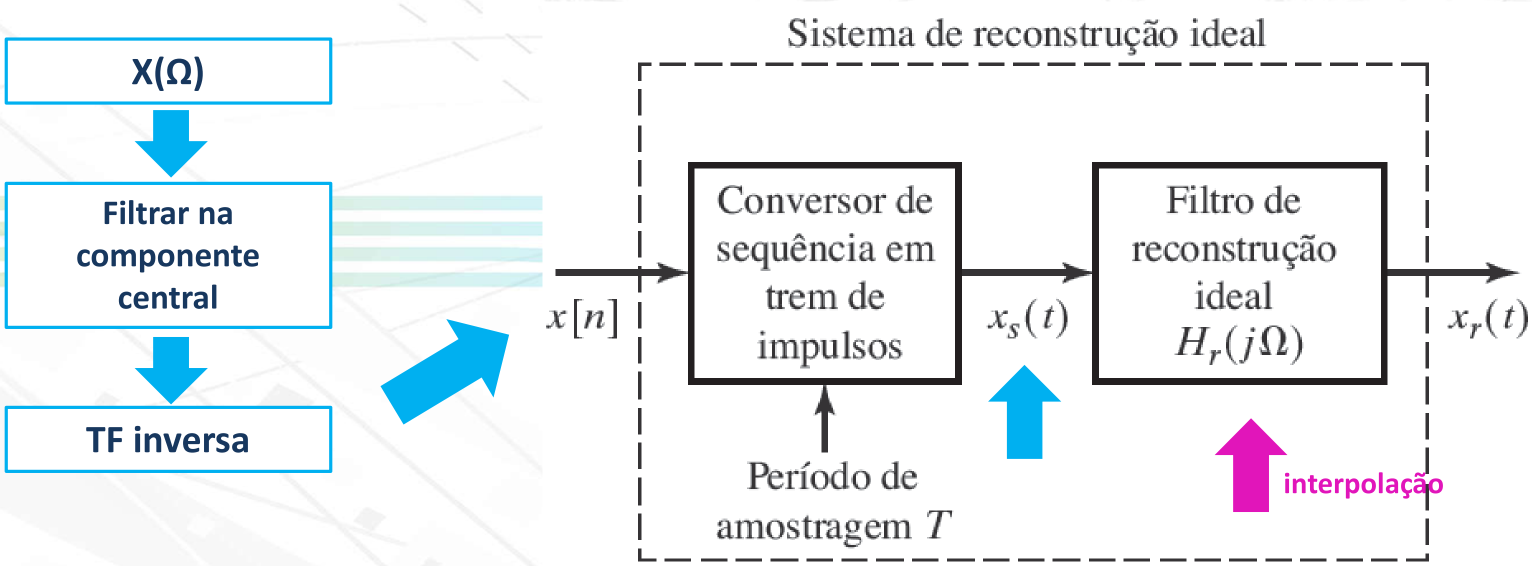
RECONSTRUÇÃO DE UM SINAL LIMITADO EM BANDA A PARTIR DE SUAS AMOSTRAS

Reconstrução de um sinal limitado em banda a partir de suas amostras

- De acordo com o teorema de amostragem, desde que se escolha adequadamente a frequência de amostragem é possível reconstruir o sinal continuo

Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras

- Diagrama de blocos de um sistema de reconstrução ideal de sinal com banda limitada.



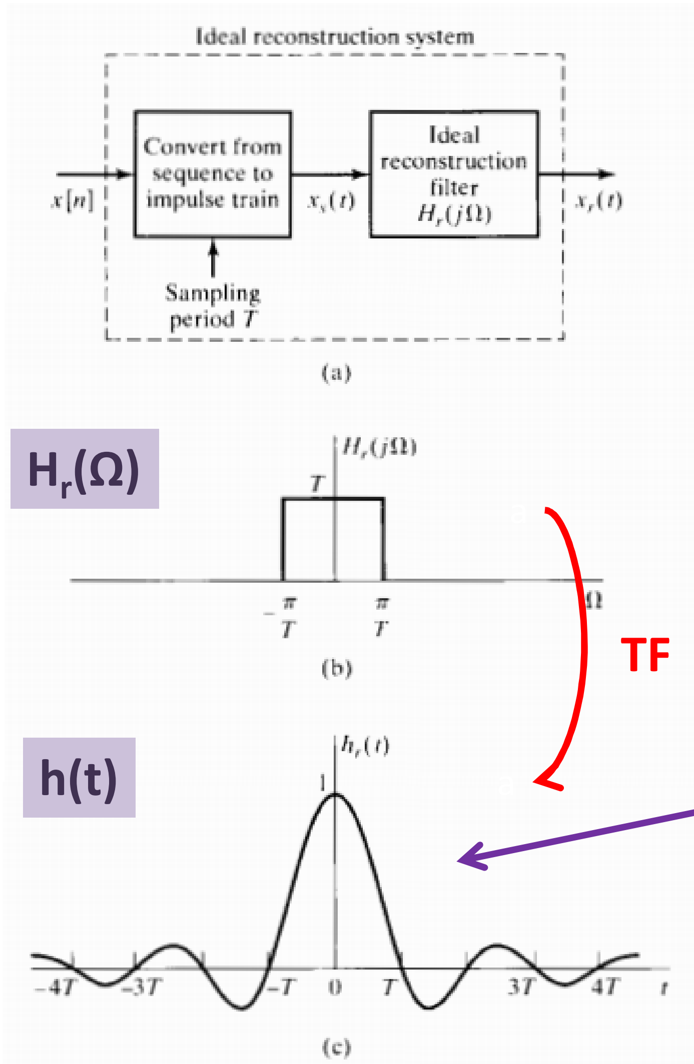
Sistema de reconstrução ideal

- Usar um filtro na componente central para eliminar as réplicas do espectro

- Se temos o espectro podemos utilizar a TF inversa para obter $x[n]$

- A partir de $x[n]$ gerar $x_s(t)$

- Interpolar $x_s(t)$ para obter $x_c(t)$



$H_r(\Omega)$

$h(t)$

TF

$$h_r(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T}.$$

Sistema de reconstrução ideal

- Interpolação????
  - Para interpolar eu preciso respeitar os pontos originais do sinal e "criar" pontos para valores não inteiros

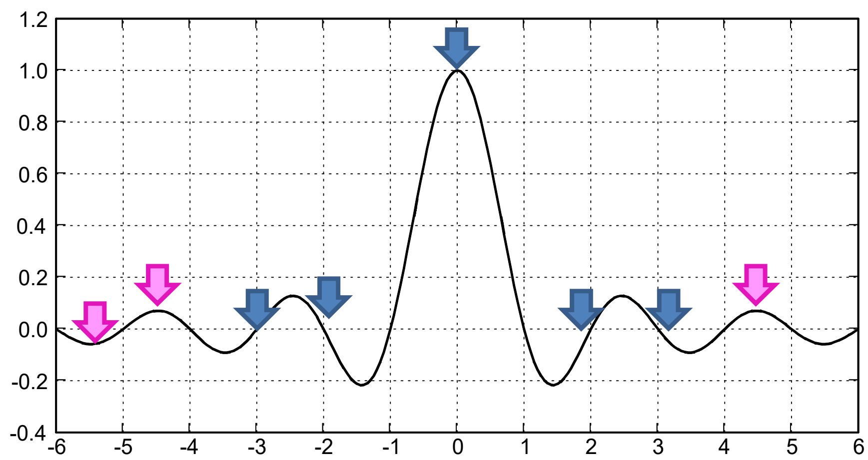
n inteiro

=0

Valores não inteiros

≠ 0

Função sinc



Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras

- Na figura a seguir, mostram-se um sinal de tempo contínuo $x_c(t)$ e o trem de impulsos modulado correspondente.

- Na figura seguinte mostram-se várias das parcelas

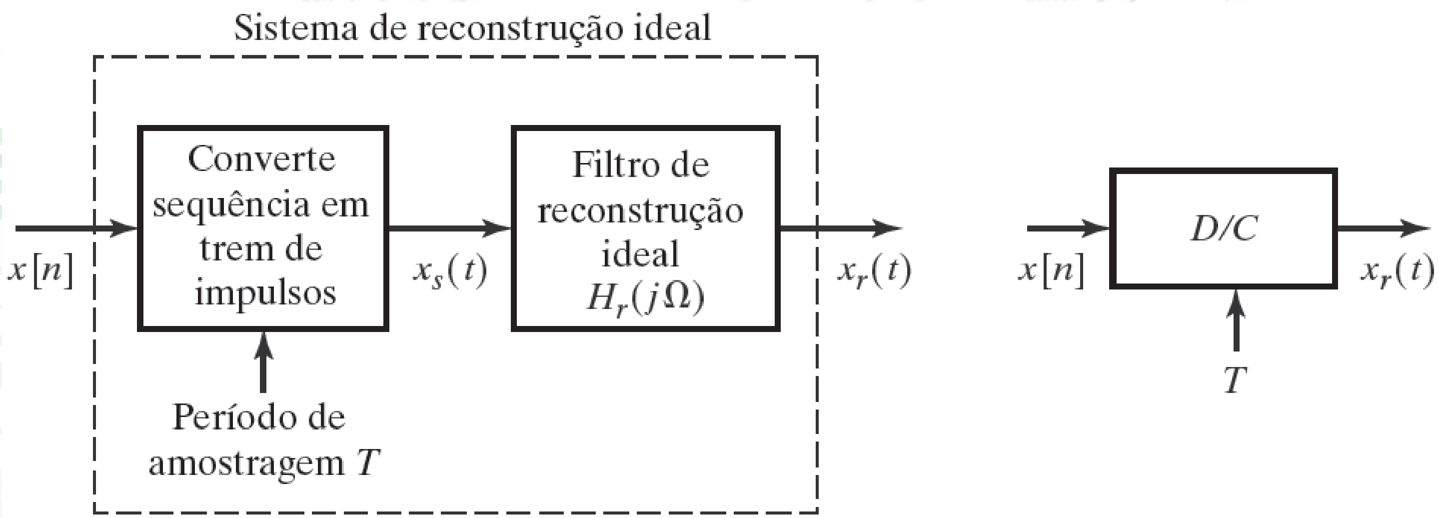
$$x[n]\frac{\operatorname{sen}[\pi(t-nT)/T]}{\pi(t-nT)/T}$$

- e o sinal reconstruído resultante $x_r(t)$.

Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras

Oppenheim • Schafer
Processamento em tempo discreto de sinais
3ª edição

- Reconstrução ideal do sinal de banda limitada.
- Representação equivalente como um conversor D/C ideal.



Amostragem de sinais contínuos

MUDANÇA DA TAXA DE AMOSTRAGEM

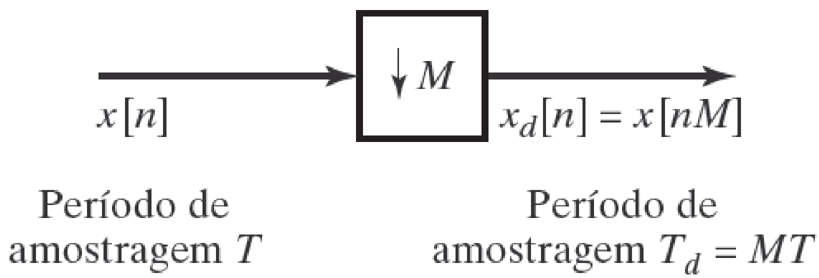
Redução da taxa de amostragem por um fator inteiro

Oppenheim • Schafer
Processamento em tempo discreto de sinais
3ª edição

- A taxa de amostragem de uma sequência pode ser reduzida amostrando-a, isto é, pela definição de uma nova sequência

$$x_d[n] = x[nM] = x_c(nMT)$$

- Representação de um compressor ou amostrador de tempo discreto.



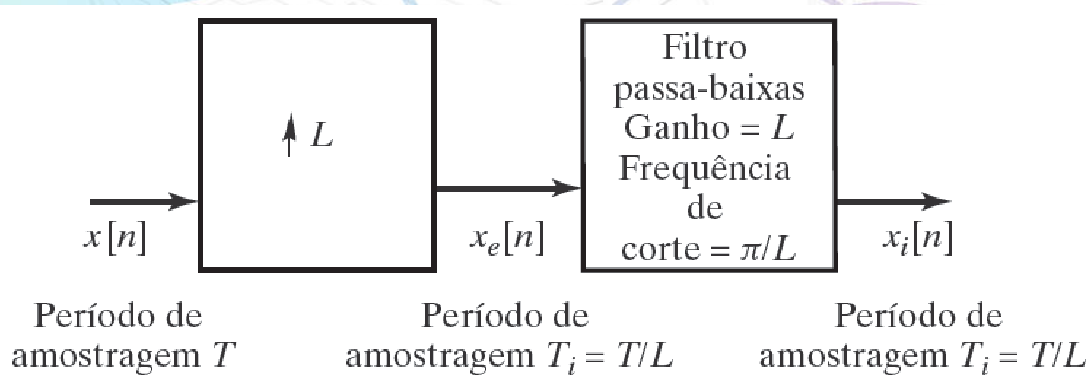
Aumento da taxa de amostragem por um fator inteiro

Oppenheim • Schafer
Processamento em tempo discreto de sinais
3ª edição

- Vamos nos referir à operação de aumentar a taxa de amostragem como superamostragem (ou *upsampling*). Segue-se que

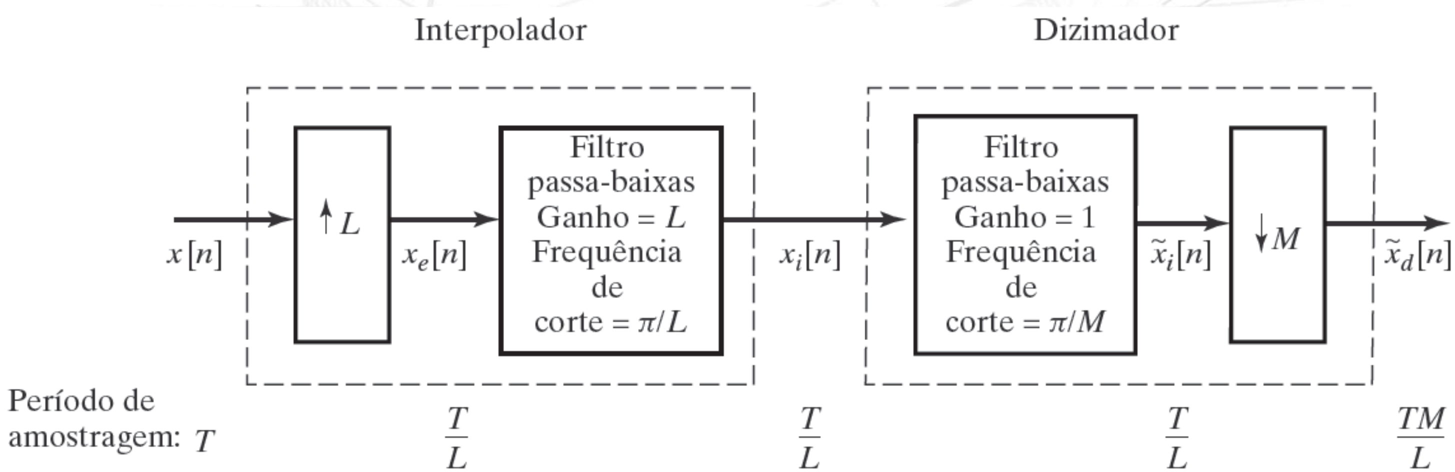
$$x_i[n] = x[n/L] = x_c(nT/L), \quad n = 0, \pm L, \pm 2L, \ldots .$$

- Sistema genérico para aumento da taxa de amostragem por *L*.



Mudança da taxa de amostragem por um fator não inteiro

- Sistema para mudar a taxa de amostragem por um fator não inteiro.



Exemplo

resample

Exemplo

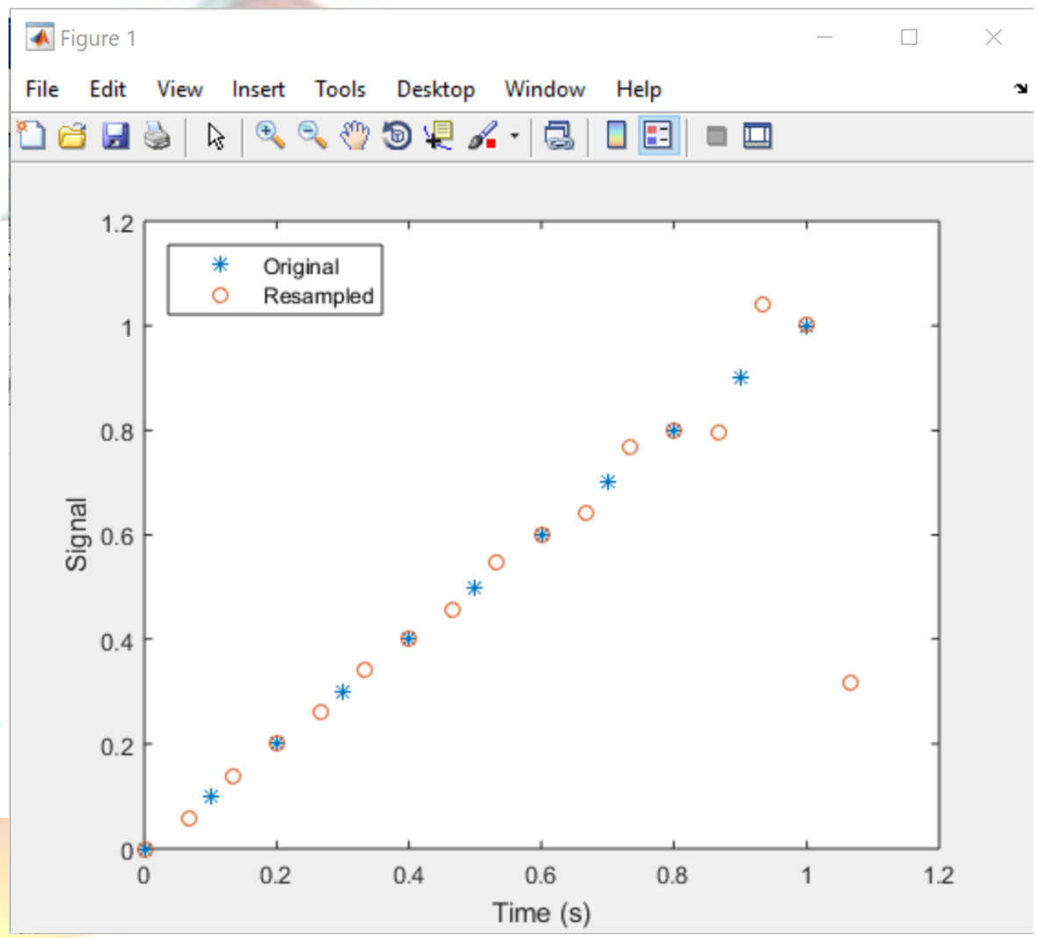
resample

```
fs = 10;
t1 = 0:1/fs:1;
x = t1;
y = resample(x,3,2);
t2 = (0:(length(y)-1))*2/(3*fs);

plot(t1,x,'*',t2,y,'o')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Signal')
legend('Original','Resampled', ...
    'Location','NorthWest')
```

Exemplo

resample

```
fs = 10;
t1 = 0:1/fs:1;
x = t1;
y = resample(x,3,2);
t2 = (0:(length(y)-1))*2/(3*fs);

plot(t1,x,'*',t2,y,'o')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Signal')
legend('Original','Resampled', ...
    'Location','NorthWest')
```



Exemplo

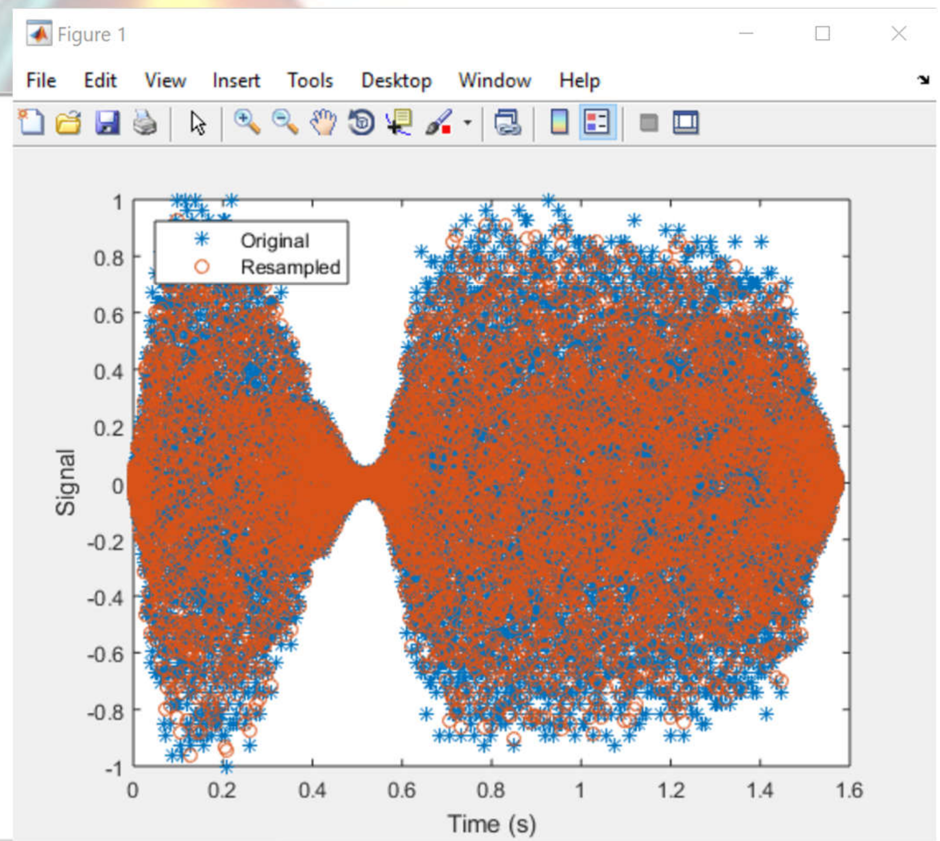
resample

```
load train.mat;
sound(y,Fs)
y=y';
[m,n]=size(y);
t1 = 0:1/Fs:(n-1)/Fs;
p=1;
q=2;
y2=resample(y,p,q);
t2 = (0:(length(y2)-1))*q/(p*Fs);

plot(t1,y,'*'); hold on; plot (t2,y2,'o')

xlabel('Time (s)')
ylabel('Signal')
legend('Original','Resampled', ...
    'Location','NorthWest')
```

Exemplo

resample

```
load train.mat;
sound(y,Fs)
y=y';
[m,n]=size(y);
t1 = 0:1/Fs:(n-1)/Fs;
p=1;
q=2;
y2=resample(y,p,q);
t2 = (0:(length(y2)-1))*q/(p*Fs);

plot(t1,y,'*'); hold on; plot (t2,y2,'o')

xlabel('Time (s)')
ylabel('Signal')
legend('Original','Resampled', ...
    'Location','NorthWest')
```



Exemplo

resample

```
load train.mat;
sound(y,Fs)
y=y';
[m,n]=size(y);
t1 = 0:1/Fs:(n-1)/Fs;
p=1;
q=2;
y2=resample(y,p,q);
t2 = (0:(length(y2)-1))*q/(p*Fs);

plot(t1,y,'*'); hold on; plot (t2,y2,'o')

xlabel('Time (s)')
ylabel('Signal')
legend('Original','Resampled', ...
    'Location','NorthWest')
```