TP 547- Princípios de Simulação de Sistemas de Comunicação

Prof. Samuel Baraldi Mafra

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

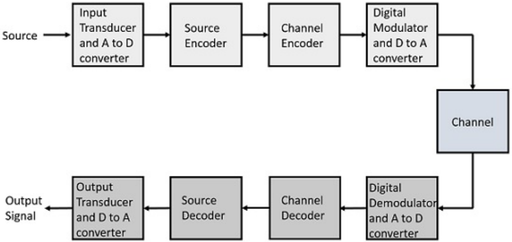
Conteúdos

- Amostragem e quantização;
- Modelos de simulação para sinais e sistemas passa-banda;
- Modelagem e simulação de não-linearidades
- Aplicações de simulação de sistemas contínuos

Amostragem e Quantização
Cap. 3 do livro "Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications" na pasta da disciplina

Sistemas de Comunicações Digitais:

- Sistema digital: uma sequência de símbolos pertencentes a um conjunto finito de símbolos para representar a fonte de informação.



Basic Elements of a Digital Communication System

Sistemas de Comunicações Digitais:

- Redes sem fio (802.11 a/b/g/n)
- Telefonia Celular (GSM, 3G)
- Satélite (TV, Rádio, Dados, DVB-S)
- Redes sem fio fixas (802.16, Wimax)
- Radiodifusão de TV digital (ATSC, DVB-T, ISDB-T)
- Ethernet (10M/100M/1G/10G)
- ADSL, VDSL
- Fibra óptica

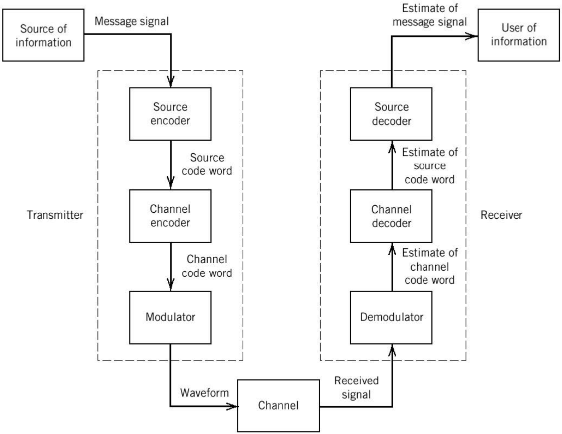
Por que usar comunicação digital:

- Aumento da demanda por transmissão de dados
- Grau de integração e confiabilidade dos circuitos eletrônicos para processamento digital de sinais
- Facilidade de codificação de fonte para compressão de dados
- Possibilidade de codificação de canal
- Segurança
- Facilidade de lidar com o compromisso largura de banda-potência para otimizar o uso destes recursos
- Padronização

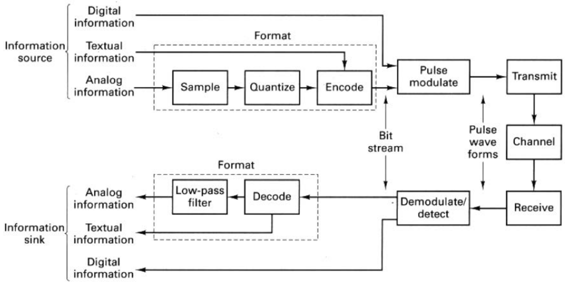
Características desejadas:

- Baixa taxa de erro de bits (BER)
- Operar com baixa relação sinal ruído (SNR)
- Bom desempenho em canais com desvanecimento (fading)
- Ocupar pouca largura de banda
- Fácil implementação
- Baixo custo

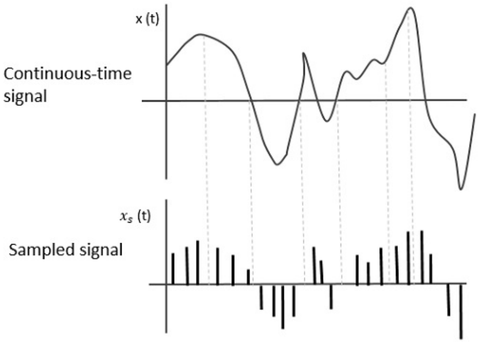
Sistema de Comunicação Digital:



Sistema de Comunicação Digital:



Amostragem de sinais:



Pares de Transformada de Fourier

Domínio do tempo	Domínio da transformada
$\delta(t)$	1
1	$\delta(f)$
$\delta(t-t_0)$	$e^{-j2\pi f t_0}$
$e^{j2\pi f_0 t}$	$\delta(f-f_0)$
$\cos(2\pi f_0 t)$	$\frac{1}{2}[\delta(f+f_0)+\delta(f-f_0)]$
$\text{sen}(2\pi f_0 t)$	$\frac{j}{2}[\delta(f+f_0)-\delta(f-f_0)]$
$\text{rect}(\frac{t}{\tau})$	$\tau\text{sinc}(f\tau)$
$2W\text{sinc}(2Wt)$	$\text{rect}(\frac{f}{2W})$
$e^{-\alpha t}u(t),\ \alpha>0$	$\frac{1}{\alpha+j2\pi f}$
$e^{-\alpha\|t\|},\ \alpha>0$	$\frac{2\alpha}{\alpha^2+(2\pi f)^2}$
$e^{-\pi t^2}$	$e^{-\pi f^2}$
$\text{sgn}(t)$	$\frac{1}{j\pi f}$
$u(t)$	$\frac{1}{2}\delta(f)+\frac{1}{j2\pi f}$
$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT_0)$	$\frac{1}{T_0}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(f-\frac{n}{T_0})$

Representação no domínio da frequência Python: Funções fft e fftfreq da biblioteca scipy.fftpack
Código:samplingfft.py

- O sinal analógico, denotado por $x(t)$, é contínuo em tempo e amplitude.
- O resultado da operação de amostragem é um sinal que ainda é contínuo em amplitude, mas discreto no tempo.
- Estes números, ou amostras, são iguais ao valor do sinal em instantes bem determinados (os instantes de amostragem)
- A forma de onda original, definida em tempo "contínuo", passa a ser representada em tempo "discreto" por amostras obtidas em instantes de amostragem espaçados convenientemente

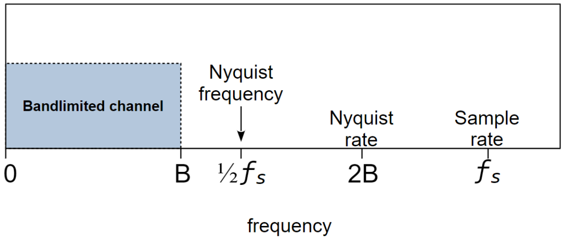
Em 1928, Henry Nyquist dos Laboratórios Bell, estabeleceu que a representação digital de um sinal analógico seria funcionalmente idêntico à forma de onda original se a taxa de amostragem fosse maior que duas vezes a maior frequência presente na forma de onda analógica.

Teorema da Amostragem

- 1.Um sinal limitado em banda a W Hz, com energia finita, é descrito de maneira completa especificando-se os valores do sinal em instantes de tempo separados por 1/2W segundos.
- 2.Um sinal limitado em banda a W Hz, com energia finita, pode ser completamente recuperado a partir do conhecimento de suas amostras, tomadas à taxa de 2W amostras por segundo.

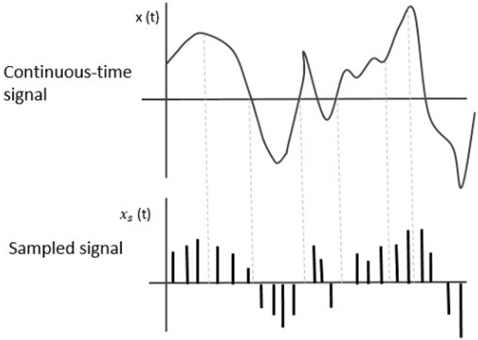
- Baseado no teorema de Nyquist, a voz humana com uma frequência máxima de quatro mil Hertz requer oito mil amostras por segundo, enquanto que um áudio com qualidade de CD com frequência máxima de vinte mil Hertz, requer quarenta mil amostras por segundo.

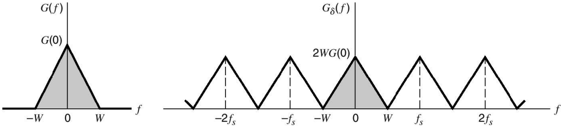
- A taxa de Nyquist é a frequência mínima na qual você pode amostrar um sinal sem nenhuma subamostragem. É o dobro da frequência mais alta em seu sinal de tempo contínuo.
- A frequência de Nyquist é a metade da taxa de amostragem. Quando a frequência mais alta (largura de banda) de um sinal é menor que a frequência de Nyquist do amostrador, a sequência de tempo discreto resultante é considerada livre da distorção conhecida como aliasing, e a taxa de amostragem correspondente é considerada acima do Taxa de Nyquist para esse sinal específico.



Amostragem instantânea (ou ideal)

- A função amostradora é um trem de impulsos de Dirac.
- As amostras são instantâneas (sem duração).
- O seu espectro é composto pelo espectro original mais réplicas idênticas.

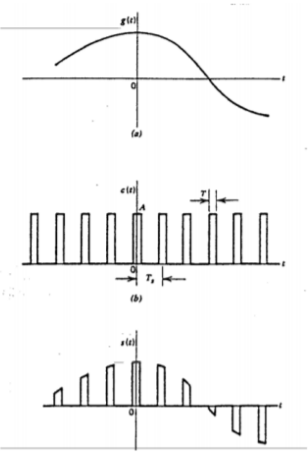

x (t)
Continuous-time signal
x_s (t)
Sampled signal


$G(f)$
$G(0)$
$-W$
0
W
f
$G_\delta(f)$
$2WG(0)$
$-2f_s$
$-f_s$
$-W$
0
W
f_s
$2f_s$
f

(a) (b)

Amostragem natural

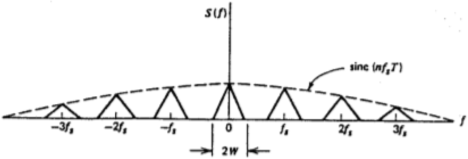
- A função amostradora é um trem de impulsos com uma certa largura.
- Cada amostra, de duração não nula, toma a forma da função amostrada.
- O espectro é composto pelo espectro original mais réplicas cuja amplitude diminui com seno cardinal.



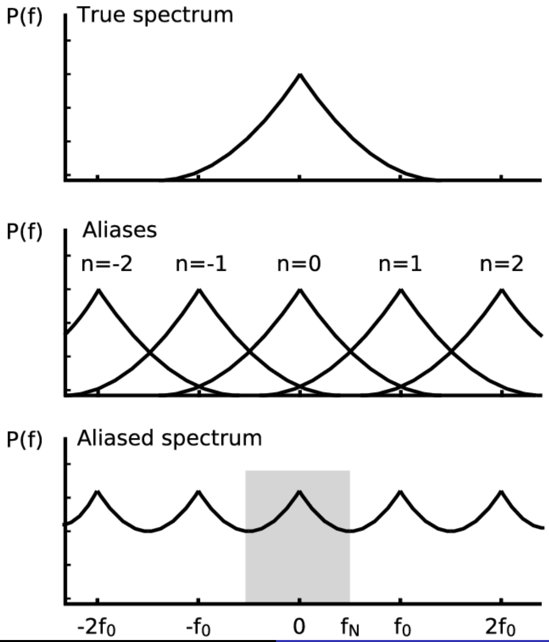
Sinal original

Sinal amostrador
(trem de impulsos
rectangulares)

Sinal amostrado



Aliasing



P(f)
True spectrum
P(f)
Aliases
n=-2
n=-1
n=0
n=1
n=2
P(f)
Aliased spectrum
$-2f_0$
$-f_0$
0
f_N
f_0
$2f_0$

Simulação de diferentes taxas de amostragem
Códigos: sampling.py, sampling2.py e subnyquist.py

- Upsampling é o processo de inserir amostras com valor zero entre as amostras originais de um sinal para aumentar a taxa de amostragem. Uma maneira de realizar o upsampling por uma razão inteira de 1: D é interpor D-1 amostras zero entre cada par das amostras de entrada do sinal. Isso faz com que o espectro do sinal original se repita em múltiplos da taxa de amostragem original.
- O processo de upsampling não altera o conteúdo do sinal de entrada, e apenas introduz a escala do eixo do tempo por um fator D. Consequentemente, a operação de upsampling é invertível, o que significa que é possível recuperar o sinal de entrada a partir de amostras da saída exatamente.
- Para remover ou pelo menos atenuar os espectros de imagem indesejados, um filtro passa-baixo deve ser colocado imediatamente após o upsampling. No domínio do tempo, o efeito é que as amostras de valor zero introduzidas pelo upsampler são preenchidas com valores interpolados.

Aplicações:

- Existem muitas aplicações em que o sinal de uma determinada taxa de amostragem precisa ser convertido em um sinal equivalente com uma taxa de amostragem diferente. Os principais motivos podem ser para aumentar a eficiência ou simplesmente para combinar sinais digitais que têm taxas diferentes.
- Ao trabalhar com imagens digitais, o upsampling é usado para ampliar as dimensões físicas de uma imagem em um determinado dispositivo. Com o photoshop podemos aumentar as dimensões de uma imagem de 2" X 2" para 3" x 3" usando reamostragem. Como a imagem foi ampliada, o upsampling foi necessário para produzir os pixels adicionais. O número de pixels descrito no arquivo aumentou de 300 para 450, enquanto o tamanho do arquivo aumentou de 88K para 198K.

Aplicações:

- Em áudio, novas amostras podem ser estimadas em uma taxa mais alta do que a entrada, por exemplo, quando o áudio digital amostrado em 44,1 kHz é convertido para a taxa profissional de 48 kHz usada com vídeo.
- Em vídeo, o upsampling é necessário na upconversion espacial de 1280x720 HDTV para 1920X1080 HDTV: 1280 amostras em cada linha de entrada devem ser convertidas em 1920 amostras na saída, uma relação de upsampling 2: 3.

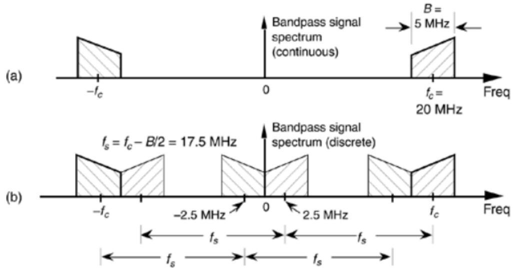
- Downsampling ou decimação é a técnica de redução da taxa de amostragem.
- Isso é feito simplesmente separando uma amostra a cada N. Há uma inevitável distorção do sinal.

Aplicações

- Para tornar um sinal de áudio digital menor, diminuindo sua taxa de amostragem ou tamanho de amostra (bits por amostra). A redução da resolução é feita para diminuir a taxa de bits ao transmitir em uma largura de banda limitada ou para converter para um formato de áudio mais limitado. Compare com upsample. Veja a amostragem.
- Para diminuir a profundidade de cor de uma imagem digital; por exemplo, de 24 bits a 16 bits por pixel. Compare com upsample. Veja a profundidade de cor e downconvert.

Amostragem de sinais passa-banda
Para sinais passa-banda é possível fazer a amostragem em uma frequencia menor que a taxa de Nyquist.

$$\frac{2f_H}{n} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{n-1}, \text{ for any integer } n \text{ satisfying: } 1 \leq n \leq \left\lfloor \frac{f_H}{f_H - f_L} \right\rfloor$$



Artigo: The theory of bandpass sampling na pasta da disciplina.
Recomendo ler para mais detalhes.

Exemplo

Nos Estados Unidos, rádio FM opera na faixa de frequência de f_L= 88 MHz a f_H = 108 MHz. Calcule o intervalo da frequência de amostragem f_s.