

Formatação e Modulação em Banda Básica

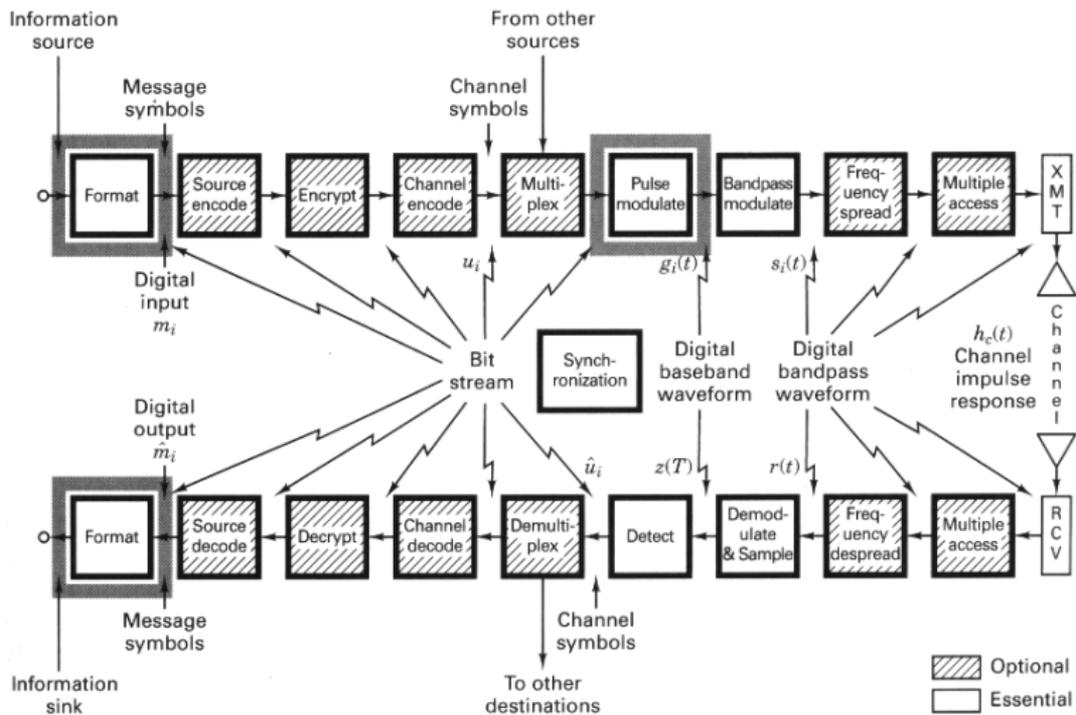
Edmar José do Nascimento
(Tópicos Avançados em Engenharia Elétrica I)
<http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento>

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Colegiado de Engenharia Elétrica

Roteiro

- 1 Formatação de Dados Textuais
- 2 Formatação de Informação Analógica
 - Amostragem
 - Aliasing
 - Sobre-amostragem
- 3 PCM
- 4 Transmissão em Banda Básica

Introdução



Introdução

- A etapa inicial e essencial de qualquer sistema de comunicação digital é a **formatação (formatting)**
- A formatação assegura que a mensagem seja compatível com o processamento digital
- A formatação engloba as seguintes funções:
 - Codificação de caracteres
 - Amostragem
 - Quantização
 - PCM - *Pulse Code Modulation*
- Após a formatação, a etapa conhecida como **modulação de pulso** realiza o mapeamento dos dados digitais para formas de onda digitais

Introdução

Formatting

- Character coding
- Sampling
- Quantization
- Pulse code modulation (PCM)

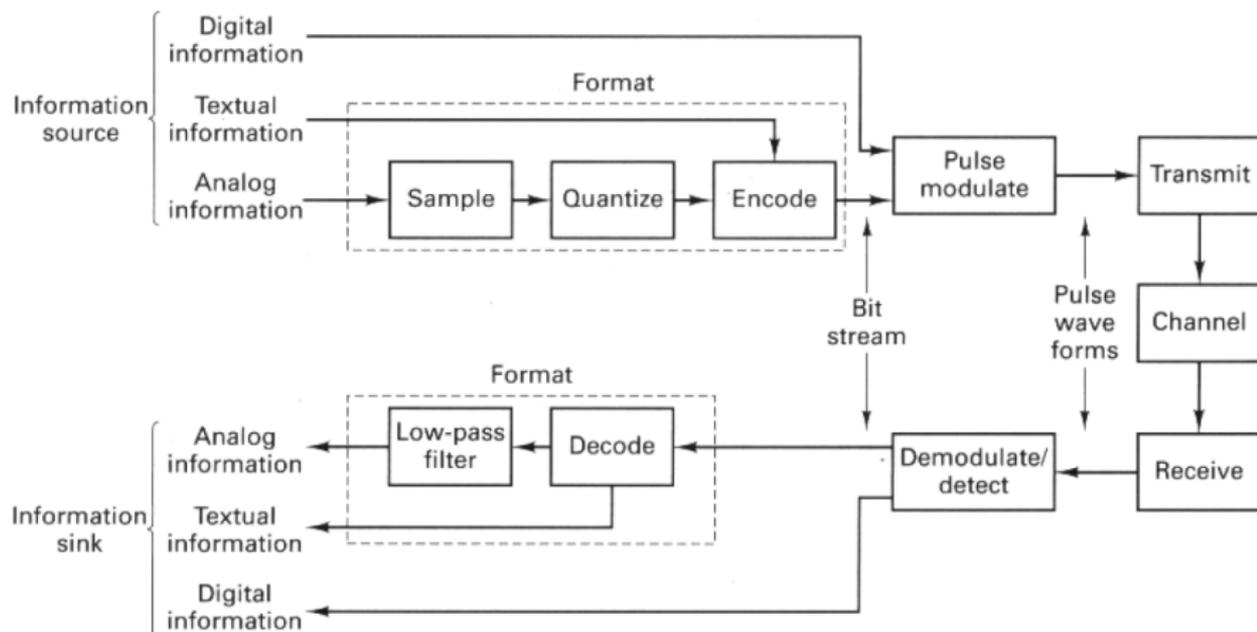
Source Coding

- Predictive coding
- Block coding
- Variable length coding
- Synthesis/analysis coding
- Lossless compression
- Lossy compression

Baseband Signaling

- PCM waveforms (line codes)
- Nonreturn-to-zero (NRZ)
- Return-to-zero (RZ)
- Phase encoded
- Multilevel binary
- M*-ary pulse modulation
- PAM, PPM, PDM

Visão Geral de um Sistema em Banda Básica



Codificação de Caracteres

- Se os dados a serem transmitidos consistem em texto alfanumérico, vários formatos de codificação de caracteres podem ser usados
 - ASCII - American Standard Code for Information Interchange
 - EBCDIC - Extended Binary Coded Decimal Interchange Code
 - Unicode
- Usando o código ASCII de 7 bits, a letra "a" é codificada na seqüência binária "1100001"
- Na transmissão serial, o primeiro bit a ser transmitido é o bit menos significativo

Código ASCII de 7 bits

Bits				5	0	1	0	1	0	1	0	1
				6	0	0	1	1	0	0	1	1
1	2	3	4	7	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	'	p	
1	0	0	0	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q	
0	1	0	0	STX	DC2	"	2	B	R	b	r	
1	1	0	0	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s	
0	0	1	0	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t	
1	0	1	0	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u	
0	1	1	0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v	
1	1	1	0	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w	
0	0	0	1	BS	CAN	(	8	H	X	h	x	
1	0	0	1	HT	EM	)	9	I	Y	i	y	
0	1	0	1	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z	
1	1	0	1	VT	ESC	+	;	K	[	k	{	
0	0	1	1	FF	FS	,	<	L	\	l	|	
1	0	1	1	CR	GS	-	=	M	]	m	}	
0	1	1	1	SO	RS	.	>	N	^	n	~	
1	1	1	1	SI	US	/	?	O	-	o	DEL	

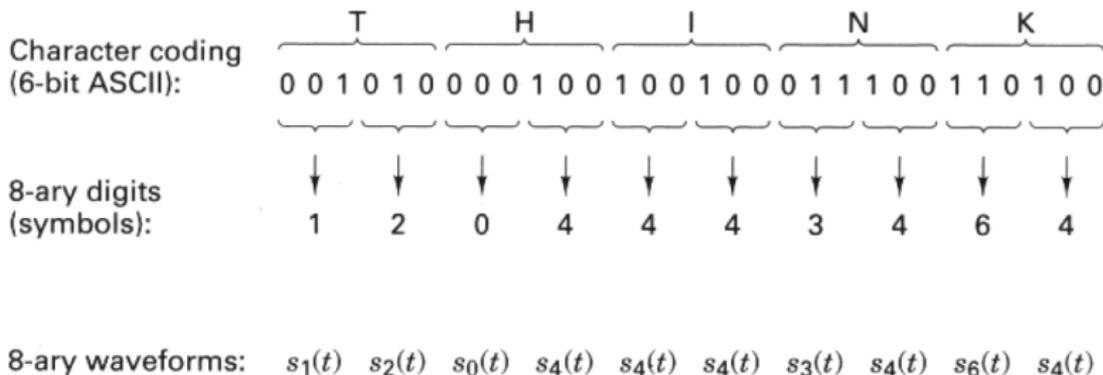
Código EBCDIC

Bits				5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
				6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
				7	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1
				8	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
1	2	3	4																		
0	0	0	0	NUL	SOH	STX	ETX	PF	HT	LC	DEL			SMM	VT	FF	CR	SO	SI		
0	0	0	1	DLE	DC1	DC2	DC3	RES	NL	BS	IL	CAN	EM	CC		IFS	IGS	IRS	IUS		
0	0	1	0	DS	SOS	FS		BYP	LF	EOB	PRE			SM			ENQ	ACK	BEL		
0	0	1	1			SYN		PN	RS	US	EOT					DC4	NAK		SUB		
0	1	0	0	SP										€		<	(+	!		
0	1	0	1	&										!	\$	*)	;	¬		
0	1	1	0	-	/									,	%	_	>	?			
0	1	1	1											:	#	@	'	=	"		
1	0	0	0		a	b	c	d	e	f	g	h	i								
1	0	0	1		j	k	l	m	n	o	p	q	r						.		
1	0	1	0			s	t	u	v	w	x	y	z								
1	0	1	1																		
1	1	0	0		A	B	C	D	E	F	G	H	I								
1	1	0	1		J	K	L	M	N	O	P	Q	R								
1	1	1	0			S	T	U	V	W	X	Y	Z								
1	1	1	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9								

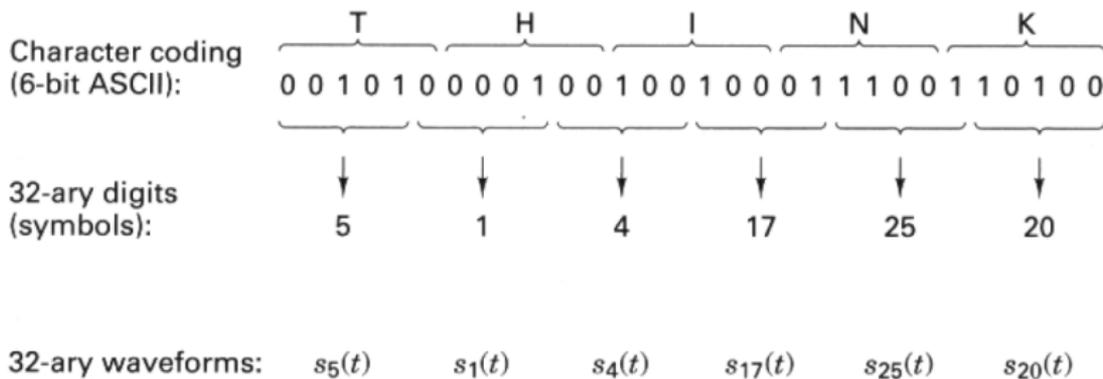
Codificação de Caracteres

- O processo de codificação de caracteres resulta em uma cadeia de bits (*bit stream*)
- A cadeia de bits pode ainda ser particionada em grupos de k bits para formar novos dígitos ou símbolos
- Um símbolo pertence a um alfabeto de tamanho $M = 2^k$
 - Quando $k = 1$, $M = 2$, o alfabeto é denominado de binário
 - Em geral, denomina-se de alfabeto M-ário
- Cada símbolo está associado a uma forma de onda para transmissão
- Quanto maior o tamanho do alfabeto, mais bits são representados por um símbolo (forma de onda)

Codificação de Caracteres

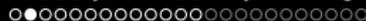


Codificação de Caracteres



Roteiro

- 1 Formatação de Dados Textuais
- 2 Formatação de Informação Analógica
 - Amostragem
 - Aliasing
 - Sobre-amostragem
- 3 PCM
- 4 Transmissão em Banda Básica



Teorema da Amostragem

- A informação analógica não é compatível com o processamento digital
- A adequação da forma de onda analógica ao processamento digital se inicia com a amostragem
- A saída do processo de amostragem é uma seqüência de pulsos com amplitudes proporcionais a alguma característica do sinal analógico (amplitude)
 - Pulse Amplitude Modulation (PAM)
 - Pode ser feita através da operação "amostra e segura" (*sample-and-hold*)

Teorema da Amostragem

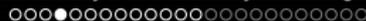
- No teorema da amostragem, estabelece-se que um sinal limitado em banda sem componentes espectrais acima de f_m Hertz pode ser unicamente determinado através de suas amostras obtidas em intervalos uniformes de

$$T_s \leq \frac{1}{2f_m} s$$

- Este critério é conhecido como critério de Nyquist
- Em termos da frequência de amostragem f_s , o critério de Nyquist estabelece que

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_m$$

- A frequência $f_s = 2f_m$ é denominada de taxa de Nyquist



Teorema da Amostragem

- O processo de amostragem pode ser feito de várias maneiras
 - Amostragem com impulsos
 - Amostragem natural
 - *Sample-and-hold*
- A amostragem com impulsos é um método ideal e de utilidade teórica
- Neste método, a amostragem de $x(t)$ é representada pelo produto de $x(t)$ por um trem de impulsos $x_\delta(t)$ definido por

$$x_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$

Amostragem com Impulsos

- Aplicando as propriedades do impulso, o sinal amostrado $x_s(t)$ pode ser escrito como

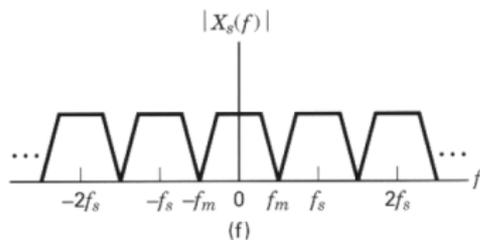
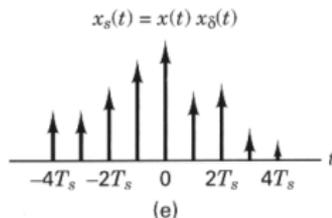
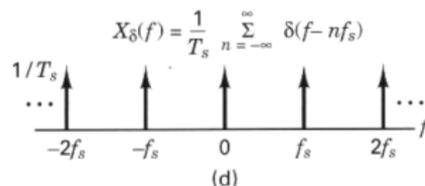
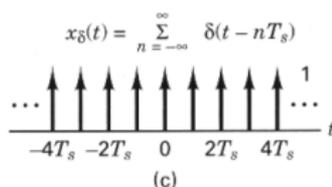
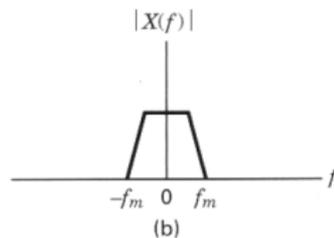
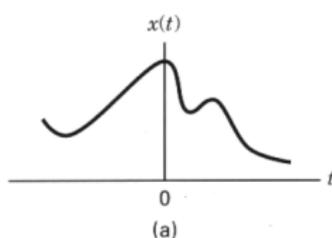
$$\begin{aligned}x_s(t) &= x(t)x_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - nT_s) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s)\end{aligned}$$

- No domínio da frequência

$$\begin{aligned}X_\delta(f) &= \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \\ X_s(f) &= X(f) * X_\delta(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s)\end{aligned}$$



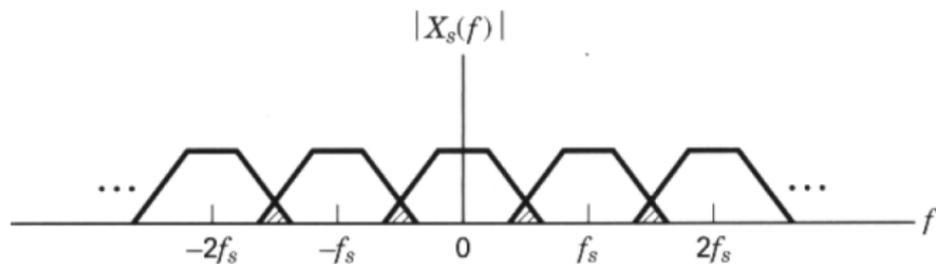
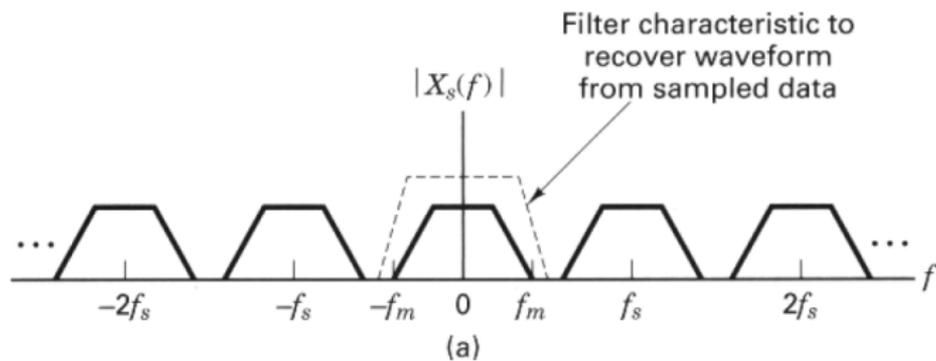
Amostragem com Impulsos

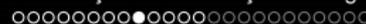


Amostragem com Impulsos

- Em relação ao espectro do sinal amostrado $X_s(f)$ observa-se que:
 - O espectro se repete periodicamente a cada f_s Hertz
 - O espectro é multiplicado por um valor constante de $1/T_s$
 - Com $f_s \geq 2f_m$, as réplicas do espectro não se sobrepõem e o sinal analógico pode ser recuperado com o uso de um filtro passa-baixas
 - Escolhendo-se $f_s > 2f_m$, a operação de filtragem é facilitada
 - Se $f_s < 2f_m$ (subamostragem), as réplicas se sobrepõem resultando na perda de parte da informação (*aliasing*)

Amostragem com Impulsos





Amostragem Natural

- A amostragem com impulsos é um modelo apenas teórico
- Um modelo mais próximo do real é obtido considerando-se um trem de pulsos $x_p(t)$ de largura T e amplitude $1/T$
- O sinal amostrado é dado por

$$x_s(t) = x(t)x_p(t)$$

- Como o sinal $x_p(t)$ é periódico, a sua representação no domínio da frequência pode ser feita em termos da série exponencial de Fourier, ou seja:

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi n f_s t}, \quad c_n = \frac{1}{T_s} \text{sinc}\left(\frac{nT}{T_s}\right)$$

Amostragem Natural

- Essas expressões resultam em

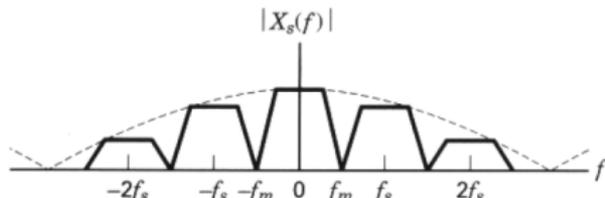
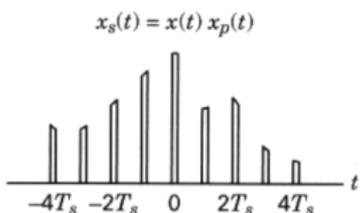
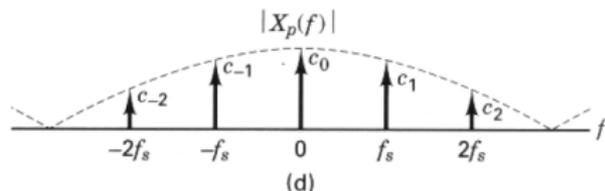
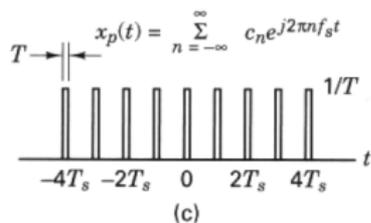
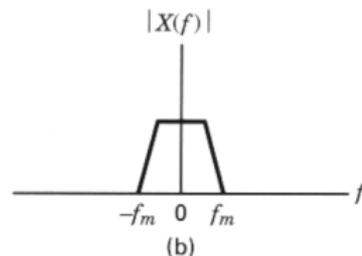
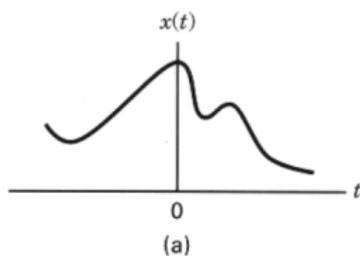
$$x_s(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi n f_s t}$$

$$X_s(f) = \mathcal{F}\left\{x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi n f_s t}\right\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \mathcal{F}\{x(t) e^{j2\pi n f_s t}\}$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n X(f - n f_s)$$

- Observa-se que as réplicas do espectro são agora multiplicadas pelos coeficientes c_n

Amostragem Natural



Sample and Hold

- O método *sample and hold* é o mais simples de ser implementado
- Nesse método, o valor da amostra atual é mantido constante até o momento da amostra seguinte
- Matematicamente, a seqüência amostrada pode ser representada pela convolução do trem de pulsos amostrado $x(t)x_\delta(t)$ por um pulso retangular $p(t)$ de amplitude unitária e largura T_s , ou seja:

$$x_s(t) = p(t) * [x(t)x_\delta(t)] = p(t) * \left[x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \right]$$

Sample and Hold

- No domínio da frequência, tem-se:

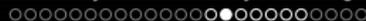
$$\begin{aligned}
 X_s(f) &= P(f) \mathcal{F} \left\{ x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \right\} \\
 &= P(f) \left\{ X(f) * \left[\frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \right] \right\} \\
 &= P(f) \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s)
 \end{aligned}$$

- $P(f)$ é da forma $T_s \text{sinc}(fT_s)$, de modo que as componentes de mais alta frequência de $X_s(f)$ são mais atenuadas
- O efeito do ganho não uniforme dado por $P(f)$ pode ser compensado aplicando-se $P^{-1}(f)$ após a filtragem



Roteiro

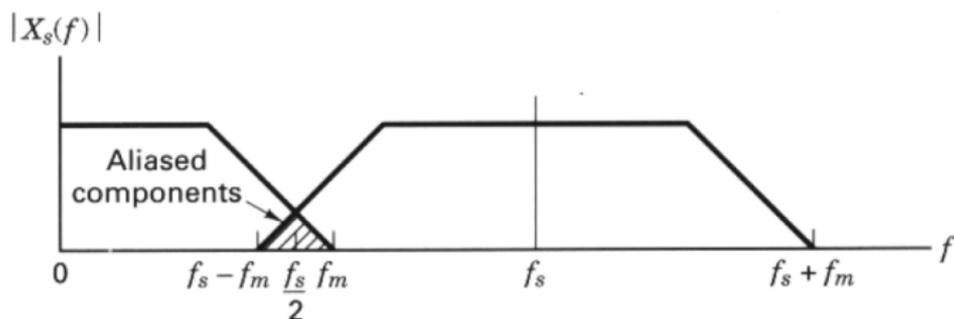
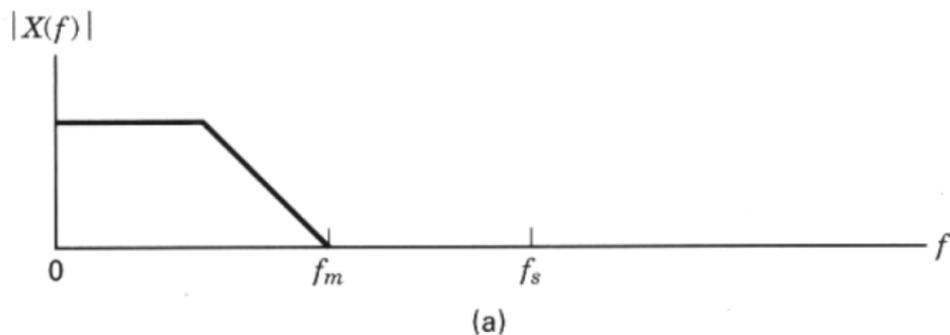
- 1 Formatação de Dados Textuais
- 2 Formatação de Informação Analógica
 - Amostragem
 - **Aliasing**
 - Sobre-amostragem
- 3 PCM
- 4 Transmissão em Banda Básica



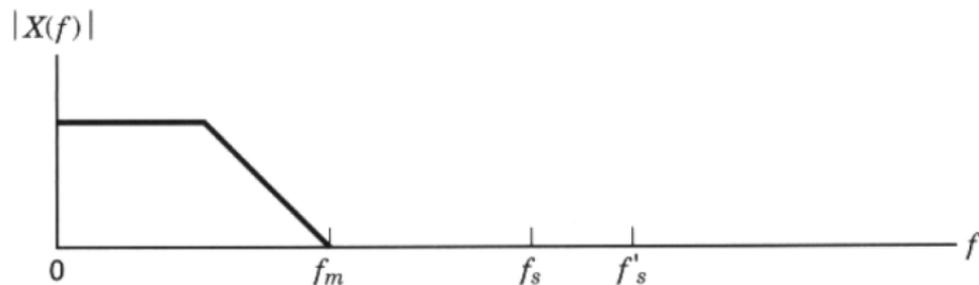
Aliasing

- O fenômeno de aliasing surge com a sobreposição das réplicas do espectro do sinal amostrado
- As componentes do espectro entre $f_s - f_m$ e f_m são prejudicadas
- Várias técnicas podem ser usadas para lidar com esse problema
 - Aumentar a frequência de amostragem
 - Eliminar uma porção do espectro antes da amostragem (filtro antialiasing)
 - Eliminar a porção comprometida do espectro do sinal amostrado (filtro antialiasing)

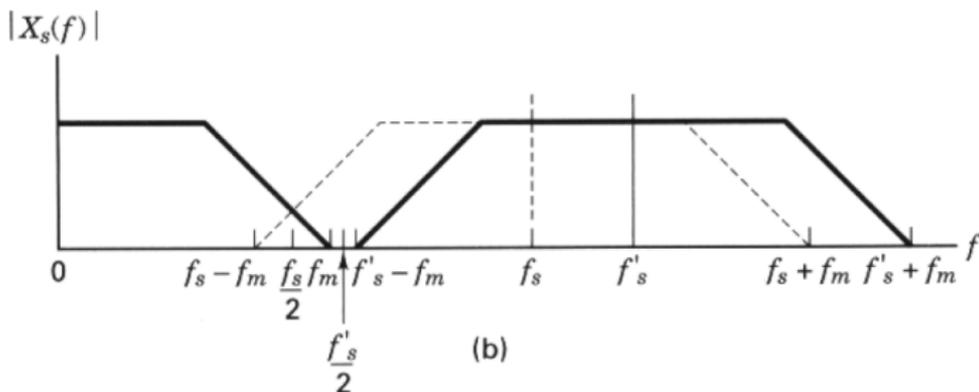
Aliasing no Domínio da Freqüência



Aliasing no Domínio da Freqüência

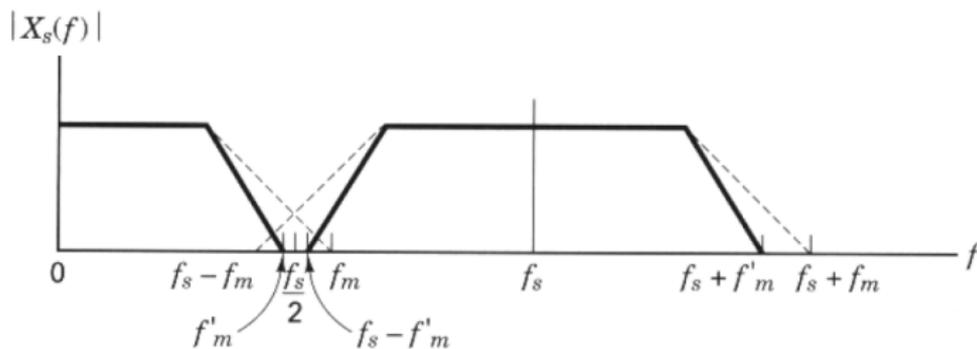
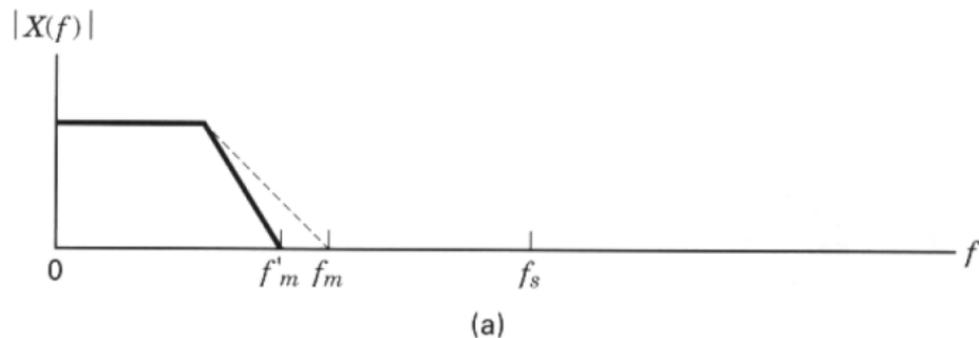


(a)

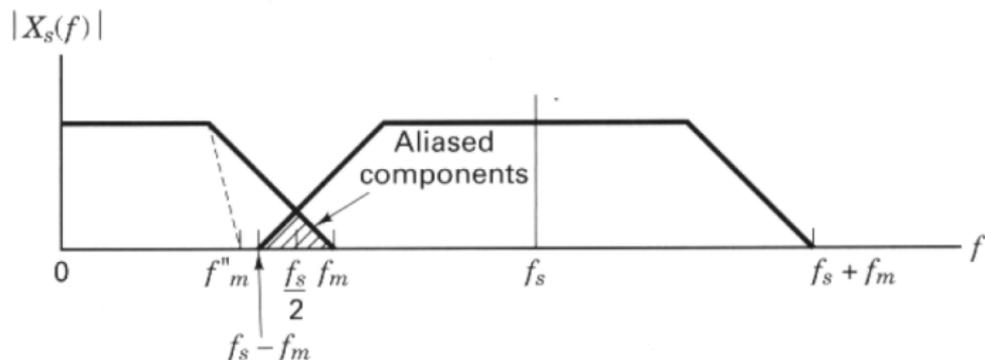
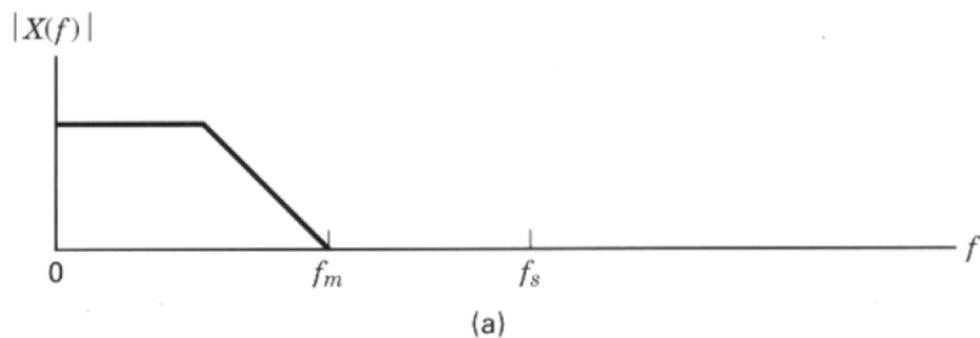


(b)

Pré-filtragem



Pós-filtragem





Considerações Práticas

- Os filtro realizáveis requerem uma largura de banda não nula para a transição entre a banda de passagem e a região com a atenuação requerida
 - Essa banda é conhecida como largura de banda de transição
- Deseja-se a largura de banda de transição seja a menor possível
 - Com isso, aumenta-se a complexidade e o custo do filtro
- É necessário então um compromisso entre o custo da complexidade do filtro (banda de transição) e o custo de uma maior taxa de amostragem (armazenamento)
 - Na prática, a largura de banda de transição se situa entre 10 e 20% da largura de banda do sinal
 - $f_s \geq 2,2f_m$

Roteiro

- 1 Formatação de Dados Textuais
- 2 Formatação de Informação Analógica
 - Amostragem
 - Aliasing
 - **Sobre-amostragem**
- 3 PCM
- 4 Transmissão em Banda Básica

Sobre-amostragem

- A sobre-amostragem consiste em realizar a amostragem em uma taxa bastante superior à taxa mínima de Nyquist
- Na conversão analógico-digital, quando não há sobre-amostragem, o processo é o seguinte:
 - A banda do sinal analógico é limitada através de um filtro analógico de alto desempenho
 - O sinal filtrado é amostrado em uma taxa próxima à taxa de Nyquist
 - As amostras são processadas por um conversor analógico-digital que mapeia as amostras para níveis discretos de tensão



Sobre-amostragem

- Quando há sobre-amostragem, o processo é o seguinte:
 - A banda do sinal analógico é limitada através de um filtro analógico de baixo desempenho (mais barato)
 - O sinal pré-filtrado é amostrado em uma taxa bastante superior à taxa de Nyquist
 - As amostras são processadas por um conversor analógico-digital que mapeia as amostras para níveis discretos de tensão
 - As amostras digitais são processadas por um filtro digital de alto desempenho a fim de reduzir a largura de banda das amostras
 - A taxa de amostragem na saída do filtro digital é reduzida em proporção à redução da largura de banda obtida pelo filtro

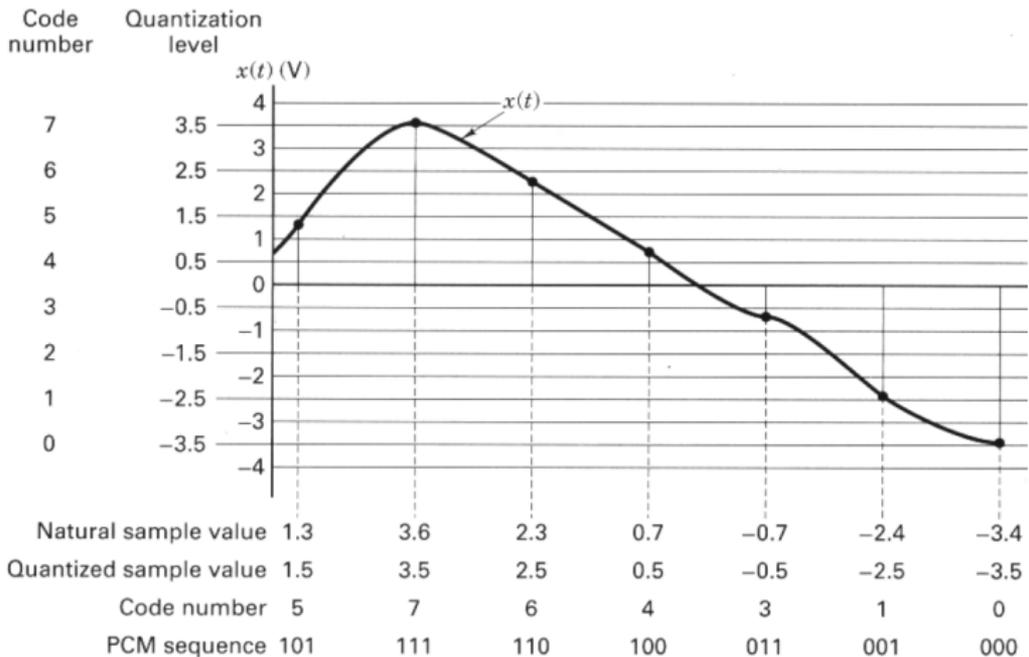
Sobre-amostragem

- Um exemplo de aplicação desses conceitos pode ser visto na digitalização de som com qualidade de CD
- Nessa aplicação, a banda considerada para o sinal analógico é de 20 kHz
- Quando a taxa de amostragem é de 44,1 kHz (não há sobre-amostragem), a largura de banda de transição de 4,1 kHz pode ser implementada com um filtro elíptico de 10^a ordem
- Com a sobre-amostragem, pode-se escolher uma taxa de 174,4 kHz com uma largura de banda de transição de 136,4 kHz implementada com um filtro elíptico de 4^a ordem
- Com o processamento digital, pode-se até reverter a distorção causada pela filtragem analógica

PCM

- Quando os sinais PAM são quantizados e codificados em uma palavra digital, denomina-se de PCM (Pulse Code Modulation) os sinais assim obtidos
- A faixa de amplitudes do sinal é dividida em L níveis correspondendo a I bits ($I = \log_2 L$)
- Para uma melhor fidelidade ao sinal analógico, pode-se aumentar o número de bits (níveis)
- Em uma transmissão em tempo real, os bits extras dessa melhoria na fidelidade devem ser encaixados no tempo de transmissão da amostra
 - Bits representados por pulsos de menor duração
 - Aumento na largura de banda de transmissão
- Quando não há restrições de tempo real, pode-se aumentar a fidelidade com o aumento do atraso

PCM



Fontes de Corrupção

- Vários fatores podem prejudicar a recuperação do sinal analógico a partir do sinal digital
- Os efeitos oriundos do processo de amostragem e quantização são os seguintes:
 - Ruído de quantização
 - Saturação do quantizador
 - Jitter (Variação no instante de amostragem) - efeito equivalente à modulação em frequência; pode ser controlado com referências de tempo estáveis
- O canal também pode ocasionar efeitos nocivos ao sinal digital
 - Ruído do canal
 - Interferência inter-simbólica

Ruído de Quantização

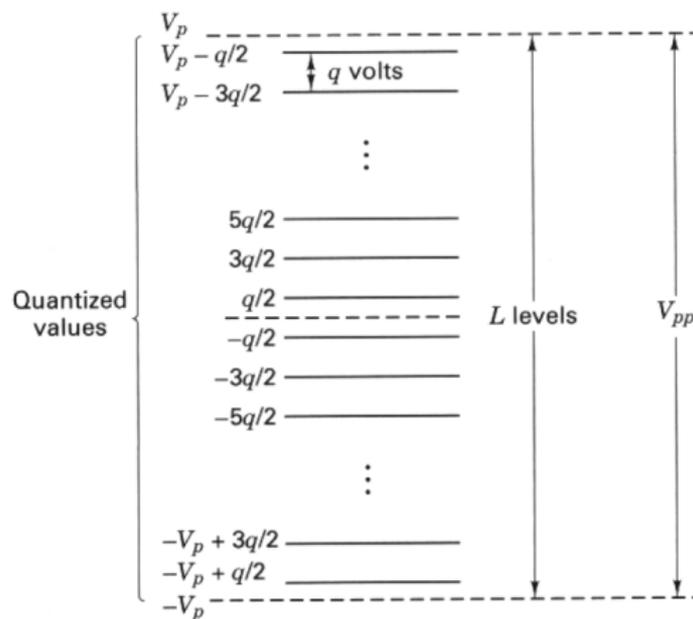
- Em um quantizador uniforme, o intervalo de quantização q é o mesmo para todos os L níveis
- O erro introduzido na quantização é de no máximo $q/2$
- Considerando-se que o erro de quantização e é uniformemente distribuído no intervalo $(-q/2, q/2)$, a variância do erro é

$$\sigma^2 = \int_{-q/2}^{q/2} e^2 p(e) de = \int_{-q/2}^{q/2} e^2 \frac{1}{q} de = \frac{q^2}{12}$$

- Sendo V_p a tensão de pico e $V_{pp} = V_p - (-V_p) = 2V_p$ a tensão de pico a pico, a potência de pico do sinal analógico normalizada é dada por

$$V_p^2 = \left(\frac{V_{pp}}{2} \right)^2 \approx \frac{L^2 q^2}{4}$$

Ruído de Quantização



Ruído de Quantização

- Como o sinal é de média nula, a variância de e representa a potência média do ruído de quantização
- Assim, a relação potência de pico - ruído de quantização é dada por

$$\left(\frac{S}{N}\right)_q = \frac{L^2 q^2 / 4}{q^2 / 12} = 3L^2$$

- Observa-se que quando se aumenta a quantidade de níveis de quantização, diminui-se o efeito do ruído

Quantização Não-uniforme

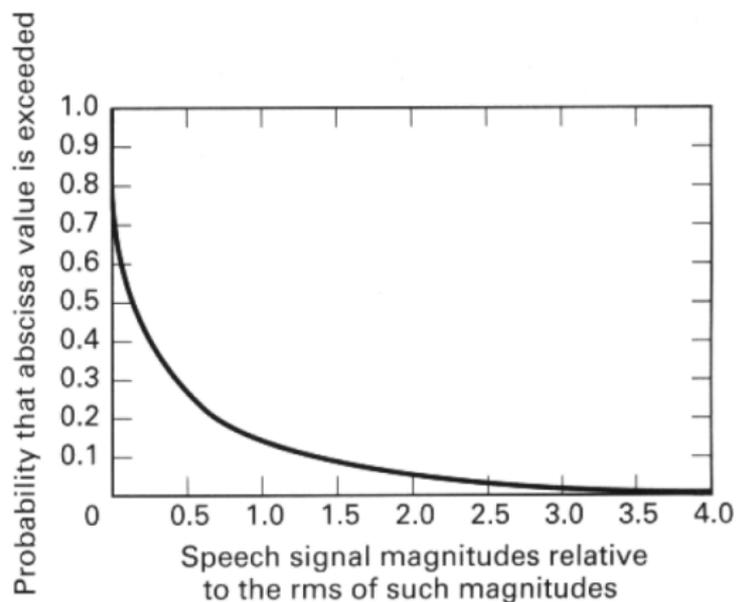
- A voz humana possui características estatísticas importantes que devem ser levadas em conta no processo de quantização
- Seja $x(t)$ um sinal de voz, o valor normalizado da amplitude de tensão em relação ao seu valor RMS é dado por

$$x(t)_{norm} = \frac{x(t)}{\sqrt{E\{X^2(t)\}}}$$

- Um gráfico de relevância é aquele que mostra a probabilidade de que $x(t)_{norm}$ exceda um determinado valor x
- No gráfico mostrado a seguir, os valores de x são as abscissas e na ordenada tem-se a

$$P(x(t)_{norm} > x) = P(x(t) > x\sqrt{E\{X^2(t)\}})$$

Estatísticas de Amplitude da Fala



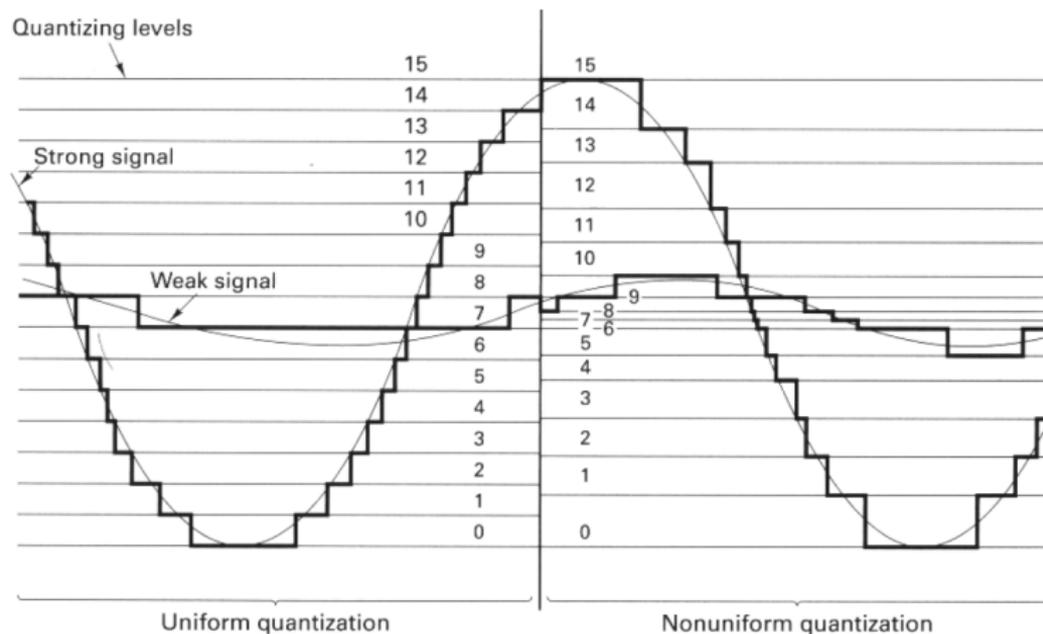
Quantização Não-uniforme

- A partir desse gráfico, pode-se observar que:
 - As baixas amplitudes da voz predominam (baixo volume)
 - Em 50% do tempo, a amplitude da tensão é menor do que um quarto da tensão RMS
 - As altas amplitudes são eventos raros
 - Em apenas 15% do tempo, a amplitude da tensão excede o valor RMS
- A consequência disso é que para a voz, a maioria dos intervalos de quantização não são usados quando se usa quantização uniforme
 - Somente os sinais fortes tem um bom aproveitamento dos intervalos de quantização
 - A relação sinal ruído (SNR) é pior para sinais fracos do que para sinais fortes

Quantização Não-uniforme

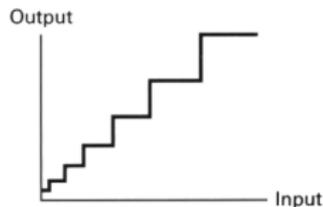
- Na quantização não-uniforme, a idéia é permitir uma quantização mais "fina" de sinais mais fracos e mais "grosseira" para sinais mais fortes
 - Quantização proporcional ao tamanho do sinal
- Com a quantização não-uniforme, pode-se conseguir uma SNR constante, independente do tamanho do sinal
 - Nos sinais de voz, a faixa dinâmica é de 40dB, ou seja, a relação entre a potência da amplitude mais forte e da mais fraca é de 10^4
 - Sendo assim, quando se utiliza quantização uniforme, a SNR pode ser 40dB inferior para sinais fracos
 - Por essa razão, em telefonia se utiliza um quantizador com compressor logarítmico

Quantização Não-uniforme

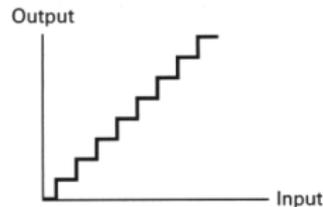
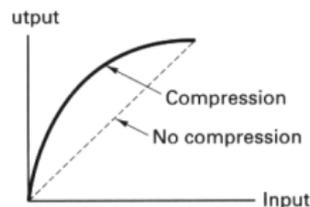


Quantização Não-uniforme

- A quantização não-uniforme pode ser realizada de duas formas:
 - Usando um quantizador não-uniforme
 - Usando uma curva característica de compressão seguida de um quantizador uniforme



(a)



Quantização Não-uniforme

- Os dois principais tipos de características de compressão são a lei μ e a lei A
- A lei μ é usada principalmente na América do Norte e a lei A na europa
- De acordo com a lei μ , a relação entre a entrada x e a saída y é dada pela expressão:

$$y = y_{max} \frac{\ln \left(1 + \frac{\mu|x|}{x_{max}} \right)}{\ln(1 + \mu)} \operatorname{sgn}(x)$$

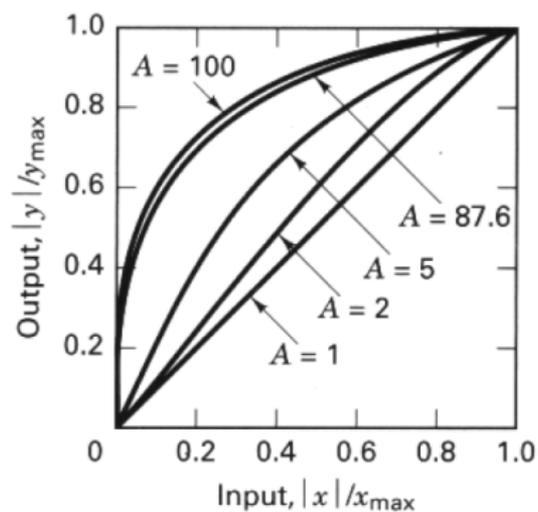
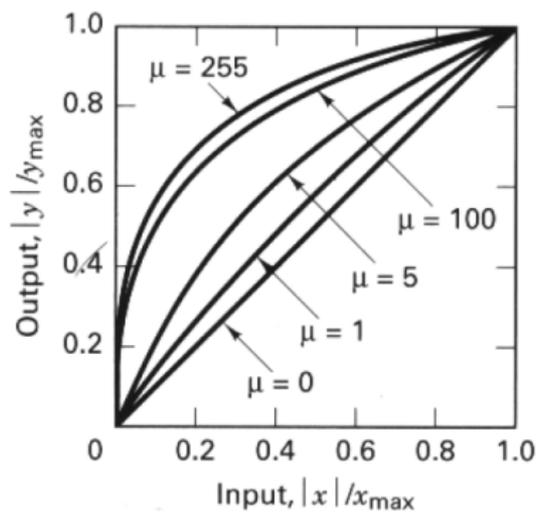
- Na América do Norte se utiliza o valor de μ igual a 255

Quantização Não-uniforme

- De acordo com a lei A , a relação entre a entrada x e a saída y é dada pela expressão:

$$y = \left\{ \begin{array}{ll} y_{max} \frac{A}{1+\ln A} \left(\frac{|x|}{x_{max}} \right) \operatorname{sgn}(x), & 0 < \frac{|x|}{x_{max}} \leq \frac{1}{A} \\ y_{max} \frac{1+\ln [A(|x|/x_{max})]}{1+\ln A} \operatorname{sgn}(x), & \frac{1}{A} < \frac{|x|}{x_{max}} < 1 \end{array} \right\}$$

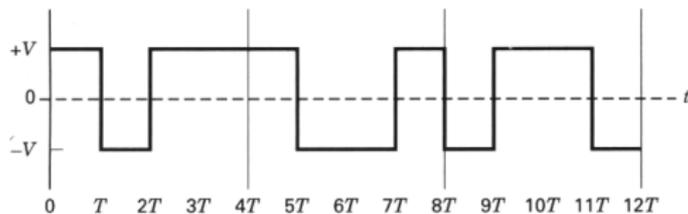
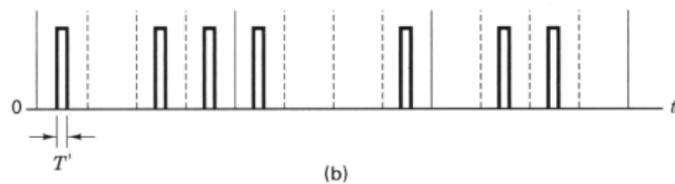
Lei μ e Lei A



Representação em Formas de Ondas

- A conversão de amostras de tensão para uma seqüência de dígitos é apenas uma abstração
- Para que os dígitos possam ser transmitidos através de um canal, eles precisam ser representados por formas de onda elétricas
- Na transmissão binária, cada "zero" e cada "um" são mapeados para uma forma de onda
- O pulso correspondendo ao zero ou ao um podem ocupar a totalidade do intervalo do bit ou apenas uma parte dele
 - A utilização do intervalo completo favorece a detecção pelo receptor

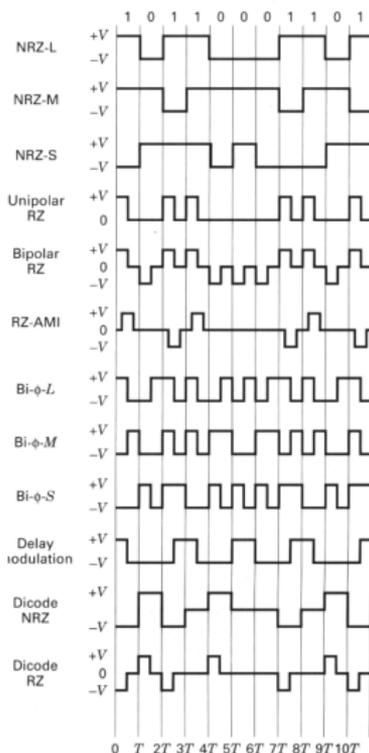
Representação em Formas de Ondas



Formas de Ondas PCM

- Quando a modulação de pulso é aplicada a um símbolo binário, a forma de onda resultante é chamada de **forma de onda PCM**
 - Em telefonia, essas formas de onda são chamadas também de **códigos de linha**
- Se a modulação de pulso é aplicada a um símbolo não binário, a forma de onda resultante é chamada de **forma de onda de modulação de pulso M-ária** (*M-ary pulse-modulation waveform*)
- As formas de onda PCM podem ser classificadas de quatro maneiras:
 - NRZ (Não retorno ao zero - *Nonreturn-to-zero*)
 - RZ (Retorno ao zero - *Return-to-zero*)
 - Codificada em fase - *Phase encoded*
 - Binária multi-nível - *Multilevel binary*

Formas de Ondas PCM



Formas de Ondas PCM

- Nas formas de onda NRZ, a amplitude se mantém no nível alto ou baixo durante todo o intervalo do bit
 - Para NRZ-L(*Level*), o bit 1 é representado por um nível de tensão e o bit 0 por outro nível de tensão
 - Para NRZ-M(*Mark*), o bit 1 é representado por uma transição de nível e o bit 0 pela ausência de transição
 - Para NRZ-S(*Space*), o bit 0 é representado por uma transição de nível e o bit 1 pela ausência de transição
- NRZ-M é usado principalmente na gravação de fitas magnéticas

Formas de Ondas PCM

- Nas formas de onda RZ, a amplitude cai para zero durante parte do intervalo do bit
 - Para RZ unipolar, o bit 1 é representado por um nível de tensão durante a metade do intervalo do bit e o bit 0 pelo nível nulo de tensão
 - Para RZ bipolar, tanto o bit 1 quanto o bit 0 são representados por níveis de tensão durante a metade do intervalo do bit
 - Para RZ-AMI (*Alternate mark inversion*), o bit 0 é representado pelo nível nulo de tensão e o bit 1 é representado por níveis de tensão alternados ($\pm V$) durante a metade do intervalo de bit
- RZ-AMI é usado em sistemas telefônicos

Formas de Ondas PCM

- As formas de onda codificadas em fase são usadas em sistemas de gravação magnéticos, em comunicações ópticas e em enlaces de satélite para telemetria
 - Para $bi - \phi - L$ (*bi-phase-level* ou codificação Manchester), o bit 1 é representado por um pulso de meia largura na primeira metade do intervalo do bit e o bit 0 é representado por um pulso de meia largura na segunda metade do intervalo do bit
 - Para $bi - \phi - M$ (*bi-phase-mark* uma transição ocorre sempre no início do intervalo do bit; o bit 1 é representado por uma segunda transição na metade do intervalo e no bit 0 não há uma segunda transição
 - Para $bi - \phi - S$ (*bi-phase-space* uma transição ocorre sempre no início do intervalo do bit; o bit 0 é representado por uma segunda transição na metade do intervalo e no bit 1 não há uma segunda transição

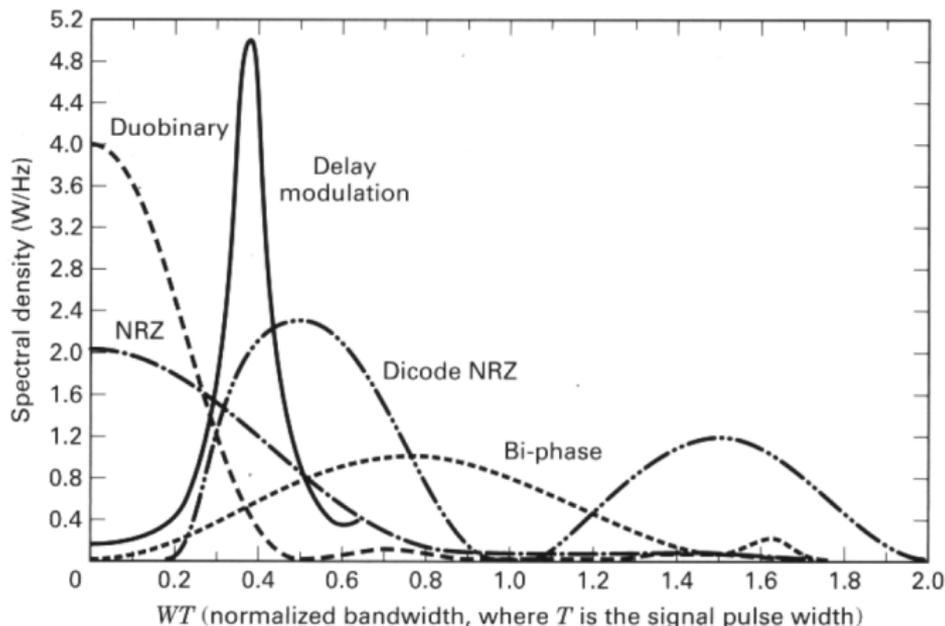
Formas de Ondas PCM

- Uma outra forma de onda codificada em fase é a codificação de Miller ou DM (*Delay Modulation*)
 - Para DM o bit 1 é representado por uma transição no ponto médio do intervalo do bit e o 0 é representado pela ausência de transição desde que ele não seja seguido por outro 0 (neste caso, a transição é feita após o primeiro 0)
- Na codificação binária multi-nível, são usados três níveis para representar os bits 0 e 1
- Além das codificações bipolar RZ e RZ-AMI, tem-se os seguintes formatos
 - Para Dicode NRZ, uma alternância entre bits é representada por uma troca de polaridades, enquanto que a ausência de alternância é representada pelo nível 0
 - Dicode RZ é semelhante à Dicode NRZ, sendo apenas os pulsos de meia duração

Escolha das Formas de Ondas PCM

- Dada a diversidade de formas de onda, a escolha é guiada por determinadas características, tais como:
 - Componente DC - Em algumas aplicações, é necessário eliminar a componente DC para fins de acoplamento (transformadores)
 - Relógio embutido - As características do código de linha podem ser usadas para fins de sincronização
 - Detecção de erros - Em esquemas como o *dicode*, a alternância das polaridades permite a detecção de erros
 - Largura de banda - Alguns esquemas permitem a transmissão de uma maior quantidade de dados por largura de banda
 - Imunidade ao ruído

Densidade Espectral de Formas de Ondas PCM



Densidade Espectral de Formas de Ondas PCM

- No gráfico anterior, a DEP é expressada em função da largura de banda normalizada WT
 - W é a largura de banda e T é a duração do símbolo
 - $WT = W/(1/T) = WR_S$ com unidades Hz/(pulso/s) ou Hz/(símbolo/s)
 - Um valor de WT menor que 1 significa que é necessário menos de 1 Hz para transmitir 1 símbolo/s, ou seja, a forma de onda é eficiente
- Pode-se observar que as sinalizações DM (Delay Modulation) e Dicode (Duobinário) são eficientes
- A DEP também permite analisar o conteúdo DC do sinal
 - Nesse caso, as sinalizações NRZ e Dicode (Duobinário) tem fortes componentes espectrais no nível DC

Tamanho da Palavra PCM

- Na escolha da quantidade de níveis de quantização L (l bits) pode-se colocar como parâmetro de projeto uma distorção especificada
- Seja $|e|$ a magnitude do erro de quantização e p uma fração da tensão pico-a-pico V_{pp} , relacionados da seguinte maneira

$$|e| \leq pV_{pp}$$

- O erro máximo é dado por

$$|e|_{max} = \frac{q}{2} = \frac{V_{pp}}{2L}$$

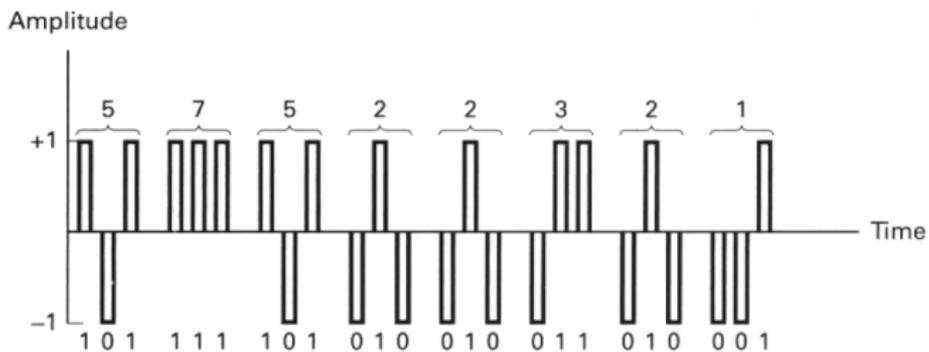
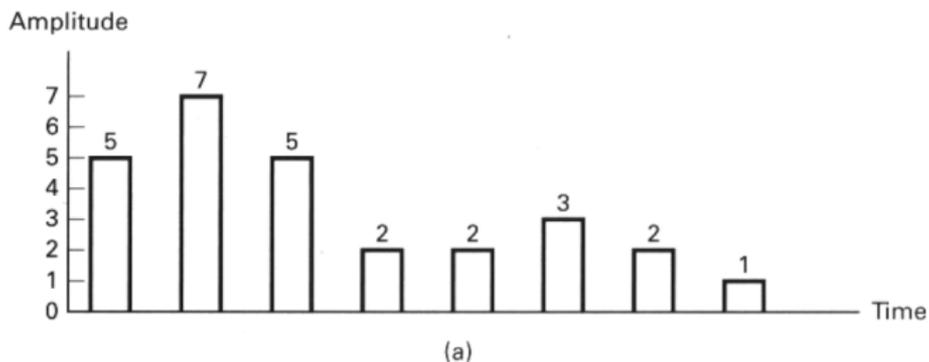
- Logo

$$\frac{V_{pp}}{2L} \leq pV_{pp} \implies 2^l = L \geq \frac{1}{2p} \implies l \geq \log_2 \frac{1}{2p} \text{ bits}$$

Formas de Onda M-árias

- Existem basicamente três formas de modular a informação em uma seqüência de pulsos
 - PAM (*Pulse Amplitude Modulation*)
 - PPM (*Pulse Position Modulation*)
 - PDM (*Pulse Duration Modulation*), também chamada de PWM
- Dentre essas formas de modulação de pulso, em comunicações tem-se interesse em PAM
- Quando os pulsos PAM são quantizados, resultando em conjunto de amostras pertencentes a um alfabeto M-ário, denomina-se de **modulação de pulso M-ária**
 - PCM é um caso especial quando $M = 2$

Formas de Onda M-árias



Formas de Onda M-árias

- A vantagem da modulação de pulso M-ária é a redução da largura de banda em relação à sinalização binária
- Se cada símbolo do alfabeto M-ário corresponde a k bits, a taxa de símbolos por segundo é reduzida para R/k
- A desvantagem desse tipo de sinalização é que ela requer mais energia por símbolo para que o desempenho na detecção seja o mesmo