

Codificação de Dados

Códigos de Transmissão e Modulações Digitais

FEUP/DEEC/CDRC I – 2002/03

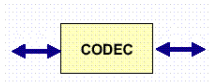
MPR/JAR

Representação de Dados

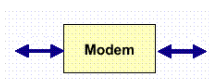
- » Dados digitais, sinal digital



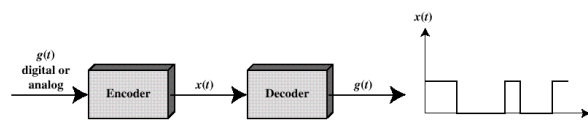
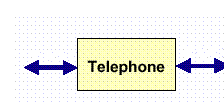
- » Dados analógicos, sinal digital



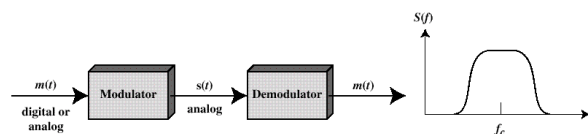
- » Dados digitais, sinal analógico



- » Dados analógicos, sinal analógico



(a) Encoding onto a digital signal



(b) Modulation onto an analog signal

Dados Digitais, Sinal Digital (Códigos de Transmissão)

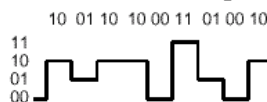
- ◆ Admitimos, sem perda de generalidade, que a informação digital é representada por um código binário, isto é, os dados a transmitir constituem uma sequência de símbolos de um alfabeto binário (0 e 1)
- ◆ Para transmissão num canal passa-baixo, os dados binários podem ser representados directamente por um sinal digital, isto é, por uma sequência de impulsos que se sucedem a uma cadência fixa (sincronizada por um relógio)

» No caso mais simples cada símbolo binário é representado por um sinal elementar que pode ter um de dois níveis (transmissão binária)

» É possível agrupar símbolos binários e representar grupos de símbolos binários (dibit, tritbit, etc.) por impulsos que podem ter um de L níveis ($L = 4, 8, \dots$). A frequência dos sinais elementares (*modulation rate*), expressa em *baud*, deixa de ser igual à frequência dos símbolos binários iniciais (*data rate*), expressa em *bit/s*, excepto no caso em que $L = 2$

$$DR = MR \log_2 L \quad DR = 1 / T_2 \quad L = 4 \quad DR = 2 MR$$

$$T_L = T_2 \log_2 L \quad MR = 1 / T_L \quad T_4 = 2 T_2$$



» É possível estabelecer outro tipo de relações entre os dados binários e a sequência de sinais elementares que os representam. Os Códigos de Transmissão exploram estas relações; um “símbolo” do código pode ser constituído pela combinação de um ou mais impulsos (sinais elementares)

Detecção e Interpretação dos Sinais

- » Os códigos de transmissão devem ser independentes da sequência de bits (transparência) e devem permitir descodificação unívoca (não ambígua)
- » O receptor tem de reconhecer os instantes de início e fim de cada impulso (sincronização) e discriminar o respectivo valor a partir do nível do sinal recebido, para poder reconstituir a sequência original de símbolos binários

Limitações à Detecção e Interpretação dos Sinais

- » Perda de informação temporal (sincronização) no receptor
 - O sinal de relógio do receptor deve estar sincronizado (em frequência e fase) com a sequência de impulsos recebidos; uma possibilidade consiste em embutir informação de sincronismo no sinal codificado
 - ISI provoca flutuações nos instantes de transição dos impulsos (*jitter* temporal ou de fase), enquanto que a ausência de transições no sinal provoca perda da referência temporal

- » Perda da referência de amplitude para discriminação dos níveis dos impulsos
 - Em sistemas que usam acoplamento *ac* ou por transformador a filtragem das componentes de baixa frequência do sinal dá origem a uma forma especial de ISI designada por *baseline wander* ou *dc wander*
 - No caso de ocorrerem longas sequências de 0's ou 1's ou, mais geralmente, se a diferença acumulada entre 0's e 1's (disparidade ou *Running Digital Sum - RDS*) não for controlada, este fenómeno impede a correcta discriminação do nível do sinal por perda da referência absoluta de amplitude

- » Relação sinal ruído (SNR), débito binário e largura de banda do canal
 - A probabilidade de erro depende destes factores; a influência do código de transmissão manifesta-se pela relação que impõe entre o *bit rate* e o *baud rate*

Propriedades dos Códigos de Transmissão

- » Os Códigos de Transmissão permitem controlar as características estatísticas (espectrais) do sinal codificado, ao impor relações controladas entre os impulsos elementares para além das determinadas pela sequência de dados
 - Remoção de correlação indesejável entre bits de informação (e.g. longas sequências de 0's e 1's) por meio de técnicas de *Scrambling*
 - Introdução de correlação controlada entre impulsos, através de codificação apropriada

- » A alteração das características espectrais do sinal (*spectral shaping*) apresenta inúmeras vantagens e constitui assim um dos objectivos mais importantes dos Códigos de Transmissão

- » A obtenção de determinadas vantagens pode ter algumas contrapartidas, pelo que os méritos dos códigos devem ser apreciados face a requisitos e critérios de avaliação concretos

Alteração das Características Espectrais

- » A redução da largura de banda efectiva do sinal codificado permite aproveitar o canal de forma mais eficiente e melhorar SNR por filtragem do ruído fora dessa banda
- » A concentração do espectro do sinal codificado na banda de passagem do canal permite reduzir os efeitos da distorção que se manifestam principalmente nos extremos da banda
- » A eliminação de componentes de baixa frequência no sinal codificado reduz os efeitos de *dc wander*, tornando possível acoplamento *ac*, o que garante melhor isolamento eléctrico e a possibilidade de telealimentação (repetidores, terminais) recorrendo a transformadores
- » A eliminação de componentes de alta frequência no sinal codificado atenua os efeitos da atenuação no canal e da interferência entre canais em suportes físicos separados (por exemplo múltiplos pares no mesmo cabo), fenómenos que têm maior impacto nas frequências mais elevadas
- » A introdução de zeros no espectro do sinal codificado permite extrair um sinal de relógio se o sinal (ou uma sua função) tiverem riscas espectrais nessas frequências, que podem ser separadas por um processo de filtragem

Outras Propriedades dos Códigos

- » Compressão de banda
 - Consegue-se com codificação multinível (sem alteração das características espectrais do sinal), por redução do *baud rate* em relação ao *bit rate*, com a contrapartida de aumentar a probabilidade de erro para idêntico SNR
- » Auto-sincronização
 - A possibilidade de recuperar um sinal de relógio directamente a partir do sinal recebido (auto-sincronização) requer transições frequentes no sinal codificado
- » Insensibilidade à inversão de polaridade do sinal
 - A inversão de polaridade do sinal pode ocorrer inadvertidamente em pares de cobre, interessando portanto uma solução que torne o sistema imune a este problema
- » Detecção de erros
 - Não é um objectivo essencial, mas pode ser uma propriedade intrínseca a explorar
- » Controlo da disparidade
 - Uma pequena disparidade (RDS) permite reduzir os efeitos de *dc wander*
- » Simplicidade de implementação
 - Uma implementação simples pode reduzir significativamente o custo do sistema

Classificação dos Códigos de Transmissão

Os códigos de transmissão podem classificar-se de vários pontos de vista

» Polaridade

- Códigos Unipolares - os impulsos têm uma única polaridade; em códigos binários os dois estados são representados por um impulso e pela ausência de impulso
- Códigos Polares - os impulsos apresentam polaridade positiva e negativa, podendo ainda um estado ser representado pela ausência de impulso

» *Duty-cycle*

- *Non Return to Zero (NRZ)* - o nível dum impulso mantém-se constante durante o período nominal do(s) símbolo(s) binário(s) que representa
- *Return to Zero (RZ)* - o nível dum impulso regressa a zero antes de terminar esse período nominal (normalmente a meio, o que corresponde a um *duty-cycle* de 50%)

» Número de níveis

- Os códigos mais comuns apresentam os seguintes números de níveis: dois (binários), três (ternários puros e pseudo-ternários), quatro (quaternários), oito (octais), etc.

» Exemplos

- Em códigos binários é usual encontrar as quatro combinações: Polar NRZ, Polar RZ, Unipolar NRZ e Unipolar RZ
- Códigos ternários são tipicamente polares, com níveis positivo, negativo e nulo

Binário NRZ (*Non Return to Zero*)

» NRZ-L (*Non Return to Zero - Level*)

- Usa dois níveis de sinal para representar 0 e 1 (codificação absoluta)
- O nível do sinal permanece constante durante o intervalo de um bit

» NRZ-I (*Non Return to Zero - Inverted*)

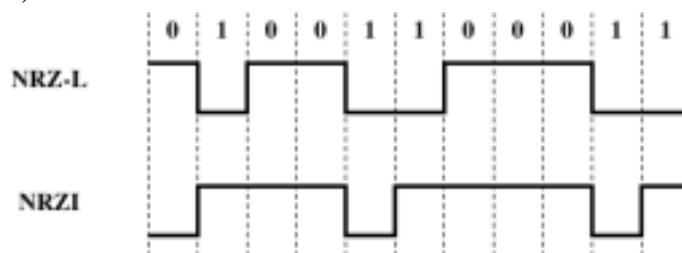
- Mudança de nível representa 1
- Codificação diferencial
 - ◆ Imune a inversões de polaridade

» Vantagens

- Fácil de implementar
- Boa eficiência espectral

» Desvantagens

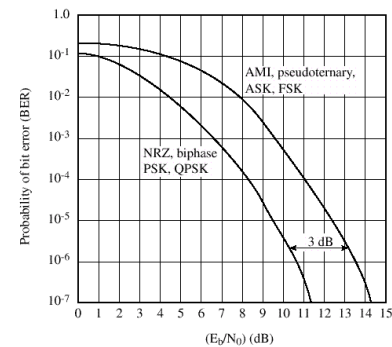
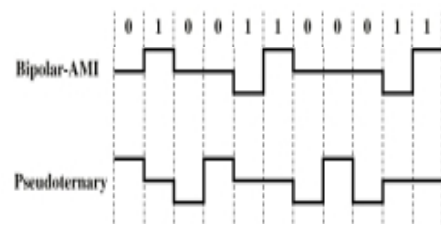
- Não possível acoplamento *ac*
 - ◆ A concentração de baixas frequências no espectro do sinal provoca *dc wander* se for usado acoplamento *ac*
- Não permite auto-sincronização
 - ◆ A ausência de transições em sequências longas de 0's ou 1's pode originar a perda de referência temporal no receptor



Binário Multinível

São usados 3 níveis para codificar símbolos binários

- » Bipolar / AMI (*Alternate Mark Inversion*)
 - 0 → ausência de sinal
 - 1 → impulsos positivos e negativos alternados
 - Imune a inversões de polaridade
 - Ausência de componentes espectrais de baixa frequência
 - Boa eficiência espectral
 - O *baud rate* é igual ao *bit rate* (se NRZ)
 - Problemas com sequências de 0's são resolvidos com HDB_n
 - AMI RZ usado no sistema T1 americano (1.544 Mbit/s)
- » Pseudoternário
 - 1 → ausência de sinal
 - 0 → impulsos positivos e negativos alternados
 - Usado no acesso básico RDIS (equipamento terminal)
- » Menos eficientes que NRZ
 - Cada nível representa um símbolo binário, enquanto num código ternário puro cada símbolo ternário pode representar $\log_2 3 = 1.58$ bit de informação
 - Receptor deve distinguir 3 níveis; para a mesma probabilidade de erro é necessário SNR 3 dB superior



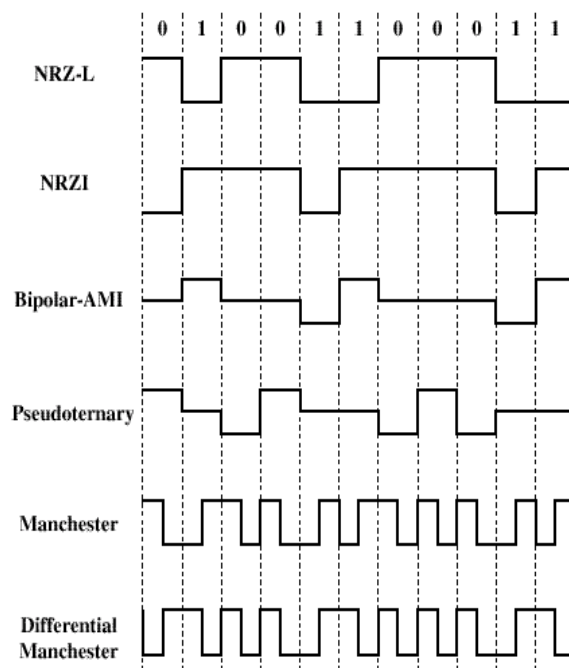
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N_0} = \frac{S}{kTR} \quad R = 1/T_b$$

E_b → energia de sinal por bit (J/s)

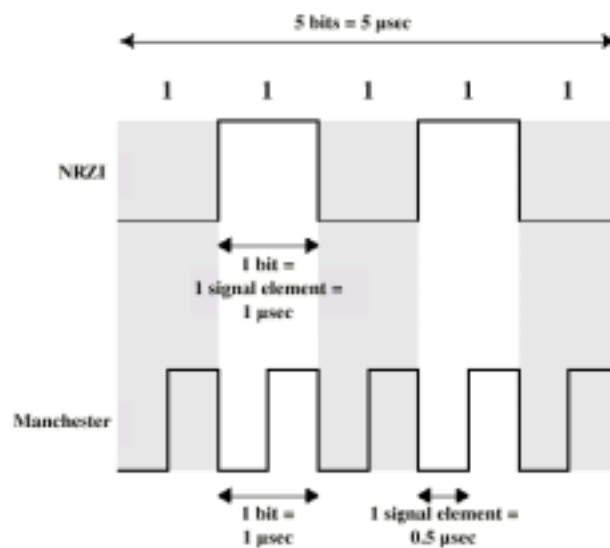
N_0 → Densidade de potência de ruído (W/Hz)

Bifásicos

- ♦ Manchester
 - » Transição no meio de cada bit
 - 1: transição ascendente
 - 0: transição descendente
 - » Usado na LAN IEEE 802.3 (Ethernet)
- ♦ Manchester Diferencial
 - » Transição no meio de cada bit
 - » Diferencial
 - 0: transição no início do bit
 - 1: ausência de transição no início do bit
 - » Usado na LAN IEEE 802.5 (Token Ring)
- ♦ Vantagens
 - » Fácil de implementar
 - » Propriedade de auto-sincronização
 - » Ausência de componentes espectrais de baixa frequência (imune a *dc wander*)
- ♦ Desvantagens
 - » O *baud rate* é duplo do *bit rate*
 - » Requer maior largura de banda do que o código binário NRZ



Ritmo de Modulação do Sinal Bifásico

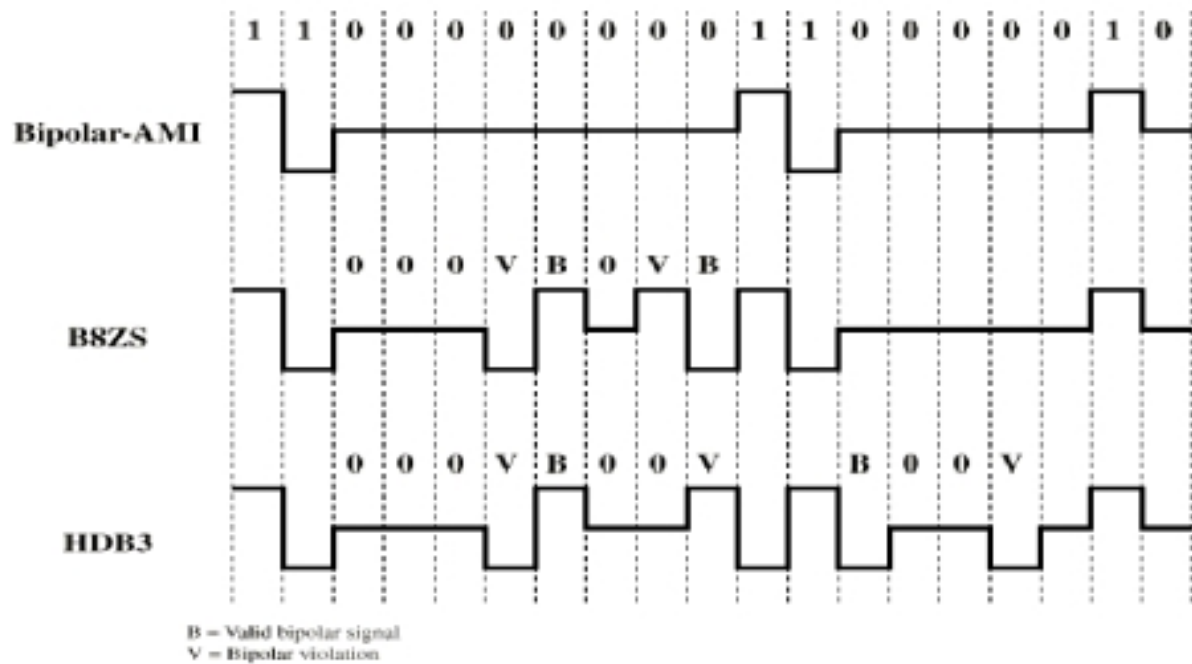


Bit Rate = 1 Mbit/s
Baud Rate = 2 Mbaud

B8ZS e HDB3

- ◆ **B8ZS - Bipolar With 8 Zeros Substitution**
 - » Baseado no bipolar AMI
 - » 000+-0-+ → se octeto de zeros e último impulso anterior positivo
 - » 000-+0+- → se octeto de zeros e último impulso anterior negativo
- ◆ **HDB3 - High Density Bipolar 3 Zeros**
 - » Baseado no bipolar AMI
 - » Usado no sistema E1 europeu (1ª hierarquia PDH – 2.048 Mbit/s)
 - » Evita sequências de quatro ou mais zeros
 - » O quarto zero numa sequência é sempre transmitido como um impulso que viola a regra da alternância (V)
 - » Nos casos em que violações consecutivas originassem impulsos (V) com a mesma polaridade, o primeiro zero da sequência é substituído por um impulso que respeita a regra da alternância (B) e o quarto zero por um impulso que viola essa regra (tendo portanto a mesma polaridade que o primeiro impulso da sequência: B00V, isto é, +00+ ou -00-). Esta regra aplica-se quando ocorre um número par de 1's desde a última substituição (violação)

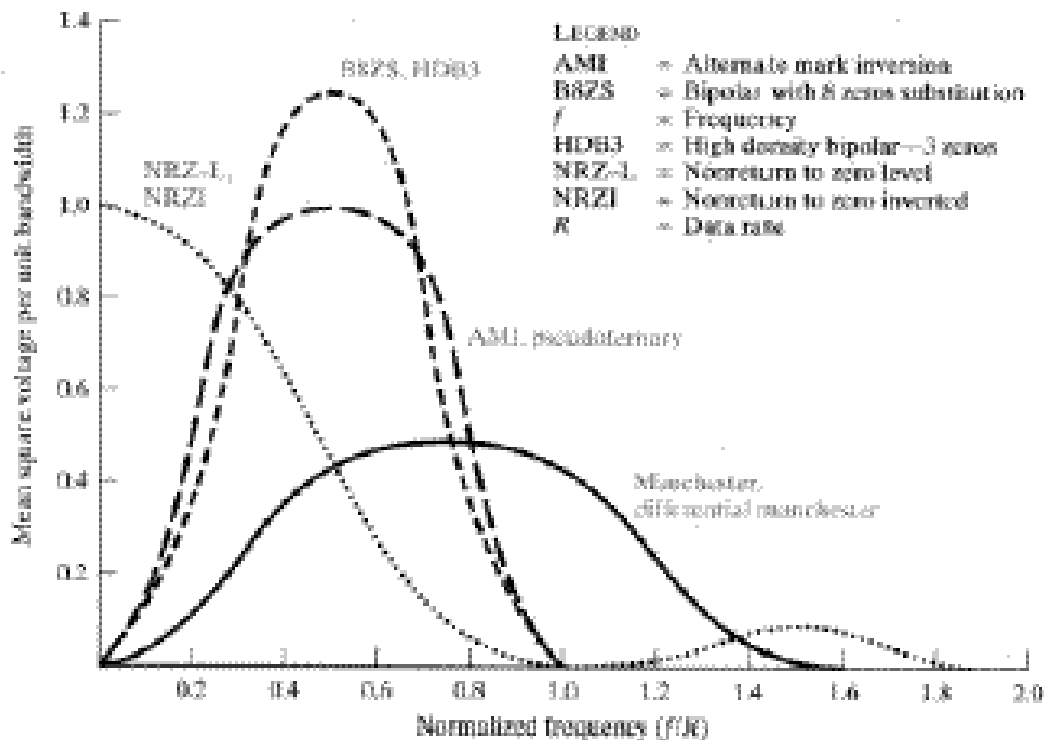
B8ZS e HDB3



Outros Códigos

- » CMI (*Coded Mark Inversion*)
 - 0 → 01
 - 1 → 00 / 11, alternadamente
 - Propriedades: auto-sincronização e auto-igualização
 - O *baud rate* é duplo do *bit rate*
 - A “palavra” 10 pode ser usada para transportar informação de controlo
 - Usado no sistema E4 europeu (4ª hierarquia PDH – 139.264 Mbit/s)
- » mBnB (n > m)
 - Códigos alfabéticos; requerem tabela para codificação /descodificação
 - Códigos Redundantes
 - ◆ A redundância é usada para evitar sequências de dados com poucas transições
 - ◆ Palavras não usadas para codificar dados podem ser usadas para controlo, delimitação de tramas, etc.
 - ◆ O *baud rate* é superior ao *bit rate*: $MR = n/m DR$
 - Usados em sistemas de transmissão ópticos; exemplos: 4B5B (usado na LAN FDDI), 8B10B (usado em Gigabit Ethernet)
- » 4B3T
 - Pseudo-ternário: grupos de 4 símbolos binários são substituídos por grupos de 3 símbolos ternários
 - Códigos Redundantes
 - ◆ A redundância é explorada para controlar a disparidade (RDS) do código
 - ◆ O *baud rate* é inferior ao *bit rate*: $MR = 3/4 DR$
 - Usado na interface pública de acesso básico RDIS (DR = 160 kbit/s; MR = 120 kbaud)

Espectros de Potência



Dados Digitais, Sinal Analógico (Modulações Digitais)

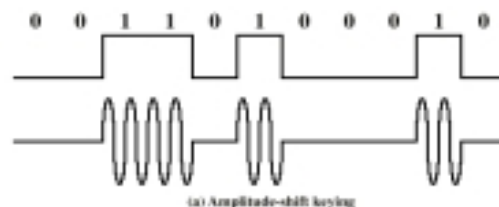
Não é possível transmitir um sinal digital num canal passa-banda sem forte distorção; a alternativa é usar o sinal para modular uma portadora sinusoidal

» Exemplo: canal telefónico com banda de passagem entre 300 e 3300 Hz

– Requer a utilização de MODEM (MODulator / DEModulator)

Modulações Digitais

◆ *Amplitude Shift Keying (ASK)*



(a) Amplitude-shift keying

◆ *Frequency Shift Keying (FSK)*



(b) Frequency-shift keying

◆ *Phase Shift Keying (PSK)*



(c) Phase-shift keying

ASK, FSK

» Amplitude Shift Keying

- O sinal digital modula a amplitude da portadora; a modulação pode ser descrita por sinais elementares

$$s_i(t) = a_i \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

- Em ASK binário há duas escolhas óbvias

$$a_i = (0, 1) \text{ - OOK (On-Off Keying)}$$

$$a_i = (+1, -1) \text{ - PRK (Phase Reversal Keying)}$$

sendo PRK um caso particular de PSK binário

- O espectro dum sinal ASK ocupa uma largura de banda dupla da do sinal digital (banda de base); portanto, o débito binário é limitado por

$$C = B \log_2 L, \text{ pois } B_0 = MR \text{ (eliminação de ISI)}$$

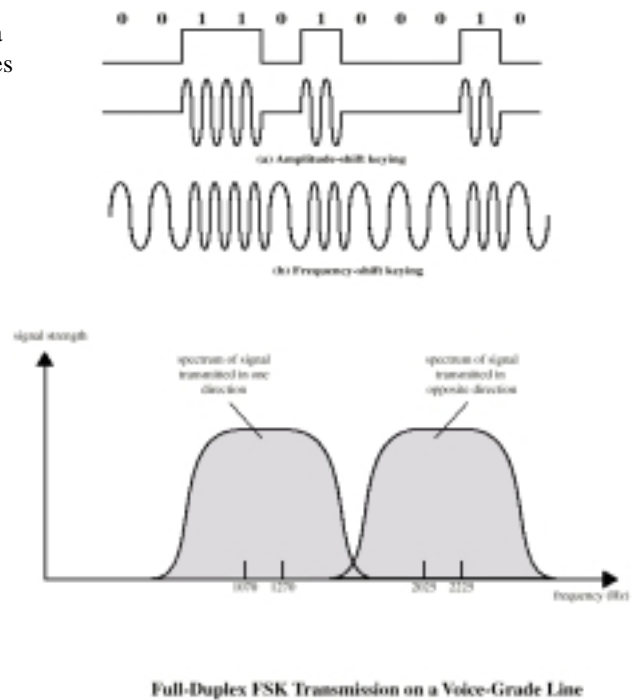
- Usado em canais telefónicos até 1200 bit/s
- Usado em fibras ópticas (modulação On-Off de fontes de luz)

» Frequency Shift Keying

- O sinal digital modula a frequência da portadora

$$s_i(t) = \cos(2\pi f_i t + \phi)$$

- Menos susceptível a erros que ASK
- Usado em canais telefónicos até 1200 bit/s



PSK

» Phase Shift Keying

- O sinal digital modula a fase da portadora; a modulação pode ser descrita por sinais elementares

$$s_i(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

com $\phi_i = 2\pi i/L + \phi_0$, sendo L o número de fases

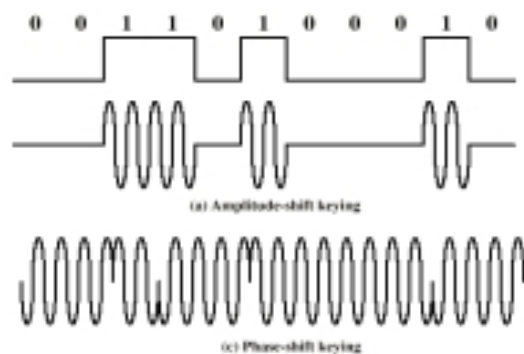
- Em PSK binário usam-se fases $(0, \pi)$ ou $(\pi/2, 3\pi/2)$
- Em PSK quaternário (QPSK) as alternativas usuais são $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ e $(\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4)$

- A modulação PSK pode ser descrita pela combinação de modulações de amplitude de duas portadoras em quadratura (sen, cos)

$$s_i(t) = \cos \phi_i \cos 2\pi f_c t + (-\sin \phi_i) \sin 2\pi f_c t$$

o que indica uma forma prática de gerar o sinal PSK

- Por esta razão um sinal PSK ocupa uma largura de banda idêntica à de um ASK
- É ainda possível uma versão diferencial da modulação PSK - a informação está contida na variação de fase, o que dispensa uma referência absoluta de fase na desmodulação (mas implica desempenho inferior)
- Exemplos de Modems PSK da série V (ITU)
 - ♦ V.26 - 4 PSK: DR = 2400 bit/s; MR = 1200 baud
 - ♦ V.27 - 8 PSK: DR = 4800 bit/s; MR = 1600 baud



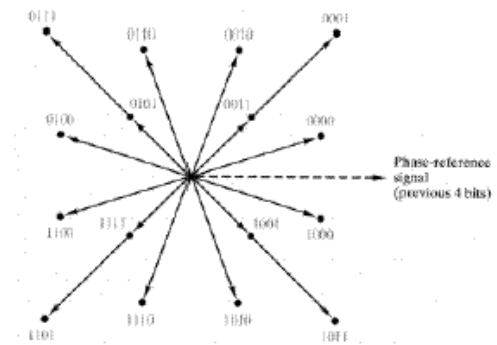
QAM

» QAM - Quadrature Amplitude Modulation

- Uma generalização de PSK consiste em combinar a modulação de fase com uma modulação de amplitude

$$s_i(t) = r_i \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$
- Esta forma de modulação designa-se genericamente por *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), podendo também ser descrita pela modulação de duas portadoras em quadratura

$$s_i(t) = (r_i \cos \phi_i) \cos 2\pi f_c t + (-r_i \sin \phi_i) \sin 2\pi f_c t$$
- As modulações PSK e QAM são habitualmente representadas por um diagrama de amplitudes e fases designado por **constelação**
- Os pontos de uma constelação PSK situam-se sobre uma circunferência, enquanto em QAM se distribuem em circunferências concêntricas
- Os modems V.29 usam uma modulação 16 QAM, com oito fases e duas amplitudes por fase
 - ◆ Fases: $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ Amplitudes: (3, 5)
 - Fases: $(\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4)$ Amplitudes: $(3\sqrt{2}, 5\sqrt{2})$
 - ◆ DR = 9600 bit/s; MR = 2400 baud



Exemplo de uma constelação