

Formatos de Modulação

Formatos de modulação

“OOK” : on-off – keyin

Formatos:

RZ, NRZ, CSRZ (carrier supresed return-to-zero)

“PAM”: Poly-amplitude-modulation

Formatos de modulação:

M-Ary –polybinary, Duo binary

“BPSK”: Binary-phase-shift-keyin”

Formatos:

BPSK, DBPSK (differential binary phase shift keying)

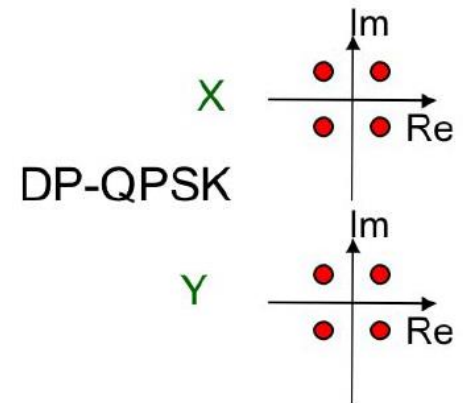
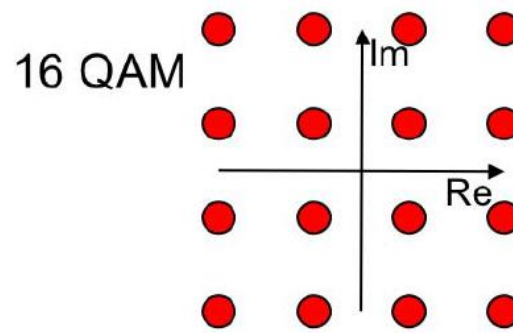
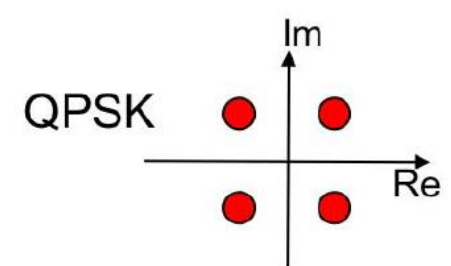
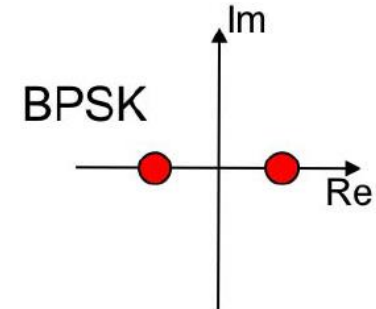
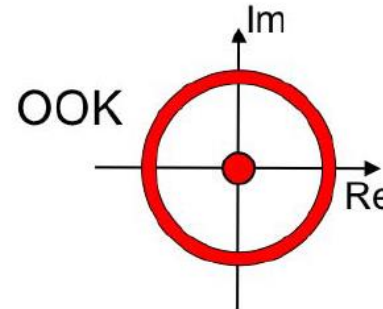
“QAM” : Quadrature-amplitude-modulation

Formatos: M-QAM

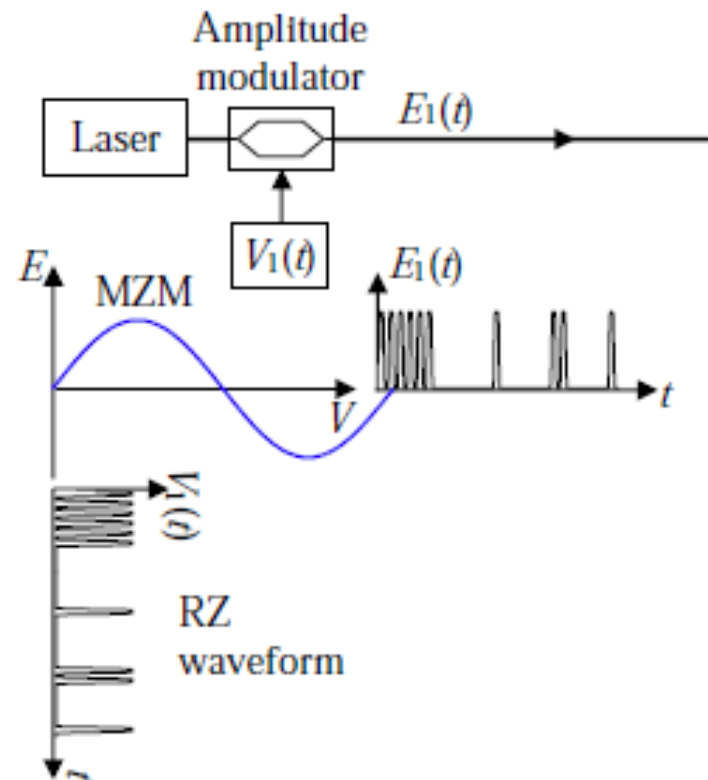
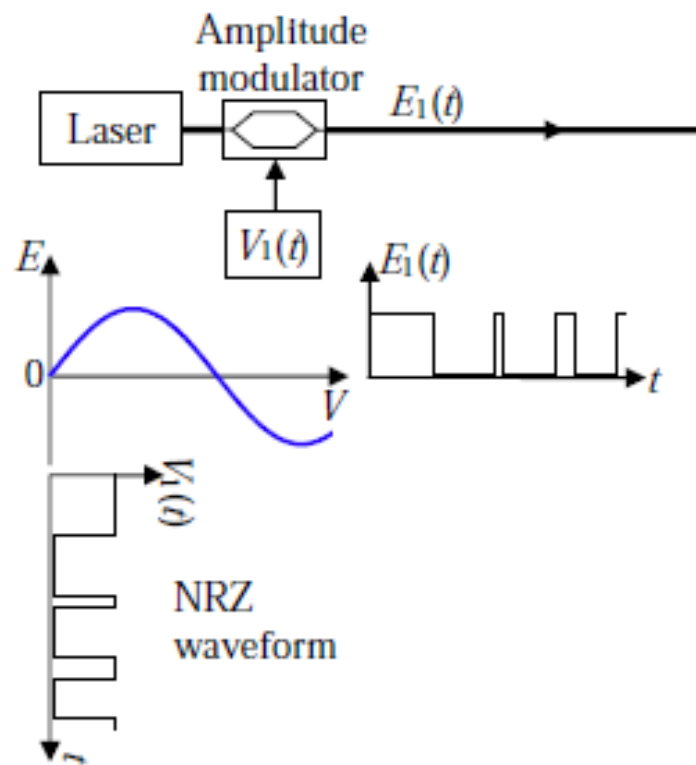
“QPSK”: Quadrature-phase-shift-keying

Formatos: QPSK, QDPSK

“DP-QPSK”: Dual-polarization- QPSK

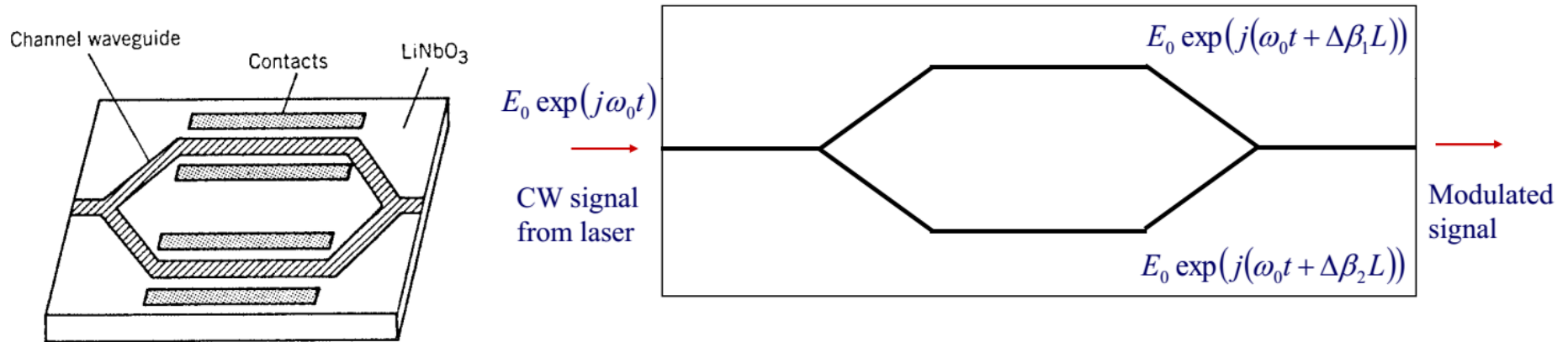


Sistemas de transmissão: Moduladores ópticos



Moduladores Ópticos MZ

Modulador tipo Mach - Zehnder



Sinal de saída do modulador:

$$E(V_1, V_2) = E_0 \cos \left[\left(\frac{\Delta\beta_2 - \Delta\beta_1}{2} \right) L \right] \exp \left[j \left(\frac{\Delta\beta_2 + \Delta\beta_1}{2} \right) L \right]$$

Constante de propagação em cada braço:

$$\Delta\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_i$$

Índice de refração em cada braço
em função da polarização elétrica:

$$n_i = n_0 + \eta_i V(t)$$

η_i : depende da geometria do braço e a constante
eletro – óptica do material (NbLiO_2)

$$\eta_i = \frac{1}{2} \frac{\pi}{\lambda_p} n_0^3 \frac{r_{33}}{d}$$

Moduladores Ópticos

Modulador tipo Mach - Zehnder

Intensidade do sinal modulado:

$$\left[\begin{aligned} I(V_1(t), V_2(t)) &= \frac{E_0^2}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_\pi} (V_2(t) - V_1(t)) \right) \right] \\ V_\pi &= \frac{\lambda_0}{2L\eta} \end{aligned} \right]$$

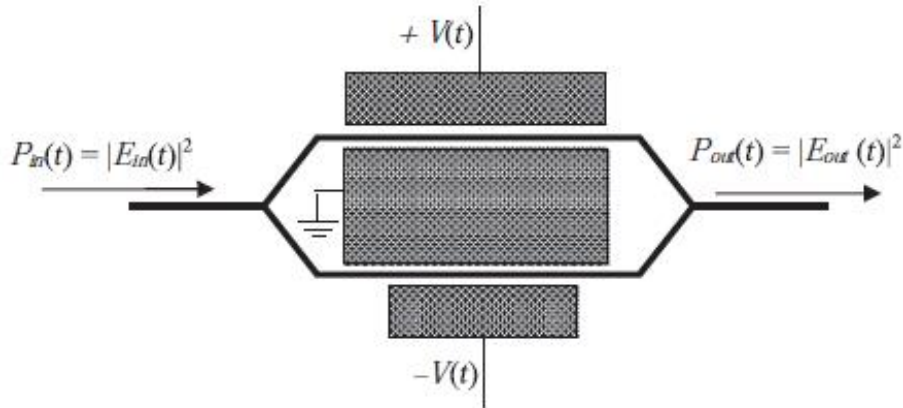
Fase de batimento (CHIRP):

$$\left[\begin{aligned} \phi_{chirp}(V_1(t), V_2(t)) &= \frac{\pi\eta L}{\lambda_0} [V_2(t) + V_1(t)] \\ \eta_2 &= \eta_1 = \eta \end{aligned} \right]$$

Frequência de batimento:

$$\Delta \nu(t) = \frac{1}{4V_\pi} \left[\frac{dV_2(t)}{dt} + \frac{dV_1(t)}{dt} \right]$$

Modo Push-Pull do modulador MZM



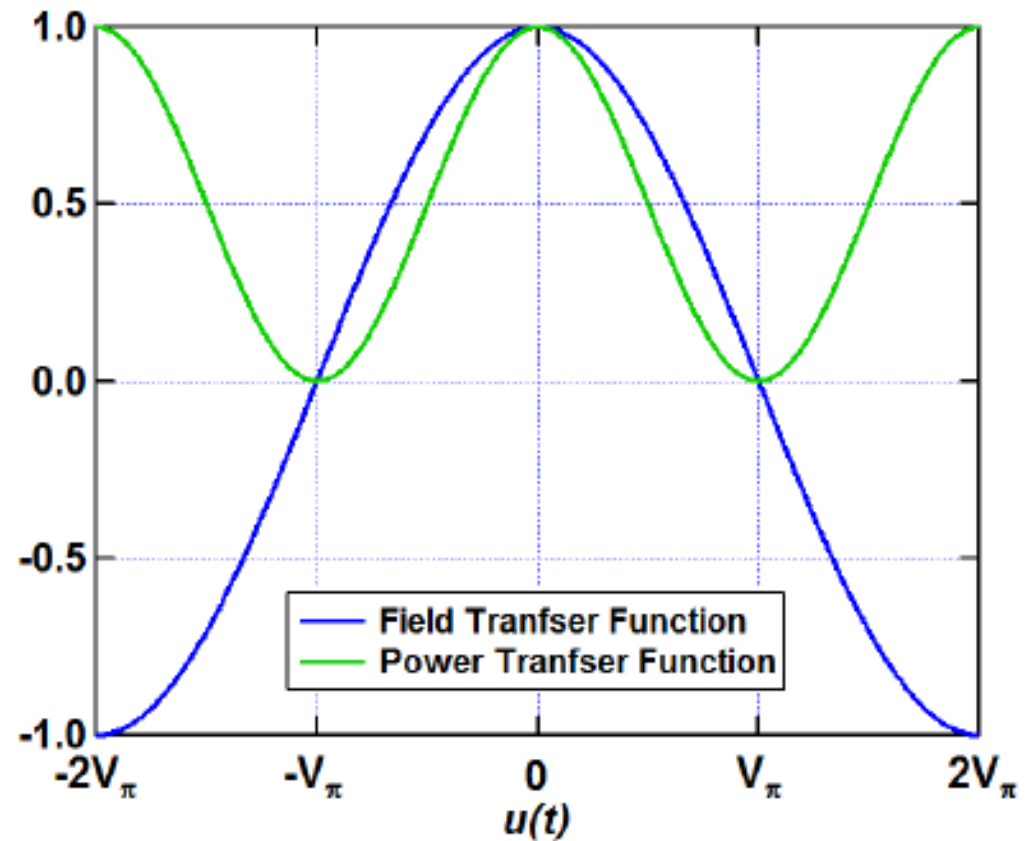
$$V_1(t) = -V_2(t) = u(t)$$

Amplitude de saída do campo

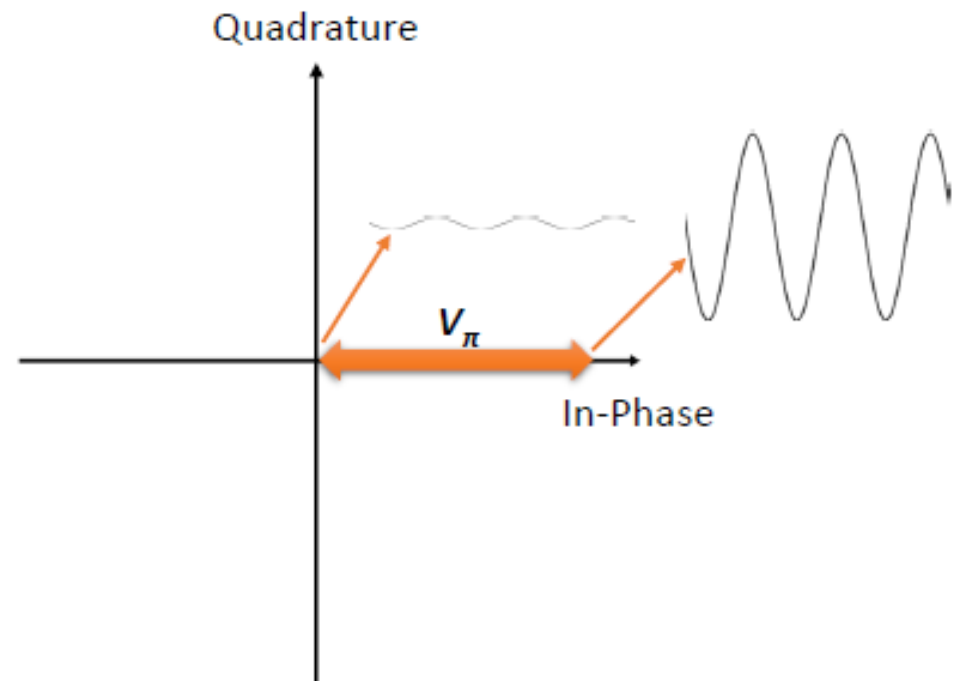
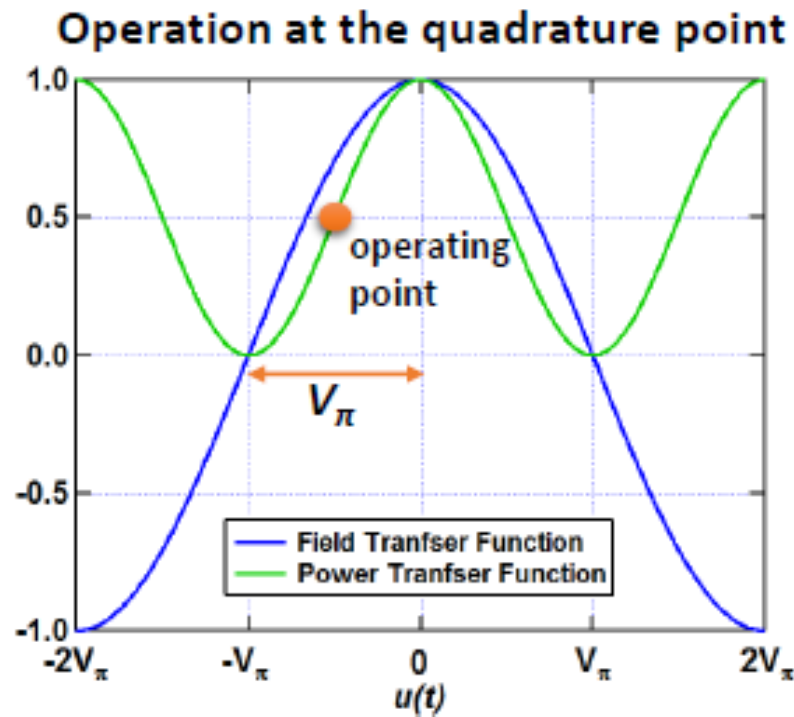
$$E = E_0 \cos\left(\frac{\pi u(t)}{2 V_\pi}\right)$$

Potência de saída do campo

$$P = \frac{E_0^2}{2} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{u(t)}{V_\pi}\right) \right]$$



Modo de operação “on-off keying” “OOASK”

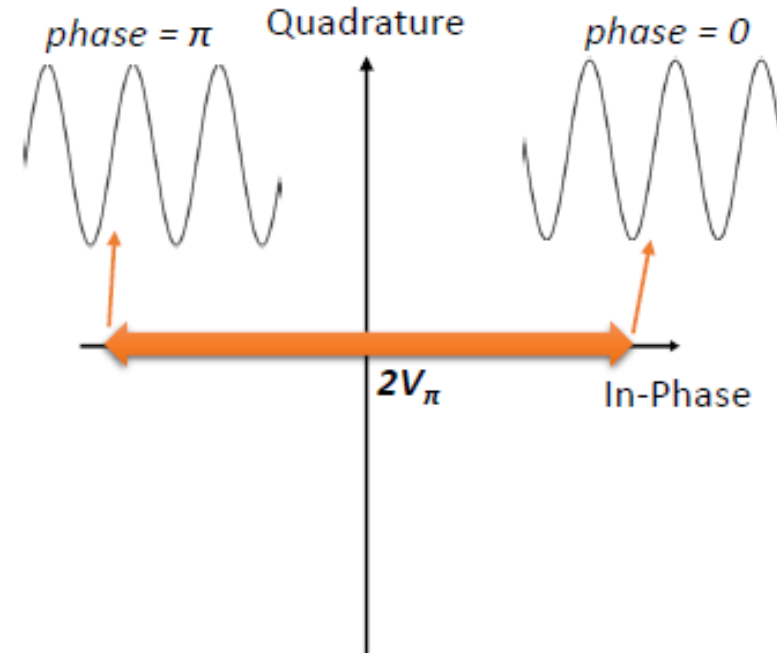
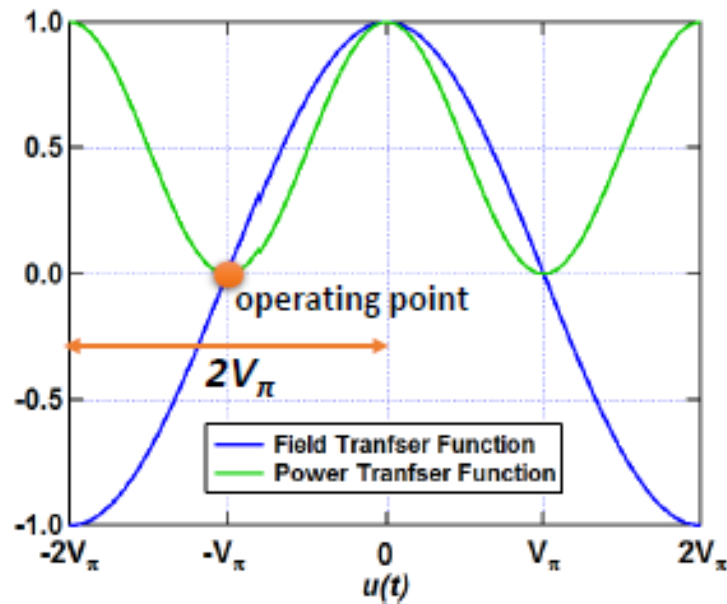


Polarização: $V_{\text{bias}} = -V_\pi / 2$

Tensão pico a pico da modulação $V_{\text{pp}} = V_\pi$

Modo de operação “on-off keying da fase (BPSK)

Operation at the minimum transmission point



Polarização: $V_{\text{bias}} = -V_\pi$

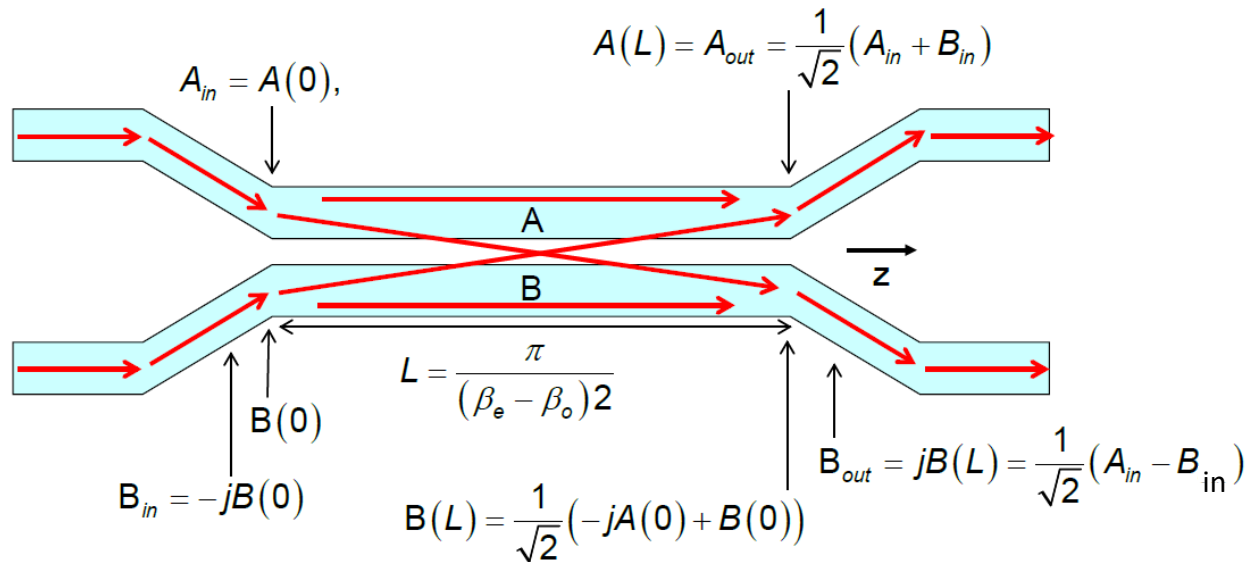
Tensão pico a pico da modulação $V_{\text{pp}} = 2V_\pi$

Receptores coherentes

Acoplador óptico 3 dB

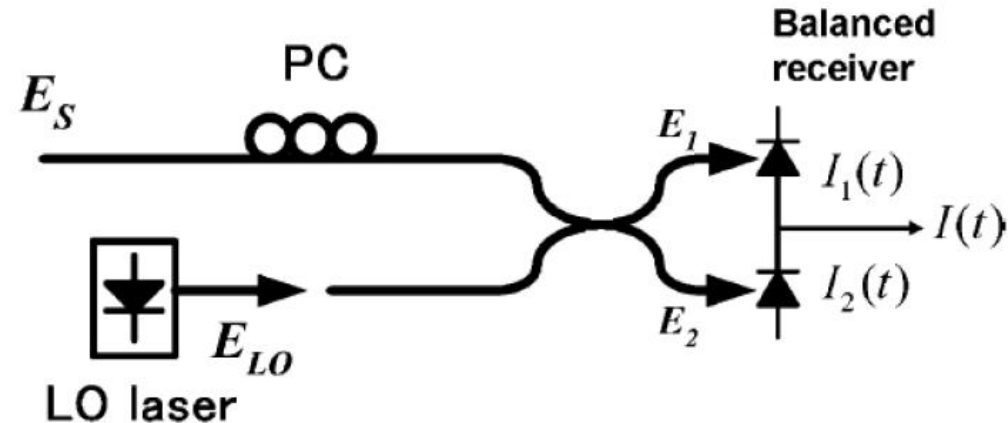
$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix}$$

← Acoplador direccional 3dB



Receptores coerentes

Receptor Balanceado



Campo elétrico do sinal

$$E_s(t) = A_s(t) \exp(j\omega_s t)$$

Potência do sinal

$$P_s = |A_s|^2 / 2$$

Campo elétrico do Laser local no receptor

$$E_{LO}(t) = A_{LO} \exp(j\omega_{LO} t)$$

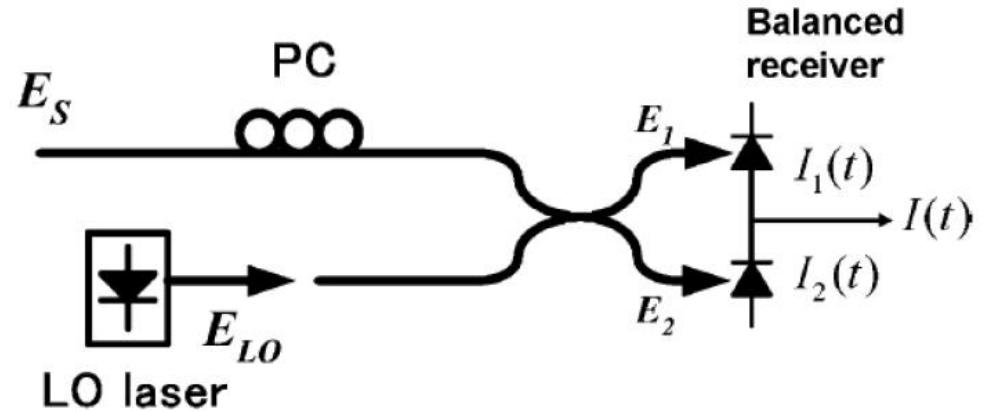
Potência do Laser local

$$P_{LO} = |A_{LO}|^2 / 2$$

Detecção coerente

Campos na saída do acoplador

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_S + E_{LO}) \quad E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_S - E_{LO})$$



Intensidade de corrente no foto diodo 1

$$I_1(t) = R \left[\text{Re} \left\{ \frac{A_s(t) \exp(j\omega_s t) + A_{LO} \exp(j\omega_{LO} t)}{\sqrt{2}} \right\} \right]^{ms}$$

$$= \frac{R}{2} \left[P_s(t) + P_{LO} + 2\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF}t + \theta_{sig}(t) - \theta_{LO}(t)\} \right]$$

Responsibilidade do foto diodo

$$R = \frac{e\eta}{\hbar\omega_s} \quad [\text{A/W}]$$

Fase do sinal

$$\theta_{sig} = \theta_s + \theta_n$$

Frequência Intermediária

$$\omega_{IF} = \omega_s - \omega_{LO}$$

Intensidade de corrente no foto diodo 2

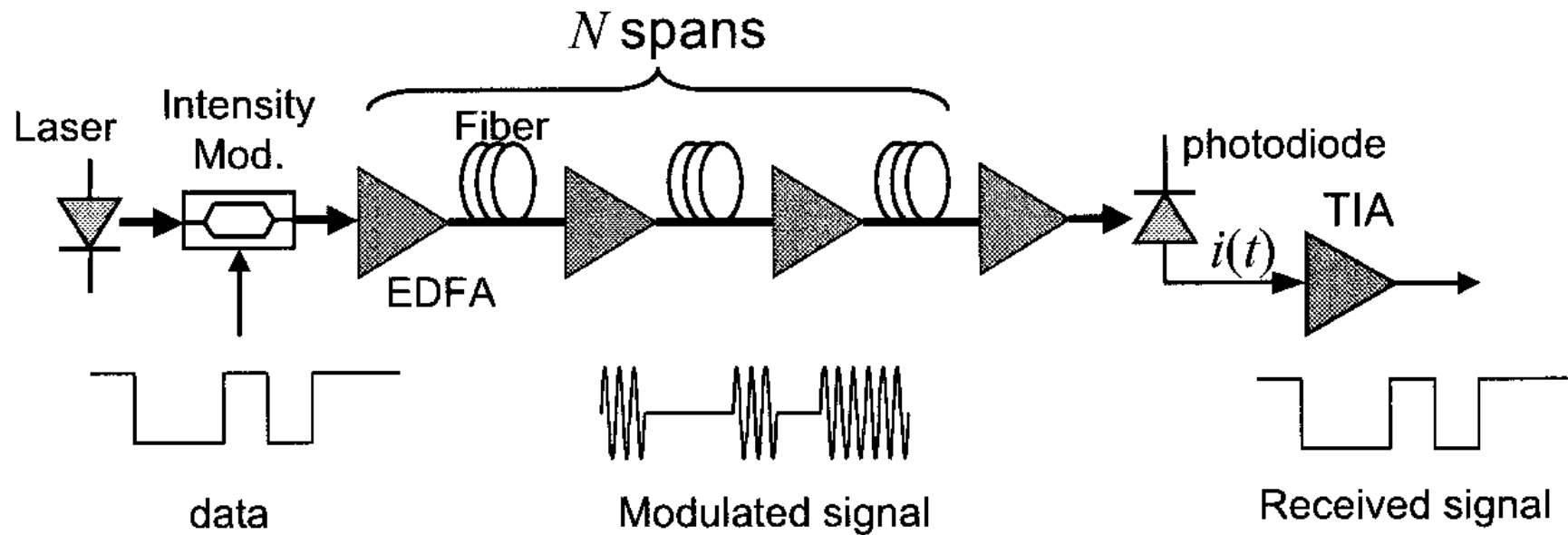
$$I_2(t) = R \left[\text{Re} \left\{ \frac{A_s(t) \exp(j\omega_s t) - A_{LO} \exp(j\omega_{LO} t)}{\sqrt{2}} \right\} \right]^{ms}$$

$$= \frac{R}{2} \left[P_s(t) + P_{LO} - 2\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF}t + \theta_{sig}(t) - \theta_{LO}(t)\} \right]$$

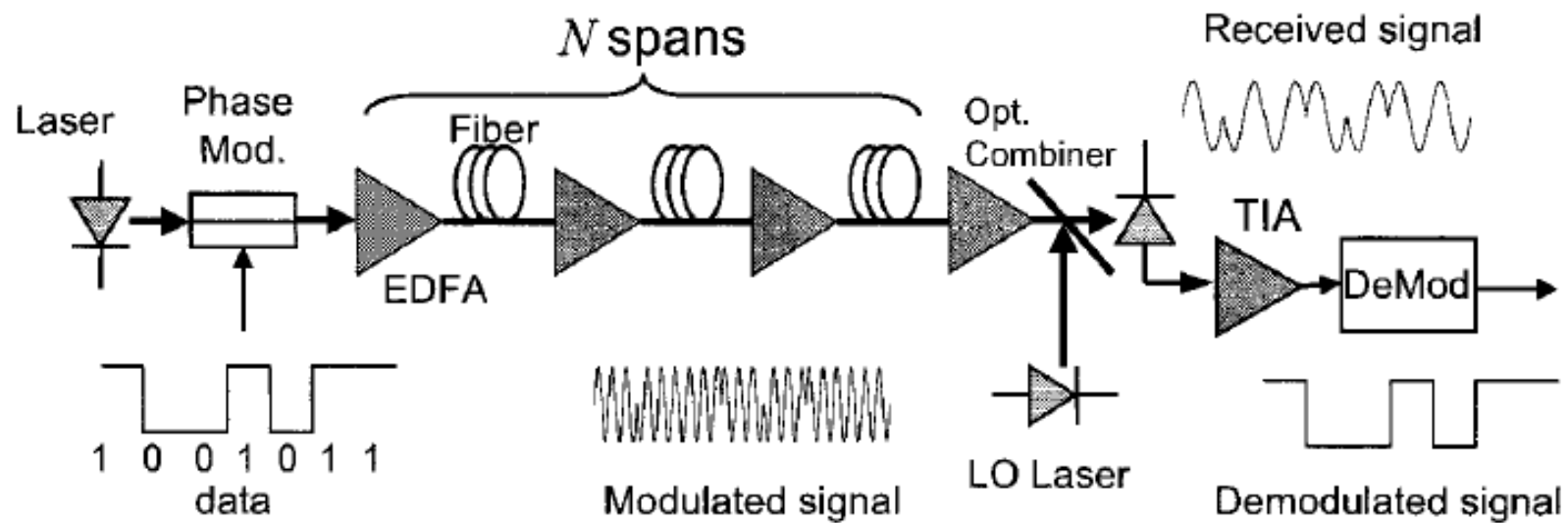
Intensidade total do receptor

$$I(t) = I_1(t) - I_2(t) = 2R\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF}t + \theta_{sig}(t) - \theta_{LO}(t)\}$$

Modulação de intensidade/Detecção Direta (ASK)



Modulação de Fase (PSK)



Receptores coerentes

Matriz de transferência do acoplador híbrido de 180°

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_S \\ E_{LO} \end{bmatrix}$$

Matriz de transferência do acoplador híbrido de 90°

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{\pi}{4}} \\ e^{j\frac{\pi}{4}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_S \\ E_{LO} \end{bmatrix}$$

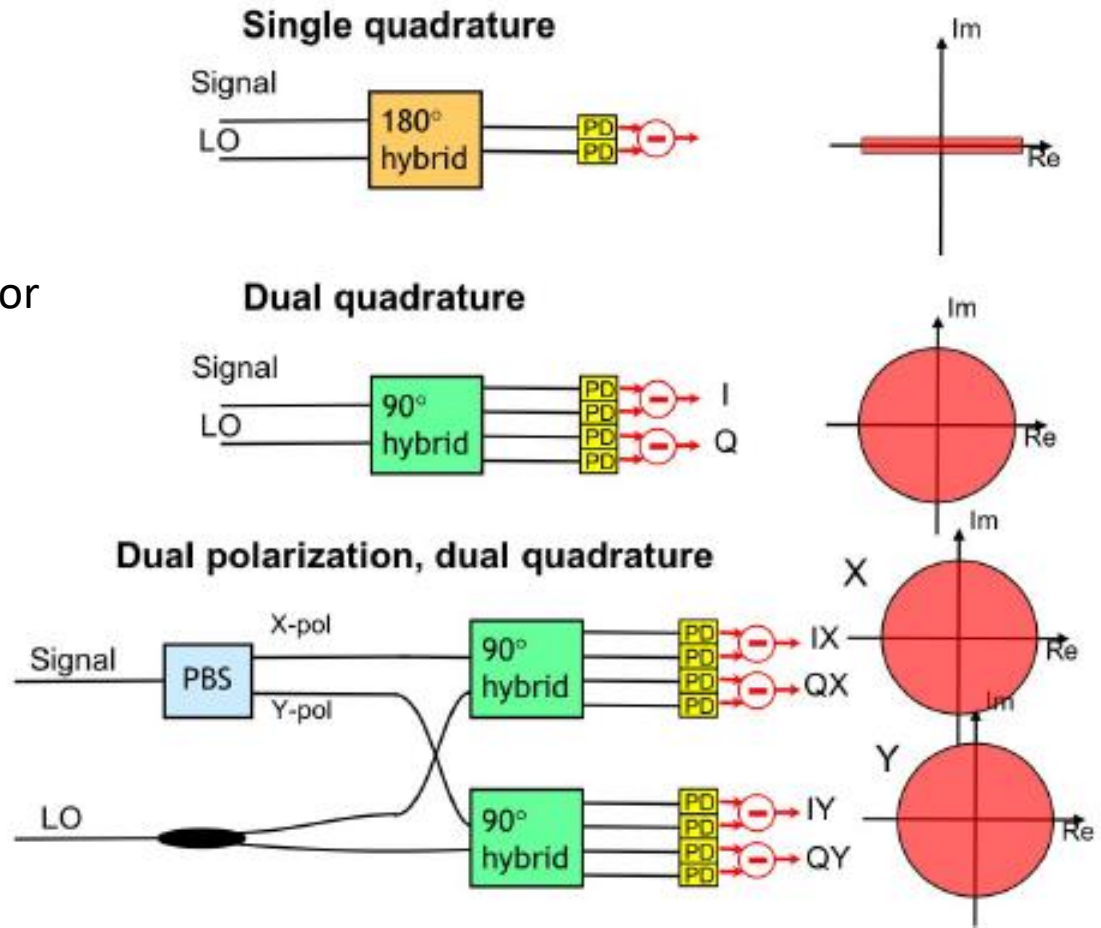
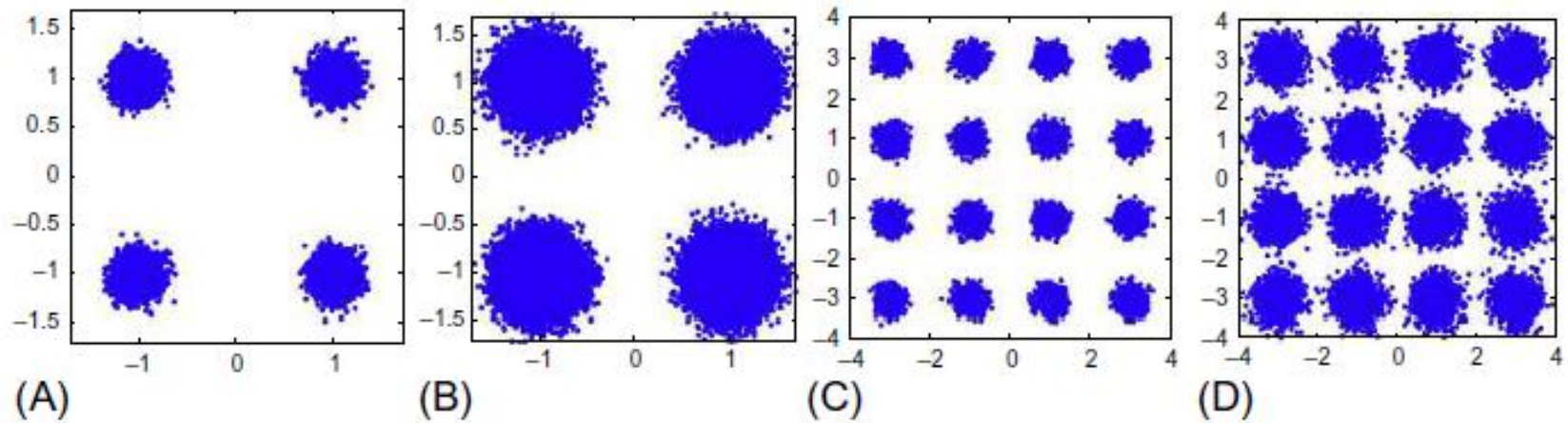


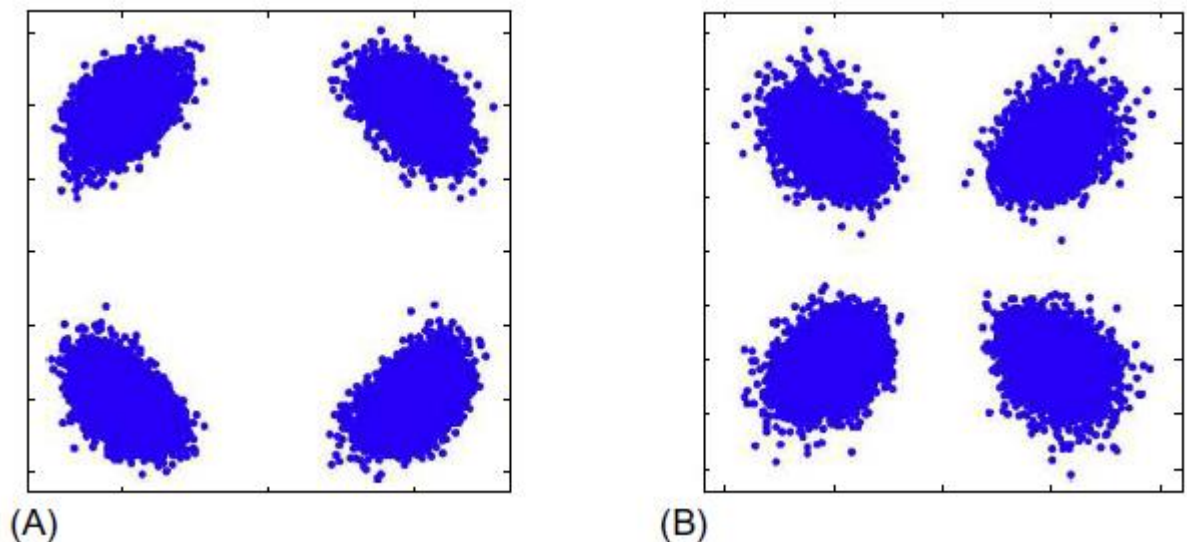
Fig. 4. Coherent receiver types.

Constelações e Ruídos

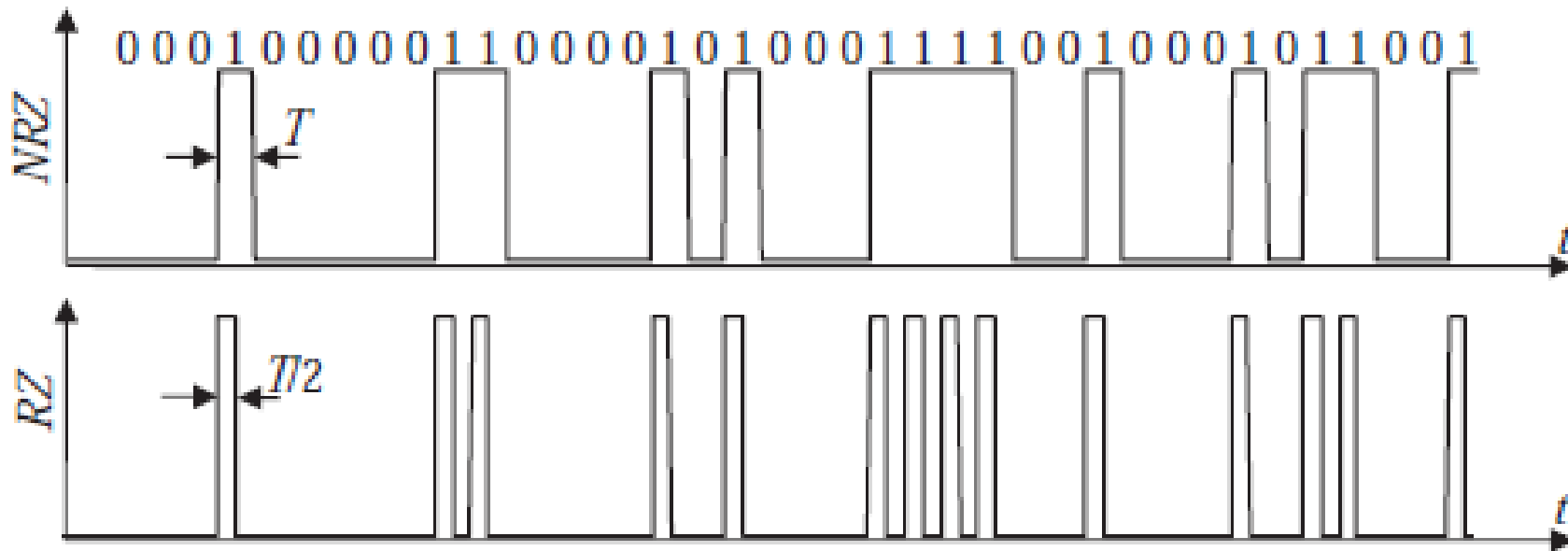


Diagramas de constelação típicos de QPSK (A) e (B), e 16QAM (C) e (D) com valores EVM de 11% (A), 17%(B), 7% (C) e 13% (D), correspondendo ao SNR de 19, 15,4, 23 e 18dB, respectivamente. EVM “error vector module”

Diagramas de constelação de sinais QPSK com ruído de fase (A) e ruído de intensidade (B).



Comparação entre os formatos RZ e NRZ

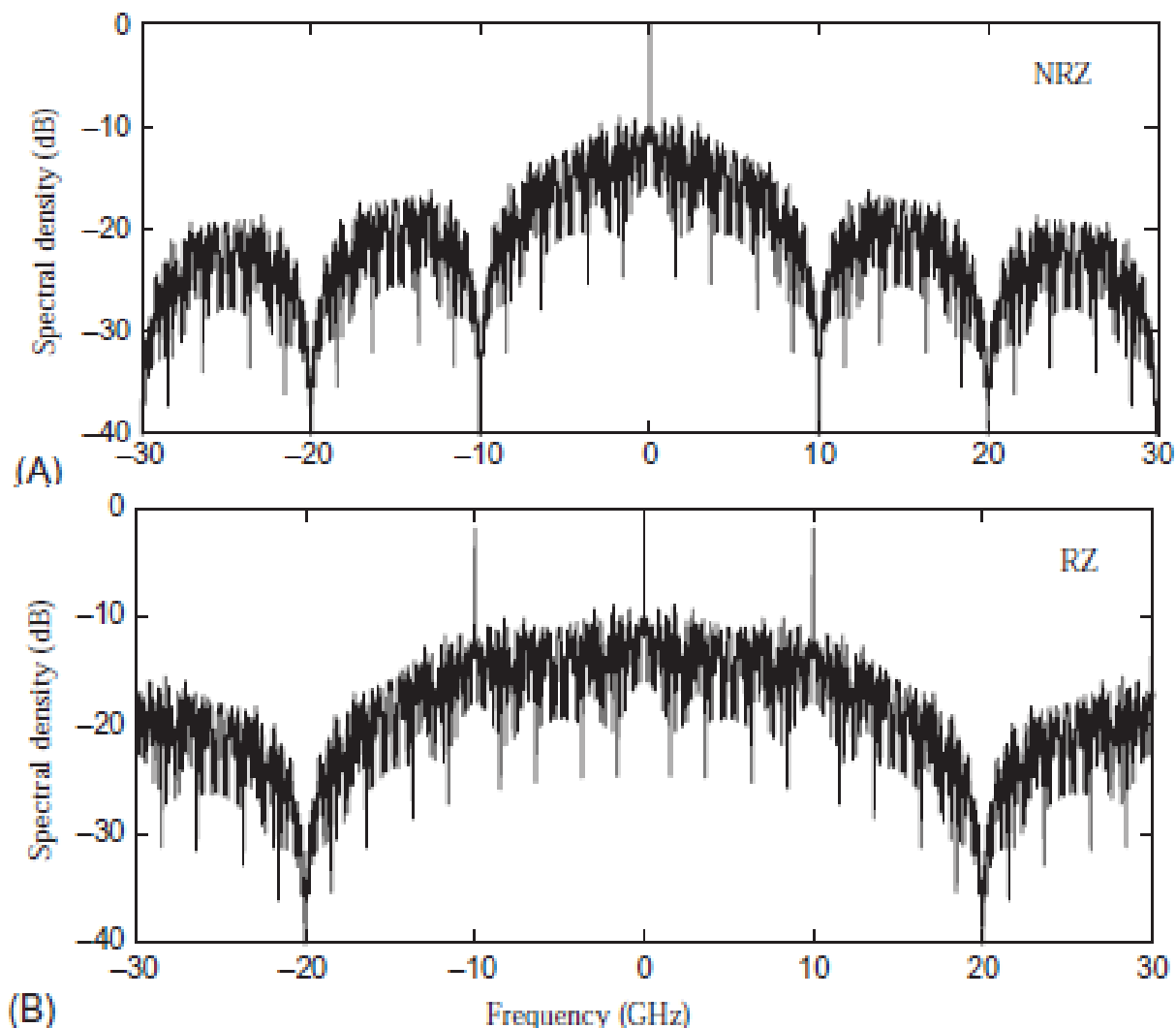


Comparação entre as formas de onda NRZ (superior) e RZ (inferior) da mesma sequência de dados e taxa de dados.

Comparação entre os formatos RZ e NRZ

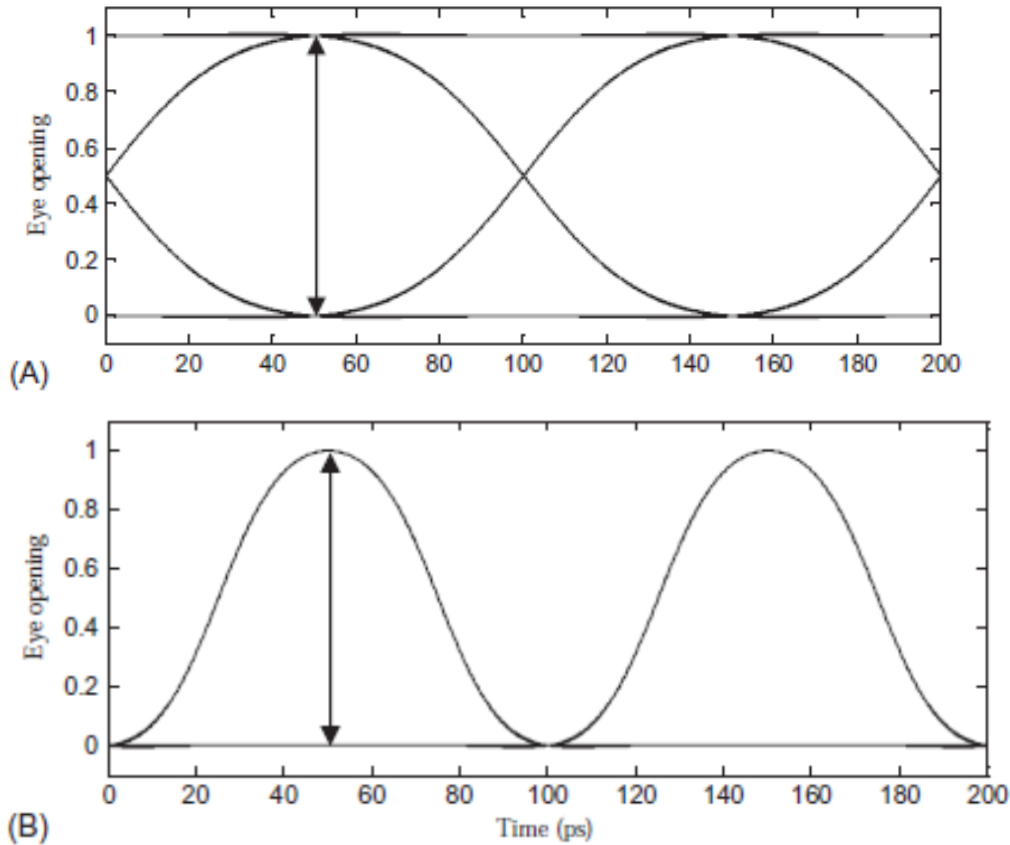
- RZ duração do pulso metade em relação NRZ ($T/2$)
- RZ apresenta maior largura de banda espectral do que NRZ
- RZ sofre mais com a dependência em relação à largura espectral sendo mais sensível para a dispersão cromática, dispersão por polarização e ondulações da função de transferência do amplificador eletrônico de banda larga.
- RZ apresenta maior pico de potência do que NRZ quando avaliadas na mesma potência média. Assim apresentara melhor razão sinal/ruído nos pontos de decisão.

Densidade de Potência espectral para as funções NRZ e RZ

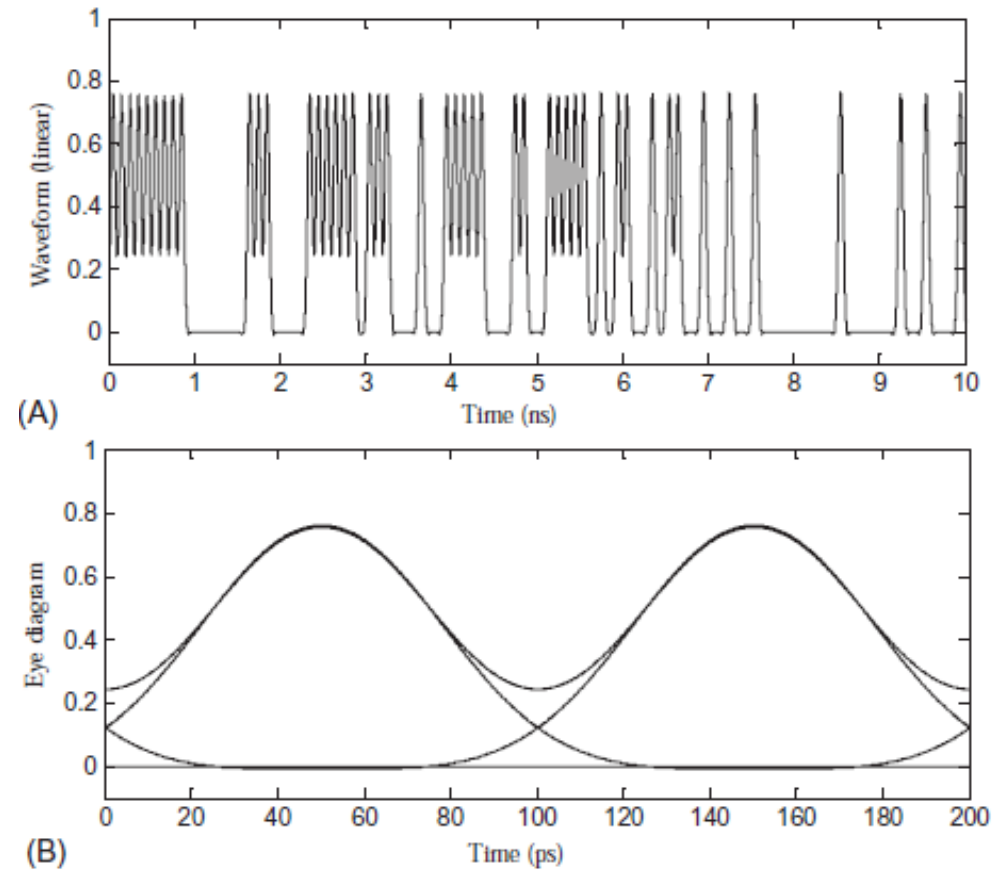


Densidades espectrais normalizadas de formas de onda binárias NRZ (A) e RZ (B) com taxa de dados de 10 Gb / s.

Limitação de largura de banda no formato RZ



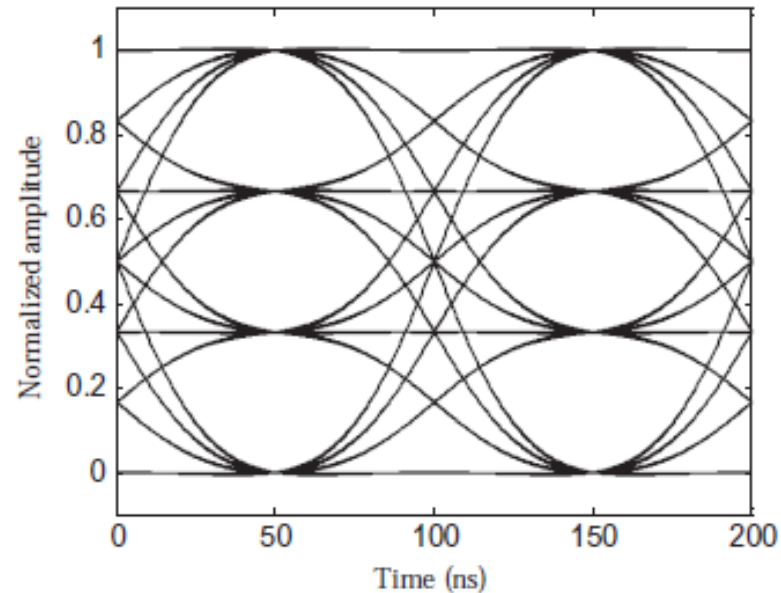
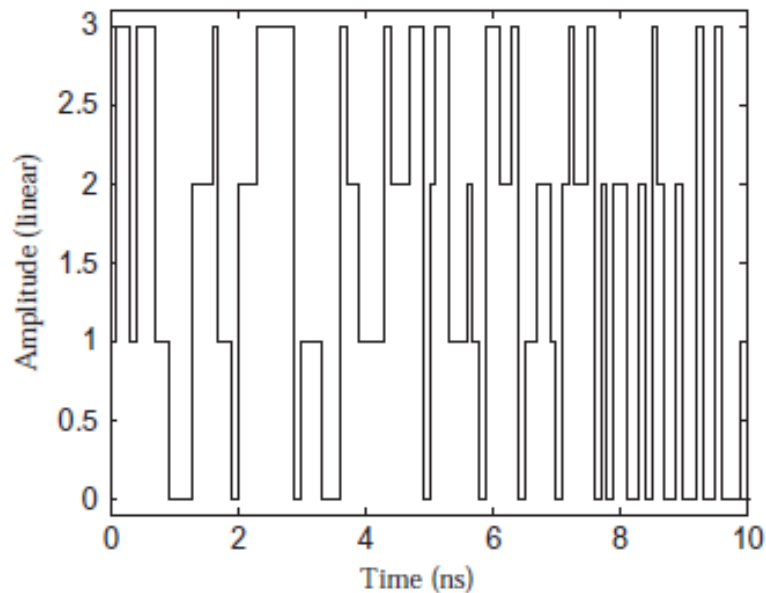
Diagramas de olho de formas de onda NRZ (A) e RZ (B) de largura de banda limitada a uma taxa de dados de 10 Gb / s. Os filtros Bessel de quinta ordem são usados com largura de banda de 6,5 GHz para a forma de onda NRZ e 13 GHz para a forma de onda RZ.



Forma de onda RZ de 10 Gb / s com banda limitada (A) e diagrama de olho (B). O filtro de Bessel de quinta ordem é usado com uma largura de banda de 3dB de 6,5 GHz.

Formato de modulação PAM: M-ary

- Modulação de amplitude de vários níveis
- Crescimento de níveis digitais
- Crescimento de numero de bits por símbolo
- Cresce a taxa de bits para uma taxa constante de símbolos (baudios/s)
- M-níveis de modulação em intensidade então $\log_2(M)$ bits/símbolo
- A taxa de bits cresce em $\log_2(M)$ vezes.



(A) forma de onda ideal de um sinal modulado em amplitude de quatro níveis a uma taxa de 10 Gbaud/s e (B) o correspondente diagrama de olho após um filtro passa-baixa com largura de banda de 6,5 GHz.

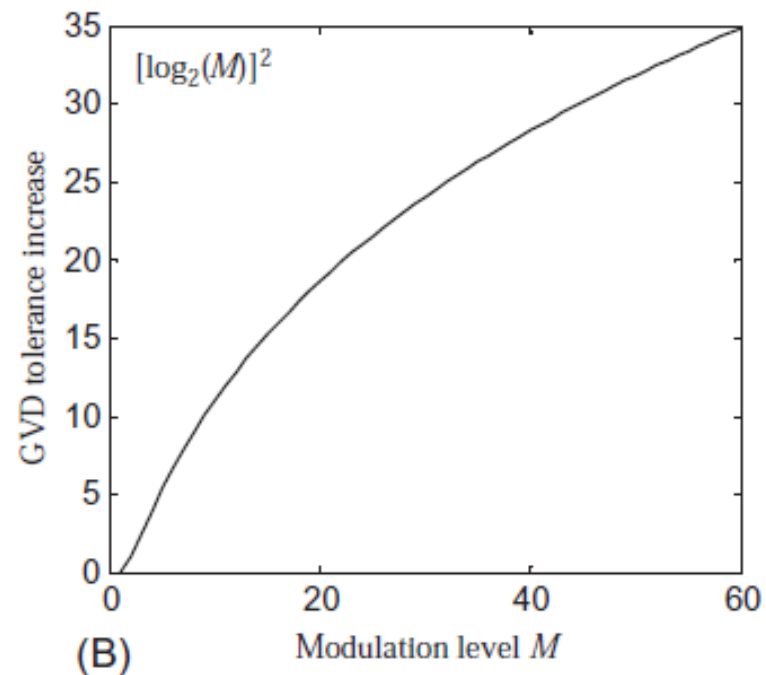
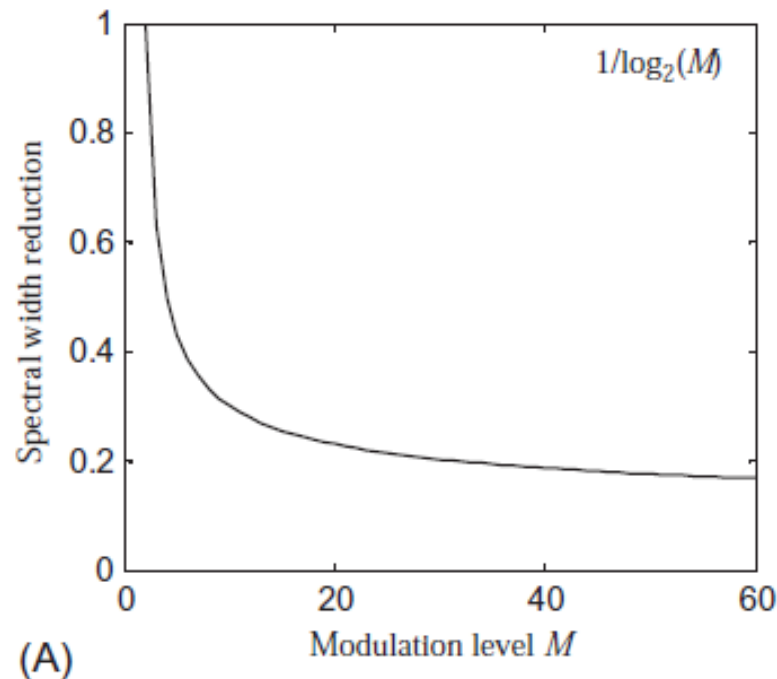
Formato de modulação PAM: M-ary

.- Largura de faixa espectral:

Proporcional a : $\frac{1}{\log_2(M)}$

.- Limitação de distância de transmissão devido à dispersão cromática:

Proporcional a: $[\log_2(M)]^2$



(A) redução da largura de banda espectral e (B) aumento da tolerância de dispersão de velocidade de grupo (GVD) como função do nível de modulação M .

Formato de modulação Poli-binario “Polybinary”

- .- Modulação multinível
- .- Correlação entre bits adjacentes
- .- O sinal não muda mais do que um nível entre bits consecutivos

Processo de codificação de um sinal poli-binario

Sequência inicial de bits (NRZ): $\{a_k\}$

Sequência pre-codificada: $\{b_k\} : b_k = a_k \oplus b_{k-1} \oplus b_{k-2} \oplus \cdots b_{k-(M-2)}$

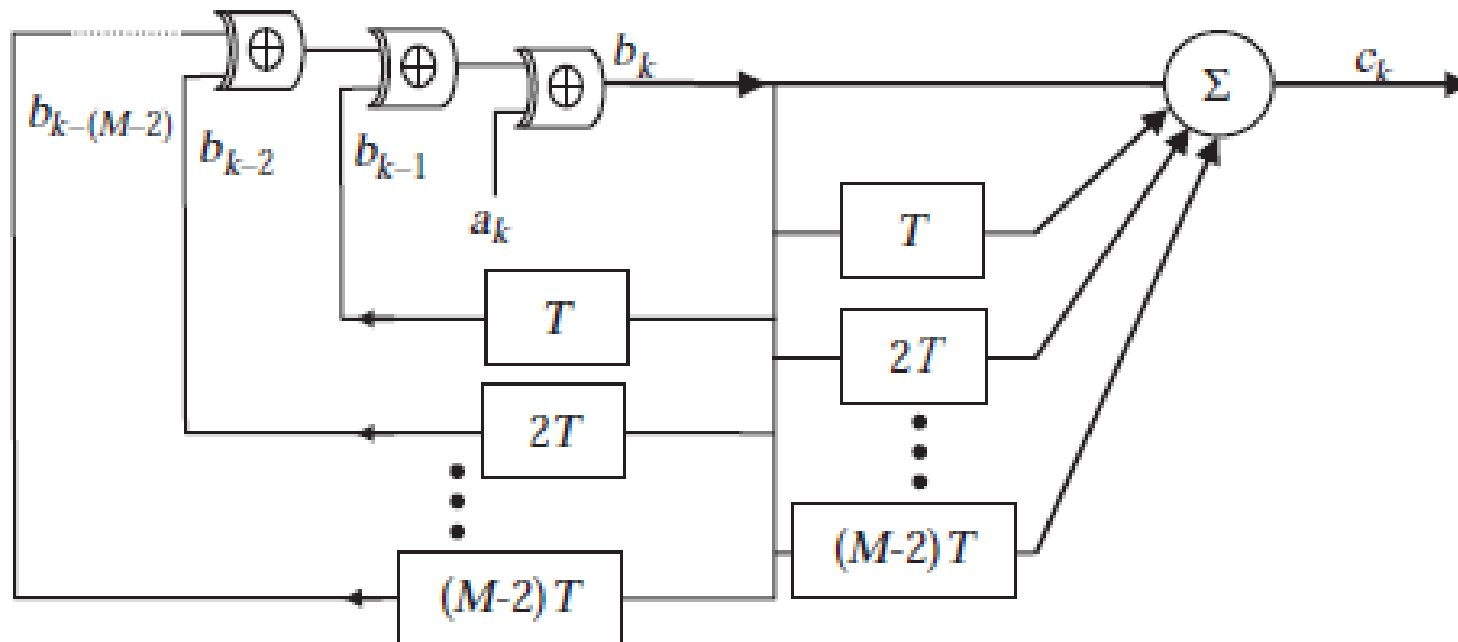
$\oplus$: representa a operação “ou” exclusiva

Sequência Polibinaria: $\{c_k\} : c_k = \sum_{i=1}^{M-2} b_{k-i}$

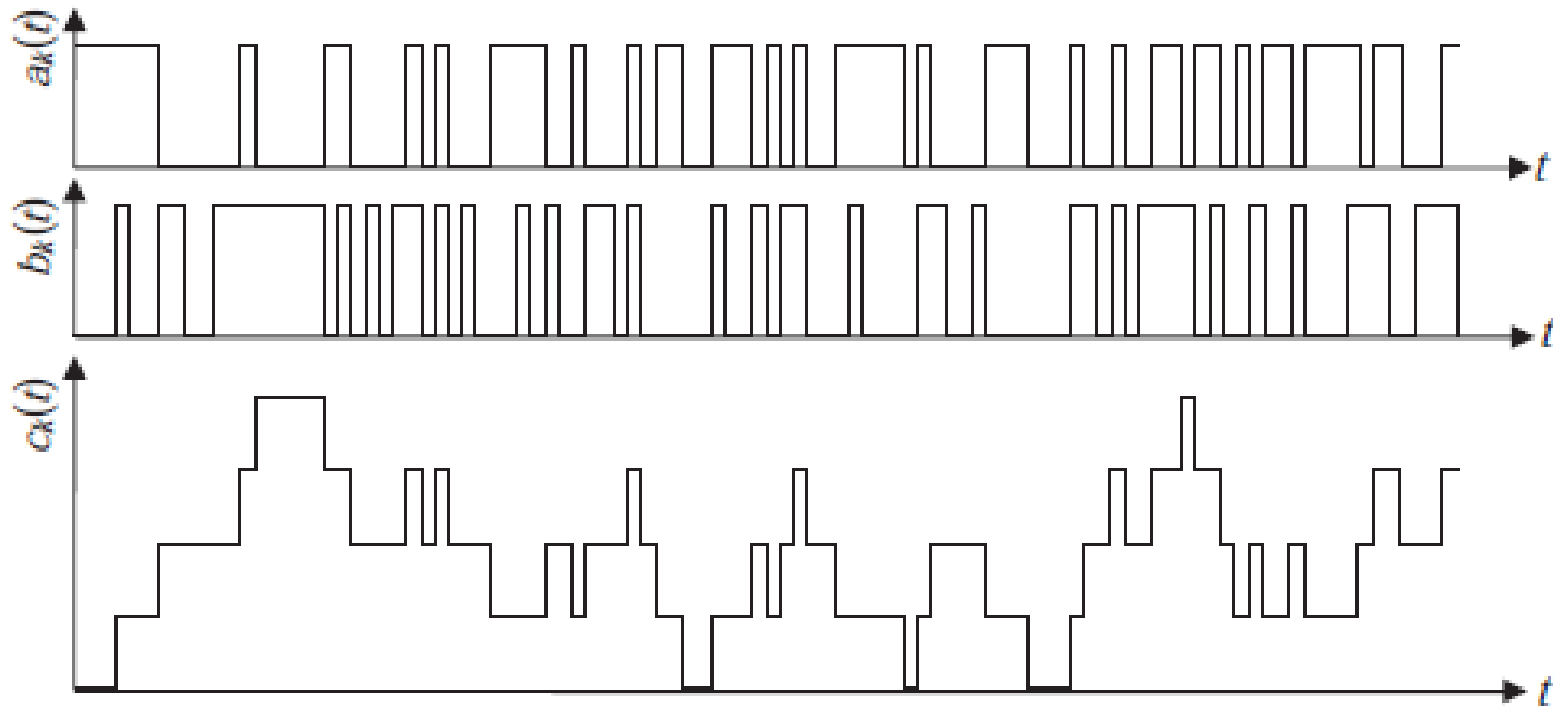
Formato de modulação Poli-binario “Polybinary”

$$\{b_k\} : b_k = a_k \oplus b_{k-1} \oplus b_{k-2} \oplus \cdots \oplus b_{k-(M-2)}$$

$$\{c_k\} : c_k = \sum_{i=1}^{M-2} b_{k-i}$$



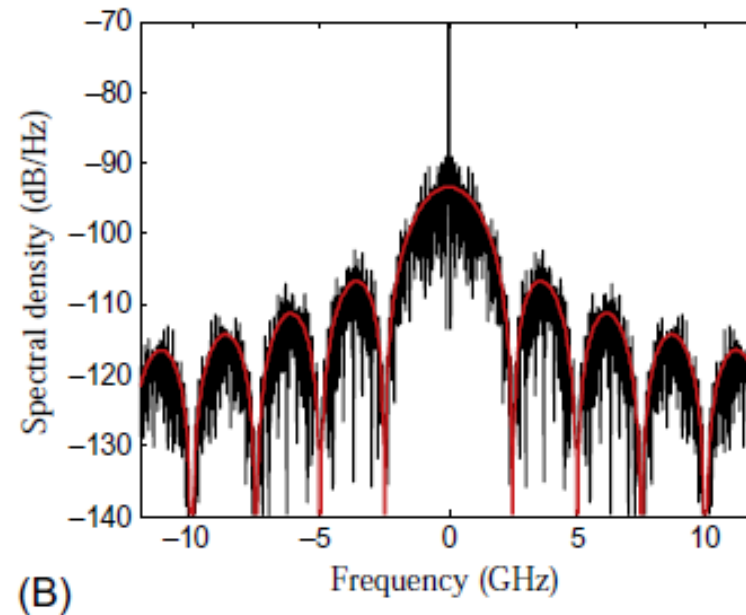
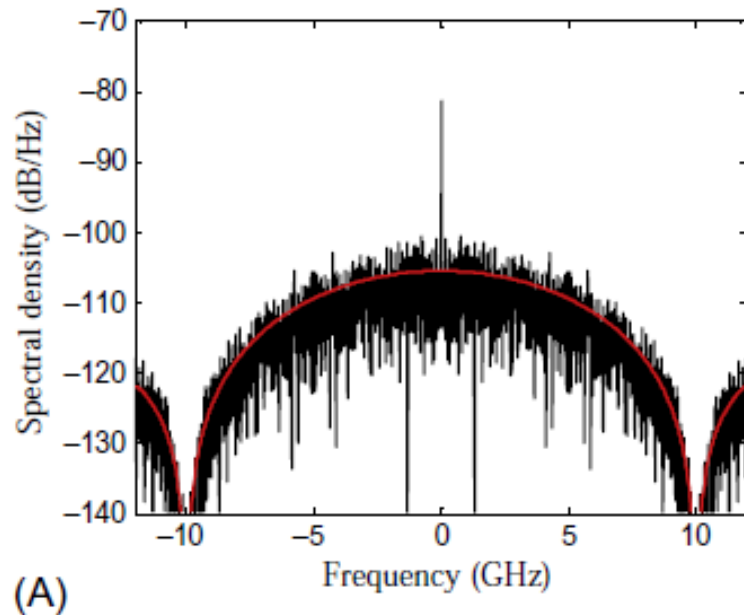
Formato de modulação Poli-binario “Polybinary”



Exemplo de codificação polibinária. $a_k(t)$ é a sequência binária original, $b_k(t)$ é a sequência binária intermediária, e $c_k(t)$ é a sequência polibinária de 5 níveis

Recuperação da sequência original: $a_k = c_k \bmod 2$

Formato de modulação Poli-binario “Polybinary”



Espectro vermelho: previsto pela Eq. abaixo; para $M=2$ (A) e $M=5$ (B). Curvas pretas espectros: Transformadas de Fourier de $a_k(t)$ (A) e $c_k(t)$ (B), ambas com taxa de bits de 10 Gb/s.

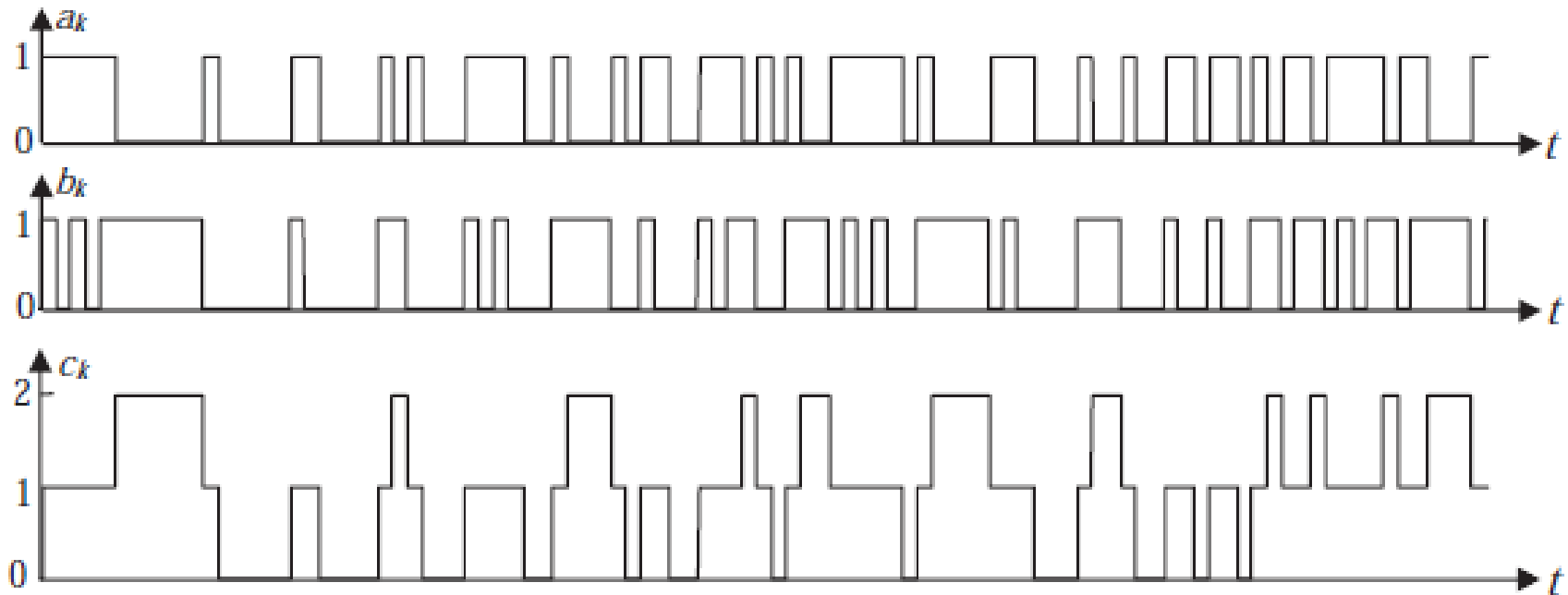
Densidade espectral de potência da
forma de onda polibinaria

$$S(f) = \frac{(M - 1)^2}{4} \text{sinc}^2[(M - 1)fT]$$

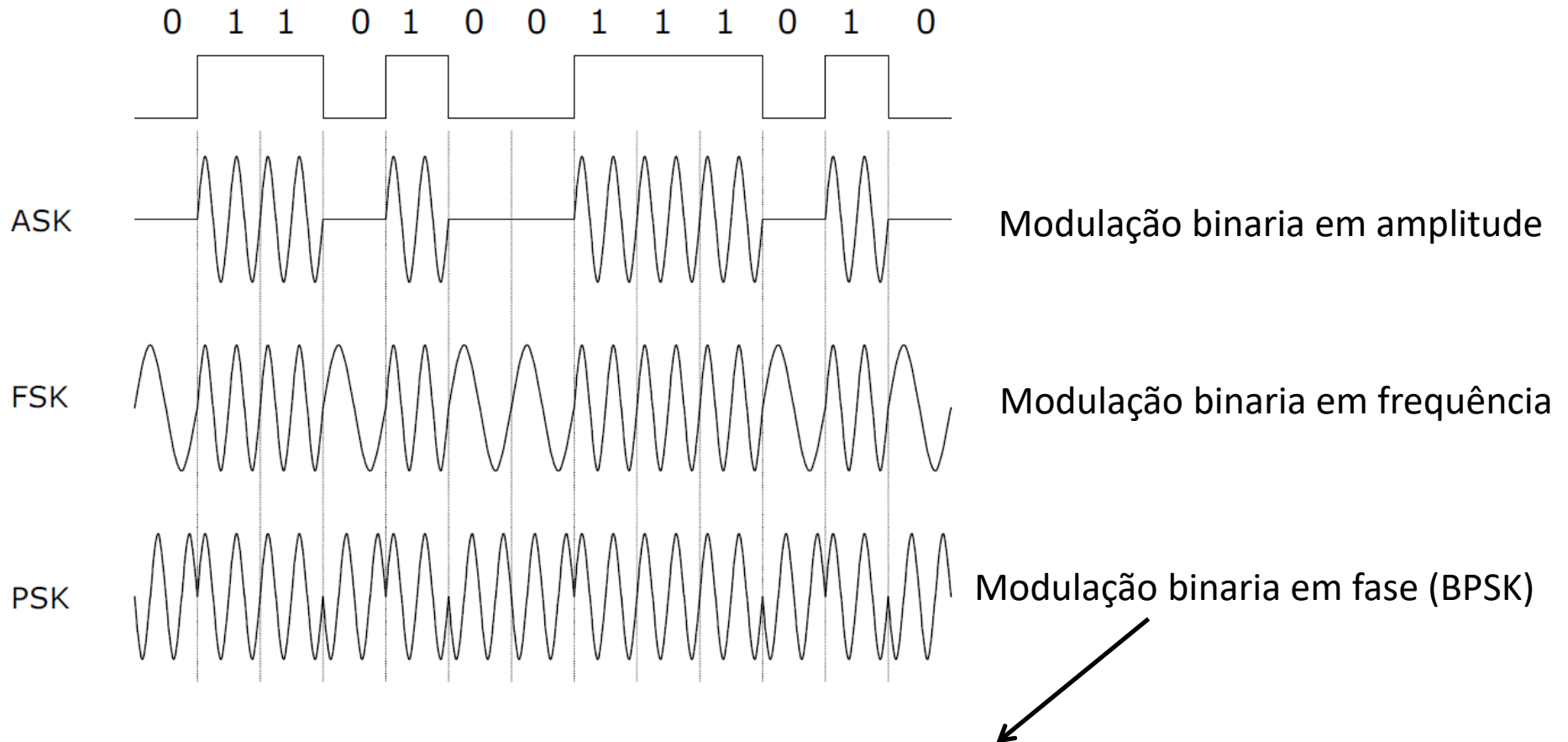
T: Período de um símbolo
M: Nível de modulação

Formato de modulação Duo-binário: $M=3$

- Utilizado com muita frequência em sistemas de comunicação óptica
- Correlação entre bits adjacentes
- O sinal não muda mais do que um nível entre bits consecutivos

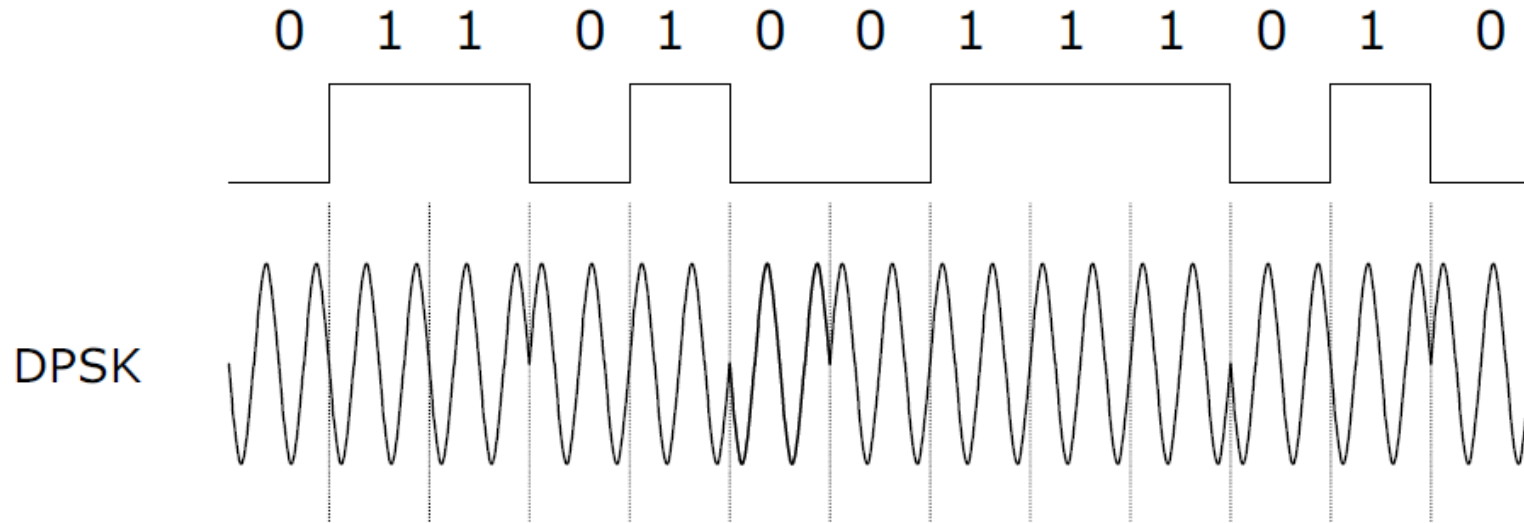


Resumo da Modulação Binária de fase: BPSK



$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{Binário "1"} \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{Binário "0"} \end{cases} = -A\cos(2\pi f_c t)$$

Modulação por diferença de fase (DPSK)

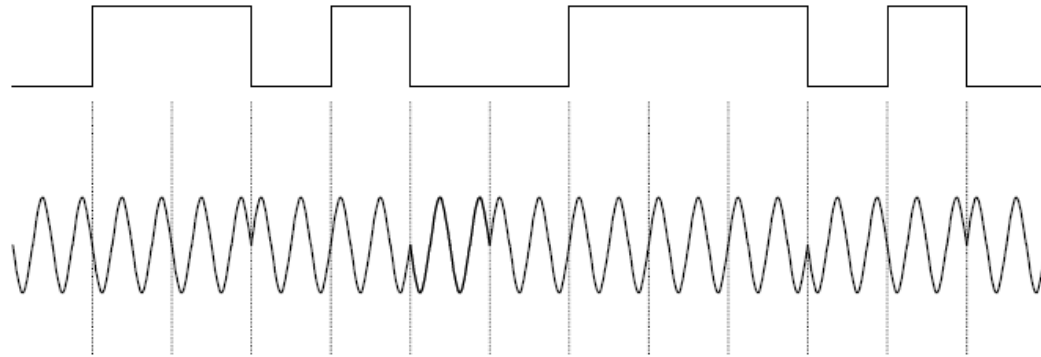


- .- Na transição para o nível "1" a fase **no** muda
- .- Na transição para nível "0" a fase muda

De-modulação de um sinal (DPSK)

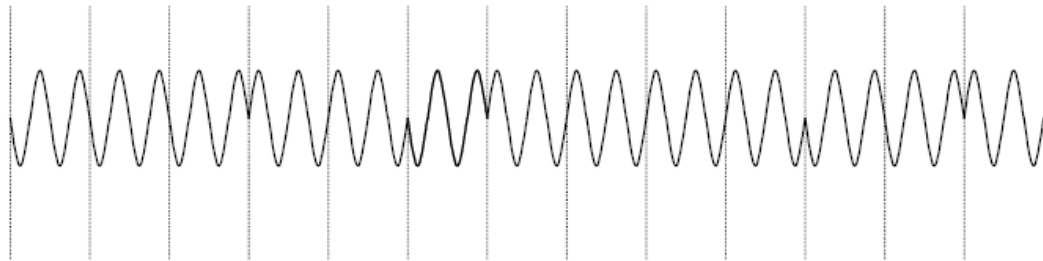
0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0

Sinal sem retardo



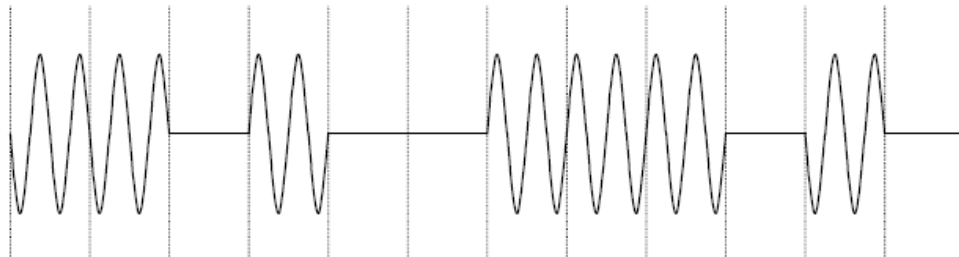
+

Sinal com retardo de um bit

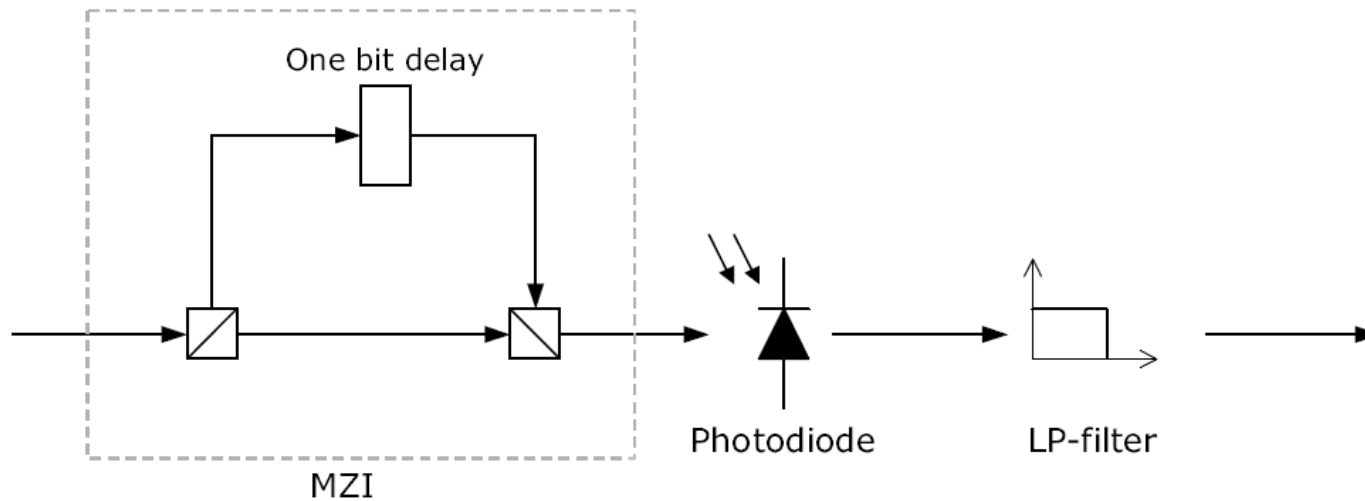


=

Sinal de saída



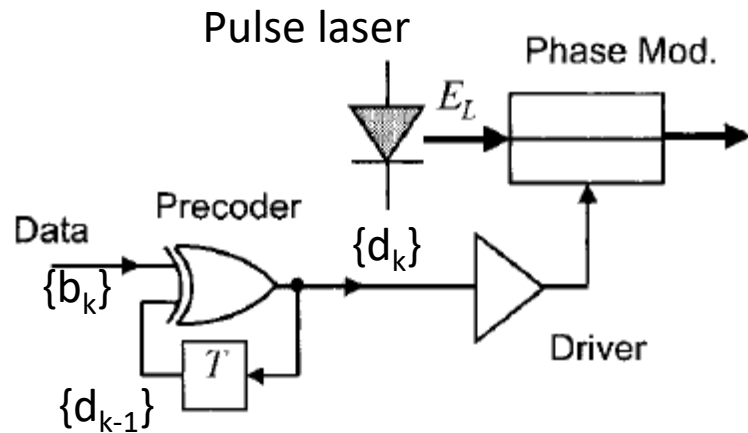
Demodulação de um sinal (DPSK)



De-modulação por interferometria

Modulação por diferença de fase (DPSK)

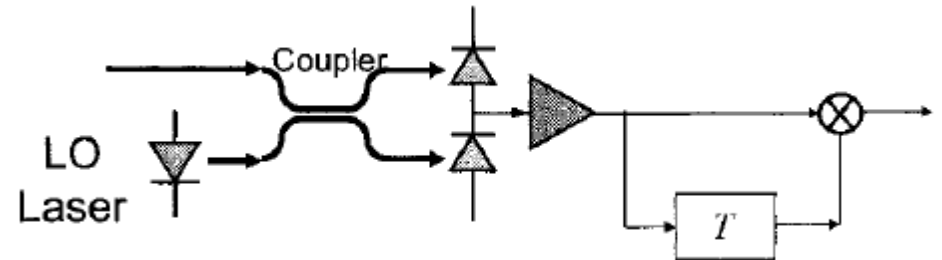
Transmissor DPSK



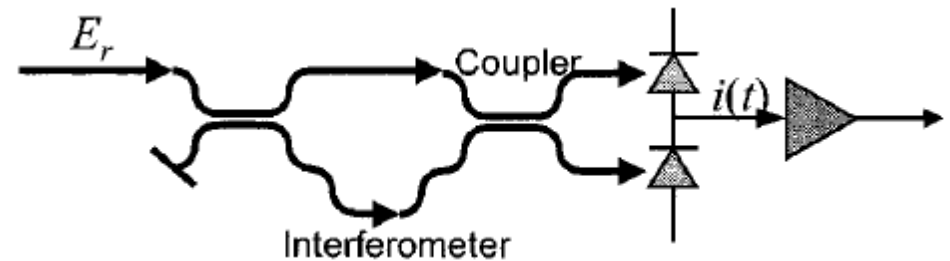
$$d_k = d_{k-1} \oplus b_k$$

b_k	d_{k-1}	d_k
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1
0	1	0

Receptor heterodino DPSK



Receptor de detecção direta DPSK

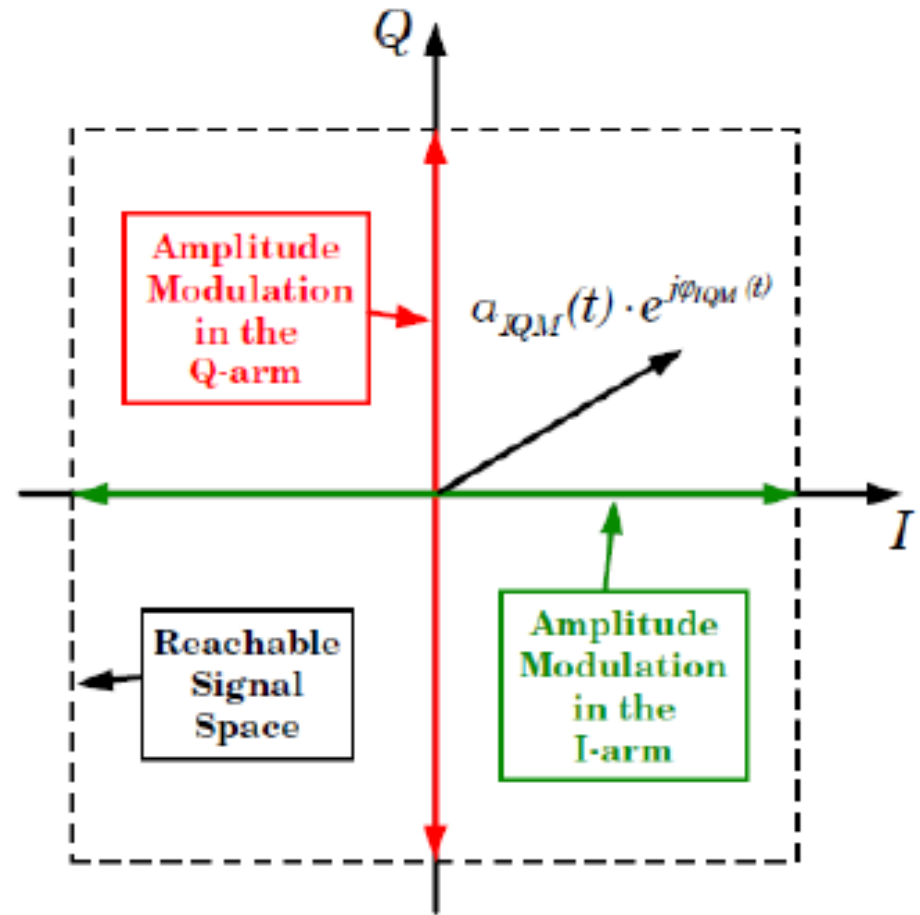


Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

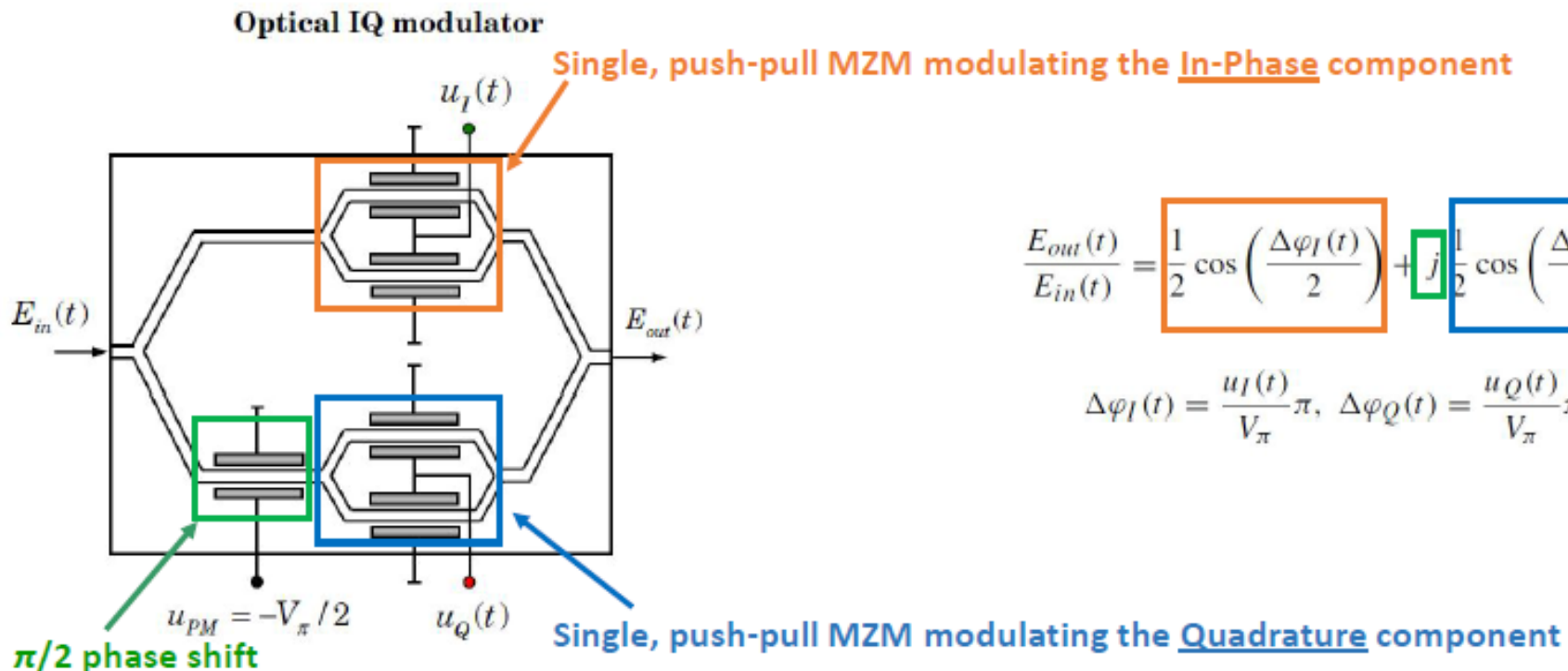
$$s_m(t) = \text{Re}[\mathbf{r}_m(t) \exp(j\varphi_m(t))]$$

$$r_m(t) = g(t) \sqrt{I_m^2 + Q_m^2}$$

$$\varphi_m(t) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_m}{I_m} \right)$$



Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

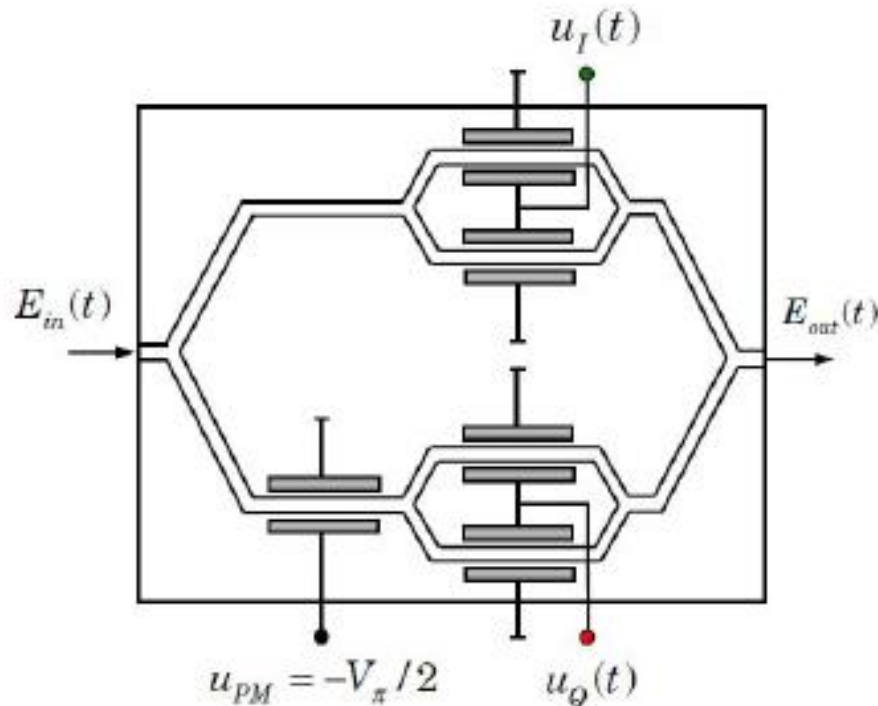


$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\phi_I(t)}{2}\right) + j \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\phi_Q(t)}{2}\right)$$

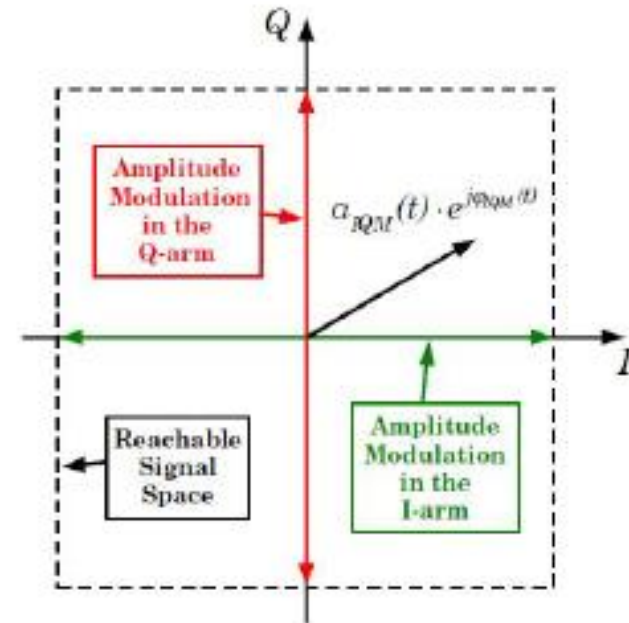
$$\Delta\phi_I(t) = \frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi, \quad \Delta\phi_Q(t) = \frac{u_Q(t)}{V_\pi} \pi.$$

Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

Optical IQ modulator



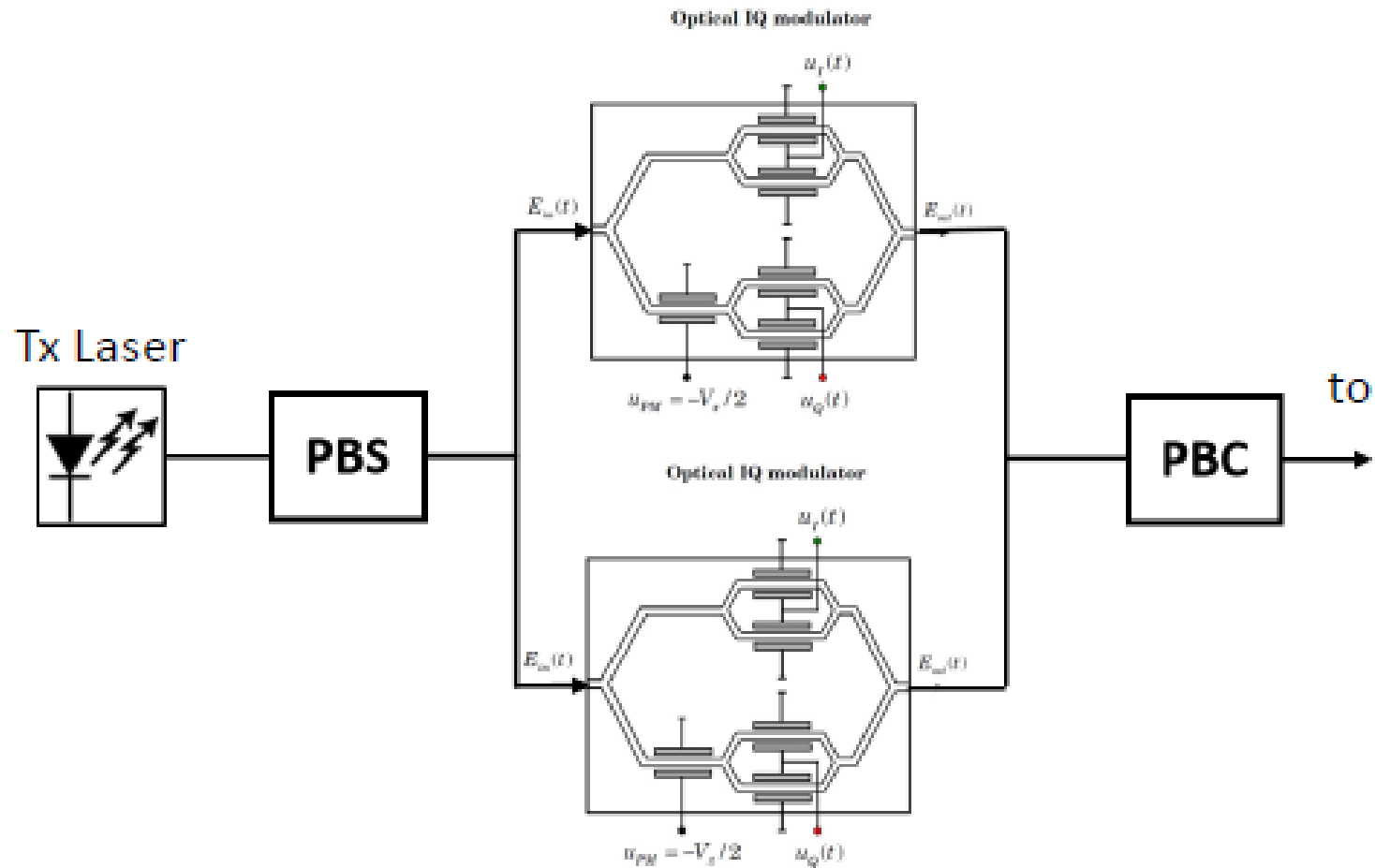
Principle of IQ modulation



$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\varphi_I(t)}{2}\right) + j \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\varphi_Q(t)}{2}\right)$$

$$\Delta\varphi_I(t) = \frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi, \quad \Delta\varphi_Q(t) = \frac{u_Q(t)}{V_\pi} \pi.$$

Transmissor (QAM) com duas polarizações



Aplicações dos receptores ópticos coerentes

Tomografia de coerência óptica
volumétrica na ordem de metros
cúbicos

