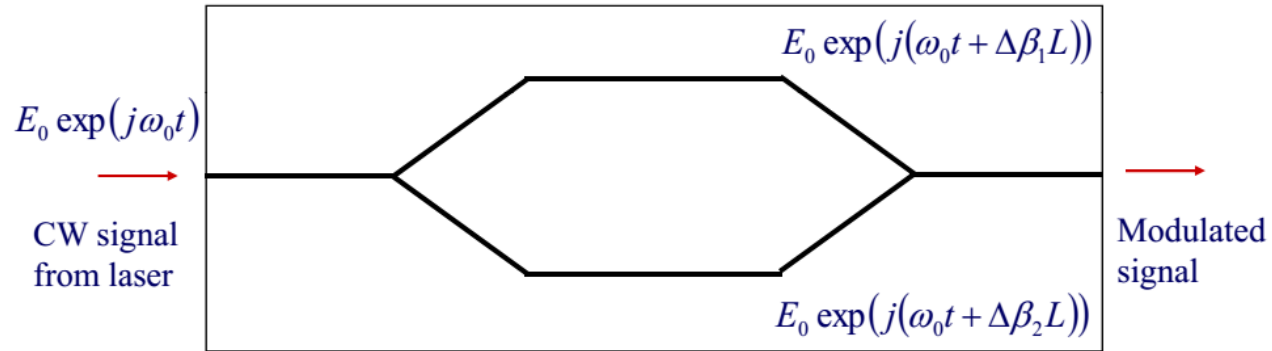
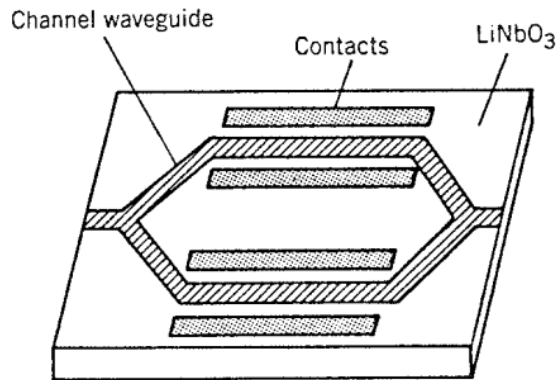


Modulador Óptico

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:

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

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):

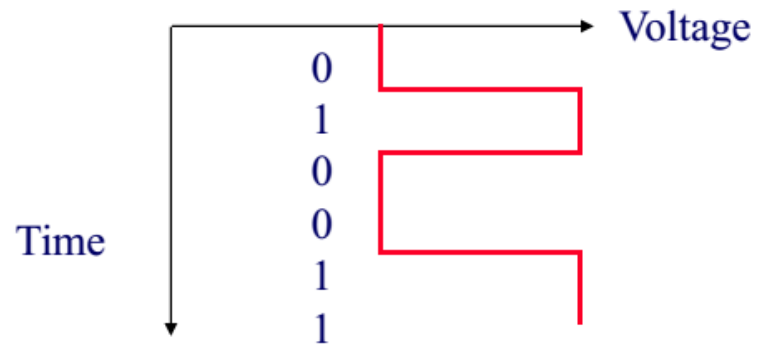
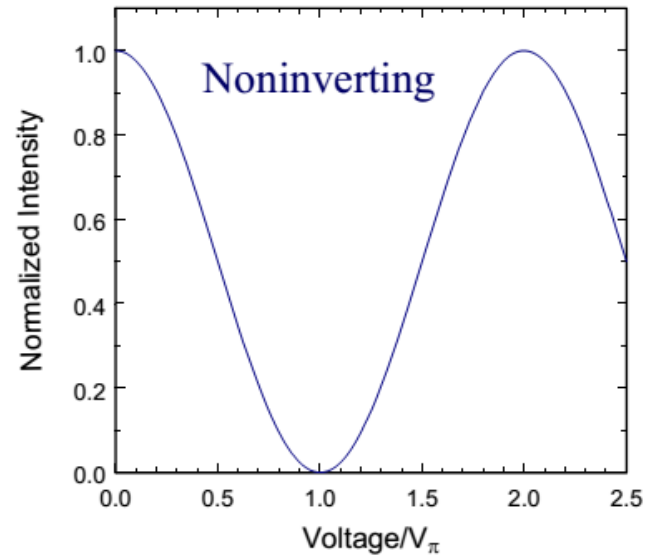
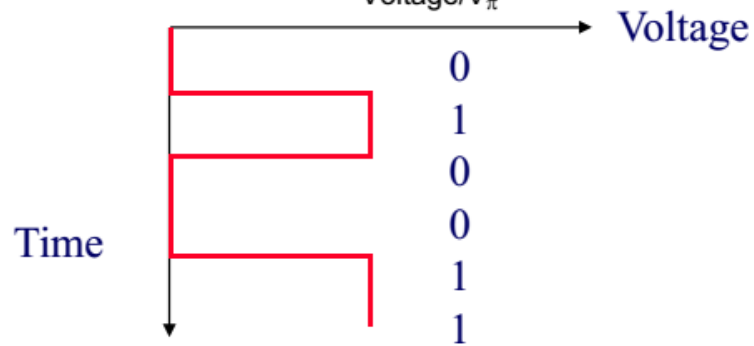
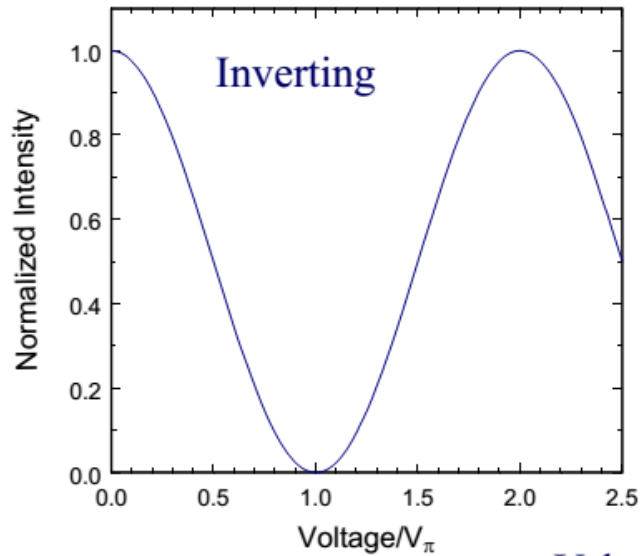
$$\left\{ \begin{aligned} \phi_{chirp}(V_1(t), V_2(t)) &= \frac{\pi\eta L}{\lambda_0} [V_2(t) + V_1(t)] \\ \eta_2 &= \eta_1 = \eta \end{aligned} \right.$$

Frequência de batimento:

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

Moduladores Ópticos

Modulador tipo Mach - Zehnder



Modo Push-Pull do modulador MZM

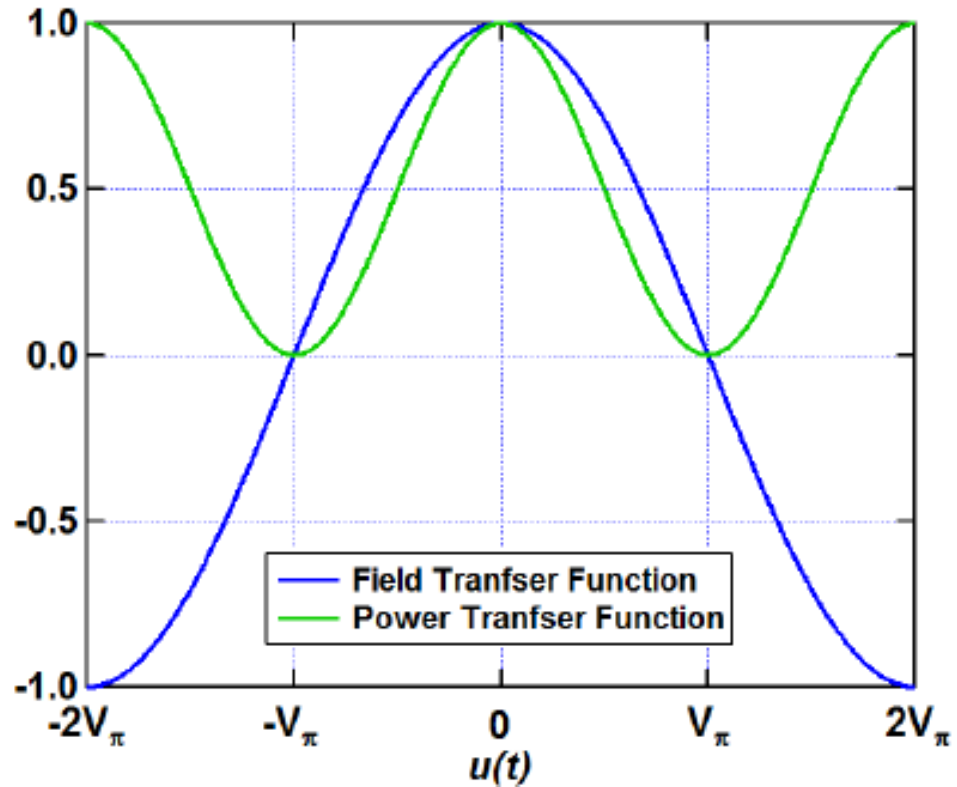
$$V_1(t) = -V_2(t) = u(t)$$

Amplitude de saída do campo

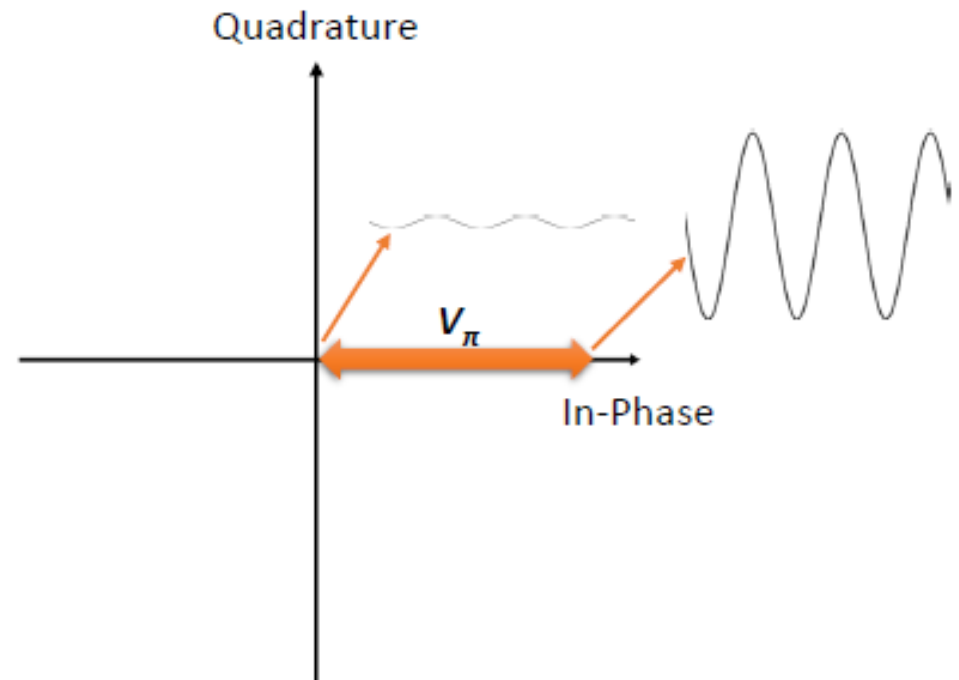
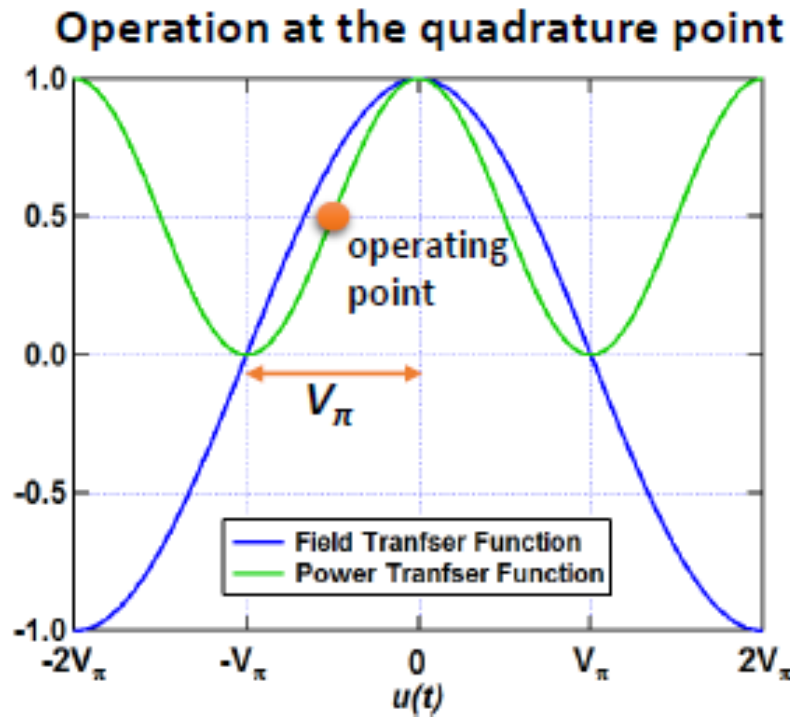
$$E = E_0 \cos\left(\frac{\pi u(t)}{2 V_\pi}\right)$$

Potência de saída do campo

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



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

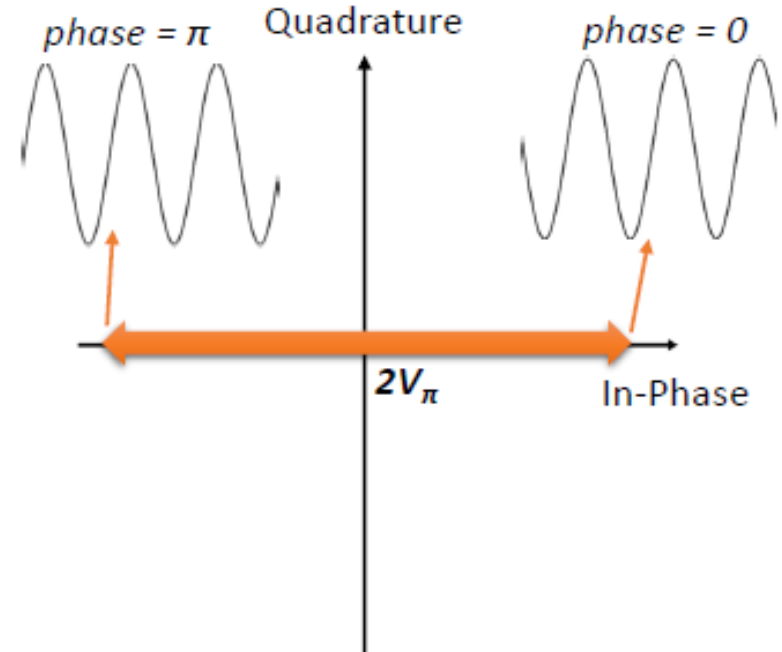
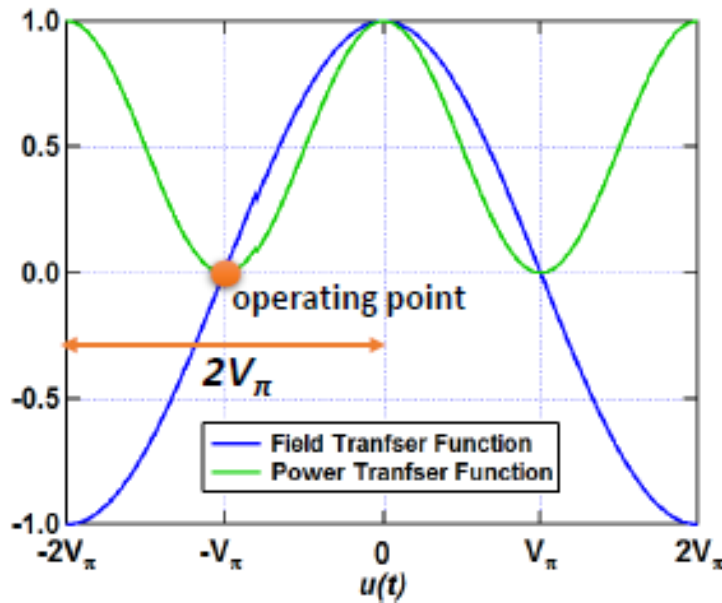


Polarização: $V_{\text{bias}} = -V_\pi / 2$

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

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

Operation at the minimum transmission point

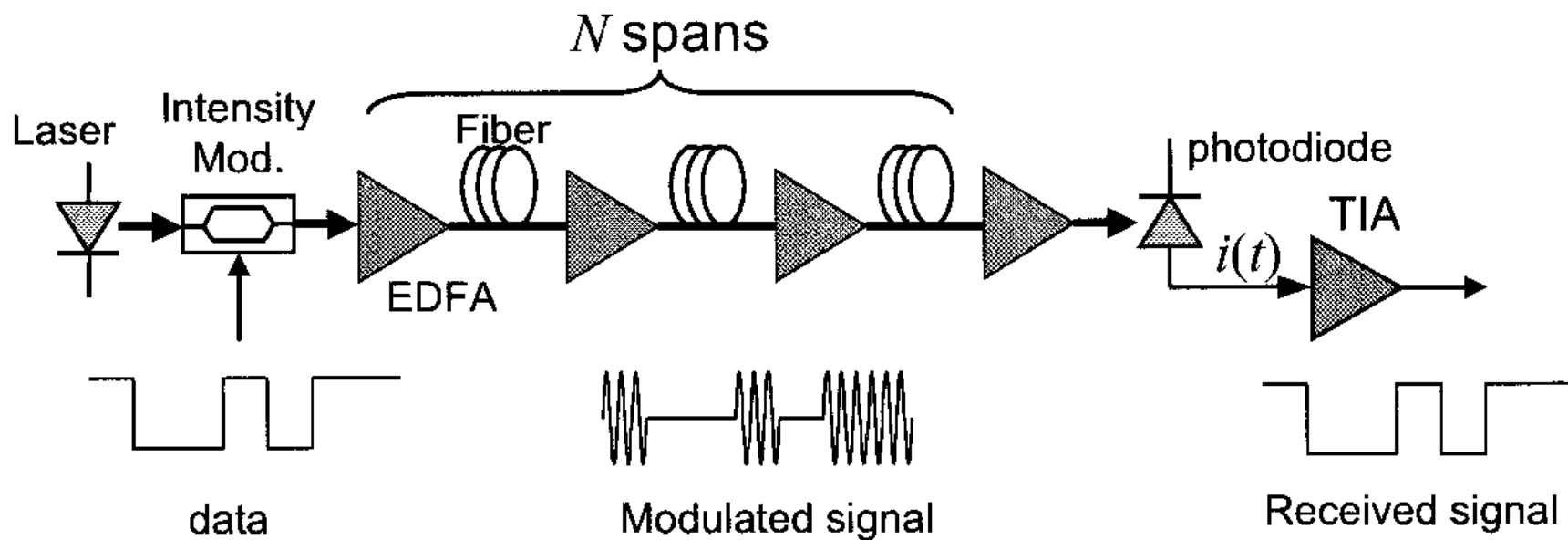


Polarização: $V_{\text{bias}} = -V_\pi$

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

Formatos de Modulação para sistemas de transmissão por fibra óptica

Modulação de intensidade/Detecção Direta (ASK)

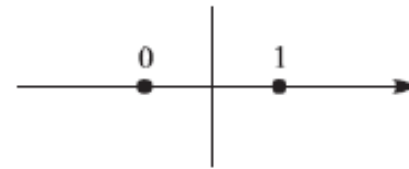


Modulação de amplitude

$$s_m(t) = A_m \cos(2\pi f_c t)$$

$$A_m = 0, 1, \dots (M - 1)$$

$$M = 2^k$$



(a) $M = 2$

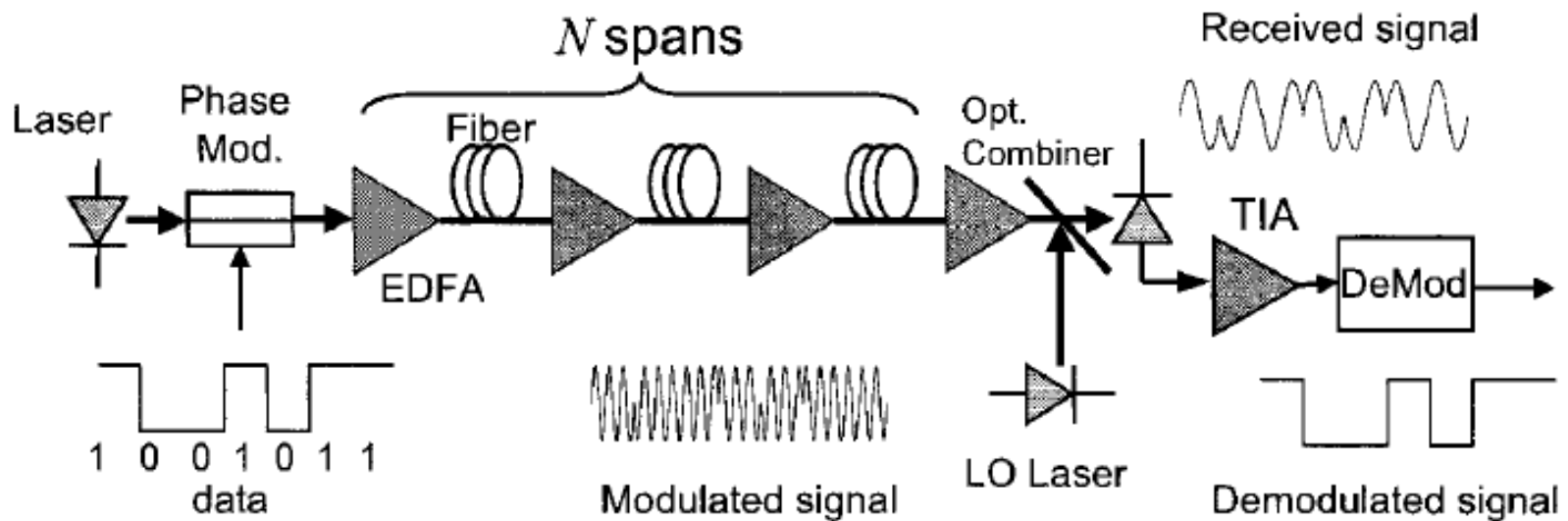


(b) $M = 4$



(c) $M = 8$

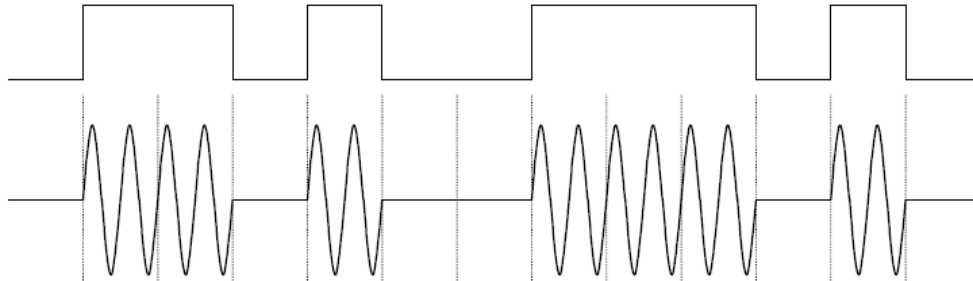
Modulação de Fase (PSK)



Modulação de Fase (PSK)

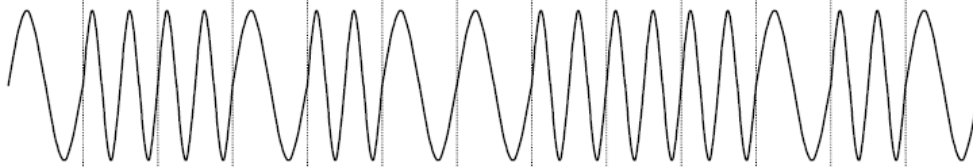
0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0

ASK



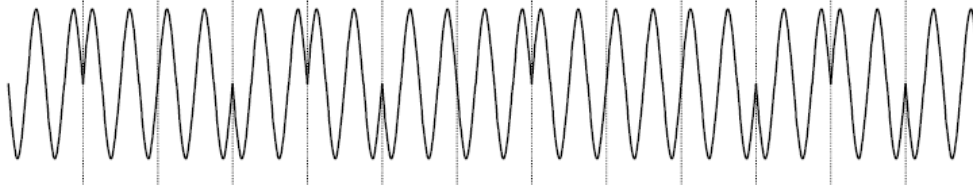
Modulação binária em amplitude

FSK



Modulação binária em frequência

PSK

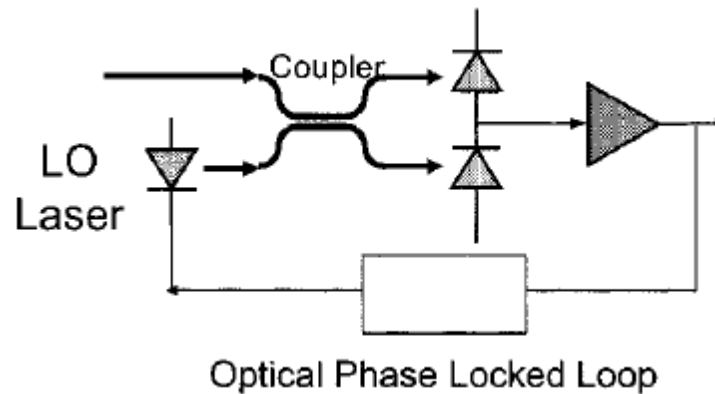


Modulação binária em fase (BPSK)

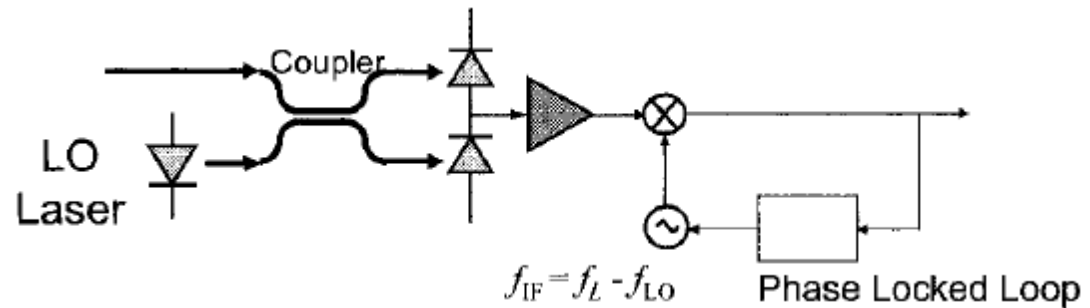
$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{Binário "1"} \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi) = -A\cos(2\pi f_c t) & \text{Binário "0"} \end{cases}$$

Receptor de sistemas com modulação de fase (PSK)

Receptor Homodino

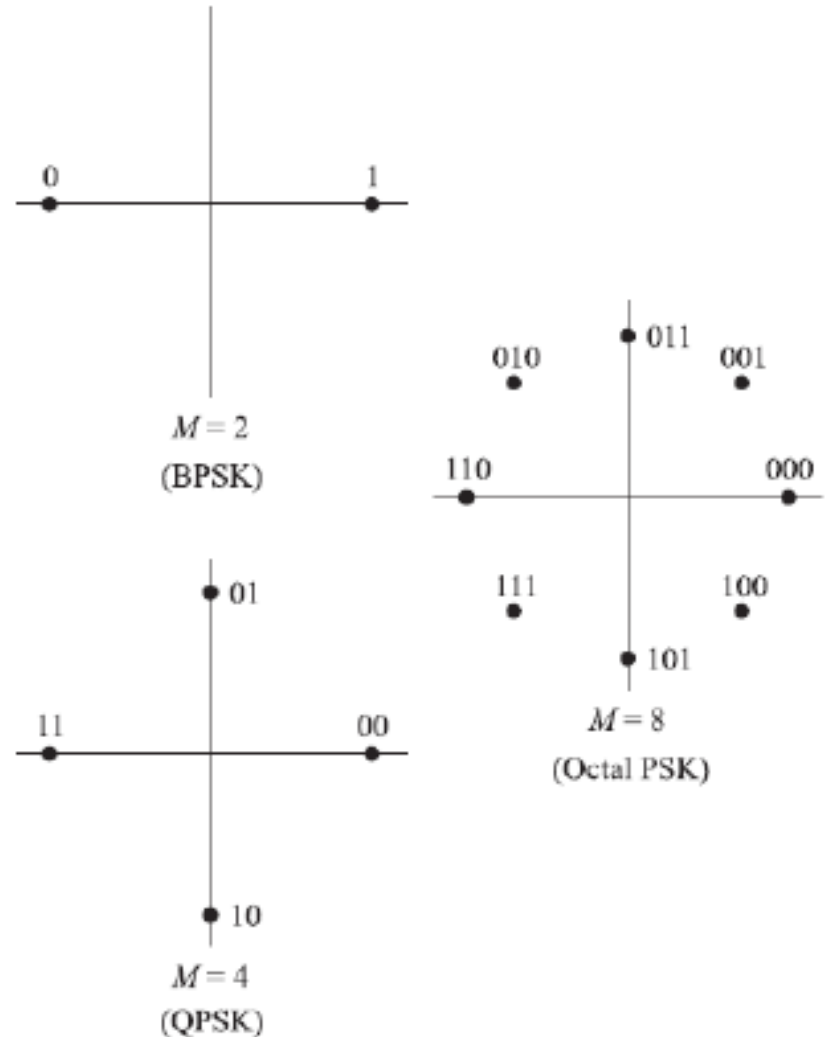


Receptor Heterodino

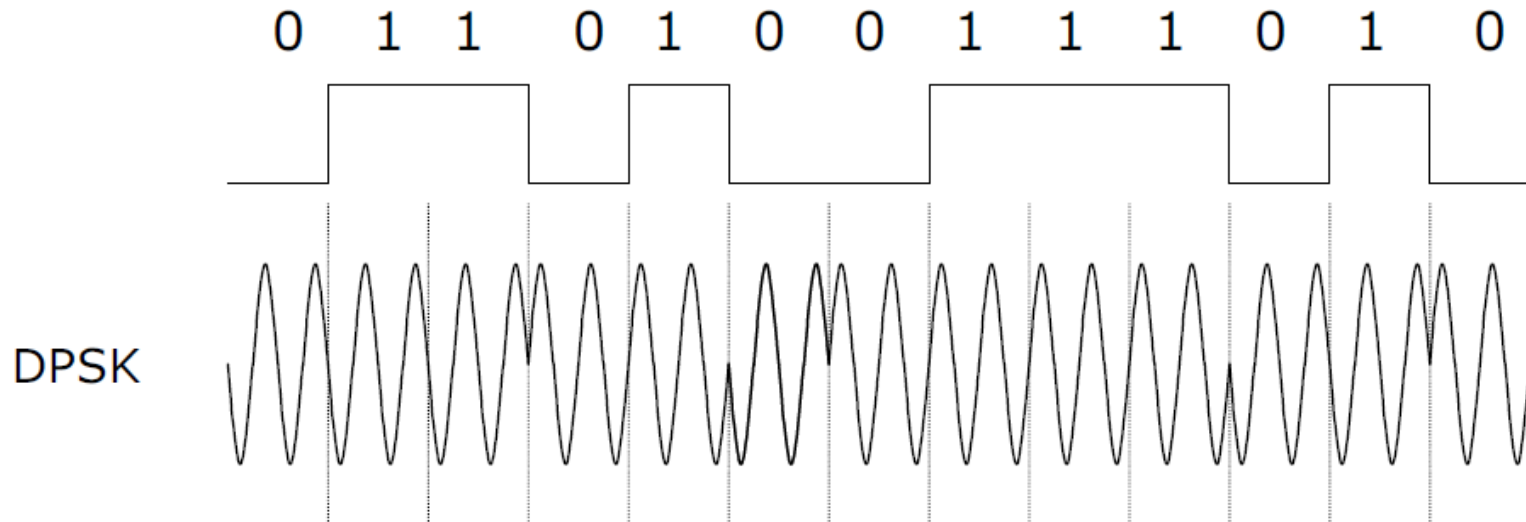


Modulação de fase PSK em quadratura

$$s_m(t) = g(t) \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(m-1)\right)$$



Modulação por diferença de fase (DPSK)

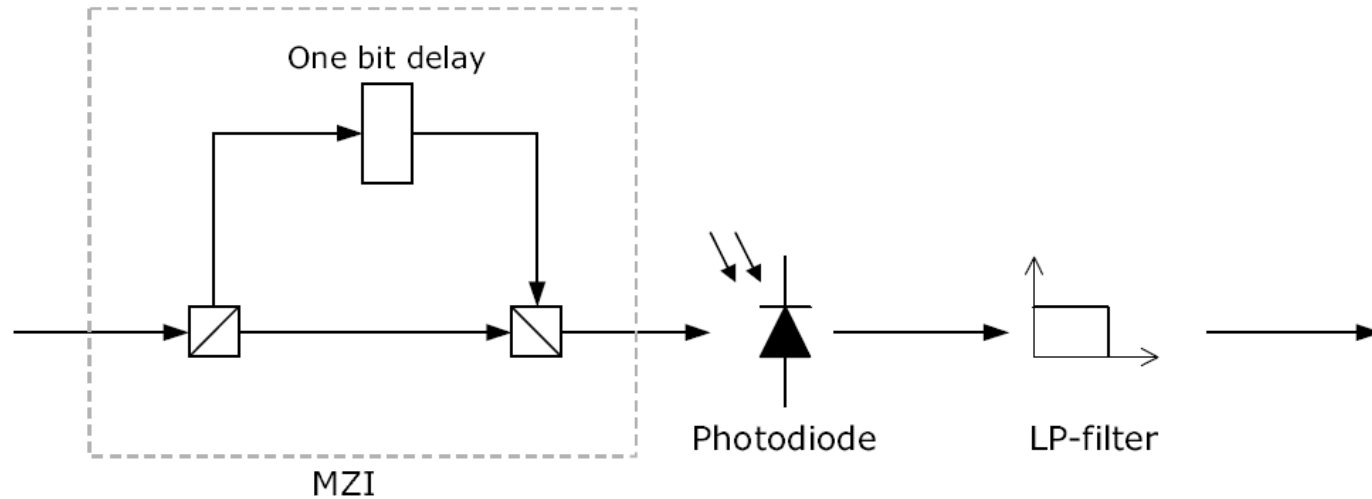


- .- No sinal no nível "1" a fase não muda
- .- No sinal no nível "0" a fase muda



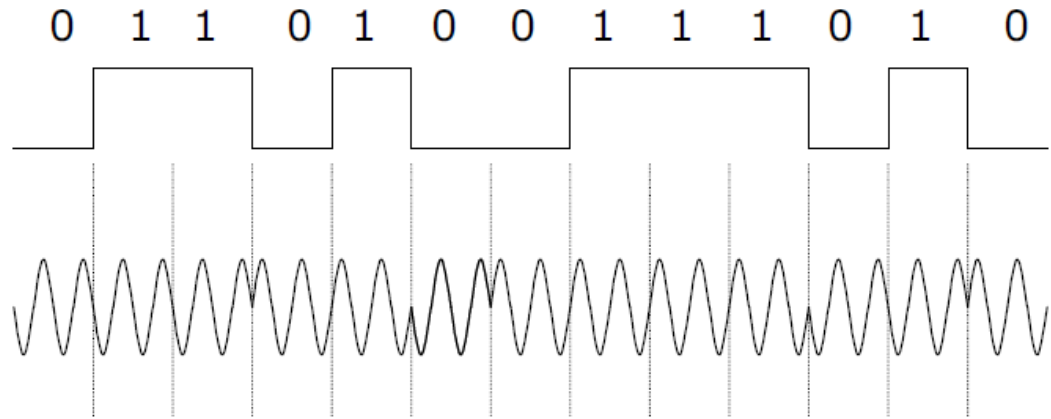
Diferença de fase entre bits próximos

Demodulação de um sinal (DPSK)

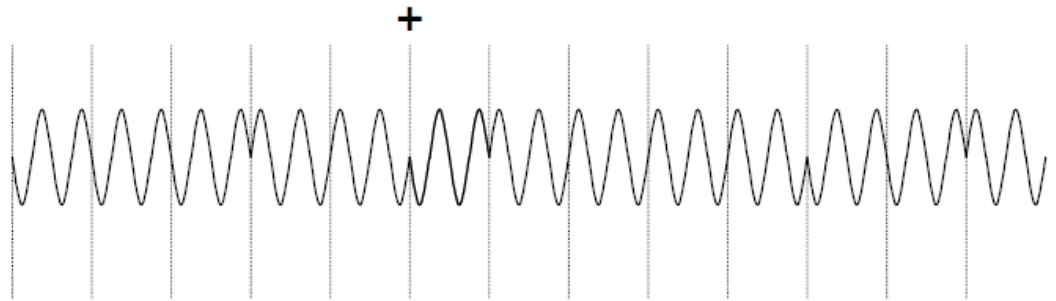


Demodulação por interferometria

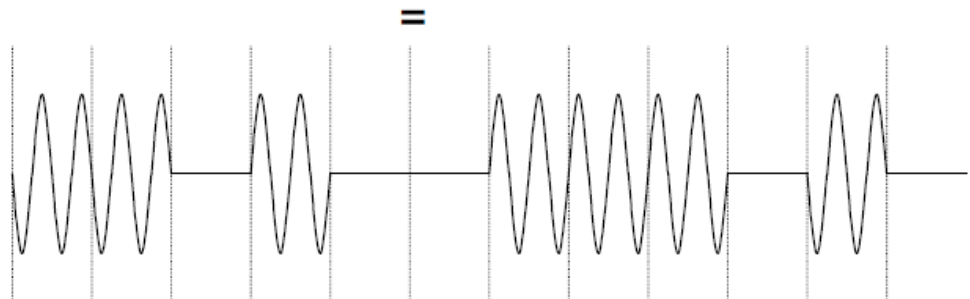
Demodulação de um sinal (DPSK)



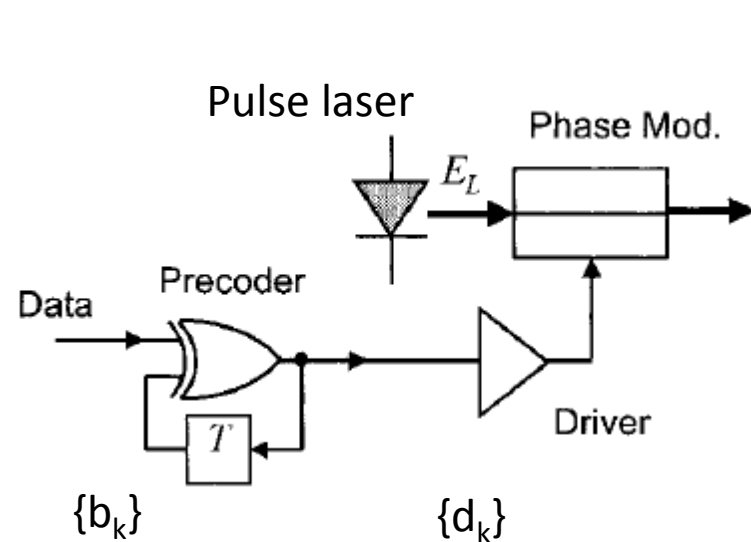
Sinal com retardo de um bit



Sinal de saída

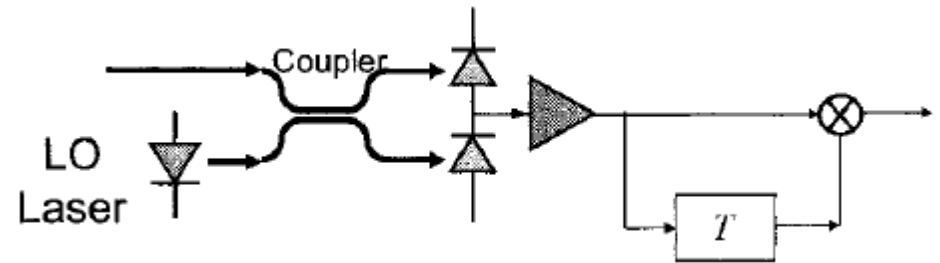


Modulação por diferença de fase (DPSK)

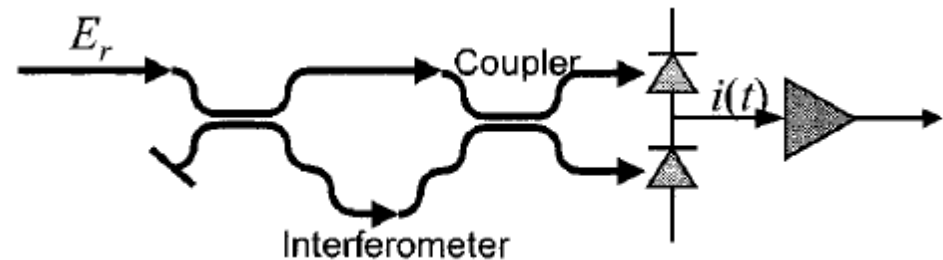


$$d_k = d_{k-1} \oplus b_k$$

Transmissor DPSK



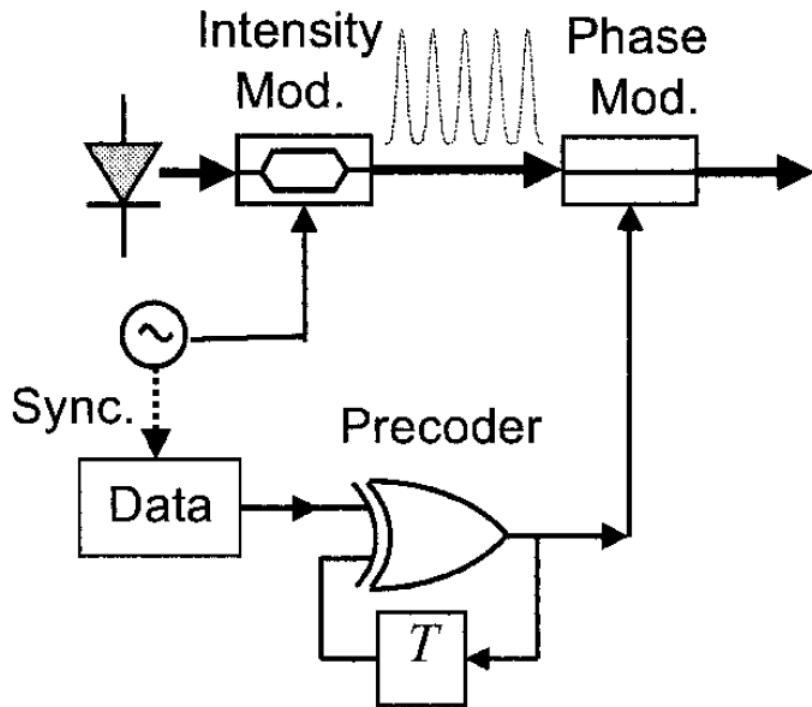
Receptor heterodino DPSK



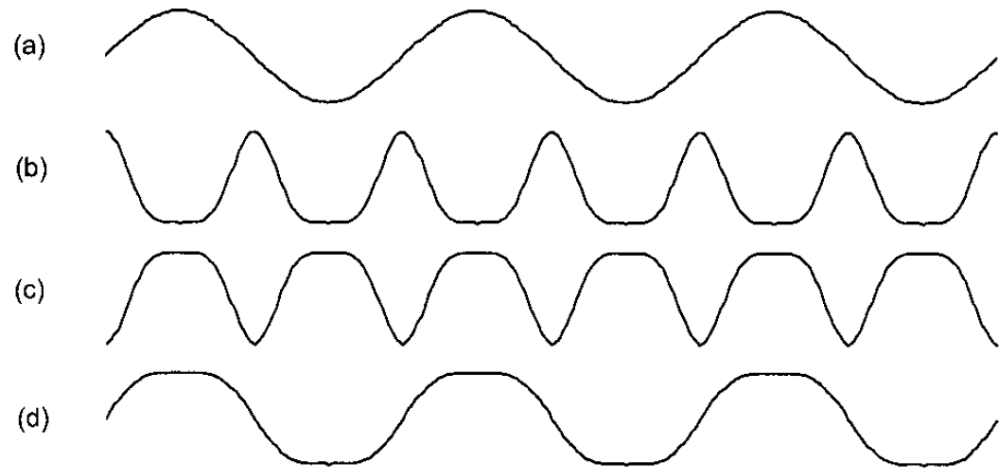
Receptor de detecção direta DPSK

Modulador diferencial de fase (DPSK)

Geração de um sinal RZ-DPSK



Transmissor de uma sinal modulado RZ-DPSK



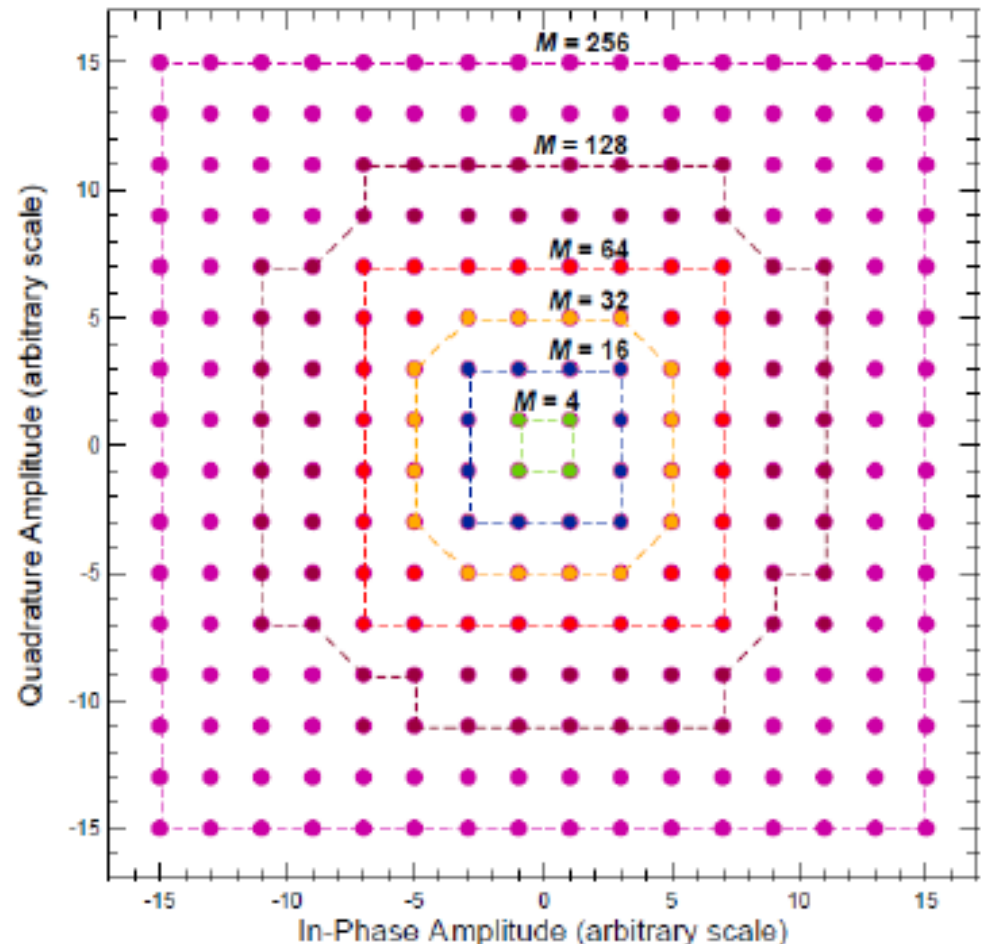
Forma de onda do sinal modulado pulsado:

- (a) Sinal de sincronismo (senoidal)
- (b) Sinal modulado: modulador polarizado no ponto máximo de transmissão e $V_{pp} = 2V_{\pi}$
- (c) Sinal modulado: modulador polarizado no ponto mínimo de transmissão e $V_{pp} = 2V_{\pi}$
- (d) Sinal modulado: modulador polarizado no ponto de inflexão positiva o negativa da transmissão e $V_{pp} = V_{\pi}$

Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

$$s_m(t) = I_m g(t) \cos(2\pi f_c t) - \dots \\ Q_m g(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$I_m, Q_m = \pm 1, \pm 3, \dots, (\pm M - 1)$$

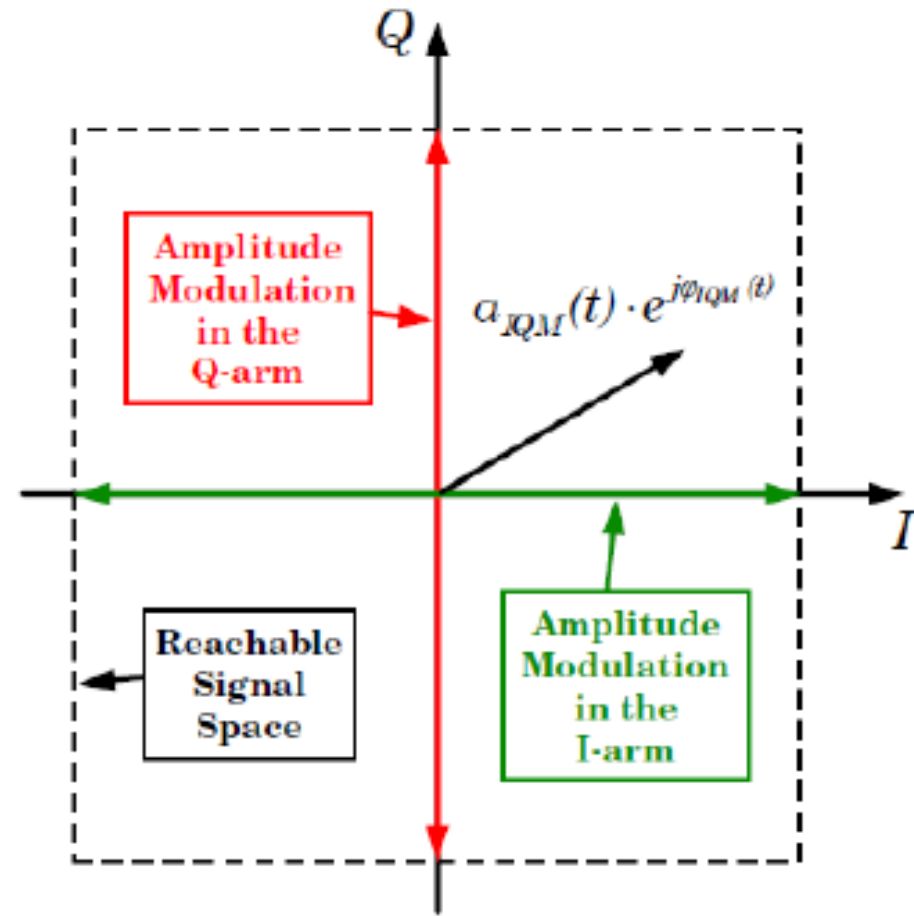


Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

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

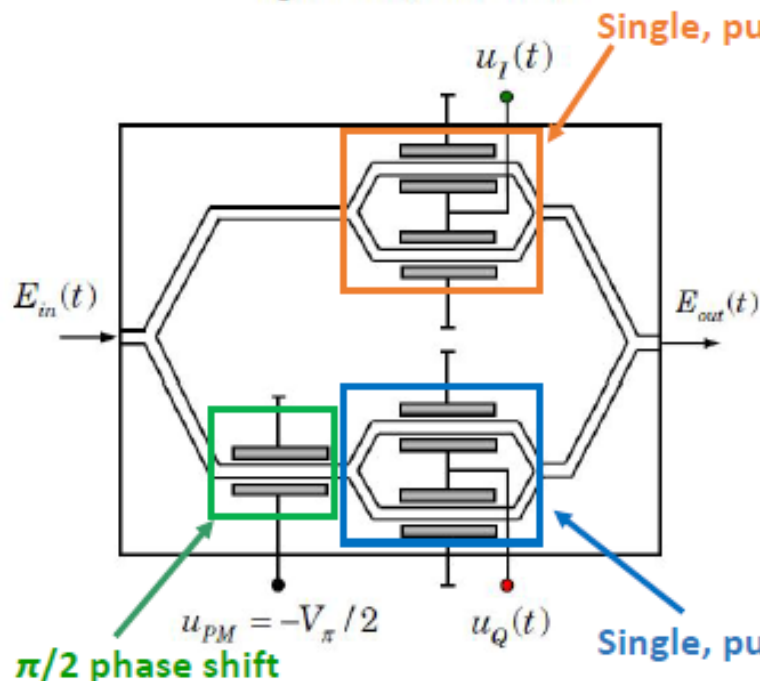
$$r_m(t) = g(t) \sqrt{I_m^2 + Q_m^2}$$

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



Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

Optical IQ modulator



Single, push-pull MZM modulating the In-Phase component

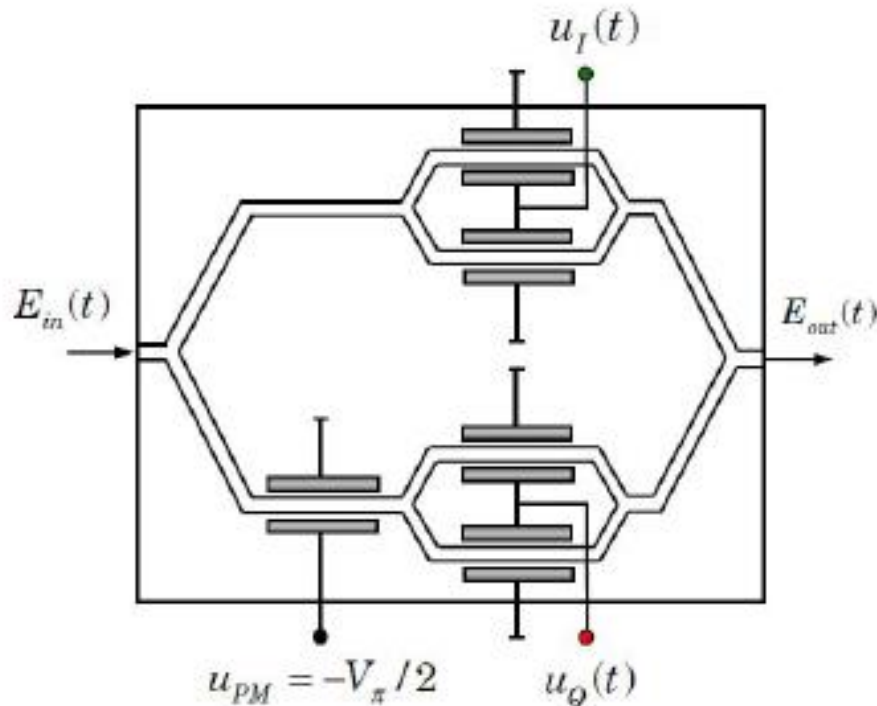
$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\varphi_I(t)}{2}\right) + j \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\varphi_Q(t)}{2}\right)$$

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

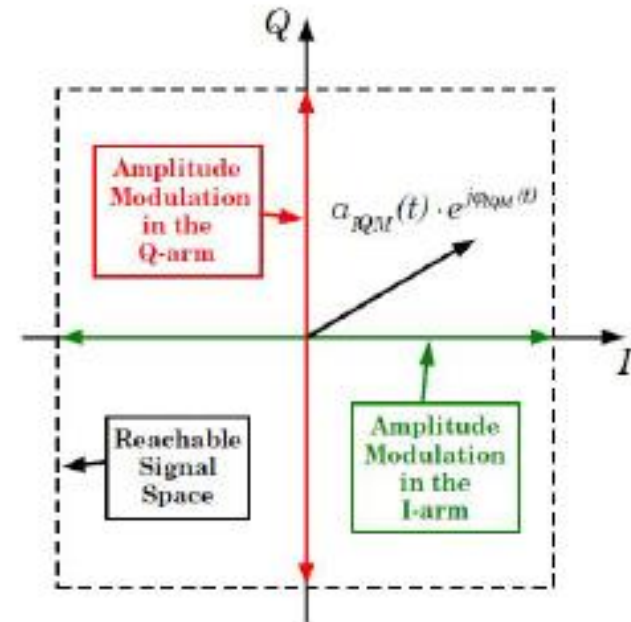
Single, push-pull MZM modulating the Quadrature component

Modulação em quadratura da amplitude (QAM)

Optical IQ modulator



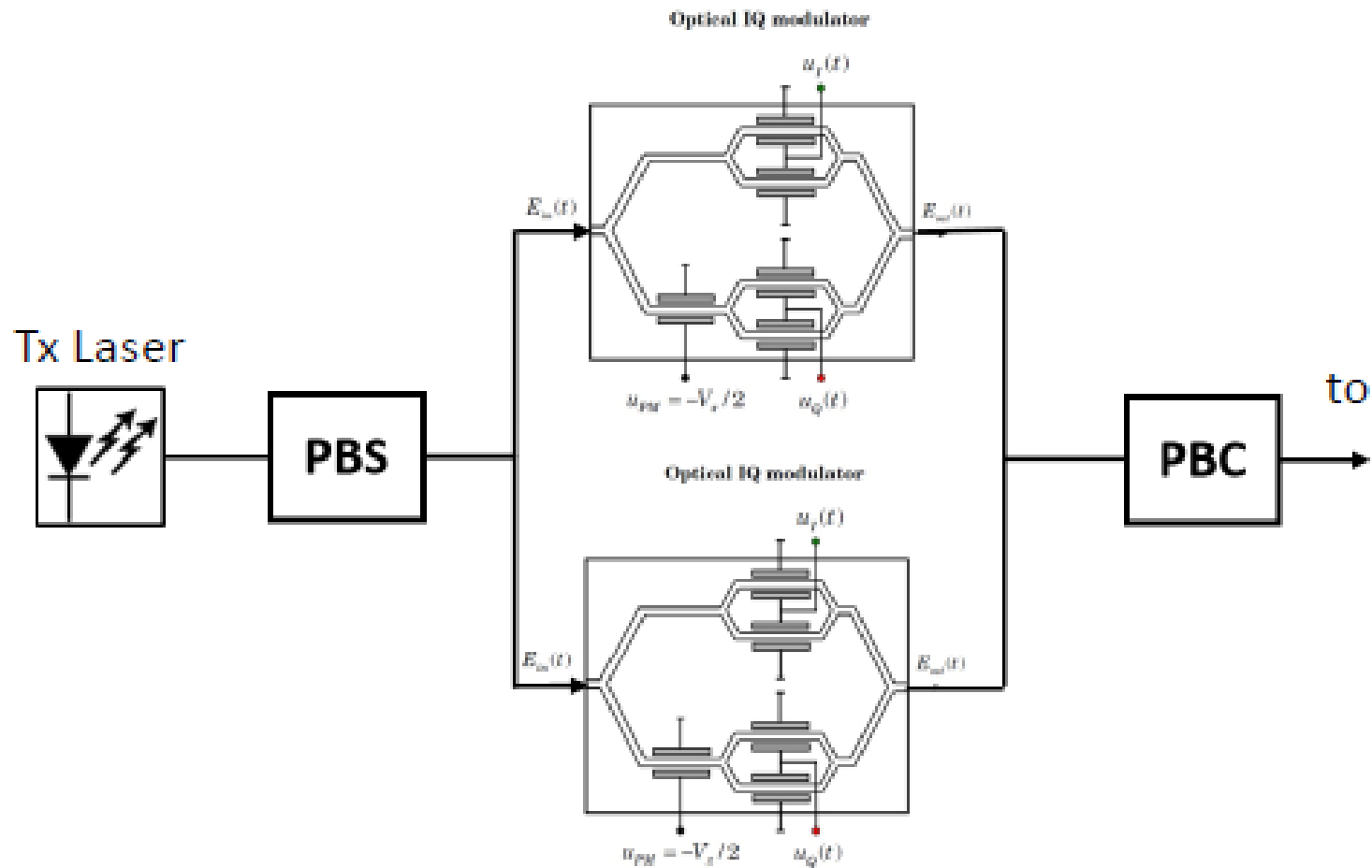
Principle of IQ modulation



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

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

Transmissor com duas polarizações



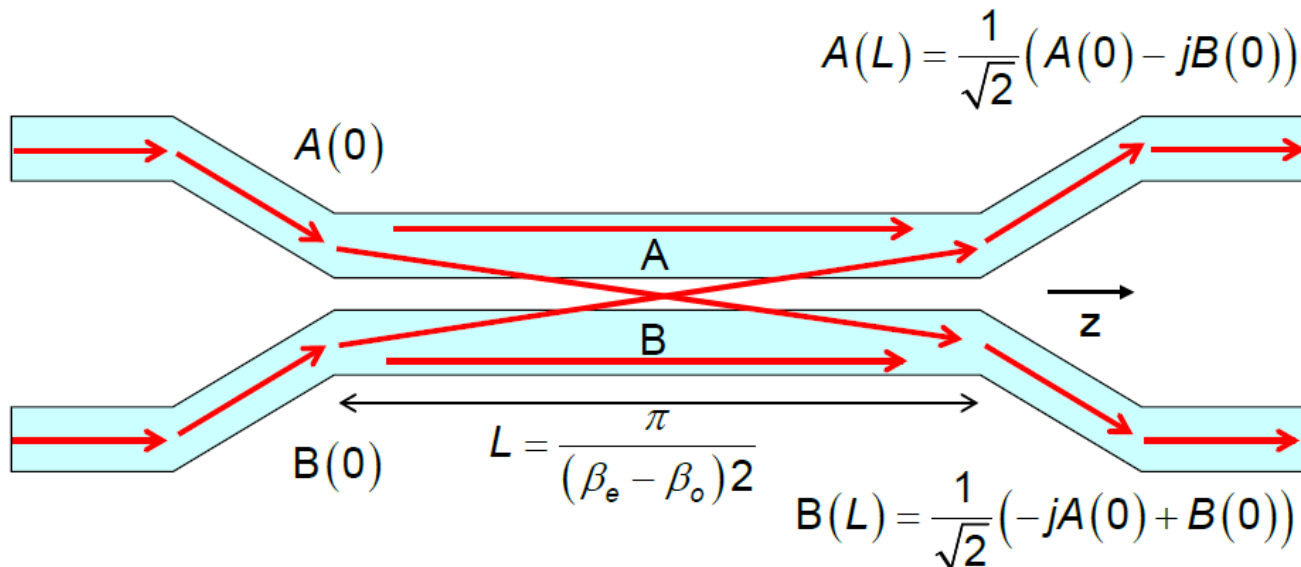
Acopladores direcionais

Acoplador óptico híbrido de 90°

Sinal de saída

$$\begin{bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -j\frac{1}{\sqrt{2}} \\ -j\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{bmatrix}$$

Sinal de entrada

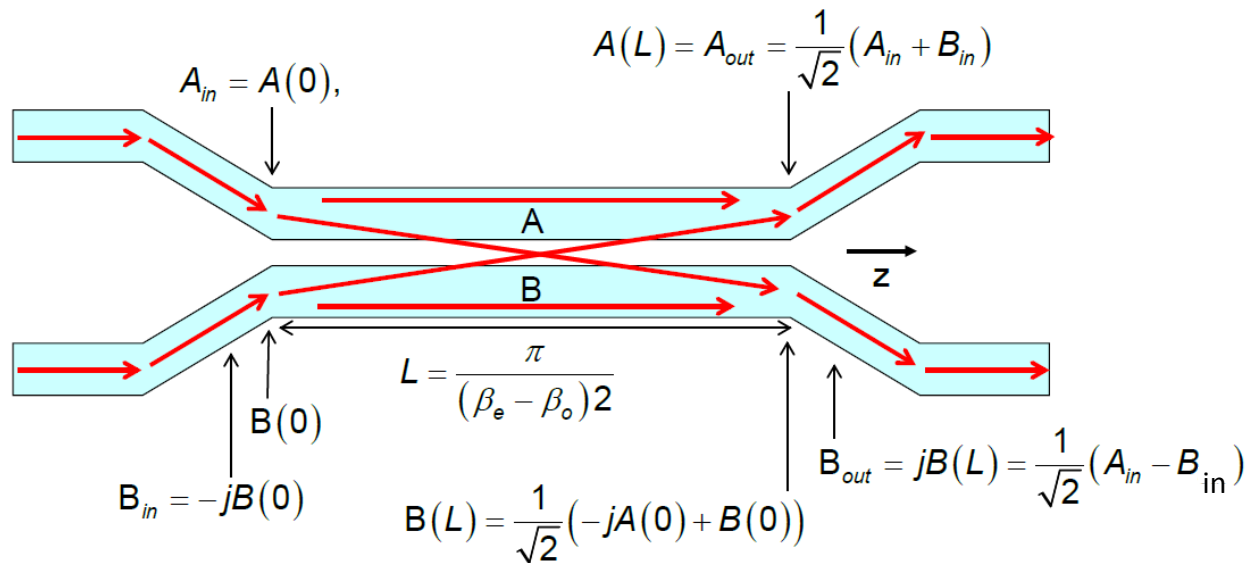


Acoplador óptico híbrido de 90°

Redefinindo a fase para um braço do acoplador:

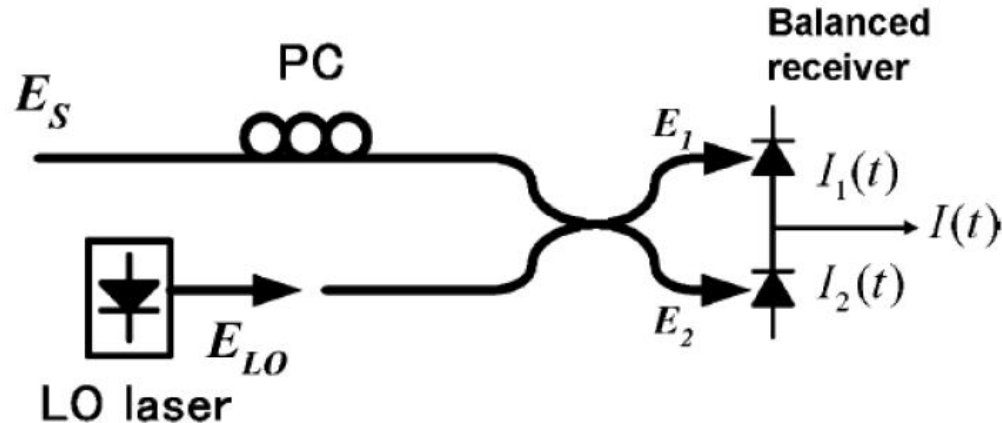
$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix}$$

← Acoplador direcional 3dB



Detecção coerente

Receptor Balanceado



Campo elétrico do sinal

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

Campo elétrico do Laser local no receptor

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

Potência do sinal

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

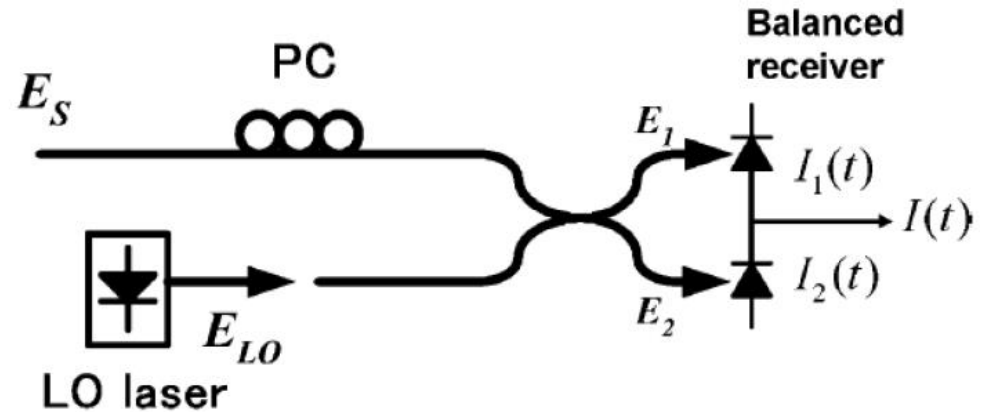
Potência do Laser local

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

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

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

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

Responsabilidade do foto diodo

$$R = \frac{e\eta}{h\omega_S}$$

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

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