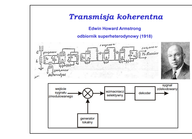
Światłowodowe systemy transmisji koherentnej

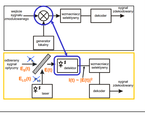
Transmisja koherentna

Edwin Howard Armstrong

odbiornik superheterodynowy (1919)



Transmisja koherentna



Podstawowe zależności

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

zakładamy, że **POLARYZACJE** obydwu sygnałów **SĄ TAKIE SAME**

$$P(\xi) = E_{sig}(\xi) + E_{LO}(\xi) \Rightarrow P(\xi) = K|E_{sig}(\xi)+E_{LO}(\xi)|^2$$

$$P(\xi) = K|A_{sig}\exp(j\omega_{sig}t + \phi_{sig}) + A_{LO}\exp(j\omega_{LO}t + \phi_{LO})|^2 =$$

$$K\left[A_{sig}^2\cos^2(\omega_{sig}t + \phi_{sig}) + A_{LO}^2\cos^2(\omega_{LO}t + \phi_{LO}) + 2A_{sig}A_{LO}\cos(\omega_{sig}t + \phi_{sig})\cos(\omega_{LO}t + \phi_{LO})\right]$$

$$K\left[A_{sig}^2\cos^2(\omega_{sig}t + \phi_{sig}) + A_{LO}^2\cos^2(\omega_{LO}t + \phi_{LO}) + 2A_{sig}A_{LO}\cos(\omega_{sig}t + \phi_{sig})\cos(\omega_{LO}t + \phi_{LO})\right]$$

$$KA_{LO}^2 \qquad KA_{sig}^2 \qquad 2KA_{sig}A_{LO}\cos[(\omega_{sig}-\omega_{LO})t + (\phi_{sig}-\phi_{LO})]$$

$$P_{LO} \qquad P_{sig} \qquad P_{IF}$$

$$P_{IF} = 2\sqrt{P_{LO}P_{sig}}$$

$$P(\xi) = K|E(\xi)+E(\xi)| = K|E_{sig}(\xi)+E_{LO}(\xi)|^2 = 2K\sqrt{P_{LO}P_{sig}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_{sig} - \phi_{LO})$$

Co zyskujemy?

Homodyna: $\omega_{sig} = \omega_{LO} \Rightarrow \omega_{IF} = 0$

$$I_{sig} = 2K\sqrt{P_{LO}P_{sig}}\cos(\phi_{sig} - \phi_{LO})$$

konieczna jest stałość różnicy faz $\Rightarrow \phi_{sig} = \phi_{LO}$

w porównaniu z detekcją bezpośrednią

$$I_{dir} = KP_{sig} \Rightarrow (I_{sig}/I_{dir})^2 = 4P_{LO}/P_{sig}$$

Heterodyna: $\omega_{sig} \neq \omega_{LO} \Rightarrow \omega_{IF} \neq 0$

$$I_{sig} = 2K\sqrt{P_{LO}P_{sig}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_{sig} - \phi_{LO})$$
$$I_{sig}^2 = 4K^2P_{LO}P_{sig}\cos^2(\omega_{IF}t + \phi_{sig} - \phi_{LO}) = 4K^2P_{LO}P_{sig}\cdot\frac{1}{2}$$

$I_{sig}^2/I_{dir}^2 = 1/2$ **o 3 dB gorzej od homodyny**

ale na trzeba próbować też

SNR w detekcji koherentnej

SNR

$$I(\xi) = R(P(\xi) + P_{LO}) = 2R\sqrt{P_{LO}P_{sig}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_{sig} - \phi_{LO})$$

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{sygnał}}{\text{szum}} = \left(\frac{I_{sig}}{\sigma}\right)^2$$

$$I_{sig}(t) = 2R\sqrt{P_{LO}P_{sig}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_{sig} - \phi_{LO})$$
$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_b^2 + \sigma_d^2$$
$$\sigma_s^2 = 2eB(\eta P_{sig} + P_{LO})\,M_s^2 \Rightarrow 2eB\eta P_{sig}\,M$$
$$\frac{S}{N} = \frac{2R^2P_{sig}}{2eB(P_{sig}+P_{LO})} = \frac{\eta R^2}{eB}\cdot\frac{\eta P_{sig}}{\eta P + P_{LO}}$$
$$\frac{S}{N} = 2\eta N_p$$

Dla odbiornika homodynowego SNR jest dwukrotnie wyższy niż podany powyżej

SNR - porównanie

PIN

1. Limit „termiczny"

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta\cdot R)^2}{4eB(\sigma_t^2 + 4kT/M)}\cdot\frac{\sigma_t^2 P_{sig}}{\sigma_t^2}$$

2. Limit „śrutowy"

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta\cdot R)^2}{2e\,(\eta\cdot\langle\cdot\rangle\cdot M)^2\cdot M^2}\cdot\frac{\sigma_t^2 P_{sig}}{2e\cdot M}$$

APD

1. Limit „termiczny"

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta\cdot\langle\cdot\rangle\cdot M)^2}{4eTM^2}\cdot\frac{\sigma_t^2 P_{sig}}{\eta P}$$

2. Limit „śrutowy"

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta\cdot\langle\cdot\rangle\cdot M)^2}{2e\cdot\langle\cdot\rangle\cdot M^2\cdot F(\langle\cdot\rangle)\cdot M^2\cdot\langle\cdot\rangle\cdot M^2}\cdot\frac{\sigma_t^2}{2e\cdot P_{sig}\cdot M}$$

detekcja koherentna

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_{sig}}{\eta P}\cdot\frac{P_{LO}}{\eta P}$$

Szumy wzmacniacza EDFA - ASE

Sposoby modulacji

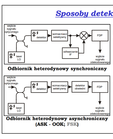
$$P_{sig} = 2A_{sig}A_{LO}\cos[(\omega_{IF} - \omega_{LO})t + \phi_{IF} - \phi_{LO}]$$

ASK $\Rightarrow E_{sig}(t) = A_{sig}(1 + \cos\omega_{IF}t + \phi_{IF})$

PSK $\Rightarrow E_{sig}(t) = A_{sig}\cos\omega_{IF}t + \phi_{IF}$

FSK $\Rightarrow E_{sig}(t) = A_{sig}\cos(\omega_{IF}t + \phi_{IF})$

Sposoby detekcji



konieczne odwzorowanie IF

tylko składowa synfazowa szumu zakłóca sygnał

Odbiornik heterodynowy synchroniczny

niepotrzebne odwzorowanie IF

składowa synfazowa i kwadraturowa szumu zakłócają sygnał

Odbiornik heterodynowy asynchroniczny (ABK - OOK) [100]

Asynchroniczny odbiornik DPSK

Odbiorniki FSK (asynchroniczne)

optical input
ω_{sig}
$E_{sig}(t)$
ω_{IF}
ω_{IF}
amplifier
ω_{IF}
ω_{IF}
PDP
ω_{IF}
delay
T-bit
ω_{IF}
electrical output
ω_{IF}
ω_{IF}
amplifier
ω_{IF}
ω_{IF}
PDP
ω_{IF}
delay
T-bit
ω_{IF}
ω_{IF}
ω_{IF}

Czułość detekcji koherentnej

$$BER = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \qquad Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

ASK: $\sigma_1 = \sigma_0;\ I_1 = 0 \Rightarrow Q = \frac{I_1}{2\sigma_0} = \frac{1}{2}\frac{\sqrt{S}}{\sqrt{B}}\sqrt{\frac{MN_s}{2}}$

$$BER_{ss} = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\sqrt{\frac{MN_s}{8}}\right) \qquad BER_{as} = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\sqrt{\frac{MN_s}{4}}\right)$$

PSK: $\sigma_1 = \sigma_0;\ I_1 = -I_0 \Rightarrow Q = \frac{2I_1}{2\sigma_0} = \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{B}}\sqrt{MN_s}$

$$BER_{ss} = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\sqrt{MN_s}\right) \qquad BER_{as} = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\sqrt{2MN_s}\right)$$

Czułość detekcji koherentnej (BER = 10 $^{-9}$)

	DEMODULACJA synchroniczna		DEMODULACJA asynchroniczna	
Format modulacji	N_s	N_{ss}	N_s	N_{as}
ASK het	72	36	80	40
ASK hom	36	18		
2DPSK het	18	18	20	20
PSK hom	9	9		
FSK het	36	36	40	40
DD			20	10

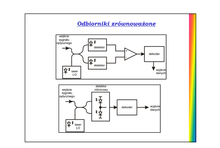
SPOSÓB DETEKCJI	SUM
KOHERENTNA	SRUTOWY LO
BEZPOŚREDNIA	TERMICZNY TIA

Czynniki degradujące czułość w transmisji koherentnej

$$I(t) = R\left[P(t) + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_s - \phi_{LO})\right]$$

- Szum fazowy lasera nadawczego i LO $\Rightarrow \Delta\phi = \phi_s - \phi_{LO}$
  $\Delta\nu B \approx 10^{-4}$ dla systemów homodynowych (~1 MHz @ 10 Gb/s)
  $\Delta\nu B \approx 0.1$ dla detekcji asynchronicznej ASK lub FSK (detekcja obwiedni)
  odbiornik *Phase Diversity*
- Szum intensywności (RIN) LO $\Rightarrow P_{LO}B$
  pogorszenie wartości S/N
  odbiornik zrównoważony (*Balanced Receiver*)
- Niedopasowanie polaryzacji lasera nadawczego i LO
  odbiornik *Polarization Diversity*
  Te zagadnienia praktycznie nie istnieją w detekcji bezpośredniej !!!

Odbiornik typu „phase diversity" (z rozproszeniem fazowym)



Odbiorniki zrównoważone

Jak to działa?

Sprzęgacz 3 dB

P_{s1}, P_{s2} — $\Phi_{s1}(t)=\Phi_{s2}(t)=0$: $P_{s1}(t)=P_{s2}(t)=P_s/2$ — $E_{s1}(t)=E_{s2}(t)/\sqrt{2}$

P_{LO1}, P_{LO2} — $\Phi_{LO1}(t)=\Phi_{LO2}(t)=0$: $P_{LO1}(t)=P_{LO2}(t)=P_{LO}/2$ — $E_{LO1}(t)=E_{LO2}(t)/\sqrt{2}$

zachowanie energii: $P_{LO} + P_{sig} = P_{det}$

$$I(t) = R\left[P_1 + P_{LO1} + 2R\sqrt{P_1 P_{LO1}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_1 - \phi_{LO1})\right]$$

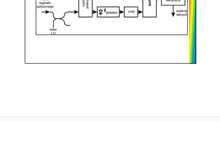
górna gałąź: $E_{sig}=E_{s1}(t)/\sqrt{2}$

$$I(t) = R\left[P_2 + P_{LO2} + 2R\sqrt{P_2 P_{LO2}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_2 - \phi_{LO2})\right]$$

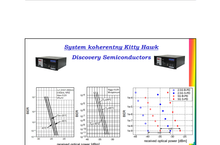
dolna gałąź $E_{sig}=E_{s2}(t)/\sqrt{2}$

$$I(t) = R\left[P_3 + P_{LO3} + 2R\sqrt{P_3 P_{LO3}}\cos(\omega_{IF}t + \phi_3 - \phi_{LO3})\right]$$

Odbiornik typu „polarization diversity" (z rozproszeniem polaryzacji)



System z homodynową detekcją sygnału ASK



$$I(t) = 4R\sqrt{P_s P_{LO}}\,\sin(\omega_{IF}t + \phi_s - \phi_{LO})$$

System koherentny Kitty Hawk Discovery Semiconductors