



10. Transmisja koherentna

Spis treści:

10.1. Detekcja koherentna.

10.2. Koherentne systemy transmisyjne.

10.3. Transmisja koherentna w obecności szumów.

10.4. Rodzaje modulacji i detekcji.

10.5. Podsumowanie

10.1. DETEKCCJA KOHERENTNA - WIADOMOŚCI PODSTAWOWE.

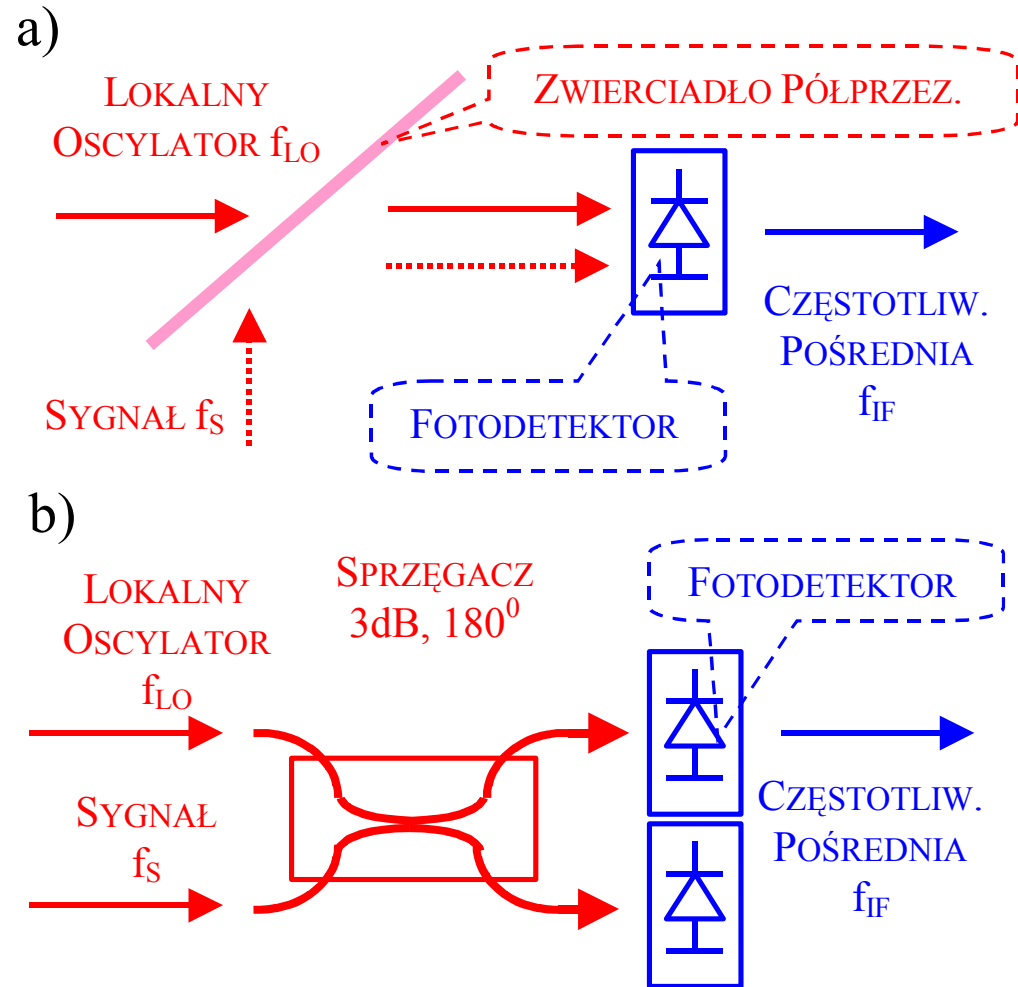
⇒ Odpowiedź fotodetektora jest związana z docierającym do niego strumieniem fotonów. Detektor nie jest czuły na fazę sygnału optycznego.

⇒ Istnieje możliwość pomiaru zespolonych amplitud (amplitudy i fazy) sygnałów optycznych przez interferencję/połączenie go z koherentnym sygnałem optycznym o stabilnej amplitudzie i fazie.

⇒ Sygnał taki kierowany jest do detektora optycznego i niesie on także informacje fazowe.

⇒ Proces taki nazywany jest:

- koherentną detekcją optyczną,
- mieszaniem optycznym,
- optyczną detekcją heterodynową.



Rys.10.1. Układ optycznej detekcji heterodynowej.
a) Ukl. ze zwierciadłem półprzezroczystym,
b) Ukl. ze sprzęgaczem.

10.1. DETEKcja KOHERENTNA – PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI (A)

⇒ Sygnał odbierany i sygnał oscylatora lokalnego mają zwykle różne częstotliwości f_S i f_{LO} .

⇒ Gdy $f_S = f_{LO}$ mamy do czynienia z **detekcją homodynową**.

⇒ Natężenie pola elektrycznego sygnału optycznego:

$$E_S = \text{Re}\{A_S e^{j2\pi f_S t}\} = \text{Re}\{A_S |e^{j(2\pi f_S t + \varphi_S)}\}$$

⇒ Amplituda $|A_S|$ i faza φ_S są modulowane z częstotliwością \ll od f_S .

⇒ Pole elektryczne sygnału optycznego w podobny sposób jest określone przez E_{LO} , $|A_{LO}|$, f_{LO} i φ_{LO} .

⇒ Oba sygnały są łączone przez sprzęgacz lub półprzezroczyste zwierciadło. Jeżeli oba sygnały są falami płaskimi o **identycznych polaryzacjach** to:

$$E = E_S + E_{LO};$$

⇒ Obliczamy kwadrat modułu:

$$|A_S \exp(j2\pi f_S t) + A_{LO} \exp(j2\pi f_{LO} t)|^2 = |A_S|^2 + |A_{LO}|^2 + 2|A_S||A_{LO}|\cos[2\pi(f_S - f_{LO})t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

⇒ Moce sygnałów optycznych P_S i P_{LO} są proporcjonalne do kwadratów amplitud natężeń pól:

$$P = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF} t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

10.1. DETEKCCJA KOHERENTNA – PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI (B)

⇒ $f_{IF} = |f_S - f_{LO}|$ jest **częstotliwością pośrednią**, zwykle dużo mniejszą od f_S i f_{LO} .

⇒ Prąd i fotodetektora jest proporcjonalny do strumienia fotonów $\Phi \cong P/hf_{\dot{S}RED}$

$$- f_{\dot{S}RED} = (f_S + f_{LO})/2$$

$$I = \eta e \Phi = \frac{\eta e P}{h f_{eRED}} = RP = R \{P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF} t + (\varphi_S - \varphi_{LO})]\};$$

- η jest **sprawnością kwantową**,

- R jest **czułością fotodetektora**.

⇒ Moc oscylatora lokalnego jest wielokrotnie większa od mocy sygnału, dlatego:

$$I \cong I_{LO} + 2R\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF} t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

⇒ Interesującym nas składnikiem jest drugi z nich, o częstotliwości pośredniej

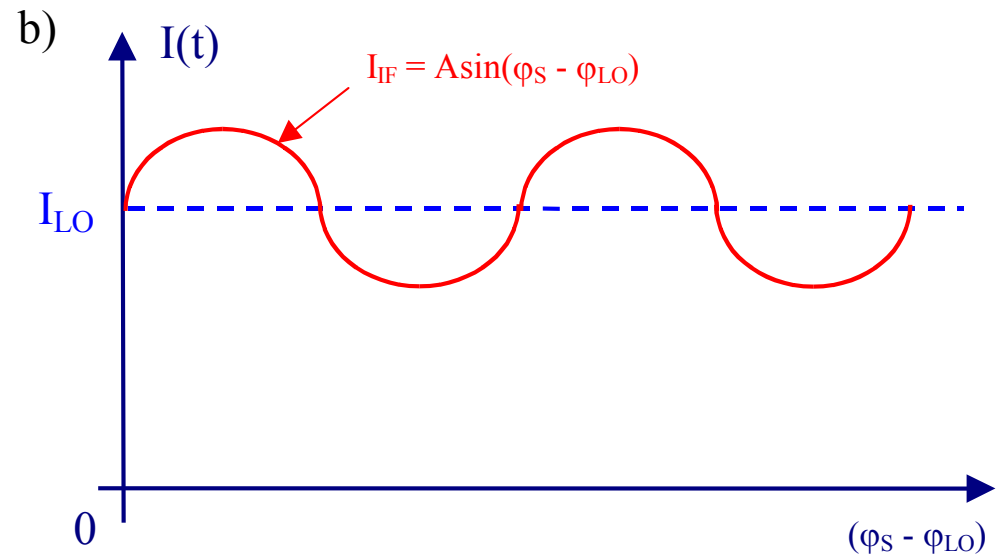
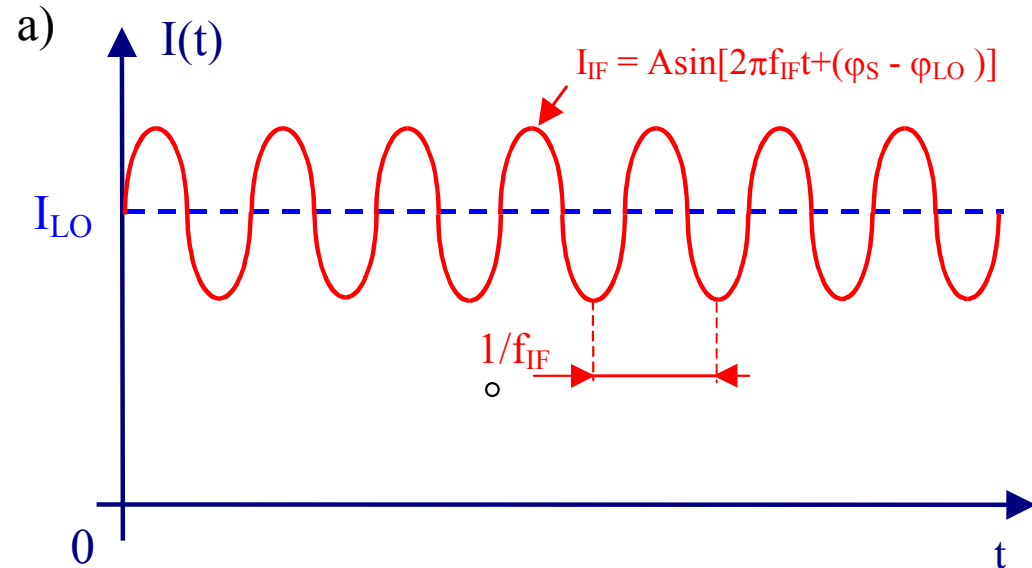
$$I_{IF} = 2R\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[2\pi f_{IF} t + (\varphi_S - \varphi_{LO})];$$

⇒ Detekcja homodynowa to specjalny przypadek detekcji heterodynowej, gdy $f_S = f_{LO}$:

$$I_{IF} \cong 2R\sqrt{P_S P_{LO}} \cos(\varphi_S - \varphi_{LO});$$

10.1. DETEKCJA KOHERENTNA – PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI (C)

- ◆ Informacja przy transmisji heterodynowej może być zawarta w amplitudzie, fazie i częstotliwości sygnału.
- ◆ **Detekcja heterodynowa** może być wykorzystana do otrzymania sygnału o częstotliwości w pasmie fal milimetrowych i submilimetrowych.
- ◆ Przy **detekcji homodynowej** informacja jest zwykle zawarta w fazie sygnału. Po detekcji otrzymuje się modulację amplitudy.

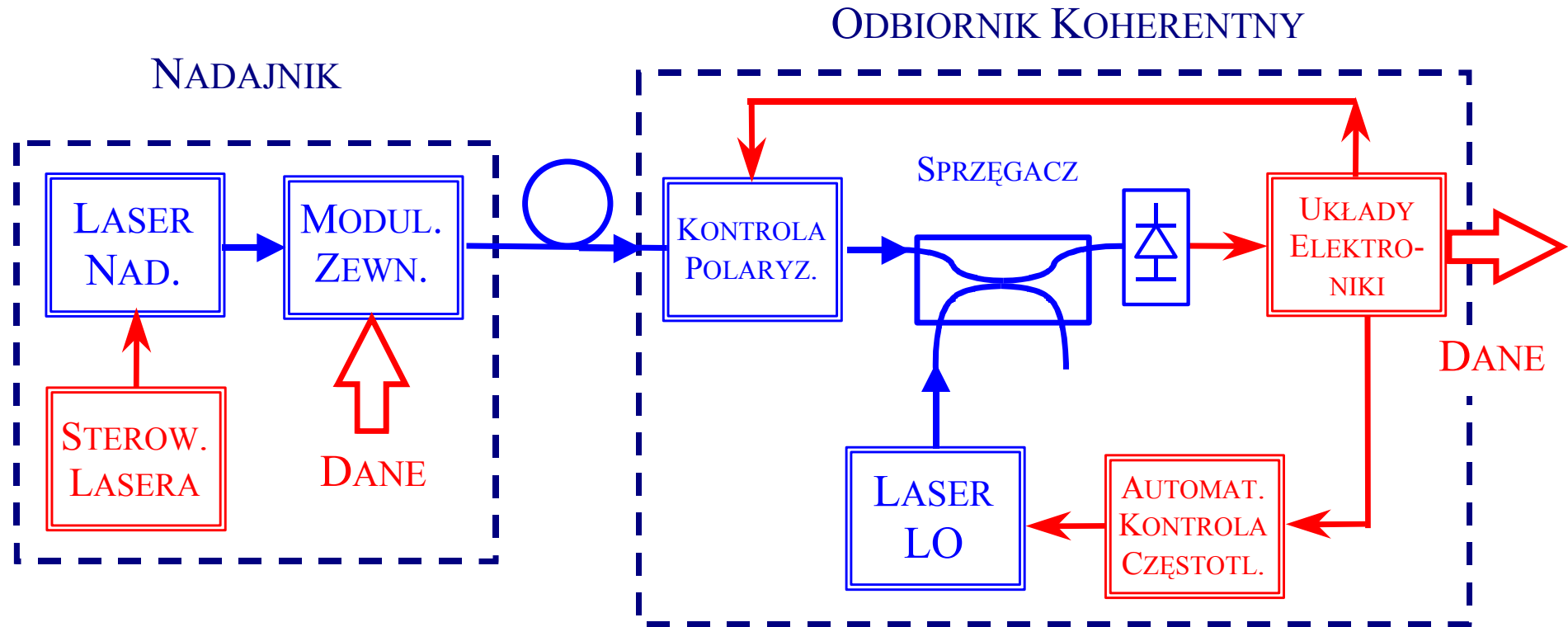


Rys.10.2. Przebiegi prądów dla detekcji koherentnej. a) Prąd przy detekcji heterodynowej. b) Prąd w detektorze homodynowym.

10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – UKŁAD ŁĄCZA

⇒ W systemach transmisji koherentnej amplituda, częstotliwość lub faza koherentnej optycznej fali nośnej są zmodulowane i niosą informację.

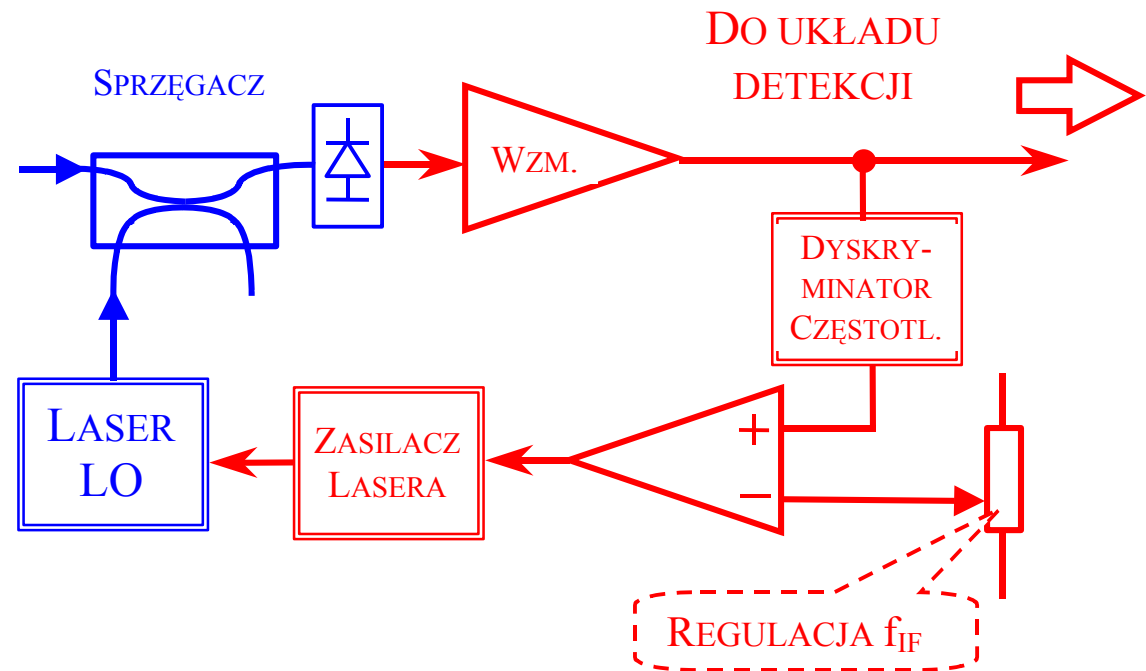
⇒ Odbiornik układu koherentnego wymaga zastosowania dodatkowego lasera - patrz rysunek.



Rys.10.3. Podstawowa struktura łącza z transmisją koherentną.

10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – KONTROLA CZĘSTOTLIWOŚCI

- ◆ Częstotliwość optycznego lokalnego oscylatora jest kontrolowana aby stabilizować wartość f_{IF} .
- ◆ Długość promieniowanej przez laser półprzewodnikowy fali zmienia się wraz z temperaturą, w tempie 0,1...1 nm/K. W układach odbiorników koherentnych konieczna jest stabilizacja temperatury, wykorzystywany jest element Peltier'a. Uzyskuje się stabilizację lepszą niż 0,01 K.
- ◆ Długość fali lasera zmienia się ze zmianą prądu w tempie 0,01...0,1 nm/K.
- ◆ Efekt ten wykorzystywany jest do przestrajania laserów w niewielkim zakresie.
- ◆ W obwodzie automatyki **systemów heterodynowych dyskryminator częstotliwości** pracuje jako wzorzec częstotliwości.
- ◆ W układach zaawansowanych - **stabilizacja fazowa z pętlą PLL**.
- ◆ W **systemach homodynowych**
 $f_{IF} = 0$;



Rys.10.4. Schemat blokowy układu automatycznej regulacji częstotliwości

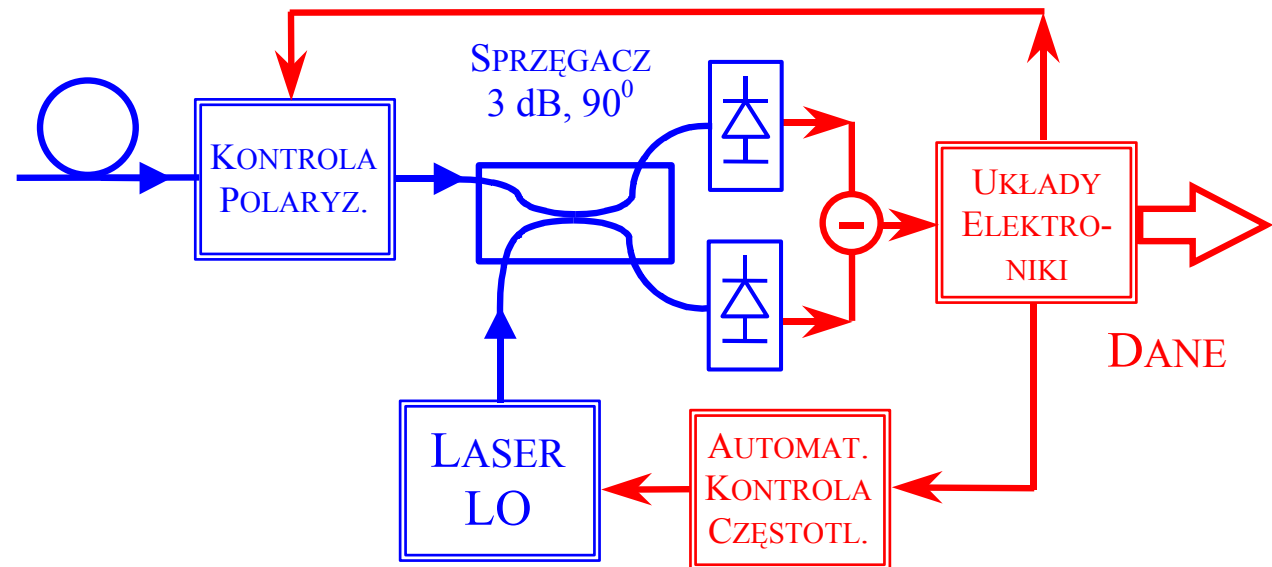
10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – ODBIORNIK ZRÓWNOWAŻONY (A)

- ◆ Aby wykorzystać całą moc sygnału i oscylatora lokalnego stosuje się odbiorniki zrównoważone.
- ◆ Kluczem układu jest sprzęgacz kierunkowy 3 dB, 90°. W rezultacie do detektorów 1 i 2 dochodzą sygnały różne:

$$E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{LO} + E_S);$$

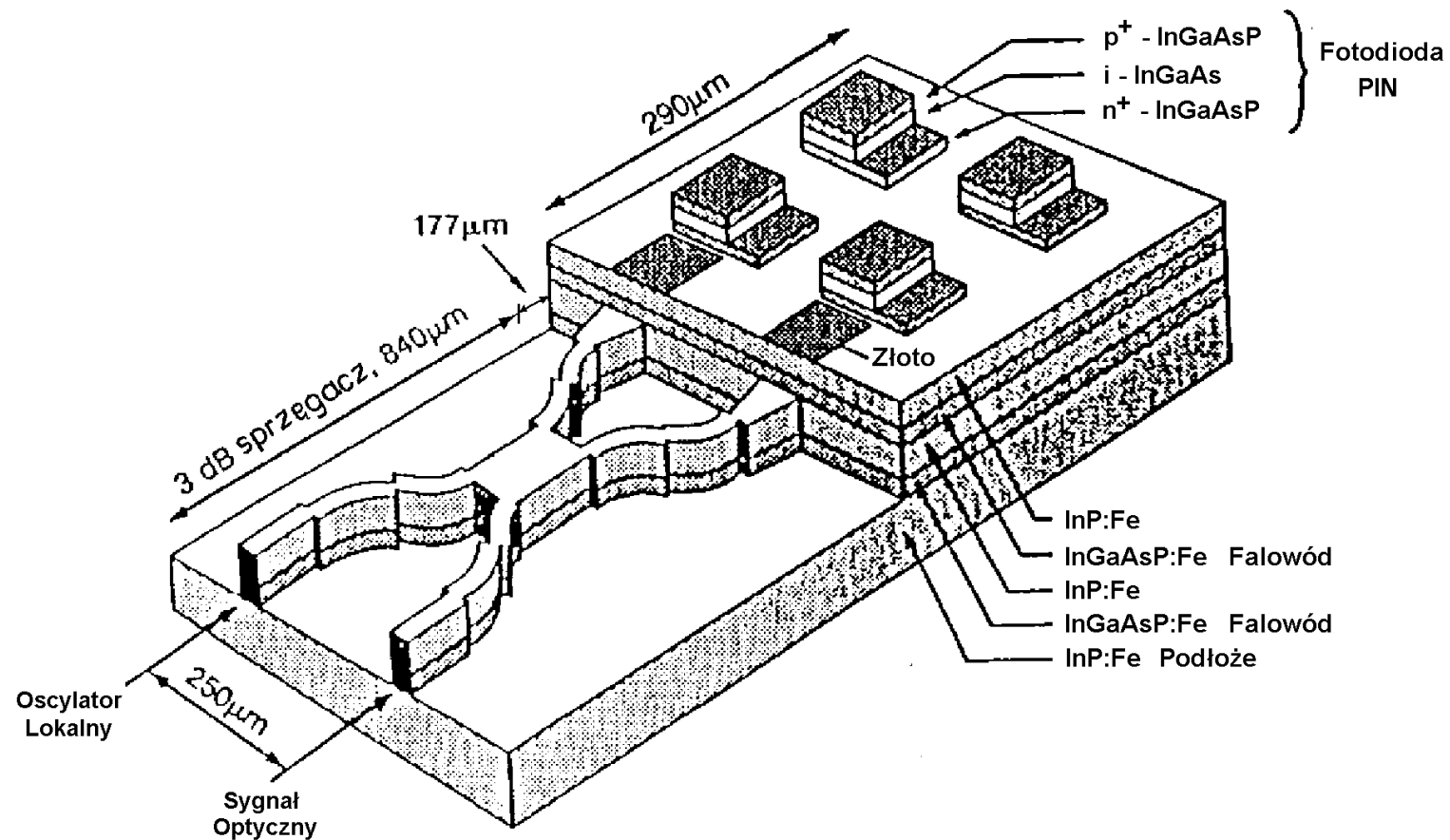
$$E_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{LO} - E_S);$$

- ◆ Prądy I_{IF1} i I_{IF2} identycznych detektorów różnią się w fazie o 180°.
- ◆ Układ sumowania dodaje oba prądy usuwając składową zależną od mocy lokalnego oscylatora



Rys.10.5. Schemat ideowy zrównoważonego odbiornika do systemu transmisji koherentnej

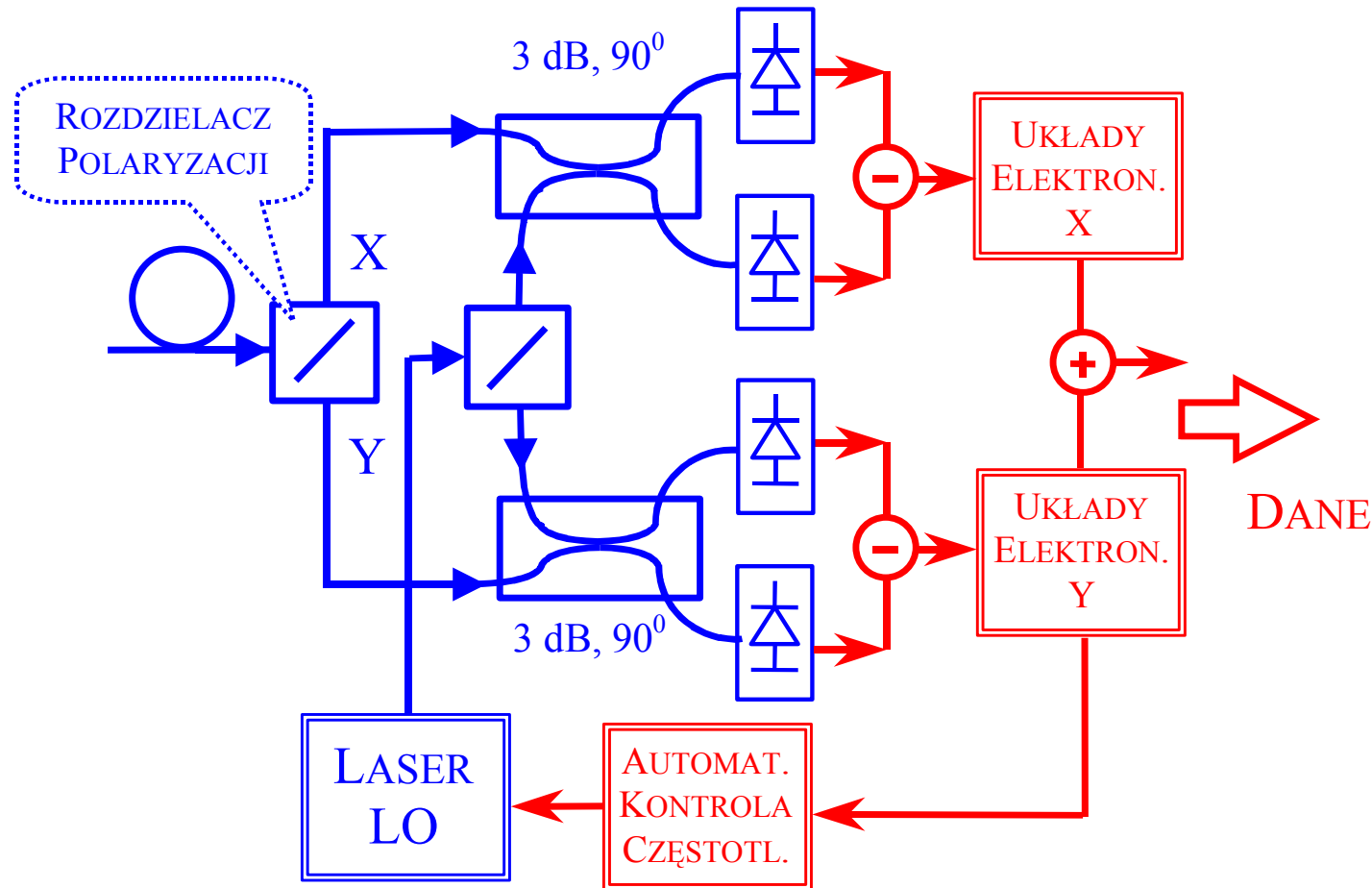
10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – ODBIORNIK ZRÓWNOWAŻONY (B)



Rys.10.6. Struktura i elementy odbiornika systemu koherentnego.
Układ pojedynczo zrównoważony.

10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – ODBIORNIK ZRÓWNOWAŻONY (C)

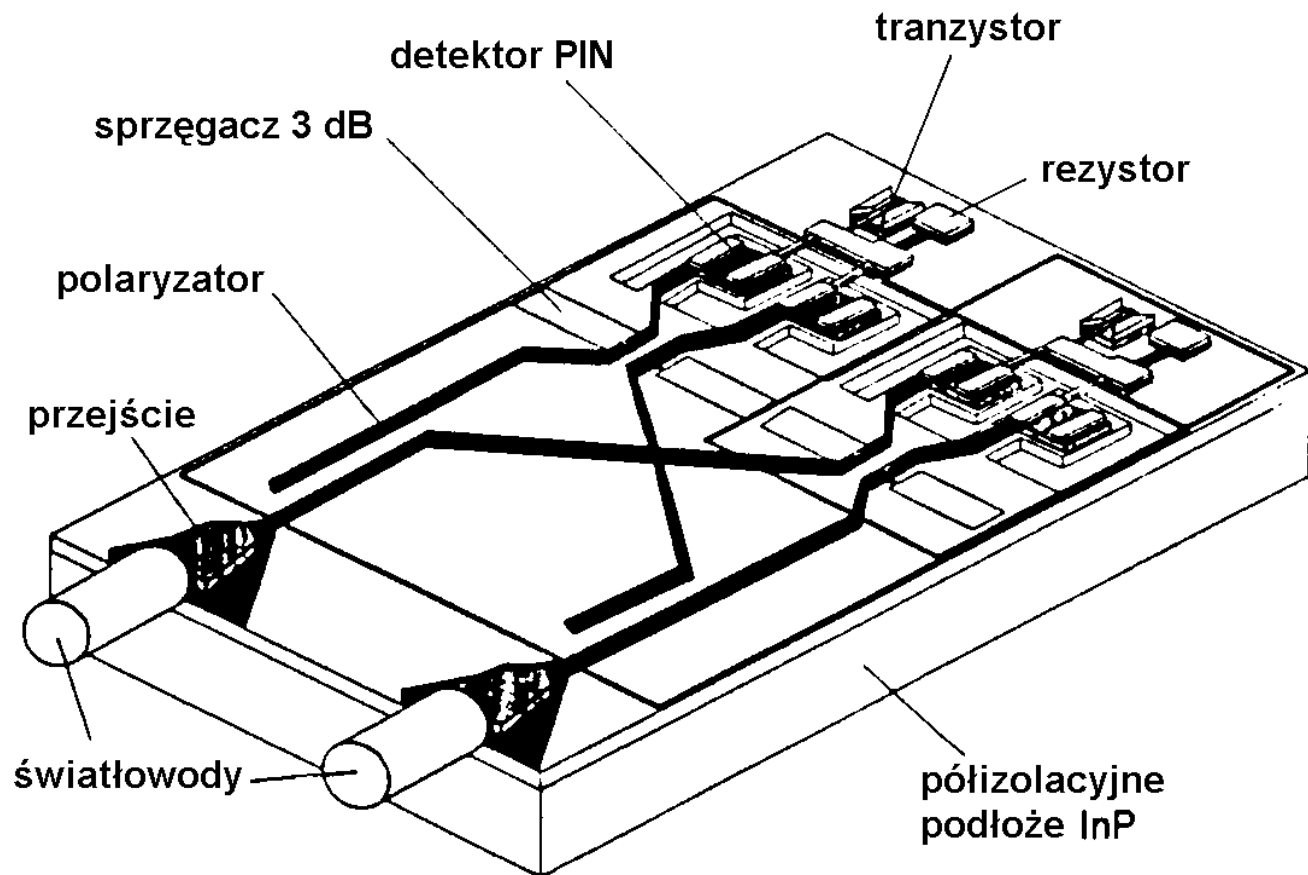
- ◆ Aby uniknąć kontrolera polaryzacji należy rozdzielić sygnały o różnej polaryzacji wykorzystując do tego celu specjalne sprzęgacze.



Rys.10.7. Układ odbiornika optycznego podwójnie zrównoważonego wykorzystującego sprzęgacze rozdzielające polaryzację.

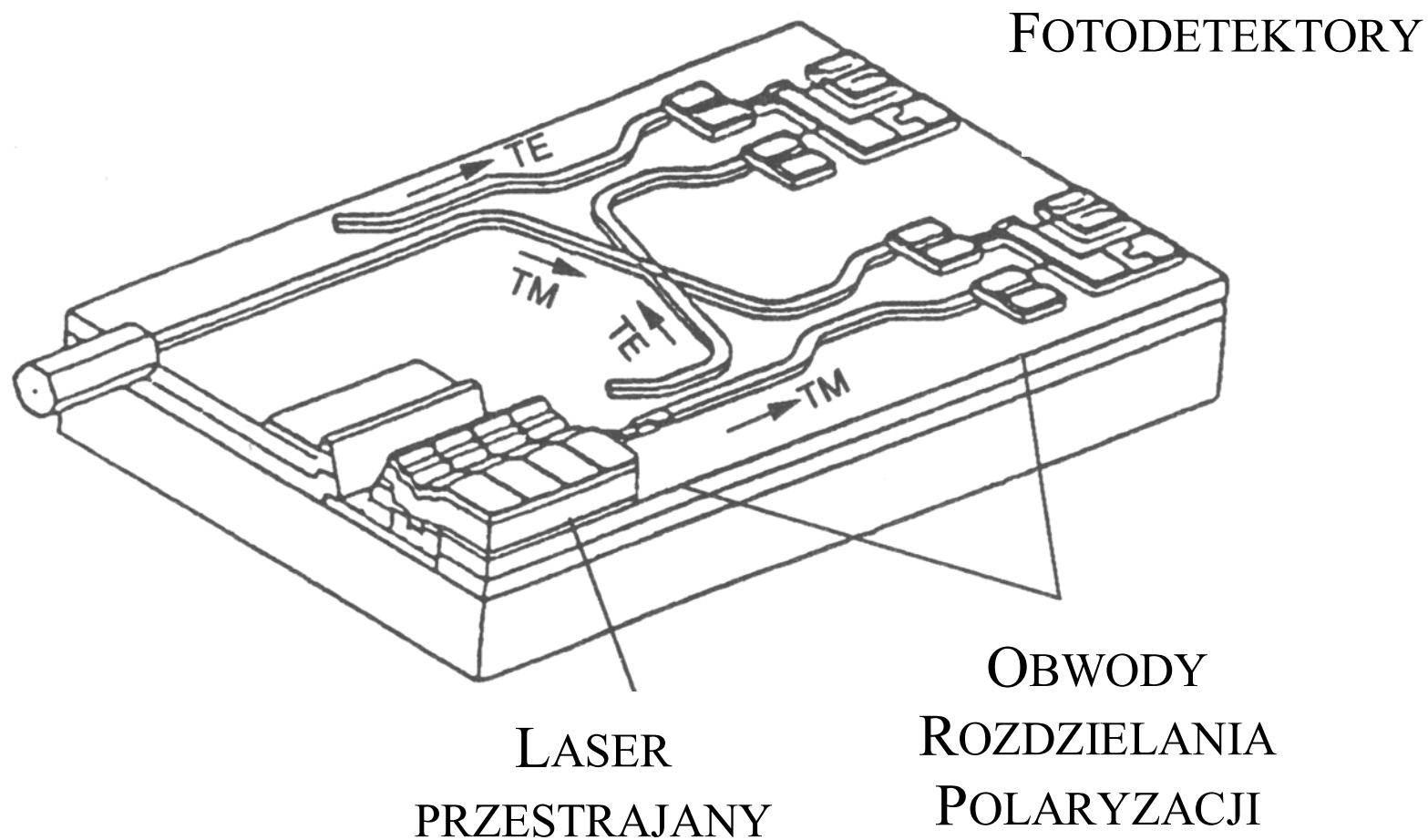
10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – ODBIORNIK ZRÓWNOWAŻONY (D)

- ✓ Przy transmisji koherentnej problemem jest fluktuacja polaryzacji transmitowanego sygnału.
- ✓ Sygnał o dowolnym stanie polaryzacji dzielony jest na dwie ortogonalne składowe polaryzacji.
- ✓ Obie składowe poddawane są oddzielnemu mieszaniu z sygnałem lokalnego oscylatora.
- ✓ Wykorzystywane są układy z podwójnie zrównoważonymi fotodetektorami



Rys.10.8. Odbiornik koherentny w układzie podwójnie zrównoważonym z przedwzmacniaczem mikrofalowym.

10.2. KOHERENTNE SYSTEMY TRANSMISYJNE – ODBIORNIK ZRÓWNOWAŻONY (E)



Rys.10.9. Odbiornik koherentny z laserem lokalnym i obwodami różnicowania polaryzacji

10.3. TRANSMISJA W OBECNOŚCI SZUMÓW – PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI (A)

✓ Analizowany będzie odbiornik koherentny sygnału optycznego o dwustanowej modulacji fazy:

$$E_S = \text{Re}\{A_S e^{j(2\pi f_S t \pm \pi/2)}\} = \alpha |A_S| \text{Re}\{e^{j(2\pi f_S t)}\}, \text{ gdzie } \alpha = \pm 1$$

✓ Prąd wyjściowy fotodetektora $i_{PD}(t)$ jest sumą:

$$i_{PD}(t) = I_S(t) + i_{ns}(t);$$

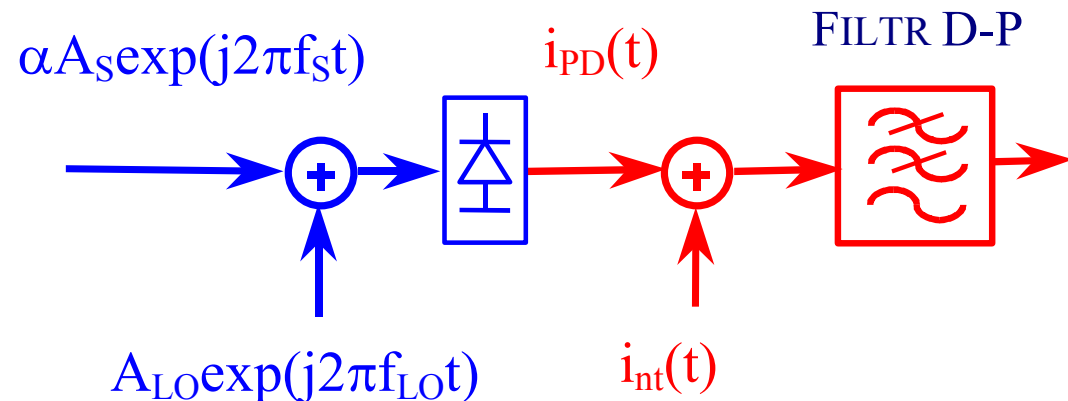
- prądu $I_S(t)$ niosącego informację,

$$I_S(t) = RP_{tot} = R(P_S + P_{LO} + 2\alpha\sqrt{P_S P_{LO}});$$

✓ Pierwszy wniosek: im większa wartość P_{LO} , tym lepiej, tym większy składnik $2\alpha\sqrt{P_S P_{LO}}$.

✓ Analiza wartości stosunku sygnału do szumu **SNR (signal-to-noise-ratio)** nie potwierdza tego wniosku.

Rys.10.10. Odbiornik koherentny do odbioru binarnej modulacji PSK i jego podstawowe źródła szumów.



10.3. TRANSMISJA W OBECNOŚCI SZUMÓW – PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI (B)

✓ Prąd wyjściowy fotodetektora zawiera prąd **szumów śrutowych** $i_{ns}(t)$ o gęstości widmowej $G_{ns}(f)$:

$$G_{ns}(f) = (RP_{tot} + I_d)e \cong RP_{LO}e;$$

- tutaj I_d jest prądem ciemnym fotodiody, e ładunkiem elektronu

✓ Układy elektroniczne dodają **szum termiczny** $i_{nt}(t)$ o gęstości widmowej $G_{nt}(f)$:

$$G_{nt}(f) = 2kT / R_L;$$

✓ Stosunek **SNR (signal-to-noise-ratio)** sygnału do szumu: $SNR = \frac{(2R\sqrt{P_S P_{LO}})^2}{[G_{ns}(f) + G_{nt}(f)]B}$;

✓ Podstawiamy gęstości szumów śrutowych i termicznych:

$$SNR = \frac{4R^2 P_S P_{LO}}{(2eRP_{LO} + 4kT / R_L)B} \cong \frac{2RP_S}{eB};$$

✓ Wzrost mocy P_{LO} pozwala wyeliminować wpływ szumów termicznych i zwiększyć czułość odbiornika do poziomu określonego wartością szumów śrutowych fotodetektora.

$$SNR \cong \frac{2RP_S}{eB} = \frac{2}{eB} \frac{\eta e}{hf_S} N_R hf_S B = 2\eta N_R \cong 2N_R;$$

- tutaj N_R jest ilością kwantów dochodzących w czasie $1/B$ do detektora, η - sprawność kwantowa.

10.4. RODZAJE MODULACJI I DETEKCJI – STOSOWANE MODULACJE (A)

✘ Proces odbioru koherentnego - założenia:

- Sygnał optyczny fali nośnej i heterodyny są monochromatyczne, nie zawierają szumów fazowych.
- Modulacja jest binarna, w czasie T sekund transmitowany jest jeden bit informacji, w sposób zależny od przyjętej modulacji.
- Pola EM odbieranego sygnału i lokalnego oscylatora są równoległe, ta sama polaryzacja.
- Jedynymi szumami fotodetektora odbiornika są szumy śrutowe.
- Fotodetektor idealnie sumuje pola elektryczne sygnału i lokalnego oscylatora.

✘ Założenia te nie są zwykle spełnione, powoduje to wzrost poziomu szumów. W szczególności:

- Nadajnik generuje sygnał optyczny o własnych szumach amplitudowych, fazowych i częstotliwościowych.
- Generator lokalny generuje sygnał optyczny także z własnymi szumami amplitudowymi, fazowymi i częstotliwościowymi.
- Sygnał o częstotliwości pośredniej zawiera wszystkie wymienione wyżej szumy.

10.4. RODZAJE MODULACJI I DETEKCJI – STOSOWANE MODULACJE (B)

✘ Całkowita moc sygnału optycznego docierającego do detektora:

$$P_{\text{tot}} = P_S + P_{\text{LO}} + 2\alpha\sqrt{P_S P_{\text{LO}}};$$

✘ Rodzaje modulacji:

■ Modulacja fazy - **kluczowanie fazy PSK** *phase-shift keying*,

$$\alpha = +1 \text{ dla "1" i } -1 \text{ dla "0"};$$

■ Modulacja amplitudy - **kluczowanie amplitudy ASK** *amplitude-shift keying*,

$$\alpha = +1 \text{ dla "1" i } 0 \text{ dla "0"};$$

■ Modulacja częstotliwości – **kluczowania częstotliwości FSK** *frequency-shift keying*.

$$f_s = f_{s0} + \alpha f_d, \text{ gdzie } \alpha = \pm 1;$$

- tutaj f_d jest dewiacją częstotliwości.

✘ Dla każdego typu modulacji stosowane są inne układy odbiorników.

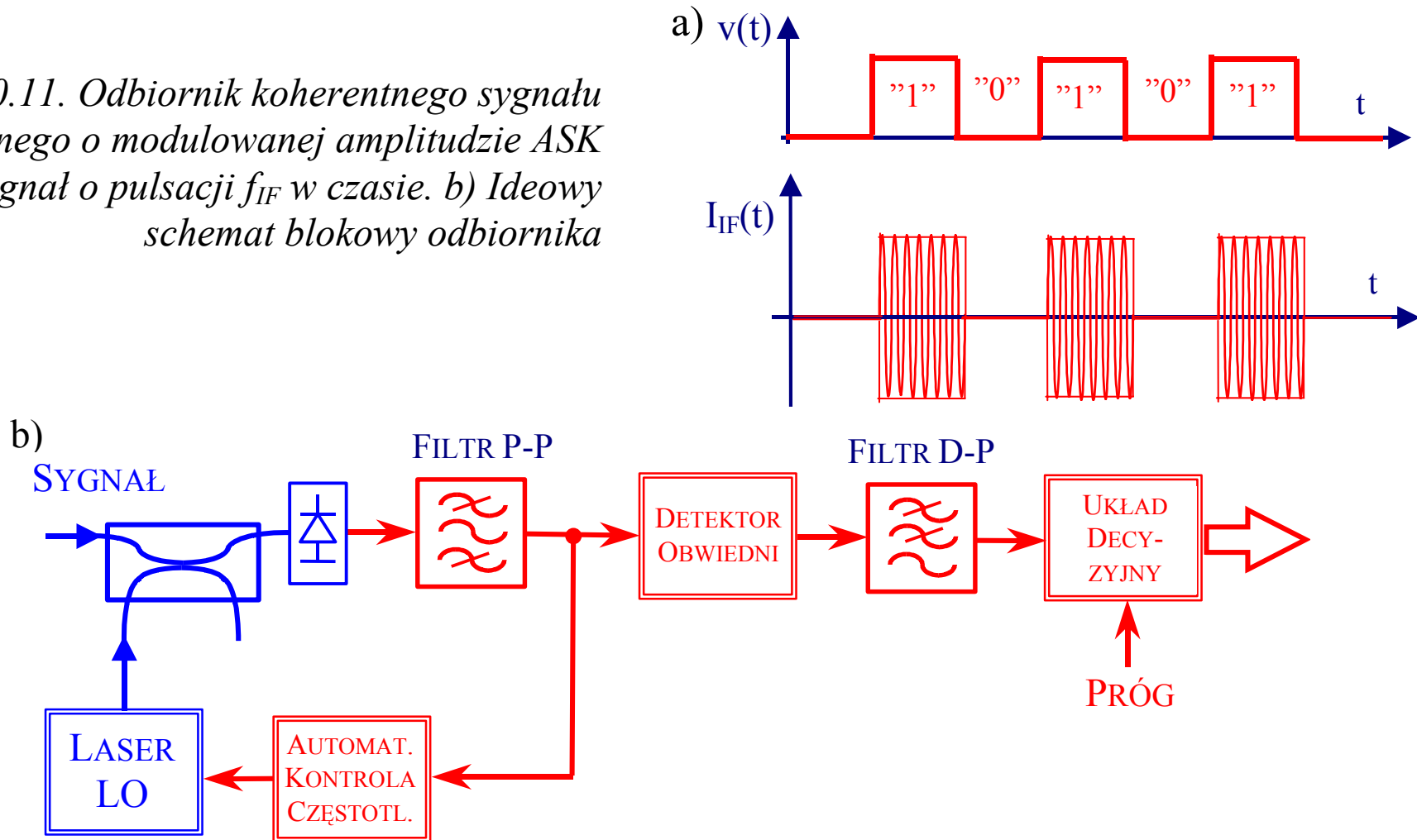
✘ Przeprowadzono analizę czułości odbiorników i tym samym całych systemów koherentnych, aby porównać teoretyczne czułości z czułościami systemów IM-DD.

10.4. RODZAJE MODULACJI I ... – ODBIORNIKI KOHERENTNE ASK I PSK (A)

- ◆ Modulacja amplitudy realizowana jest zwykle zewnętrznym modulatorem, co umożliwia stabilną pracę lasera nadajnika i ułatwia stabilizację częstotliwości lasera LO?

Rys.10.11. Odbiornik koherentnego sygnału optycznego o modulowanej amplitudzie ASK

a) Sygnał o pulsacji f_{IF} w czasie. b) Ideowy schemat blokowy odbiornika



10.4. RODZAJE MODULACJI I ... – ODBIORNIKI KOHERENTNE ASK I PSK (B)

- ◆ Prąd $I_S(t)$ wyjściowy detektora jest filtrowany przez filtr środkowo-przepustowy i wzmacniany.
- ◆ Dla modulacji amplitudy ASK: $\alpha = +1$ dla "1" i 0 dla "0";
- ◆ Prąd wyjściowy fotodetektora dla detekcji heterodynowej równy jest:

$$I_S(t) = \begin{cases} I_{IF} \cos \omega_{IF} t = 2R \sqrt{P_S P_{LO}} \cos \omega_{IF} t & \text{dla "1"} \\ 0 & \text{dla "0"} \end{cases}$$

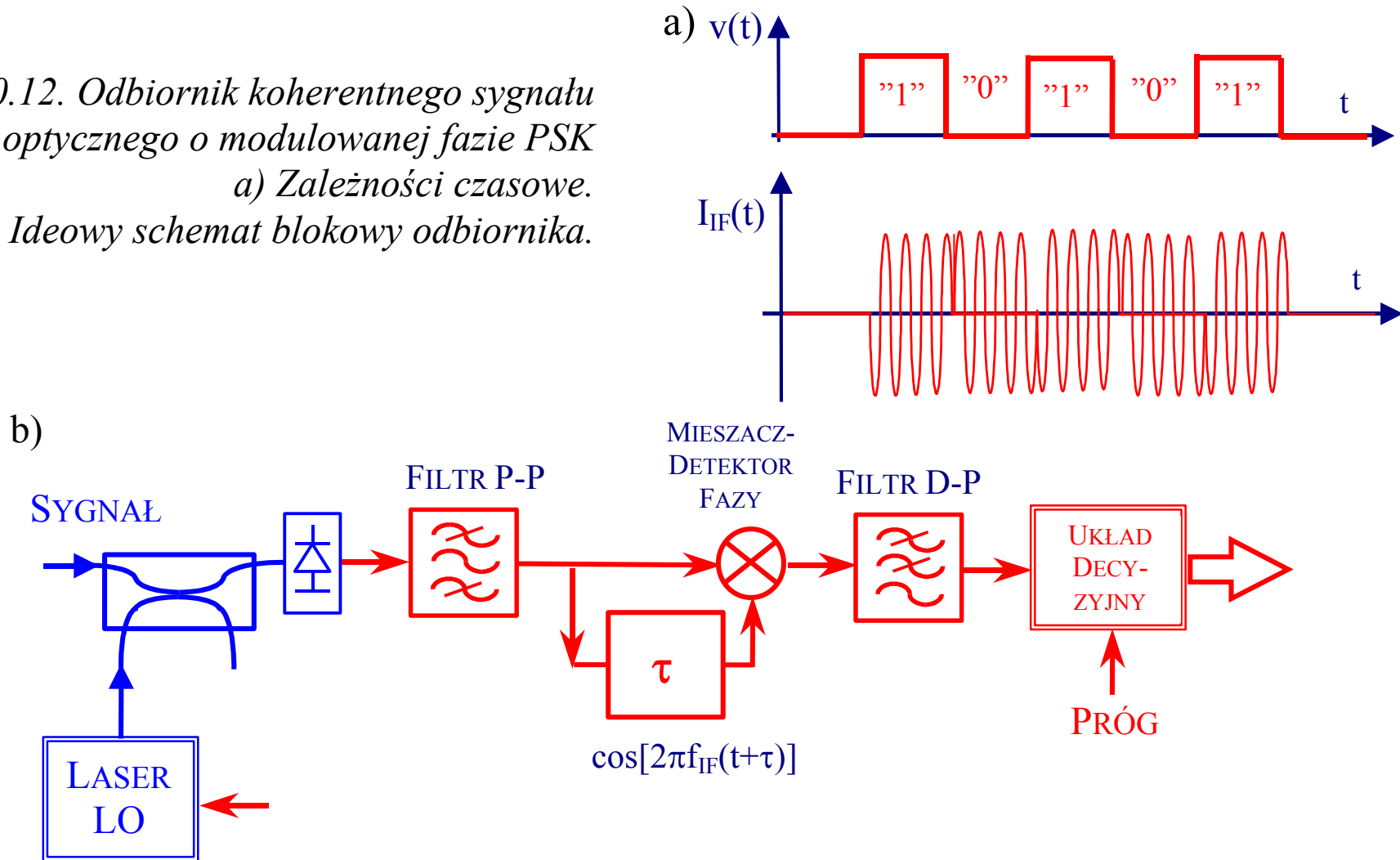
- ◆ Po wzmacnieniu sygnał poddawany jest kolejnej detekcji, otrzymujemy obwiednię prądu $I_S(t)$, następnie filtr dolno-przepustowy, wzmacniacz i układ decyzyjny.
- ◆ Obliczane jest prawdopodobieństwo P_e błędnego odczytania bitu jako $P_e = \text{erfc}(\sqrt{N_R} / 2) / 2$;
- ◆ Dla stopy błędu równej 10^{-9} czułość odbiornika heterodynowego ASK = 36 fotonów/bit
- ◆ Funkcja $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$; natomiast $\text{erfc}(z) = 1 - \text{erf}(z)$; dla małych z : $\text{erfc}(z) \cong 2e^{-z^2}$.

- ◆ Prąd wyjściowy fotodetektora dla detekcji homodynowej: $I_S(t) = \begin{cases} 2R \sqrt{P_S P_{LO}} & \text{dla "1"} \\ 0 & \text{dla "0"} \end{cases}$
- ◆ Prawdopodobieństwo P_e błędnego odczytania bitu równe jest $P_e = \text{erfc}(\sqrt{N_R}) / 2$;
- ◆ Dla stopy błędu równej 10^{-9} czułość odbiornika homodynowego ASK = 18 fotonów/bit

10.4. RODZAJE MODULACJI I ... – ODBIORNIKI KOHERENTNE ASK I PSK (C)

- ◆ Binarną modulację fazy PSK realizuje się modulatorem zewnętrznym.

Rys.10.12. Odbiornik koherentnego sygnału optycznego o modulowanej fazie PSK
a) Zależności czasowe.
b) Ideowy schemat blokowy odbiornika.



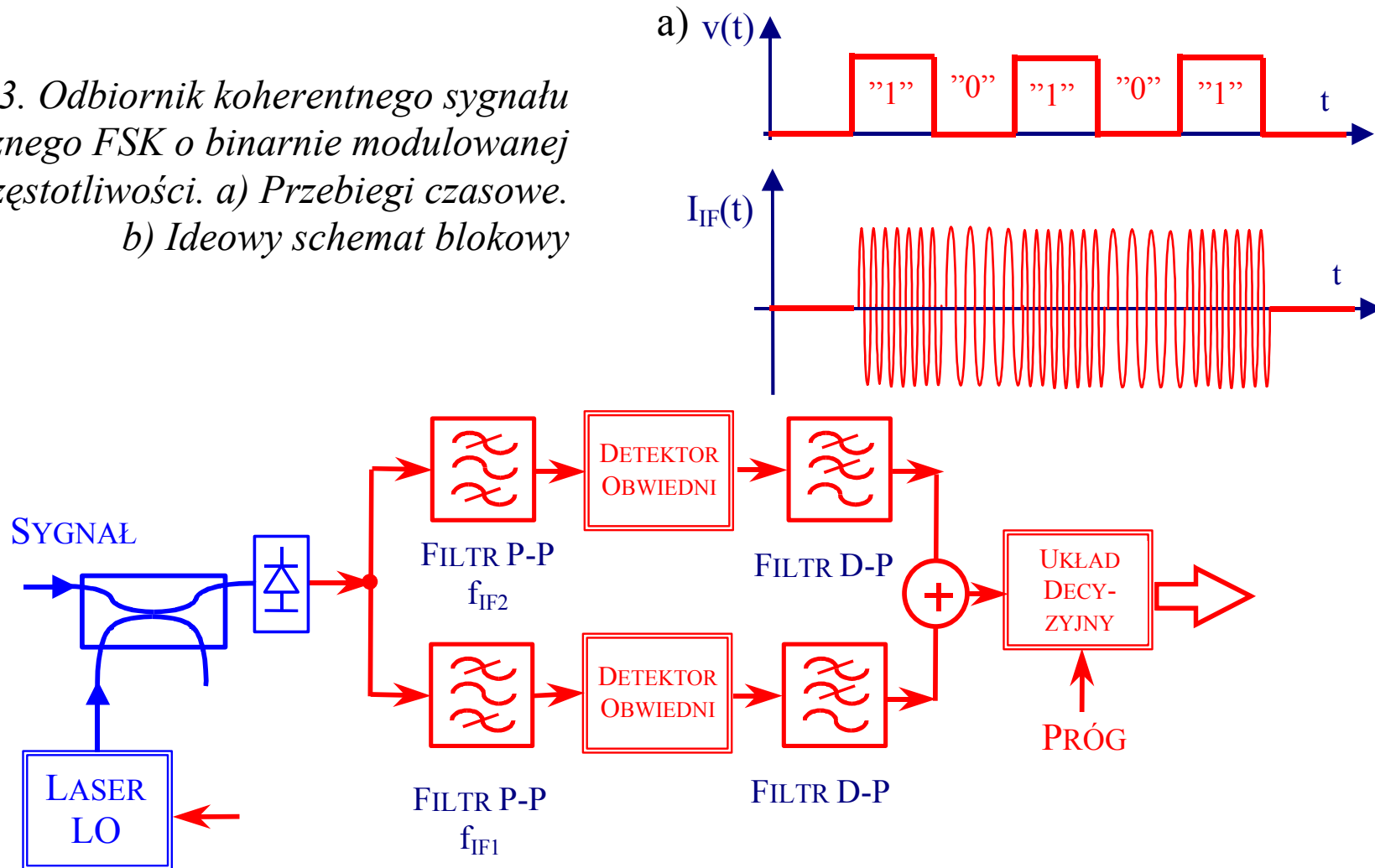
10.4. RODZAJE MODULACJI I ... – ODBIORNIKI HETERODYNOWE ASK I PSK (D)

- ◆ Całkowita moc sygnału optycznego docierającego do detektora $P_{\text{tot}} = P_S + P_{\text{LO}} + 2\alpha\sqrt{P_S P_{\text{LO}}}$;
- ◆ Dla modulacja fazy PSK: $\alpha = +1$ dla "1" i -1 dla "0";
- ◆ W układzie odbiornika heterodynowego PSK detektor obwiedni zastąpiony jest detektorem fazy.
- ◆ Detektor fazy może być różnie rozwiązany. Można wprowadzić linię opóźniającą o opóźnieniu τ równym czasowi trwania jednego bitu.
- ◆ Prawdopodobieństwo błędnego odczytania bitu dla modulacji PSK w odbiorniku heterodynowym jest równe: $P_e = \text{erfc}(\sqrt{N_R})/2$;
- ◆ Dla stopy błędu równego 10^{-9} czułości odbiornika **heterodynowego PSK = 18 fotonów/bit**.
- ◆ Dwukrotnie większa czułość odbiornika heterodynowego PSK w porównaniu z odbiornikiem ASK wynika z faktu, że do odbiornika PSK dociera dwukrotnie więcej mocy.
- ◆ W najtrudniejszym do realizacji i najkorzystniejszym przypadku odbiornika homodynowego PSK na wyjściu fotodetektora otrzymujemy napięcie stałe „+” lub „-”, w zależności od wartości fazy.
- ◆ Prawdopodobieństwo P_e dla modulacji PSK w odbiorniku homodynowym: $P_e = \text{erfc}(2\sqrt{N_R})/2$;
- ◆ Dla stopy błędu równego 10^{-9} czułości odbiornika **homodynowego PSK = 9 fotonów/bit**

10.4. RODZAJE MODULACJI I DETEKCCJI – ODBIORNIK KOHERENTNY FSK (A)

✓Przypadek kluczowania częstotliwości: chwilowa częstotliwość sygnału optycznego $f_0 + \alpha f_d$; gdzie $\alpha = \pm 1$; (tutaj f_d jest dewiacją częstotliwości).

Rys.10.13. Odbiornik koherentnego sygnału optycznego FSK o binarnie modulowanej częstotliwości. a) Przebiegi czasowe. b) Ideowy schemat blokowy



10.4. RODZAJE MODULACJI I DETEKCJI – ODBIORNIK KOHERENTNY FSK (B)

- ◆ Częstotliwość sygnału optycznego przyjmuje 2 wartości: $f_0 \pm f_d$;
- ◆ Odbiornik wymaga stosowania 2 oscylatorów lokalnych $f_0 + \alpha f_d$ i $f_0 - \alpha f_d$.
- ◆ Częstotliwość pośrednia przyjmuje także 2 wartości: $f_{IF} \pm f_d$;
- ◆ Prawdopodobieństwo błędnego odczytania bitu: $P_e = \operatorname{erfc}(\sqrt{N_R} / 2) / 2$;
- ◆ W przypadku modulacji FSK czułość idealnego odbiornika homodynowego jest taka sama jak heterodynowego.
- ◆ Jest ona o 6 dB gorsza niż w przypadku odbiornika homodynowego modulacji PSK.
- ◆ Dla stopy błędu równego 10^{-9} czułości odbiornika **homodynowego i heterodynowego FSK** jest równa = **36 fotonów/bit**
- ◆ W systemach wykorzystujących kluczkowanie częstotliwości FSK stosuje się zwykle niewielkie dewiacje: $f_d T < 1$;
- ◆ Można stosować większe dewiacje, wtedy jedna z częstotliwości pośrednich wypada poza pasmo odbiornika i nie jest dalej poddawana obróbce. Sygnał wyjściowy fotodetektora jest wtedy analogiczny, jak w przypadku modulacji ASK.

10.4. RODZAJE MODULACJI I ... – TEORET. CZUŁOŚĆ ODBIORNIKÓW KOHERENTNYCH

Rodzaj modulacji - odbiornik	Prawdopodobieństwo P_e	Średnia liczna fotonów N_R
PSK - homodynowy	$(1/2)\text{erfc}(\sqrt{2N_R})$;	9
ASK - homodynowy	$(1/2)\text{erfc}(\sqrt{N_R})$;	18
FSK - homodynowy	$(1/2)\text{erfc}(\sqrt{N_R/2})$;	36
PSK- heterodynowy- synchroniczny	$(1/2)\text{erfc}(\sqrt{N_R})$;	18
ASK- heterodynowy- synchroniczny	$(1/2)\text{erfc}(\sqrt{N_R/2})$;	36
FSK- heterodynowy- synchroniczny	$(1/2)\text{erfc}(\sqrt{N_R/2})$;	36

10.5. PODSUMOWANIE

- ◆ Analizy teoretyczne wykazały, że czułość odbiorników koherentnych: heterodynowych i homodynowych jest większa niż w przypadku transmisji IM-DD.
- ◆ Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły wnioski analiz teoretycznych.
- ◆ Na przeszkodzie do szerokiego zastosowania systemów transmisji koherentnej stoją trudności realizacyjne:
 - ✓ Lasery nadajnika i odbiornika muszą pozwalać na precyzyjne przestrajanie ich częstotliwości.
 - ✓ Specjalne układy o dużym stopniu złożoności muszą stabilizować ich częstotliwość.
 - ✓ Sygnały optyczne generowane przez lasery nadajnika i lokalnego oscylatora muszą być spektralnie czyste.
- ◆ Odkrycie wzmacniaczy optycznych i łatwość ich budowy pozwoliła zwiększyć czułość odbiorników optycznych w systemach IM-DD i znacznie zwiększyć odległość między stacjami regeneracyjnymi, co zahamowało rozwój systemów koherentnych.
- ◆ Proces mieszania sygnałów optycznych otwiera drogę do otrzymywania sygnałów mikrofalowych z zakresu fal milimetrowych i submilimetrowych.