

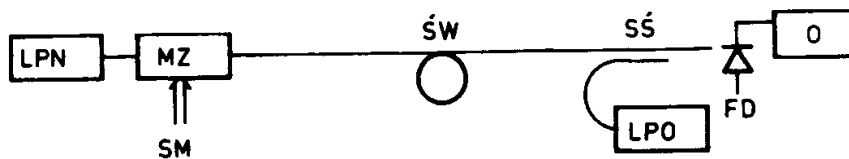
# TRANSMISJA KOHERENTNA WYKŁAD 16 SMK

Na podstawie: J. Siuzdak, „Wstęp do telekomunikacji światłowodowej”, WKŁ, W-wa 1999

**Systemy koherentne** – systemy wykorzystujące w transmisji światłowodowej światło koherentne oraz specyficzny sposób odbioru (detekcji) sygnału wychodzącego ze światłowodu.

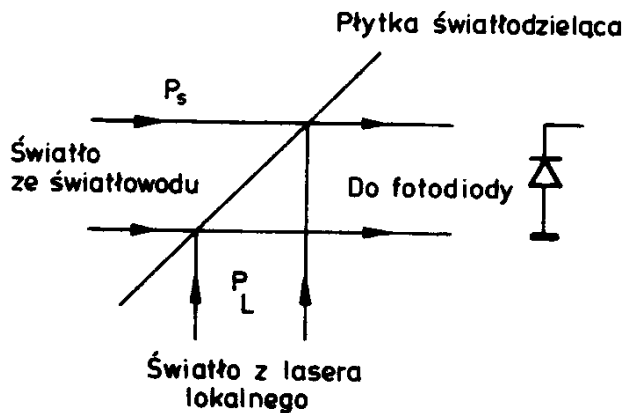
## 1. Zasady pracy systemu koherentnego.

Światło pochodzące z pp lasera nadawczego o bardzo wąskiej szerokości linii widmowej modulowane jest przez modulator zewnętrzny sterowany strumieniem danych i kierowane do światłowodu. Może być AM, PM lub FM (modulacja sygnału optycznego, a nie jego obwiedni). Po przebyciu żądanej odległości transmitowany sygnał dochodzi do układu odbiorczego: w sprzęgaczu światłowodowym do odbiorczego sygnału dodawany jest sygnał świetlny z lokalnego lasera pp (heterodyny optycznej). Superpozycja tych dwóch sygnałów zamieniana jest na sygnał elektryczny w odbiorczej fotodiodzie. Dalsza obróbka dokonywana jest elektrycznie.



**Rys. 10.1.** Schemat blokowy systemu koherentnego. Oznaczenia: LPN – laser półprzewodnikowy nadawczy, MZ – modulator zewnętrzny, SM – sygnał modulujący, ŚW – światłowód, SŚ – sprzęgacz światłowodowy, LPO – laser półprzewodnikowy odbiorczy, FD – fotodioda, O – odbiornik. Na podstawie [143]

Systemy z detekcją bezpośrednią wykorzystują jedynie modulację amplitudową (czy sygnał jest, czy go nie ma), nie czynią użytku z zależności fazowych i częstotliwościowych fali świetlnej. W przypadku systemów koherentnych detekcji w fotoodbiorniku podlega suma sygnału odbieranego i sygnału z lokalnego laserowego generatora.



**Rys. 10.2.** Zasada odbioru koherentnego. Na podstawie [143]

Fotoprąd w fotodiodzie:

$$I = R * P = R * |E|^2, \quad R - \text{czułość fotodiody}$$

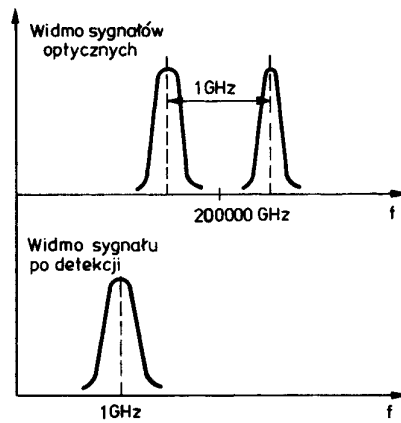
Natężenie pola elektrycznego sygnału i lasera lokalnego:

$$E_s = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_s t + \phi_s)$$

$$E_L = \sqrt{2P_L} \cos(\omega_L t + \phi_L)$$

$$I = R[P_L + P_s + 2\sqrt{P_L P_s} \cos[(\omega_L - \omega_s)t + \phi_L - \phi_s]]$$

Pierwszy człon w ostatnim wzorze – stały prąd proporcjonalny do mocy lasera lokalnego, drugi człon jest pomijalny ( $P_L \gg P_s$ ), trzeci – sygnał użyteczny zawierający wszystkie informacje o amplitudzie, częstotliwości i fazie odbieranego sygnału. Jeżeli różnica między pulsacjami w trzecim składniku jest stabilna i mieści się w zakresie częstotliwości elektrycznych, to widmo sygnału użytecznego przechodzi w zakres częstotliwości elektrycznych.



**Rys. 10.3.** Przesunięcie widma sygnału z częstotliwości optycznych do elektrycznych. Na podstawie [143]

Przez zwiększenie mocy lasera lokalnego wartość członu sygnałowego może być dowolnie duża, jednak nie prowadzi to do nieograniczonego wzrostu SNR, bo wzrost  $P_L$  prowadzi do zwiększenia mocy szumu śrutowego.

$$i_s^2 = 2qIB = 2qRP_L B; \quad SNR = \frac{I_s^2}{i_s^2} = \frac{RP_s}{qB}$$

Wielkość ta jest o 25 dB większa dla systemów koherentnych niż dla niekoherentnych (o podobnej szybkości transmisji). **Systemy koherentne są, zatem znacznie czulsze** (do osiągnięcia określonych parametrów transmisji w systemie koherentnym potrzebna jest znacznie mniejsza moc – pociąga to za sobą zwiększenie odcinka między regeneratorami – ok. 200 km przy szybkości transmisji n GBit/s).

Dodatkową poprawę czułości można uzyskać stosując inne rodzaje modulacji sygnału (np. fazy), co w systemach z detekcją bezpośrednią było niemożliwe.

Kolejna zaleta systemów koherentnych – **łatwa korekcja charakterystyki dyspersyjnej** światłowodu na drodze elektrycznej. Zależność szybkości transmisji w światłowodzie od częstotliwości można skompensować stosując odpowiedni filtr mikrofalowy, bądź linię opóźniającą. Dzięki przesunięciu widma sygnału do częstotliwości elektrycznych uzyskuje się dużą poprawę selektywności odbiornika.

Wada systemów koherentnych: konieczność spełnienia ostrych wymagań dotyczących szerokości linii widmowych laserów przez nadajniki i odbiorniki, ich wzajemnej stabilizacji, jednakowej polaryzacji sygnałów z podziałem częstotliwości FDM.

## 2. Problemy konstrukcji systemów koherentnych.

### a). Dopasowanie polaryzacji

Aby fala świetlna niosąca sygnał użyteczny i pochodząca z lasera odbiorczego mogły ze sobą interferować (detekcja koherentna) obie fale muszą mieć jednakową polaryzację. W światłowodach jednodomowych mogą rozchodzić się dwa tryby o ortogonalnych polaryzacjach. Między tymi trybami dochodzi do sprzężenia (naprężenia wewnętrzne światłowodu, zmiana ciśnienia i temperatury, drgania mechaniczne). Wielkość sprzężenia ulega powolnym zmianom w czasie; stan polaryzacji sygnału ulega przypadkowym zmianom w czasie.

Jeżeli polaryzacja światła z lasera odbiorczego jest stała, to poziom mocy sygnału w odbiorniku zależy od różnicy między dwoma polaryzacjami. Gdy kąt pomiędzy wektorami chwilowych natężeń pól lasera lokalnego i sygnału wynosi  $\Phi$ , to moc sygnału użytecznego  $\approx \cos^2 \Phi$ . Zależność sygnału odbieranego od stanu polaryzacji jest niedopuszczalna, uniemożliwia poprawne działanie odbiornika.

#### - użycie światłowodów utrzymujących polaryzację

tzn. światłowodów, w których celowo wprowadzono dużą dwójłomność tak, aby współczynniki propagacji fal o polaryzacjach ortogonalnych znacznie się różniły (obszary wewnątrz światłowodu wnoszące ukierunkowane naprężenia zwiększające jego dwójłomność). Zasadniczy parametr takiego światłowodu – przesłuch polaryzacyjny:

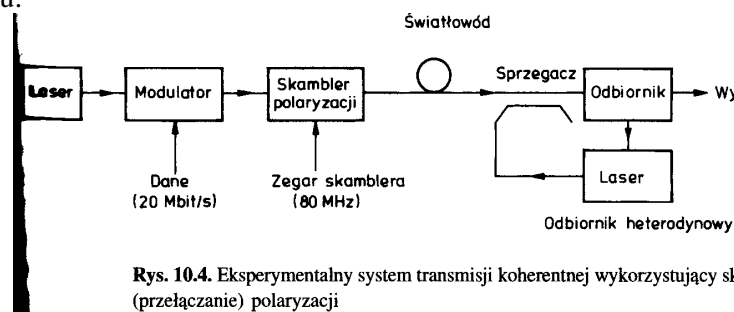
$$P_p = 10 \log_{10} \frac{P_y}{P_x} = 10 \log_{10} th(hL)$$

$h$  – współczynnik sprzężenia modowego,  $L$  – długość światłowodu,  $P_x$ ,  $P_y$  – moce modów wzbudzonego i wprowadzonego.

Wada – nieco **większe tłumienie** i **wyższa cena**, nie można zastosować tego rozwiązania w już istniejących liniach światłowodowych.

#### - skramblowanie (okresowe przełączanie) polaryzacji

polega na wielokrotnej zmianie stanu polaryzacji nadawanego sygnału w okresie trwania każdego bitu:

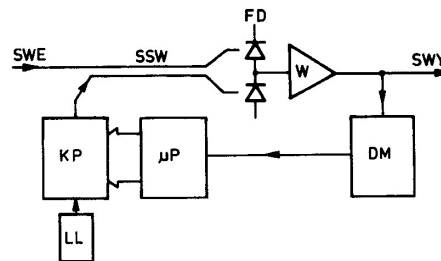


Światło z lasera nadawczego modulowane jest amplitudowo z prędkością 20 MBit/s za pomocą zewnętrznego modulatora (Macha-Zehndera). Zmodulowany sygnał wprowadza się do układu przełączającego polaryzację (skramblera, 80 MHz). W trakcie trwania każdego bitu polaryzacja jest przełączana 4-krotnie między składowymi ortogonalnymi.

Wada – **komplikacja układu nadajnika** i **strata połowy mocy nadawanej**; szybkość przełączania polaryzacji musi przekraczać szybkość transmisji. Skramblowanie polaryzacji

nadaje się do stosunkowo wolnej transmisji. Zaleta – prosta struktura odbiornika (nie wymaga kontroli polaryzacji). Nadaje się do systemów rozsiewczych (systemy, w których sygnały pochodzące z jednego lub niewielkiej liczby nadajników są rozprowadzane wśród wielkiej liczby odbiorników).

- **kontrola polaryzacji lasera odbiorczego** – można skonstruować układ zmieniający stan polaryzacji lasera odbiorczego w takt zmian polaryzacji sygnału tak, aby obydwie te polaryzacje były jednakowe.

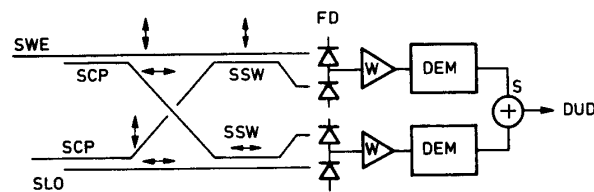


**Rys. 10.5.** Schemat blokowy układu kontroli polaryzacji. Oznaczenia: SWE – sygnał wejściowy (światłny), SWY – sygnał wyjściowy (elektryczny), SSW – sprzęgacz światłowodowy, FD – zespół fotodiód, W – wzmacniacz, KP – kontroler polaryzacji,  $\mu P$  – mikroprocesor, DM – detektor mocy sygnału użytecznego, LL – laser odbiorczy. Na podstawie [144]

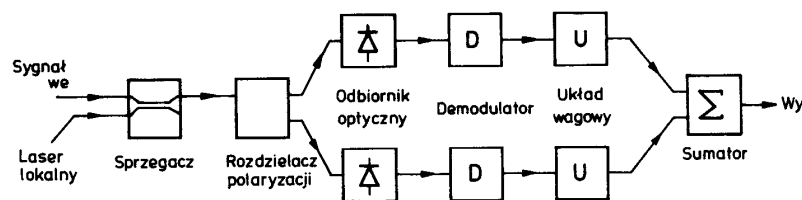
Mikroprocesor steruje kontrolerem polaryzacji tak, aby otrzymać maksimum sygnału z detektora mocy. Kontrolery polaryzacji wymagają kilku sygnałów sterujących, wprowadzają kontrolowaną dwójłomność do ośrodka, przez który przechodzi światło.

Wada – **duża komplikacja układowa.**

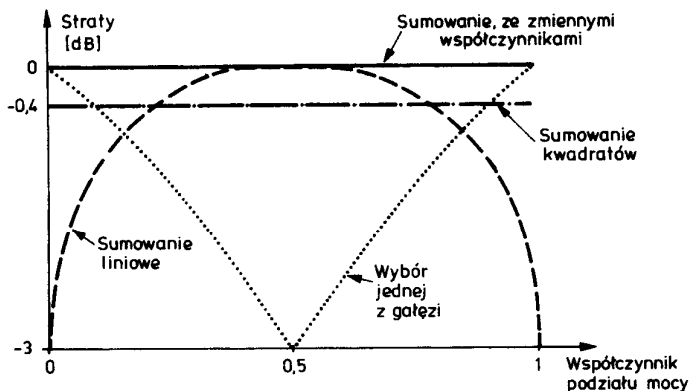
- **odbiór rozproszony** – polarisation diversity – polega na tym, że każda z dwóch ortogonalnych składowych polaryzacji sygnału odbieranego detekowana jest osobno, a złożenie całego sygnału z dwóch składowych odbywa się na drodze elektrycznej. Polaryzacje obydwu sygnałów są rozdzielane w ten sposób, że każda para fotodiód odbiera sygnały o jednakowych polaryzacjach, które są ortogonalne dla różnych par. Sygnały pochodzące od każdej z par fotodiód są demodulowane i dodawane przed komparacją.



**Rys. 10.6.** Schemat blokowy układu z odbiorem ortogonalnym. Oznaczenia: SWE, SSW, FD, W – jak na rys. 10.5, SCP – sprzęgacze światłowodowe czułe na polaryzację, SLO – sygnał z lasera odbiorczego, DEM – demodulator, S – sumator sygnałów, DUD – do układu decyzyjnego. Na podstawie [144]



**Rys. 10.7.** Podstawowa konfiguracja obróbki elektrycznej w układzie z odbiorem ortogonalnym w przypadku pracy w pasmie podstawowym

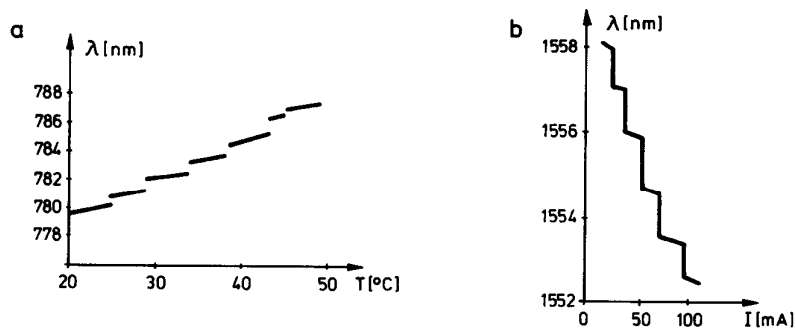


Rys. 10.8. Zmniejszenie stosunku sygnału do szumu przy odbiorze ortogonalnym w zależności od podziału mocy sygnału między obydwie gałęzie. Na podstawie [135]

Straty w porównaniu do przypadku dopasowania polaryzacji są zależne od stosunku podziału mocy sygnału,  $\alpha$ , między obydwie gałęzie. Największą wartość straty przyjmują dla  $\alpha$  równego 0 lub 1, czyli gdy cały sygnał wejściowy jest tylko w jednej gałęzi.

**b). Stabilizacja linii widmowych laserów pp.**

Aby umożliwić detekcję koherentną, różnica częstotliwości między laserem nadawczym, a heterodyną optyczną musi być stabilna i mieścić się w zakresie pasma elektrycznego odbiornika. Długość emitowanej przez laser fali ulega zmianom wraz z temperaturą (typowo 0.1-1 nm/K) i prądem (typowo 0.01-0.1 nm/Ma). Zmiany te są spowodowane zależnością współczynnika załamania rezonatora od temperatury i koncentracji nośników). Schodkowy charakter zależności wynika ze zjawiska przeskakiwania między modami (mode hopping).

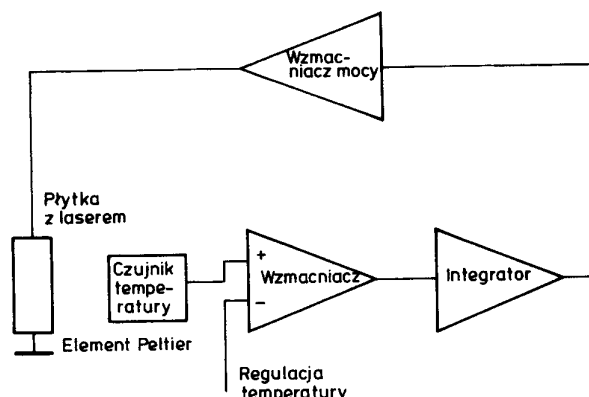


Rys. 10.9. Przykładowe zmiany długości fali emitowanej przez laser wraz ze zmianami jego: a) temperatury (na podstawie [28]), b) prądu (na podstawie [145])

Aby utrzymać stabilną długość fali laserów nadawczego i odbiorczego – precyzyjna stabilizacja ich temperatur i prądów (układy sprzężenia zwrotnego z użyciem np. termistora jako czujnika temperatury i elementu Peltier jako jej regulatora).

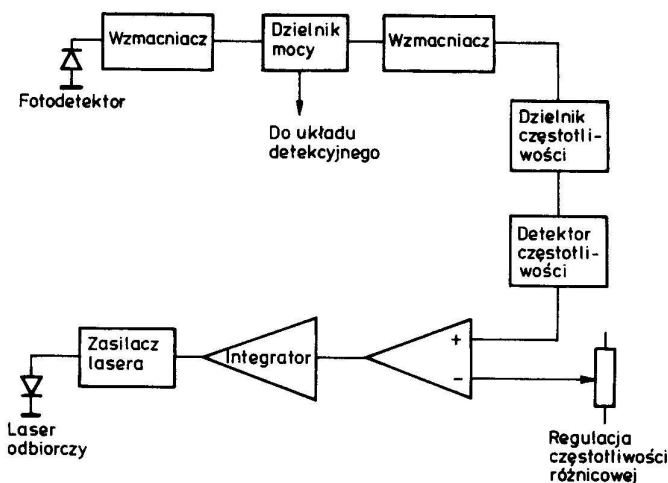
Laser pp wraz z czujnikiem temperatury, którego napięcie wyjściowe zależy od temperatury lasera są umieszczone w jednej obudowie oddzielonej od radiatora elementem Peltier. W stanie równowagi (temperatura lasera równa jest żądanej temperaturze) sygnał wyjściowy ze wzmacniacza różnicowego jest zerowy i integrator utrzymuje kierunek i wartość prądu płynącego przez element Peltier. Wszelkie odchyłki od żądanej temperatury

powodują powstanie napięcia niezrównoważenia sterującego integrator. Uzyskuje się stabilizację  $\approx 0.01$  K.



Rys. 10.10. Schemat blokowy układu stabilizacji temperatury

Stabilizacja częstotliwości lasera w zakresie  $\pm 10$  MHz wymaga stabilizacji prądu z dokładnością kilku  $\mu$ A.



Rys. 10.11. Schemat blokowy układu stabilizacji prądu i automatycznej regulacji częstotliwości

Sygnal elektryczny z fotodiody o częstotliwości równej różnicy między częstotliwościami obydwu laserów ulega wzmocnieniu, a następnie dochodzi do cyfrowego dzielnika i detektora częstotliwości. Sygnal wyjściowy detektora częstotliwości (proporcjonalny do chwilowej częstotliwości różnicowej) jest porównywany z sygnałem odniesienia odpowiadającym żądanej częstotliwości różnicowej. Jeśli wystąpi zmiana częstotliwości różnicowej, zmianie też ulega prąd stały lasera, który kompensuje zmianę częstotliwości.

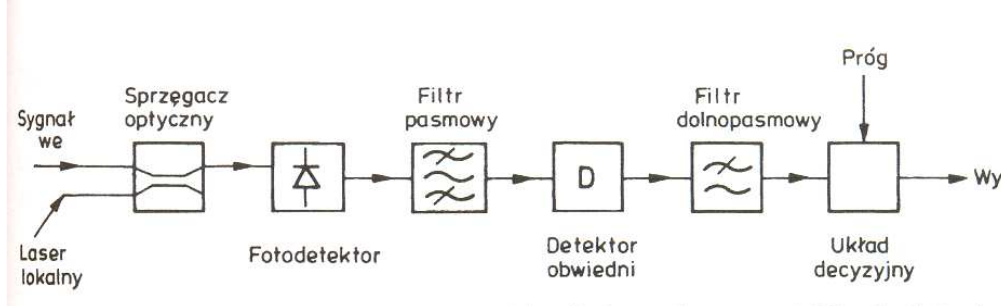
### 3. Rodzaje modulacji i detekcji

Ze względu na zależność częstotliwości generowanego przez laser promieniowania od wartości prądu, jedyną możliwą do osiągnięcia bezpośrednią modulacją lasera jest modulacja częstotliwości osiągana przez niewielką modulację prądu. Pozostałe rodzaje modulacji osiągane są przez modulatory zewnętrzne (elektrooptyczne). Z uwagi na możliwość odbić

wstecznych, promieniowanie lasera wprowadzane jest do światłowodu przez izolatory optyczne Faraday'a.

**Odbiór** promieniowania świetlnego może być **homodynamiczny**, gdy różnica częstotliwości między laserem lokalnym, a nadajnikiem jest zerowa i są one sfazowane lub **heterodynamiczny**, kiedy obydwa lasery emitują falę różniącą się o określoną wielkość – częstotliwość pośrednią (IF).

**a). Modulacja amplitudy ASK i odbiornik z detekcją obwiedni:**

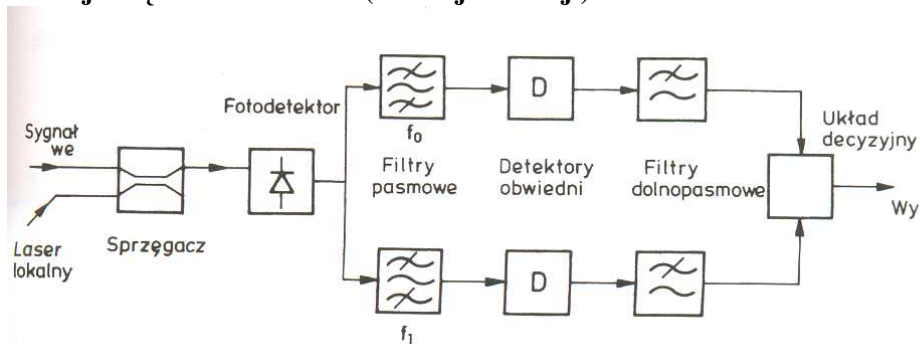


Schemat blokowy odbiornika heterodynamicznego ASK z detekcją obwiedni

Po transmisji w światłowodzie i zmieszaniu w fotodetektorze ze światłem pochodzącym z lasera lokalnego, powstały sygnał elektryczny przechodzi przez filtr pośredniej częstotliwości, a następnie detekowana jest jego obwiednia. Dolnoprzepustowy filtr wyjściowy służy do filtracji wyższych harmonicznych.

Elementowa stopa błędów:  $P_e = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{SNR}{4}\right)$

**b). Modulacja częstotliwości FSK (o dużej dewiacji):**



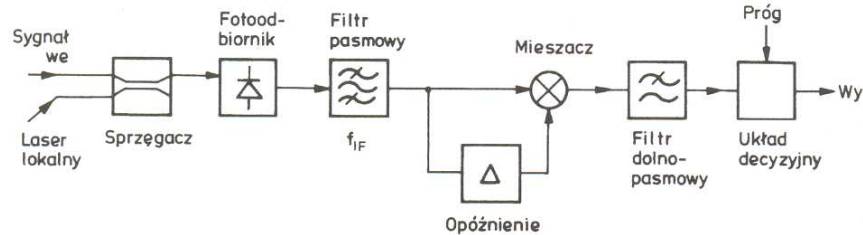
Konfiguracja odbiornika FSK z dwoma filtrami

Sygnał wejściowy jest filtrowany przez dwa filtry pośredniej częstotliwości, z których każdy dostrojony jest do częstotliwości  $f_0$  (górny) lub  $f_1$  (dolny) odpowiadającej symbolowi „0” lub „1”. Przefiltrowane sygnały poddawane są detekcji obwiedni, a wartości sygnałów na wyjściu detektorów są od siebie odejmowane. Na podstawie znaku sygnału na wyjściu układu różnicowego podejmowana jest decyzja dotycząca nadanego symbolu.

Elementowa stopa błędów:  $P_e = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{SNR}{2}\right)$ .

### c). Modulacja CPFSK (przeptywności 1 Gbit/s)

Modulację częstotliwości można stosować przy małej dewiacji, kiedy widma sygnałów odpowiadających różnym symbolom pokrywają się. Wymaga to modulacji z ciągłą fazą:



Schemat blokowy odbiornika sygnału CPFSK z demodulatorem z linią opóźniającą.

Elementowa stopa błędów:  $P_e = \frac{1}{2} \exp(-SNR)$ .

**d). Różnicowa modulacja fazy – DPSK** – konfiguracja odbiornika taka sama jak dla CPFSK tylko z innym czasem opóźnienia w demodulatorze = czasowi trwania jednego bitu T.

Elementowa stopa błędów:  $P_e = \frac{1}{2} \exp(-SNR)$

Powyższe odbiorniki stosują tzw. **demodulację asynchroniczną**. Przy takiej demodulacji w odbiorniku nie jest odtwarzana pośrednia częstotliwość odbieranego sygnału. Istnieje również **demodulacja synchroniczna**, przy której częstotliwość pośrednia jest odtwarzana i wykorzystywana następnie do detekcji sygnału. Ten sposób demodulacji zapewnia większą czułość odbioru (0.4 dB), jest rzadziej stosowany – komplikacja układowa.

Tablica 10.1

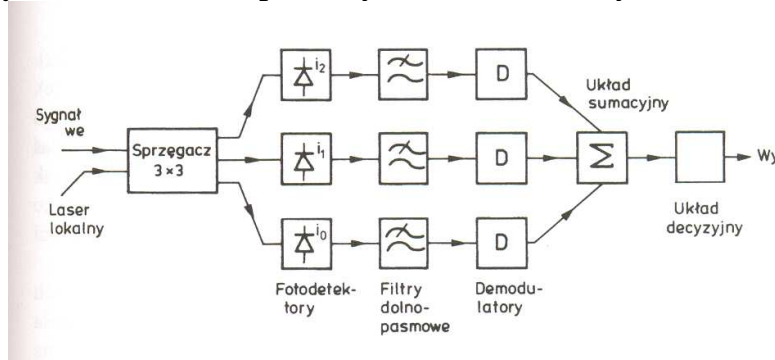
Rodzaj modulacji	Rodzaj demodulacji	Wymagane SNR [dB]	Wymagana liczba fotonów na bit
ASK	Synchroniczna	18,6	72
ASK	Detekcja obwiedni	19	80
FSK	Synchroniczna	15,6	36
FSK	Z dwoma filtrami	16	40
FSK	Z jednym filtrem	19	80
PSK	Synchroniczna	12,6	18
CPFSK, DPSK	Różnicowa	13	20

Czułość różnych rodzajów demodulacji (SNR wymagany do osiągnięcia  $BER=10^{-9}$ )

Systemy detekcji heterodynowej są znacznie łatwiejsze do zastosowania w porównaniu z homodynowymi, ale pasmo przepustowe jest 2 razy > niż w homodynowych. Ponadto wymagają one obróbki elektrycznej sygnału na wyższych częstotliwościach.



**d). Struktury odbiorników z rozproszonym odbiorem fazowym:**



**4. Skończona szerokość linii widmowych laserów**

Światło emitowane przez lasery pp charakteryzuje się stosunkowo dużą szerokością linii widmowej, która w układzie elektrycznym przejawia się w postaci **szumu fazowego** (emisja spontaniczna fotonów). Wskutek szumów fazowych typowy laser jednodomowy DFB na długość fali 1.55 μm ma szerokość linii widmowej 10-100 MHz. Niezerowa szerokość linii widmowej generuje zmiany widma zmodulowanego sygnału w porównaniu z idealnym przypadkiem widma o bardzo małej szerokości. Jeśli widmo sygnału (ASK) modulującego jest  $M(f)$ , a widmo lasera  $S(f)$  to wypadkowe widmo:

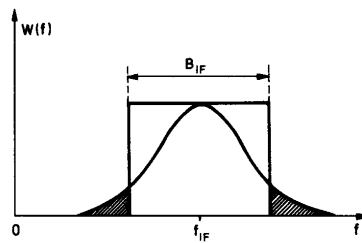
$$W(f) = S(f) * M(f)$$

Wypadkowa szerokość widma sygnału rośnie ze wzrostem szerokości widmowej lasera. W przypadku detekcji heterodynowej wymaga to zwiększenia pasma przepustowego filtra pośredniej częstotliwości = zwiększenia mocy przepuszczanych przez ten filtr szumów.

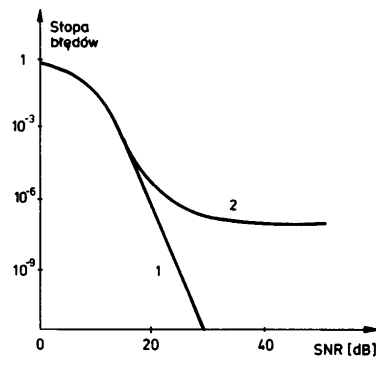
Aby straty SNR spowodowane wzrostem szerokości pasma były < 1 dB, spełniony musi być warunek:

$$\Delta v_{FWHM} \cdot T < 0.18$$

Jeżeli wskutek szumu fazowego sygnał znajdzie się poza pasmem przepustowym filtra pośredniej częstotliwości, spowoduje to błąd w odbiorze.



**Rys. 10.19.** Wychodzenie widma sygnału poza pasmo filtra pośredniej częstotliwości



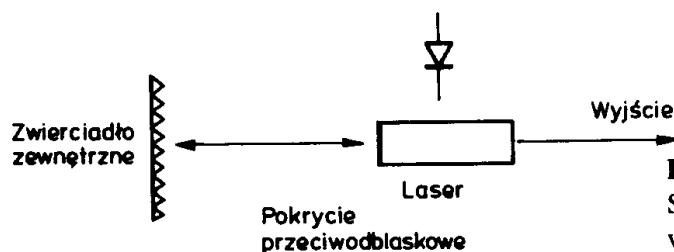
**Rys. 10.20.** Przykładowa zależność elementowej stopy błędów (BER) od stosunku mocy sygnału do mocy szumu (SNR). Krzywa 1 odpowiada brakowi szumu fazowego, natomiast krzywa 2 – jego obecności

Część mocy sygnału znajdująca się poza pasmem przepustowym nie zależy od SNR. Przyczyna – szum fazowy odbieranego sygnału przenosi się na fluktuację jego częstotliwości. Zjawisko to trzeba eliminować. Zjawisko szumów fazowych jest jeszcze bardziej krytyczne dla innych rodzajów modulacji. Wprowadza to określone ograniczenia na sumaryczną szerokość linii widmowych laserów w stosunku do szybkości transmisji:

- detekcja homodynowa (PSK):  $\Delta \nu_{FWHM} \cdot T < 10^{-4}$
- różnicowa modulacja fazy (DPSK) i modulacja częstotliwości z ciągłą fazą (CPFSK):  $\Delta \nu_{FWHM} \cdot T < 3 \cdot 10^{-3}$
- modulacja częstotliwości (FSK) i amplitudy (ASK) z detekcją obwiedni:  $\Delta \nu_{FWHM} \cdot T < 10^{-1}$

W prawidłowo zaprojektowanym systemie zwiększenie SNR towarzyszy zawsze zmniejszenie BER. Jeżeli powyższe wymagania nie są spełnione, wówczas powyżej pewnej wartości SNR zwiększanie SNR nie towarzyszy maleniu BER (rys. 10.20).

Aby uzyskać znacznie węższe linie widmowe stosuje się lasery pp z zewnętrznym rezonatorem:



**Rys. 10.21.**  
Schemat lasera z zewnętrzną  
wnęką rezonansową

## 5. Trendy w rozwoju telekomunikacji koherentnej

- badania nad światłowodowymi liniami telekomunikacyjnymi o bardzo dużych przepływnościach i długich odcinkach międzyregeneratorowych,
- rozwijanie sieci lokalnych LAN i systemów rozsiewczych pracujących ze zwielokrotnieniem FDM,
- stworzenie optyczno-elektronicznego układu scalonego umożliwiającego odbiór rozproszony (polaryzacyjny i fazowy),
- rozwiązanie problemu stabilizacji emisji wielu sygnałów optycznych w niewielkich odstępach częstotliwościowych do realizacji systemów ze zwielokrotnieniem FDM,
- konstrukcja jednodomowego lasera o wąskiej linii widmowej i szerokim zakresie przestrajania.