



9. Cyfrowe łącza światłowodowe

Spis treści:

- 9.1. Wprowadzenie.
- 9.2. Zasada działania łącza optycznego.
- 9.3. Czułość odbiornika a stopa błędu.
- 9.4. Ograniczenia zasięgu łącza: tłumienie i dyspersja.
- 9.5. Transmisja solitonów.
- 9.6. Przykłady rozwiązań.
- 9.7. Podsumowanie.

9.1. WPROWADZENIE – SYGNAŁ ANALOGOWY I CYFROWY - PRÓBKOWANIE (A)

- Sygnał elektryczny może mieć formę sygnału analogowego bądź sygnału cyfrowego.
- Typowe sygnały analogowe to głos z mikrofonu, obrazu z kamery video
- Sygnały transmisji danych między komputerami są sygnałami cyfrowymi.
- Sygnały cyfrowe przyjmują kilka z możliwych wartości, sygnały binarne - jedną z dwu wartości "1" lub "0".
- Sygnał analogowy zamieniamy na cyfrowy przez **próbkowanie** go w określonym rytmie.
- **Kryterium Nyquist'a:**

jeśli sygnał analogowy zajmuje pasmo Δf , to częstotliwość próbkowania f_s powinna być na tyle duża, aby spełniony był warunek:

$$f_s \geq 2\Delta f;$$

- **Kwantyzacja** próbki to przypisanie jej jednej z M wartości, na co potrzeba m bitów:

$$M = 2^m; \quad m = \log_2 M;$$

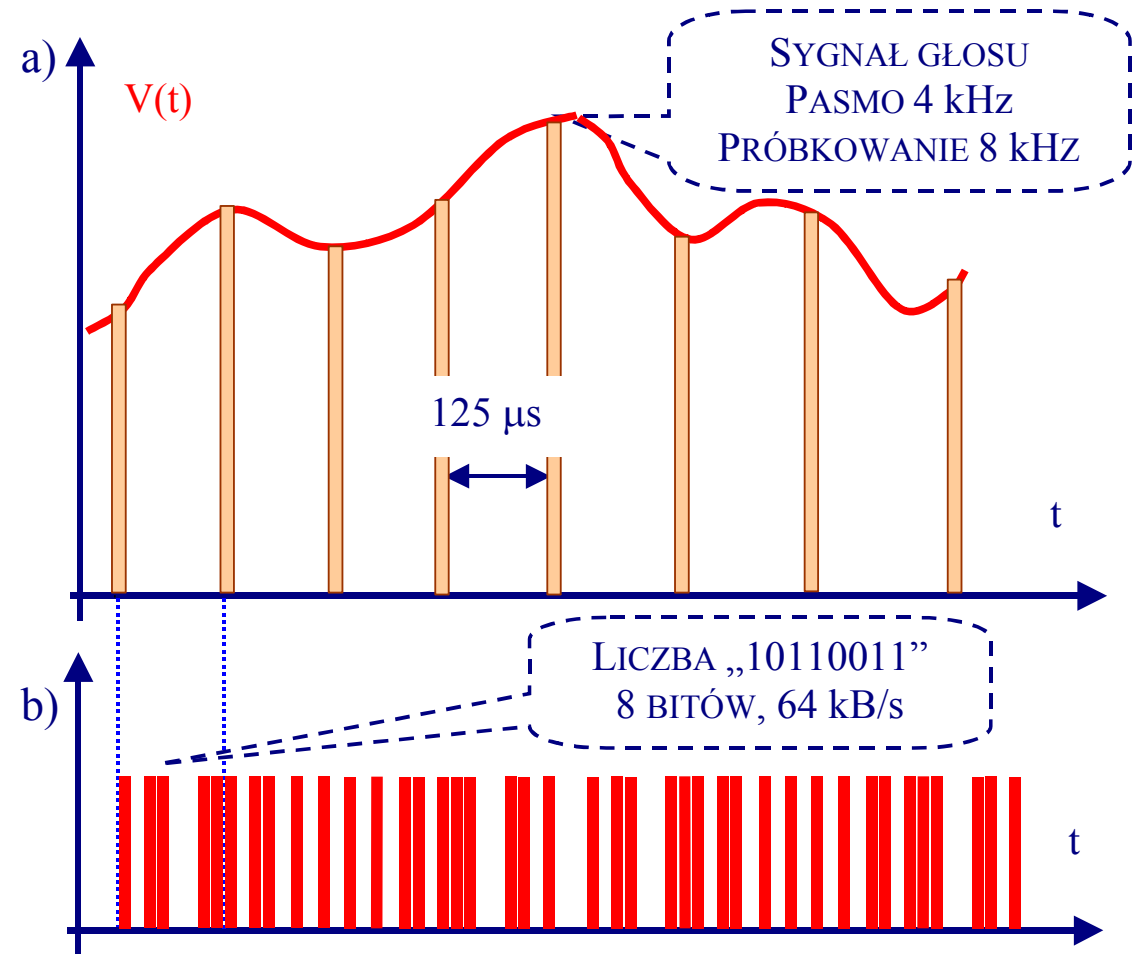
- Obie funkcje wykonuje przetwornik A/D.

9.1. WPROWADZENIE – SYGNAŁ ANALOGOWY I CYFROWY - PRÓBKOWANIE (B)

- Wartość próbki zostaje zapisana binarnie przez m bitów, a szybkość transmisji B :

$$B[\text{b/s}] = m f_s \geq (2\Delta f) \log_2 M = 2m\Delta f;$$

- Tak więc przetwornik A/D:
 - Próbkuje sygnał.
 - Kwantyzuje go.
 - Transmituje informację cyfrową o wartości próbki.
- Analogową postać sygnału przywraca przetwornik D/A.
- Przebieg analogowy nie zostaje odtworzony wiernie, zmienia się zawartość wyższych harmonicznych.



Rys.9.1. Próbkowanie sygnału analogowego głosu z prędkością 8000 próbek/sekundę, zapis przebiegu w postaci cyfrowej.

9.1. WPROWADZENIE – TRANSMISJA CYFROWA ROZMAITYCH INFORMACJI (A)

⇒ Transmisja rozmowy telefonicznej:

- pasmo: 200...3400 Hz.
- częstotliwość próbkowania: 8 kHz,
- rozdzielczość kwantowania 8 bitów,
- szybkość transmisji 64 kb/s,
- dynamika powiększona przez stosowanie logarytmicznej PCM.

⇒ Audio-CD., popularny odtwarzacz:

- pasmo: 20...20 000 Hz.
- częstotliwość próbkowania: 44,10 kHz,
- rozdzielczość kwantowania 16 bitów,
- szybkość transmisji 706 kb/s na kanał.

⇒ Digital Audio Tape – DAT:

- pasmo: 20...20 000 Hz.
- częstotliwość próbkowania: 48 kHz,

⇒ Systemy telewizji: NTSC/PAL:

- Szybkość transmisji 3...5 Mb/s.

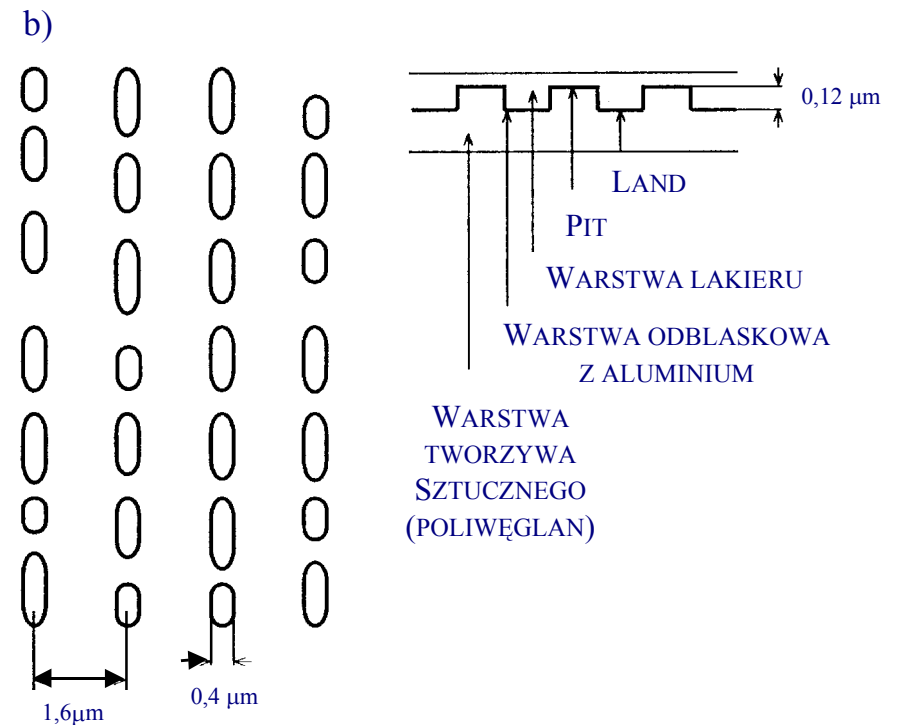
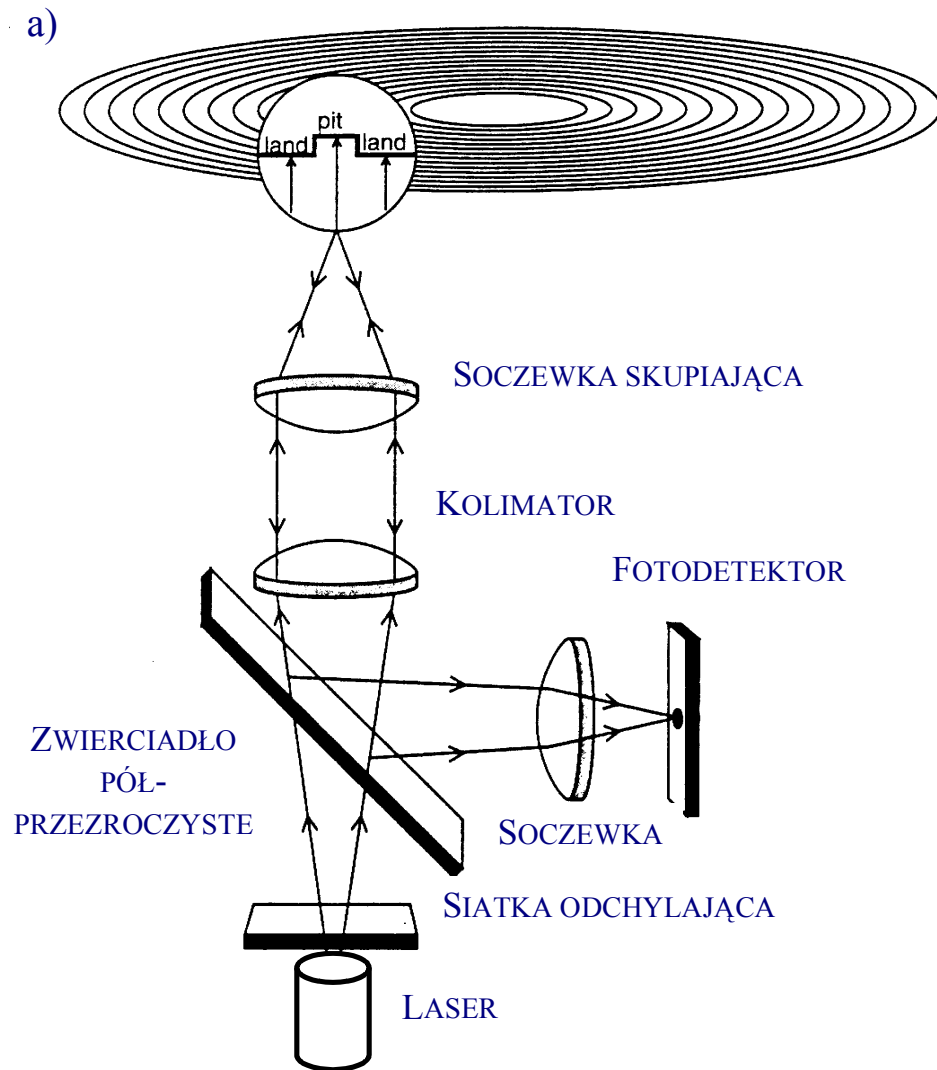
⇒ System telewizji zgodny z CCIR 601:

- Szybkość transmisji 5...10 Mb/s.
- Cyfrowy strumień danych zawiera informacje kolejno o 3 kolorach:
 - czerwonym,
 - zielonym
 - i niebieskim.
- 3 przetworniki A/D analizują każdy z kolorów zapisując intensywność barwy za pomocą 8 bitów.

⇒ High Definition Television Format - HDTV

- Szybkość transmisji bez kompresji: 60 Mb/s,
- Szybkość transmisji z kompresją: 20-40 Mb/s.

9.1. WPROWADZENIE – TRANSMISJA CYFROWA ROZMAITYCH INFORMACJI (B)



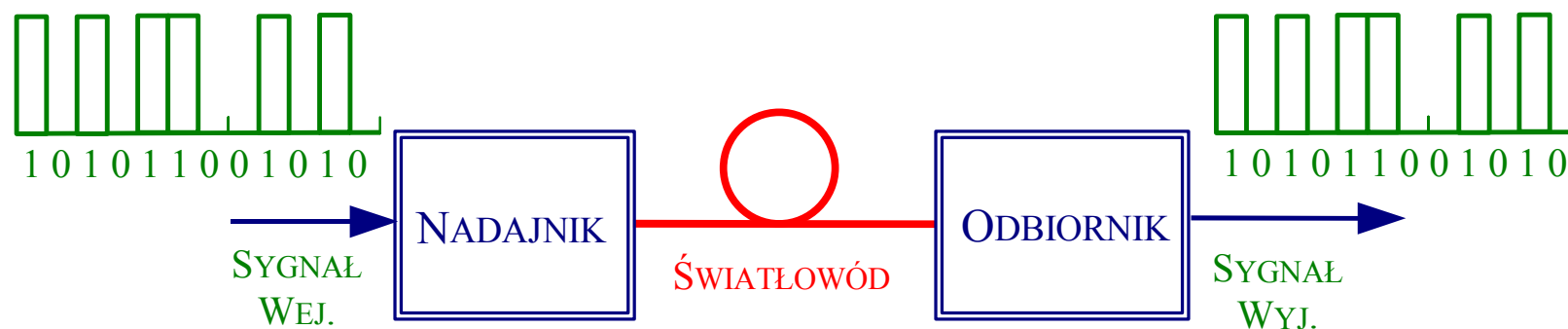
*Rys.9.2. Zasada działania CD.
a) Bezkontaktowe próbkowanie płyty CD za pomocą promienia laserowego, b) Układ pitów i landów na dysku wizyjnym*

9.2. ZASADA DZIAŁANIA ŁĄCZA CYFROWEGO – DEFINICJA BER

- Najpopularniejszym typem łącza optycznego jest łącze cyfrowe.
- Celem transmisji jest przesłanie - możliwie bezbłędnie - od nadajnika do odbiornika ciągu liczb.
- Laser modulowany bezpośrednio i cyfrowo.
- Modulacja amplitudy dwustanowa (typu „*on-off keying*” OOK),
- Detekcja bezpośrednia, na diodzie PIN lub lawinowej. Światłowód krzemowy.
- Stopa błędów BER (ang. *bit error rate*) - prawdopodobieństwo popełnienia błędów. Jeśli p_0 to prawdopodobieństwo potraktowania „1” jako „0”, a p_1 to prawdopodobieństwo wzięcia „0” za

„1”, to:

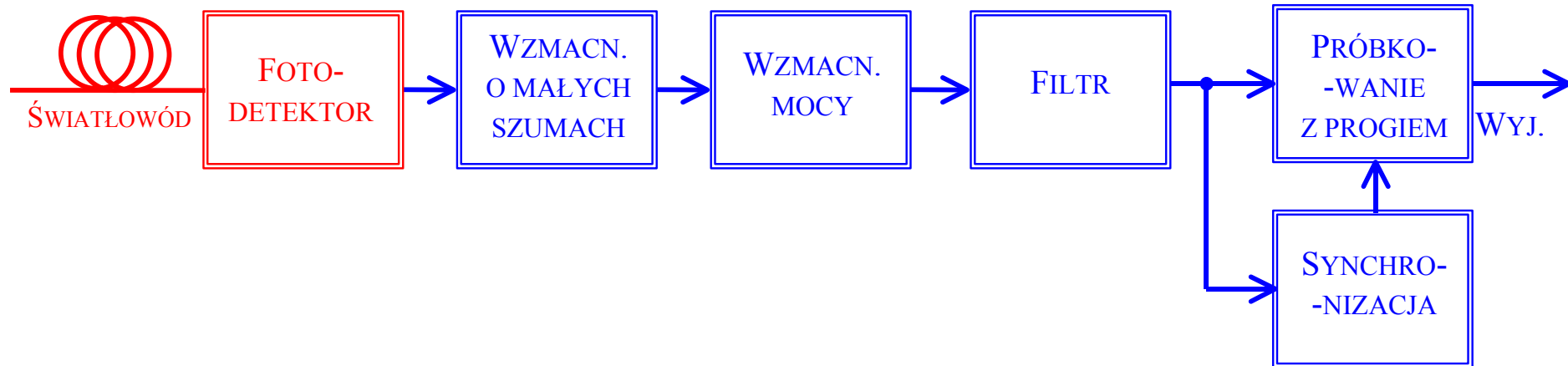
$$\text{BER} = \frac{p_0 + p_1}{2} < 10^{-9};$$



Rys.9.3. Schemat ideowy światłowodowego łącza cyfrowego.

9.2. ZASADA DZIAŁANIA ŁĄCZA CYFROWEGO – SCHEMAT FUNKCJONALNY ODBIORNIKA

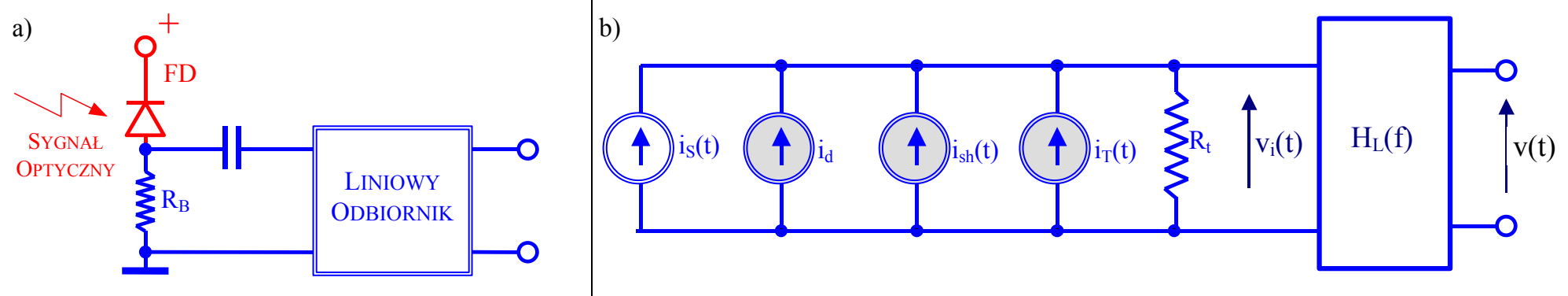
- Schemat funkcjonalny odbiornika łącza cyfrowego o transmisji binarnej pokazuje rys.9.4.



Rys.9.4. Schemat funkcjonalny odbiornika łącza cyfrowego.

- Fotodetektor z diodą PIN, lub lawinową detekuje przychodzące impulsy optyczne..
- Wzmacniacze: niskoszumny i mocy (z regulacją wzmocnienia) wzmacniają te impulsy.
- Filtr wyrównuje kształt i eliminuje interferencje między symbolami.
- Układ próbkowania z progami podejmuje co okres T decyzje, czy "0" czy "1".
- Układ synchronizacji pełni rolę zegara odmierzającego czas, który związany jest z rytmem przychodzących impulsów optycznych.

9.2. ZASADA DZIAŁANIA ŁĄCZA CYFROWEGO – SZUMY ODBIORNIKA



Rys.9.5. Schematy zastępcze odbiornika. a) Fotodetektor z polaryzacją i wzmacniaczem odebranego sygnału. b) Obwód zastępczy odbiornika ze źródłami szumów ciemnych i_d oraz śrutowych i_{sh} .

- Analiza czułości odbiornika winna uwzględniać szumy.
 - $i_s(t)$ – sygnał po fotodetekcji,
 - $i_d(t)$ – prąd ciemny fotodetektora,
 - $i_{sh}(t)$ – szumy śrutowe fotodetektora,
 - i_T – szumy termiczne wzmacniacza,
- R_t – wyjściowa rezystancja detektora równoległa z R_B .
- $H_L(f)$ reprezentuje liniową funkcję przenoszenia układu wzmacniającego.
- Zachowanie układu opisane jest transimpedancją $Z_t(f)$: $Z_t(f) = \frac{v(t)}{i_s(t)}$;

9.2. ZASADA DZIAŁANIA ŁĄCZA CYFROWEGO – SZUMY ŚRUTOWE

- Obecność szumów śrutowych jest skutkiem kwantowej natury światła.
- Wiązka niesie średnio \bar{n} fotonów w przedziale czasu $\Delta\tau$, do fotodetektora dotrze ich n w czasie $\Delta\tau$ z prawdopodobieństwem $P(n)$ opisanym rozkładem Poisson'a.

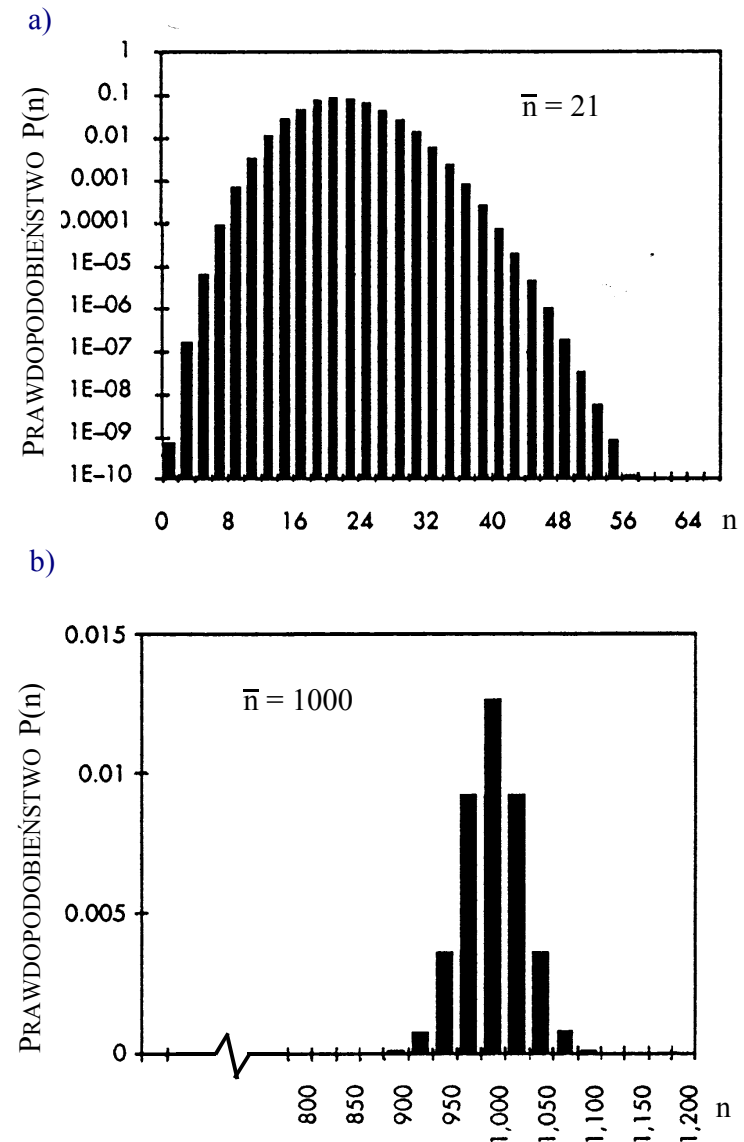
$$P(n) = \frac{e^{-\bar{n}} \bar{n}^n}{n!};$$

- Średni prąd fotodetektora zapisze się prosto:

$$\bar{I} = \frac{e\bar{n}}{\Delta\tau};$$

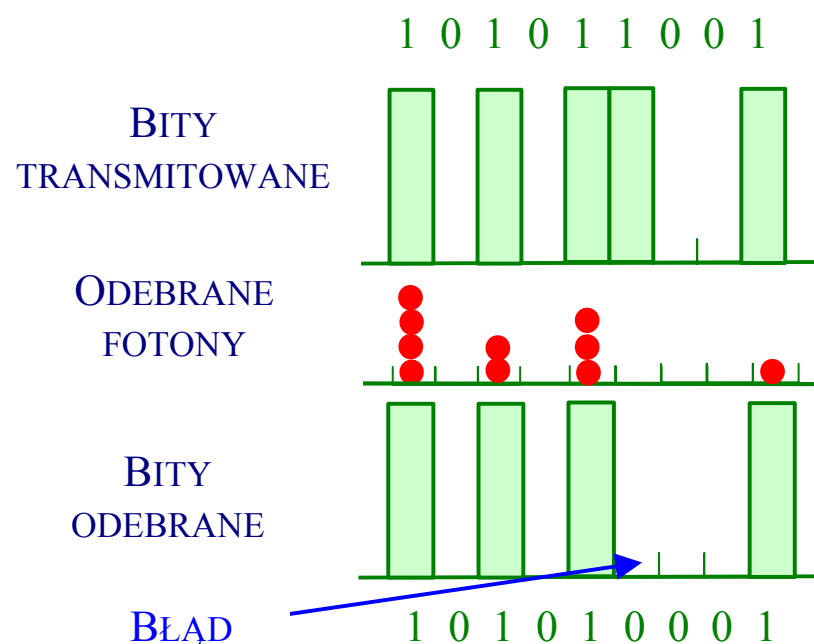
- Im większa wartość \bar{n} , tym rozkład upodabnia się do Gaussa.

Rys.9.6. Rozkład prawdopodobieństwa Poisson'a dla a) 21 fotonów i b) dla 1000 fotonów.



9.3. CZUŁOŚĆ ODBIORNIKA A STOPA BŁĘDU – ODBIORNIK IDEALNY (A)

- Czulość odbiorników analogowych opisana jest stosunkiem sygnału do szumu SNR (*signal-to-noise-ratio*).
- Czulość odbiorników cyfrowych w systemie *on-off keying* opisana jest minimalną mocą optyczną - np. liczbą fotonów - dla której uzyskujemy mniejszą od 10^{-9} stopę błędów.
- Pytanie: w jakim stopniu stopa błędu zależy od liczby docierających do odbiornika fotonów?
- Bit "1" - do odbiornika dochodzi energia, bit "0" - nie ma w torze mocy optycznej,
- Dla "1" do odbiornika dociera średnio \bar{n} fotonów.



Rys.9.7. Ilustracja możliwości popętnienia błędu przez odbiornik przy detekcji "1".

- Gdy impulsy są równej długości to średnio na bit przypada: $\bar{n}_a = \bar{n} / 2$;
- Idealny odbiornik detekuje "1", jeżeli dojdzie co najmniej 1 foton. Zgodnie z rozkładem Poisson'a prawdopodobieństwo detekcji n fotonów gdy dochodzi ich średnio \bar{n} jest równe:

$$P(n) = \frac{e^{-\bar{n}} \bar{n}^n}{n!};$$

9.3. CZUŁOŚĆ ODBIORNIKA A STOPA BŁĘDU – ODBIORNIK IDEALNY (B)

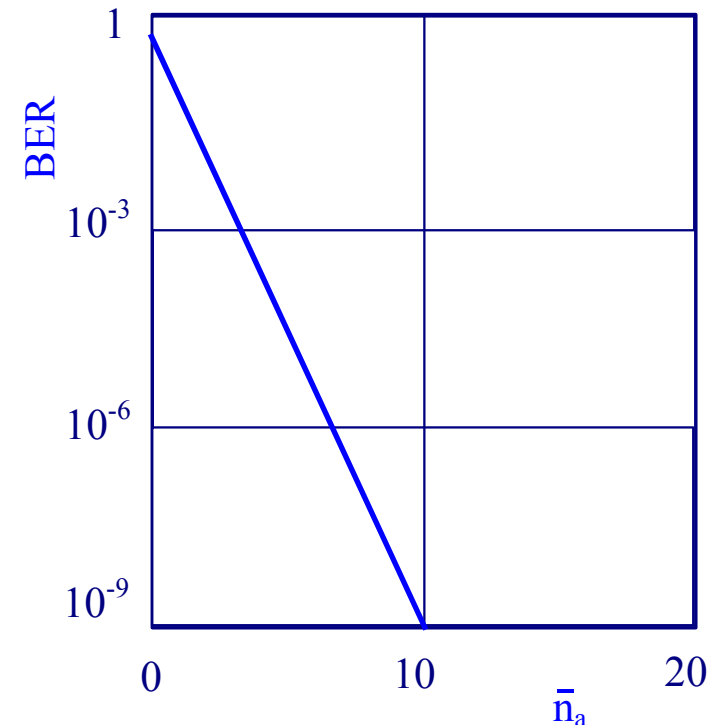
- Prawdopodobieństwo nie wykrycia fotonu gdy transmitowana jest "1" jest równe:

$$P_1(0) = \exp(-\bar{n});$$

- Gdy transmitowane jest "0" nie ma fotonów i dlatego $P_0 = 0$.
- Prawdopodobieństwo wykrycia fotonu zależy od liczby \bar{n} .

$$\text{BER} = \frac{P_1 + P_0}{2} = \frac{\exp(-\bar{n})}{2} = \frac{\exp(-2\bar{n}_a)}{2};$$

- Konkluzja: czułość idealnego odbiornika w cyfrowych optycznych systemach telekomunikacyjnych równa jest 10 fotonów na bit, dla stopy błędu $\text{BER} < 10^{-9}$.



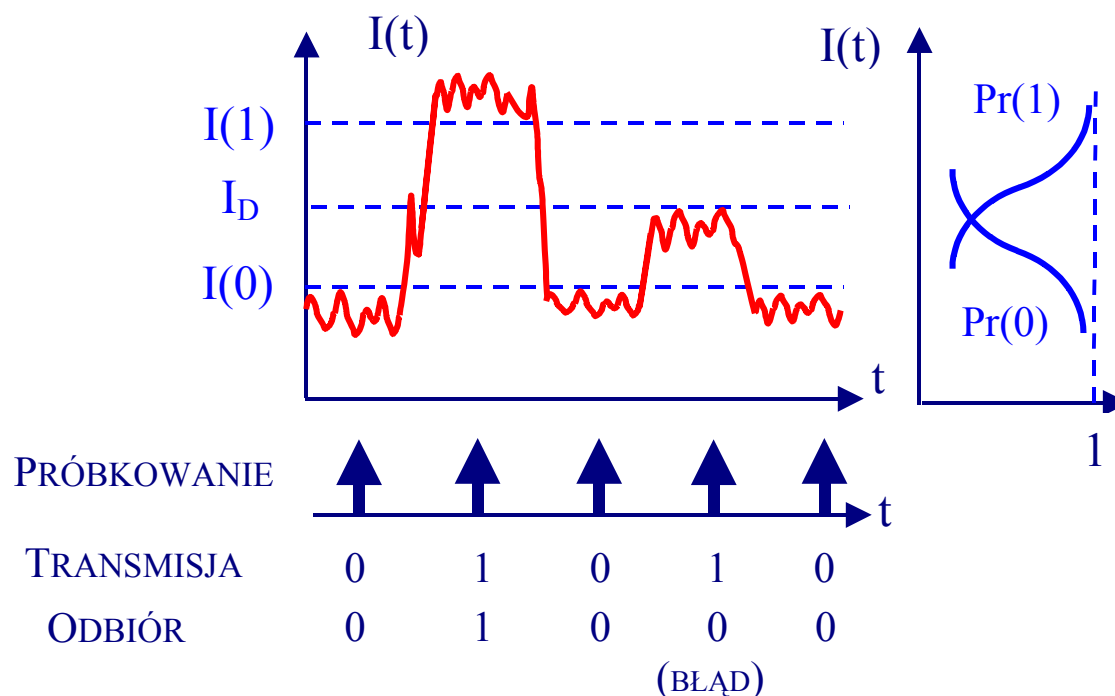
Rys.9.8. Stopa błędu BER idealnego odbiornika w zależności od średniej ilości fotonów/bit

- Energia optyczna docierająca w jednym bicie $h\bar{n}$, jeżeli prędkość modulacji wynosi B_0 bitów/sekundę to minimalna moc optyczna (czułość odbiornika) źródła P_r wynosi:

$$P_r = h\bar{n}B_0;$$

9.3. CZUŁOŚĆ ODBIORNIKA A STOPA BŁĘDU – ODBIORNIK Z SZUMAMI

- Proces podejmowania decyzji "0" lub "1" w obecności szumów jest bardziej złożony.
- Dobiegające do fotodetektora fotony generują (nie wszystkie) pary elektron-dziura, co powoduje przepływ impulsu prądu w obwodzie wyjściowym.
- Przykład sygnału wyjściowego fotodetektora w obecności szumów śrutowych i termicznych, po wzmocnieniu, przed obwodem podejmującym decyzję "0" lub "1".



Rys.9.9. Prąd progowy I_D i prawdopodobieństwa generacji "0" lub "1" wokół wartości progowej

9.3. CZUŁOŚĆ ODBIORNIKA A STOPA BŁĘDU – ODBIORNIKI RZECZYWISTE

- Wartość progowa prądu I_D jest dobierana po analizie warunków pracy.
- Przy obecności szumów fotodiody i wzmacniaczy 10 fotonów nie wystarcza do uzyskania stopy błędu 10^{-9} .

Tabela: Typowe wartości czułości dla kilku typów odbiorników optycznych pracujących przy prędkościach od 1 Mb/s do 2,5 Gb/s.

| Odbiornik | Czułość odbiornika [fotony/bit] |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Idealny detektor | 10 |
| Fotodioda lawinowa - Si | 125 |
| Fotodioda lawinowa InGaAs | 500 |
| Fotodioda PIN | 6000 |
| Fotodioda PIN z InGaAs poprzedzona wzmacniaczem światłowodowym EDFA | 215 |

9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA - BILANS TŁUMIEŃ I MOCY

- **Pierwsze kryterium** pozwalające obliczyć zasięg łącza światłowodowego: *moc odbierana musi być większa od mocy P_R określającej czułość odbiornika*, zwykle z marginesem $P_m = 6$ dB

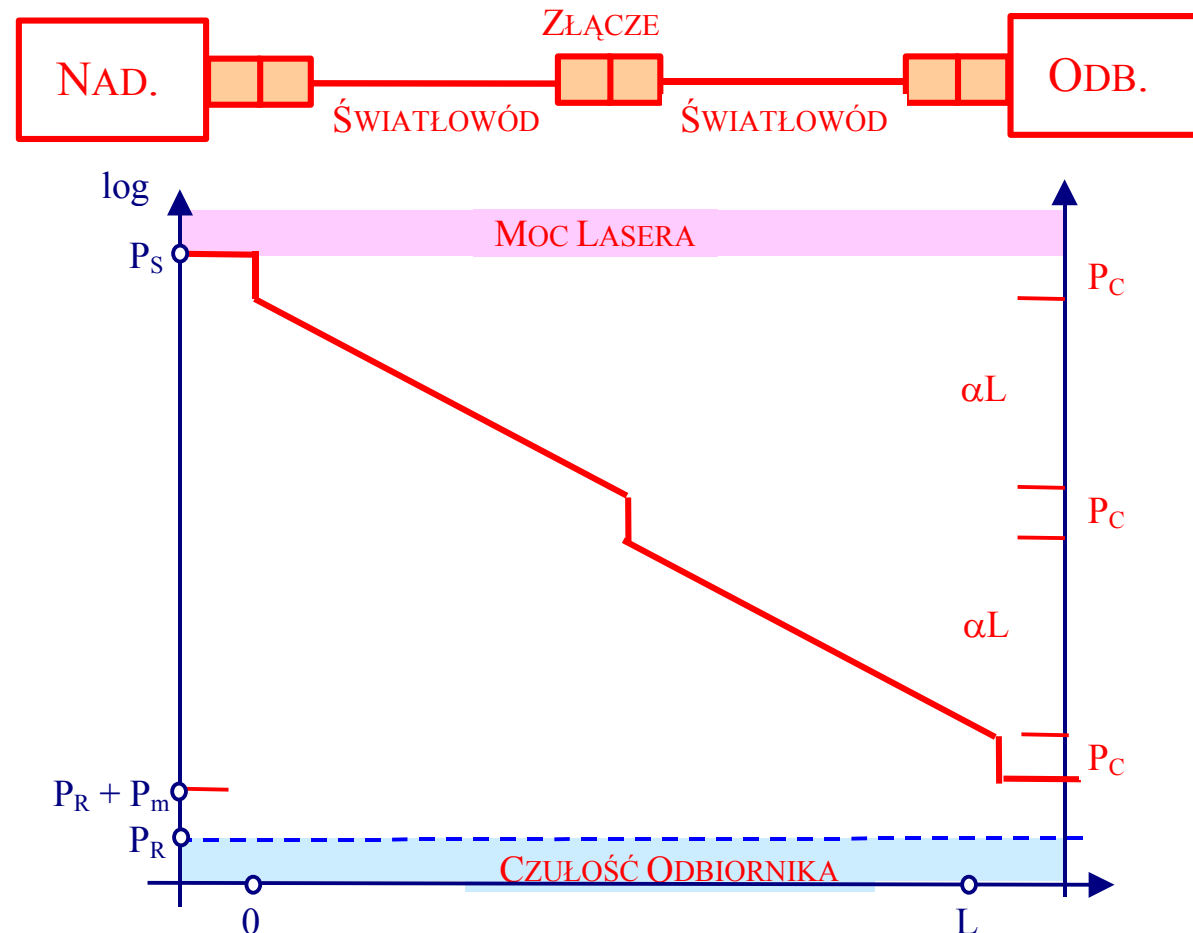
- **Budżet mocy:**

- Moc nadajnika laserowego P_S [dBm],
- Stała tłumienia światłowodu α [dB/km],
- Dla długości L [km] daje to tłumienie toru αL [dB],
- Straty wywołane połączeniami i sprzężeniami P_C [dB],

$$P_S - P_C - \alpha L = P_R + P_m;$$

$$P_R \text{ [dBm]} = 10 \log \frac{\bar{n}_0 h f B_0}{10^{-3}};$$

Rys.9.10. Budżet mocy łącza optycznego.



9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – ZASIĘG A PRĘDKOŚĆ TRANSMISJI

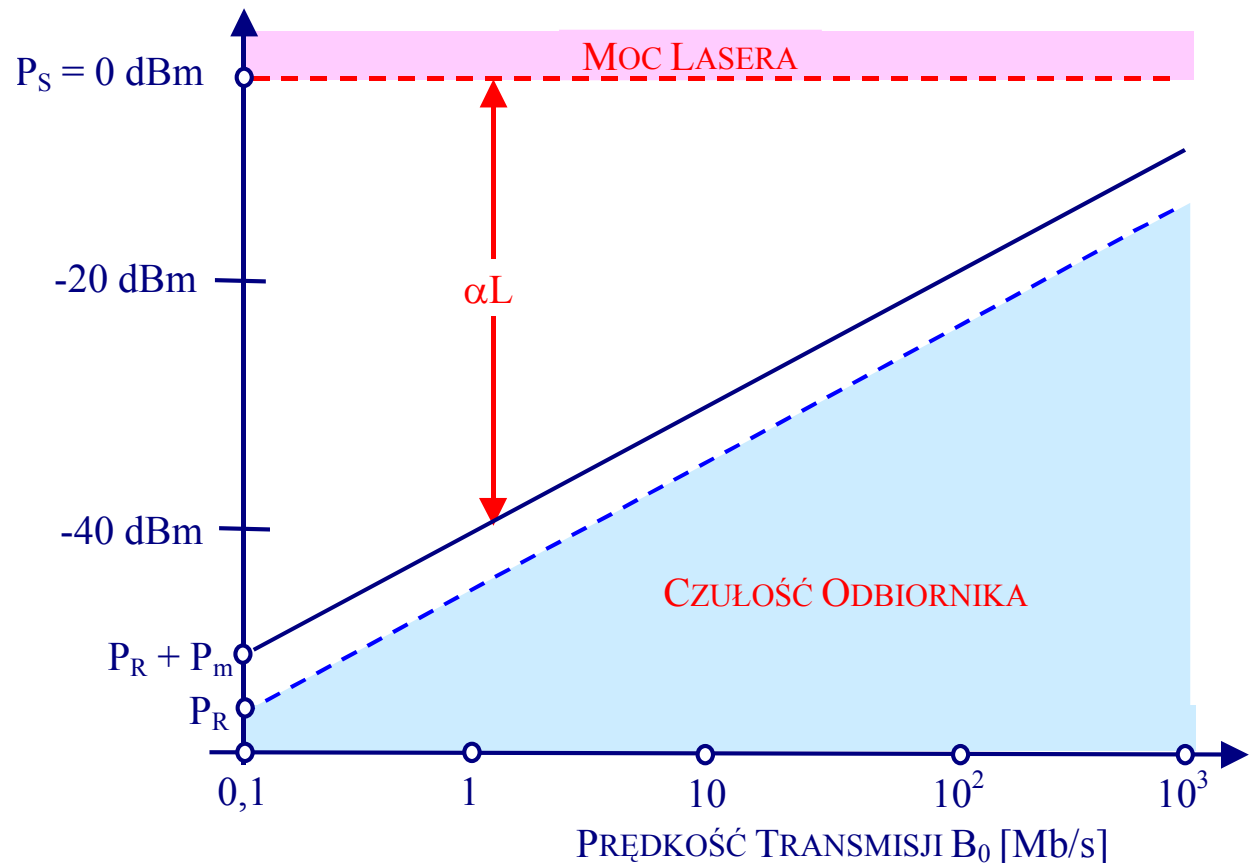
- \bar{n}_0 - średnia liczba fotonów/bit, odpowiadająca czułości odbiornika, dla idealnego = 10 fotonów/bit
- Maksymalny zasięg łącza:

$$L = \frac{1}{\alpha} (P_s - P_c - P_m - P_r);$$

- Uwzględnimy teraz prędkość transmisji B_0 ;

$$L = L_0 - \frac{10}{\alpha} \log B_0;$$

Rys.9.11. Budżet mocy łącza w zależności od prędkości transmisji B_0



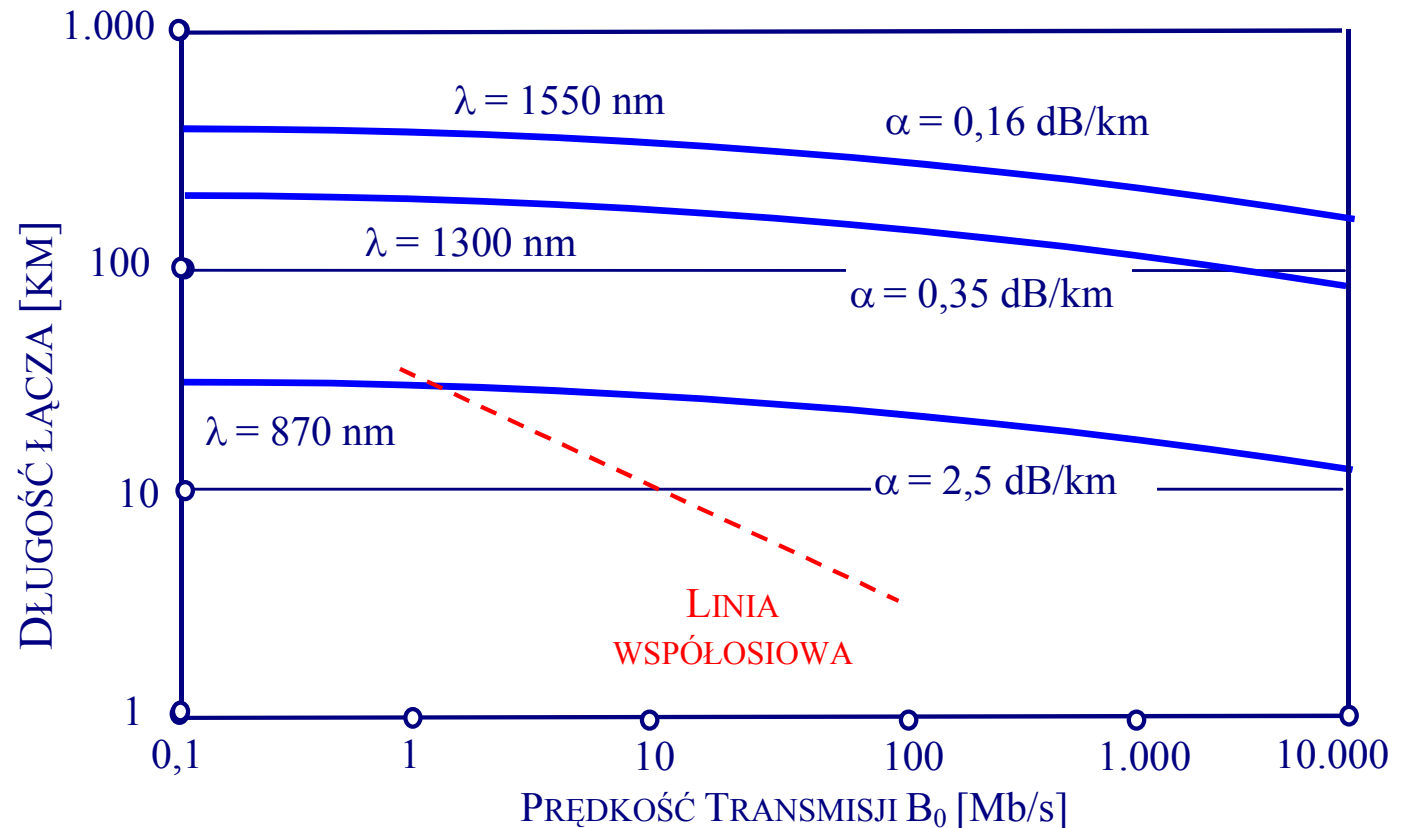
- L_0 jest zasięgiem łącza dla prędkości transmisji 1 bit/s.

$$L_0 = \frac{1}{\alpha} (P_s - P_c - P_m - 30 - 10 \log(\bar{n}_0 hf));$$

9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – ZASIĘG A DŁUGOŚĆ FALI

Rys.9.12. Maksymalna długość łącza w zależności od prędkości transmisji. Dla porównania linia współosiowa

- Długości fali 870 nm, 1300 nm i 1550 nm.
- Przyjęto moc nadajnika $P_s = 1$ mW
- Przyjęto: $P_c = P_m = 0$



- Dla okna 1 i 2 przyjęto czułość odbiornika 300 fotonów/bit. Dla okna 3 przyjęto 1000 fotonów/bit.
- Gdy B_0 rośnie 10 razy, to ilość fotonów na bit maleje 10-krotnie. Zmniejszenie ilości fotonów o 10 dB to w oknie 1 – 4 km, w oknie 2 – 28,6 km, w oknie 3 – 62,5 km.

9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – EFEKTY DYSPERSJI (A)

- **Drugie kryterium** pozwalające obliczyć zasięg łącza światłowodowego: *szerokość odbieranego impulsu σ_τ nie może przekroczyć określonej części okresu $T = 1/B_0$.*
- Drugie kryterium zapisane wzorem (wartość 1/4 przyjęto arbitralnie, do porównań):

$$\sigma_\tau = \frac{T}{4} = \frac{1}{4B_0};$$

- Sygnały monoczęstotliwościowe nie podlegają dyspersji, sygnały zajmujące pewne pasmo są przez efekt dyspersji modyfikowane.
- Impuls światła wzbudzony w światłowodzie ma kształt krzywej Gaussa. W miarę propagacji na długości L impuls ulega rozmyciu zachowując „Gaussowski” kształt.
- W światłowodzie **wielomodowym** decyduje **dyspersja modalna**. W światłowodzie wielomodowym pobudzone jest wiele modów, z których każdy wędruje samodzielnie z różną prędkością. Impuls wejściowy ulega „rozmyciu”.
- W światłowodzie o **profilu skokowym** szerokość impulsu jest obliczana z zależności:

$$\sigma_\tau \approx \frac{L}{2c_1} \Delta;$$

- Ważny parametr $LB_0 = c_1 / 2\Delta$; gdzie $c_1 = c/n_1$ - prędkość światła w rdzeniu, a $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$;

9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – EFEKTY DYSPERSJI (B)

- Przykład: $n_1 = 1,46$ i $\Delta = 0,01$, dla światłowodu wielomodowego $LB_0 = 10 \text{ km.Mb/s}$.
- W światłowodzie o **profilu gradientowym** zróżnicowanie prędkości propagacji modów jest mniejsze, w granicach o c_1 do $c_1(1 - \Delta^2/2)$, dyspersja modalna jest mniejsza. Wtedy:

$$LB_0 = \frac{c_1}{\Delta^2};$$

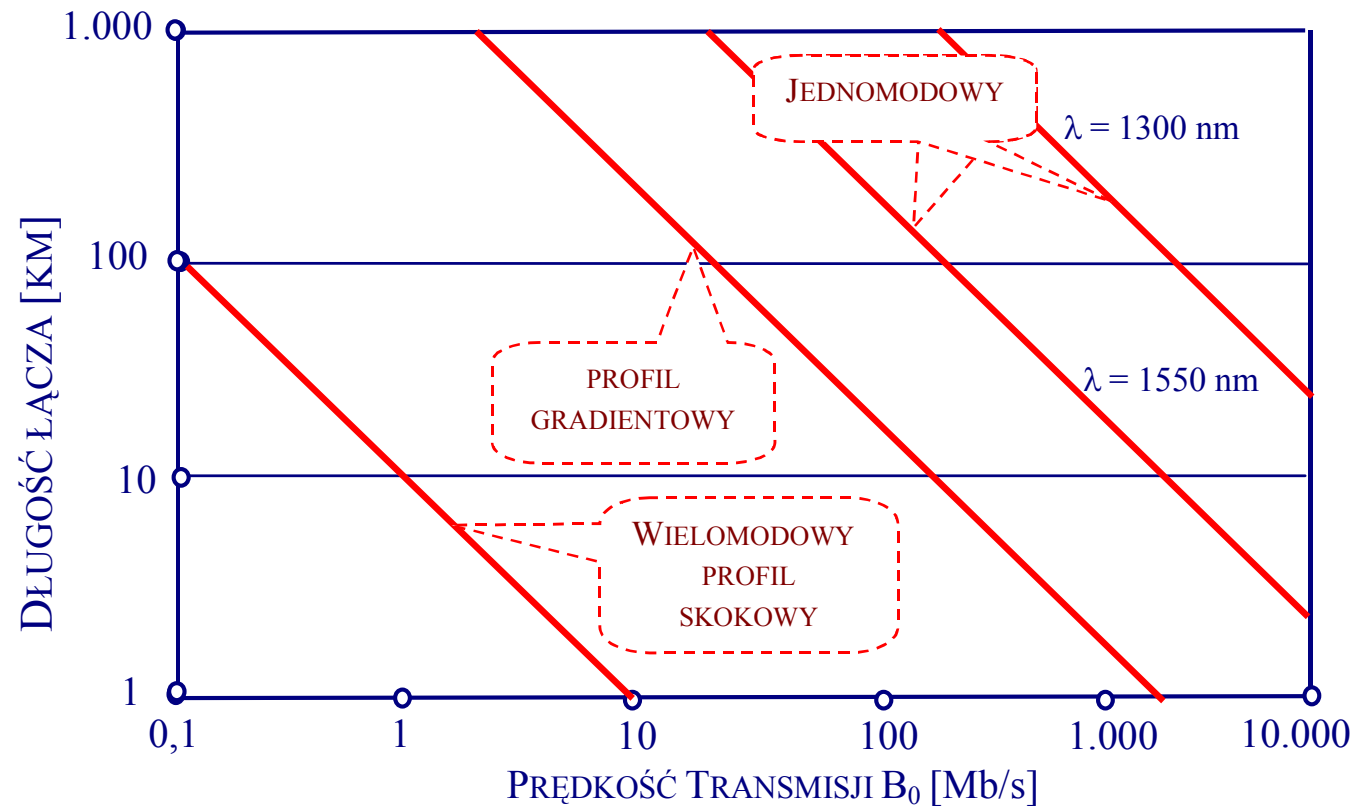
- Przykład światłowodu o profilu gradientowym: $n_1 = 1,46$ i $\Delta = 0,01$, $LB_0 = 2000 \text{ km.Mb/s}$.
- W światłowodzie **jednomodowym** prędkość grupowa zależy od długości fali, mamy do czynienia z **dyspersją chromatyczną**. Można wyróżnić dwa składniki dyspersji chromatycznej:
 - **dyspersję materiałową**, związaną z zależnością $n(\lambda)$, opisana parametrem D_λ ,
 - **dyspersję falowodową**, związaną z zależnością $v_{\text{grupowa}}(\lambda)$, opisana parametrem D_w .
- Biorąc pod uwagę tylko dyspersję materiałową (jest większa od falowodowej), otrzymuje się:

$$LB_0 = \frac{1}{4|D_\lambda|\sigma_\lambda};$$

- $|D_\lambda|$ - współczynnik dyspersji materiałowej światłowodu, σ_λ - spektralna szerokość impulsu światła laserowego.
- Dla 1300 nm $|D_\lambda| = 1 \text{ ps/km.nm}$, co przy $\sigma_\lambda = 1 \text{ nm}$ daje $LB_0 = 250 \text{ km.Gb/s}$.
- Dla 1550 nm $|D_\lambda| = 17 \text{ ps/km.nm}$, co przy $\sigma_\lambda = 1 \text{ nm}$ daje $LB_0 = 15 \text{ km.Gb/s}$.

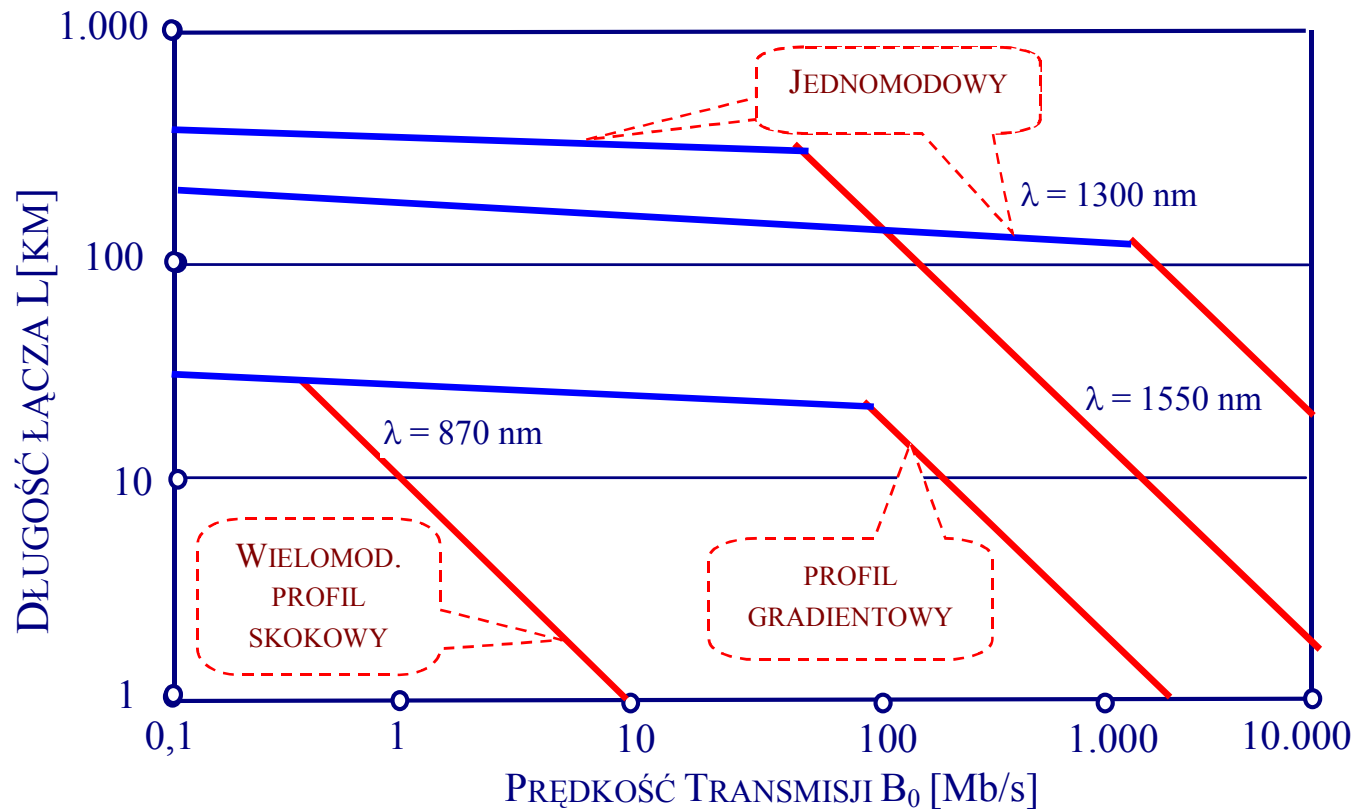
9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – EFEKTY DYSPERSJI (C)

Rys.9.13. Długość łącza w zależności od prędkości transmisji.



- Wielomodowy o profilu skokowym: $n_1 = 1,46$ i $\Delta = 0,01$, $LB_0 = 10$ km.Mb/s.
- Wielomodowy, profil paraboliczny: $n_1 = 1,46$ i $\Delta = 0,01$, $LB_0 = 2$ km.Gb/s.
- Jednomodowy, $\lambda = 1300$ nm $|D_\lambda| = 1$ ps/km.nm, co przy $\sigma_\lambda = 1$ nm daje $LB_0 = 250$ km.Gb/s.
- Jednomodowy, $\lambda = 1550$ nm $|D_\lambda| = 17$ ps/km.nm, co przy $\sigma_\lambda = 1$ nm daje $LB_0 = 15$ km.Gb/s.

9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – EFEKTY TŁUMIENIA I DYSPERSJI



Rys.9.14. Długość łącza w zależności od prędkości transmisji dla różnych typów światłowodów, z uwzględnieniem efektów tłumienia i dyspersji.

- Dla małych prędkości transmisji L zależy od tłumienia i maleje z B_0 logarytmicznie.
- Dla dużych B_0 dominują efekty dyspersji i długość transmisji L jest odwrotnie proporcjonalna do B_0 .

9.4. OGRANICZENIA ZASIĘGU ŁĄCZA – PRZECIWDZIAŁANIA EFEKTOM DYSPERSJI

- Analiza zasięgu łącza oparta jest o znaną zależność:
$$LB_0 = \frac{1}{4|D_\lambda|\sigma_\lambda};$$
- Wprowadzenie laserów DFB z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym bardzo oczyściło widmo lasera, zmniejszyło wartość σ_λ .
- Specjalne uprofilowanie rdzenia światłowodu umożliwiło 10-krotne zmniejszenie $|D_\lambda|$ dla 1550nm, światłowody o przesuniętej dyspersji SDF.
- Zwiększanie prędkości transmisji B_0 [b/s] zwiększa pasmo transmitowanego sygnału, zgodnie z transformacją Fouriera:
$$\sigma_\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2c_0} B_0;$$
- Dla $\lambda_0 = 1550$ nm i $B_0 = 10$ Gb/s otrzymuje się $\sigma_\lambda = 0,16$ nm.
- Poszerzenie widma sygnału lasera jest rezultatem efektu „ćwierkania” częstotliwości, tzw. *chirping effect*. Wzrost ilości wstrzykiwanych nośników - prądu diody powoduje zmiany współczynnika załamania n i zmianę częstotliwości oscylacji.
- Specjalne układy profilują kształt impulsu prądu lasera, aby minimalizować „ćwierkanie”.
- Oczekiwany rozwiązaniem jest zewnętrzna modulacja sygnału lasera, pracującego w ustabilizowanych warunkach.

9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - TROCHĘ HISTORII (A)

1838 - John Scott-Russell zauważył i w 1844 opisał „solitary wave”:

„Obserwowałem ruch łodzi, którą ciągnęły szybko w wąskim kanale konie, gdy nagle zatrzymały się. Wprowadzona w ruch masa wody zgromadziła się wokół dzioba łodzi w stanie wzburzonym, wtedy niespodziewanie potoczyła się z dużą prędkością w postaci dużego, pojedynczego wzniesienia; okrągły gładki, wyraźny garb wodny poruszał się w kanale, bez widocznej zmiany kształtu i zmniejszenia prędkości. Pojechałem za nim na koniu i dogoniłem, gdy jeszcze poruszał się z prędkością około 8 lub 9 mil na godzinę, zachowując początkowy kształt jakiejś 30 stóp długości i od jednej do półtorej stopy wysokości. Jego wysokość stopniowo zmniejszała się i po przejechaniu za nim jednej do dwóch mil zgubiłem go przy ujściu kanału. Tak w sierpniu 1834 roku nastąpiło moje pierwsze przypadkowe spotkanie z tym niezwykłym, przepięknym zjawiskiem...”

1895 - D.J. Korteweg, G. de Vries podają równanie różniczkowe opisujące ruch grzbietów wodnych.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \left(1 + \frac{3u}{2h} \right) \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} = 0;$$

Tutaj u jest wysokością fali nad poziomem niezaburzonej wody, h jest głębokością wody a c jest prędkością fali. Rozwiązanie tzw równania KdV pozwala przewidzieć zachowanie się „solitary waves” i fal przyboju „breaking waves” w środowisku wodnym.

9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - TROCHĘ HISTORII (B)

1967 - Gardner, Greene i Kruskal analizując rozwiązania równania KdV wprowadzają nazwę soliton.

1972 - Zakharov i Shabat a w 1973 - Hasegawa i Tappert udowadniają teoretycznie - na podstawie nieliniowego równania Schroedingera - możliwość przesyłania solitonowych impulsów optycznych, jasnych i ciemnych, w światłowodzie.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -j \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + jk|u|^2 u;$$

Rozwiązanie ma postać jak niżej. Tutaj $u(z,t)$ jest obwiednią amplitudy sygnału optycznego o pulsacji ω_0 .

$$u(z, t) \exp[-j(\omega_0 t - \beta_0 z)];$$

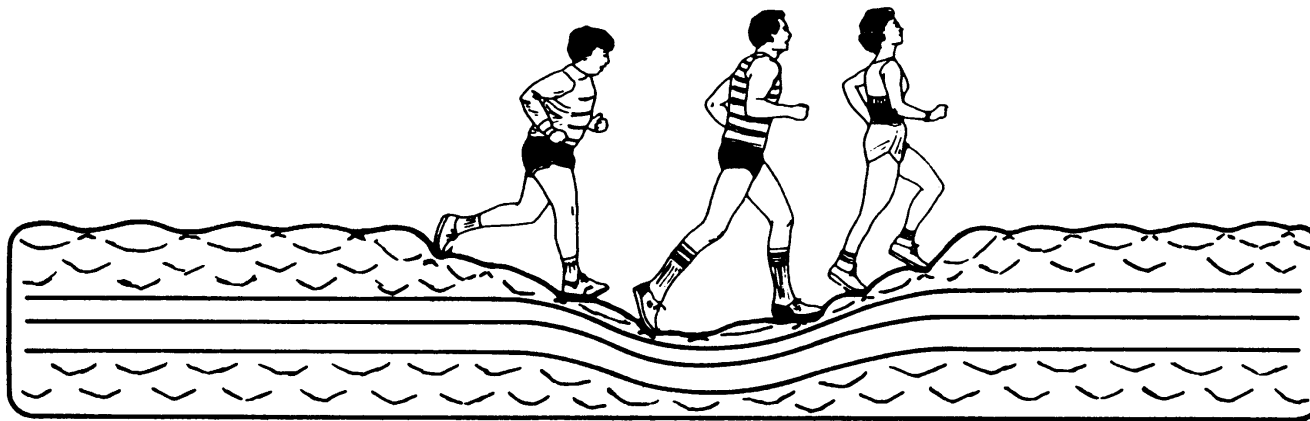
W równaniu NLSE: $k'' = d^2 k / d\omega^2$ wyraża zależność prędkości grupowej od częstotliwości. Hasegawa wykazał, że w światłowodzie z ujemną dyspersją prędkości grupowej (im większa częstotliwość sygnału, tym większa prędkość grupowa) mogą być propagowane solitony.

1980 - Mollenauer, Stolen i Gordon przesyłają eksperymentalnie impulsy solitonowe w światłowodzie.

1994 - praktyczne zastosowania solitonów w łączności światłowodowej do transmisji informacji,
- formowanie krótkich elektrycznych impulsów na liniach transmisyjnych z waraktorami.

9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - ILUSTRACJA

- Biegacze biegą z różnymi prędkościami. Grupa wystartowała razem, ale po pewnym dystansie szybsi wysforowali się do przodu, wolniejsi pozostają z tyłu.
- Na podłożu twardym szybsi przybiegną wcześniej, wolniejsi później.
- Im dłuższy dystans, tym większa odległość między najszybszym i najwolniejszym.
- Na podłożu miękkim następuje ugięcie podłoża pod ciężarem biegnących. Grupa nie może się rozbiec, ponieważ szybsi biegą stale „pod górę”, wolniejsi nabywają większej prędkości biegnąc stale „z góry”.
- Jeśli tylko ciężar biegnących jest odpowiednio duży, to grupa biegnie razem jako „soliton”.

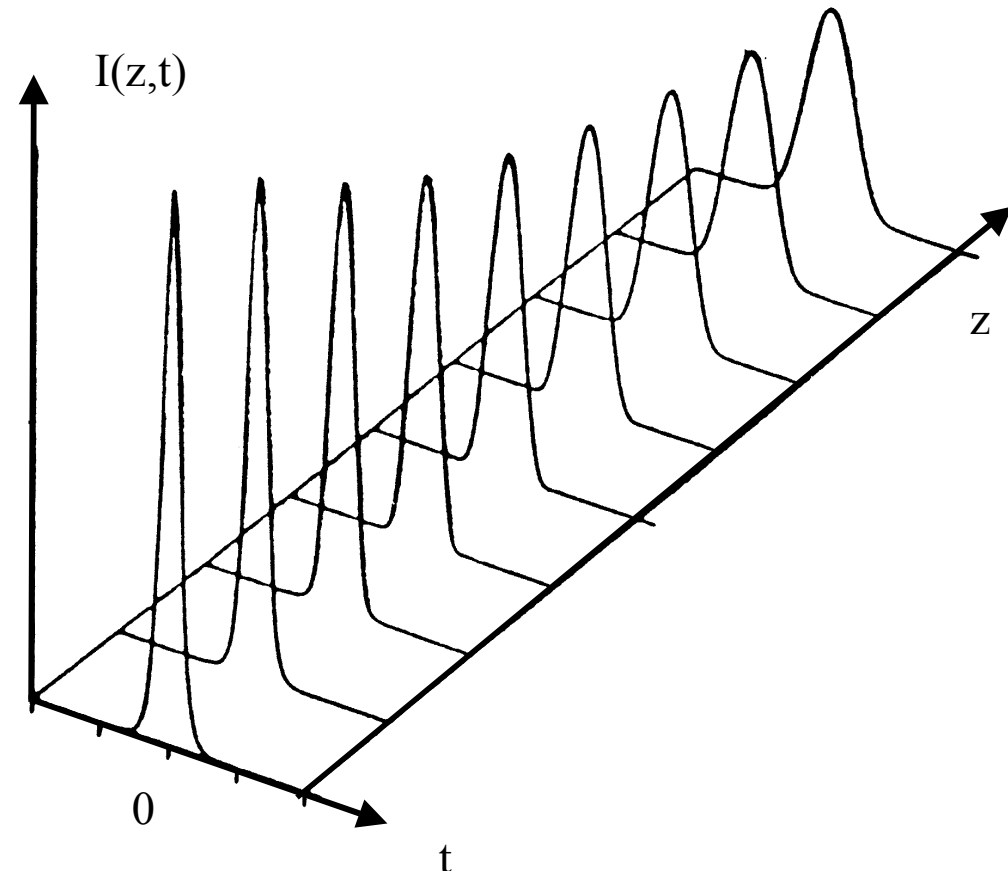


Rys.9.15. Ilustracja wyjaśniająca proces formowania i „podróżowania” solitonu.

9.5. . TRANSMISJA SOLITONÓW - LINIOWY OŚRODEK DYSPERSYJNY

Przypomnienie:

- W jednomodowym światłowodzie impuls promieniowania zajmuje pewną szerokość widmową.
- Światłowód wykazuje dyspersję: składowe o częstotliwości większej mają większą prędkość grupową, składowe o częstotliwości mniejszej - poruszają się wolniej.
- W rezultacie impuls poszerza się, ale rozkład widmowy impulsu nie zmienia się.



Rys.9.16. Transmisja impulsów w liniowym, dyspersyjnym ośrodku stratnym

9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - BEZDYSPERSYJNY OŚRODEK NIELINIOWY

- Rozważana będzie propagacja impulsu $I(z,t)$ o pulsacji ω_0 przez ośrodek bezdyspersyjny ale nieliniowy:

$$n = n_0 + n_2 I(z, t);$$

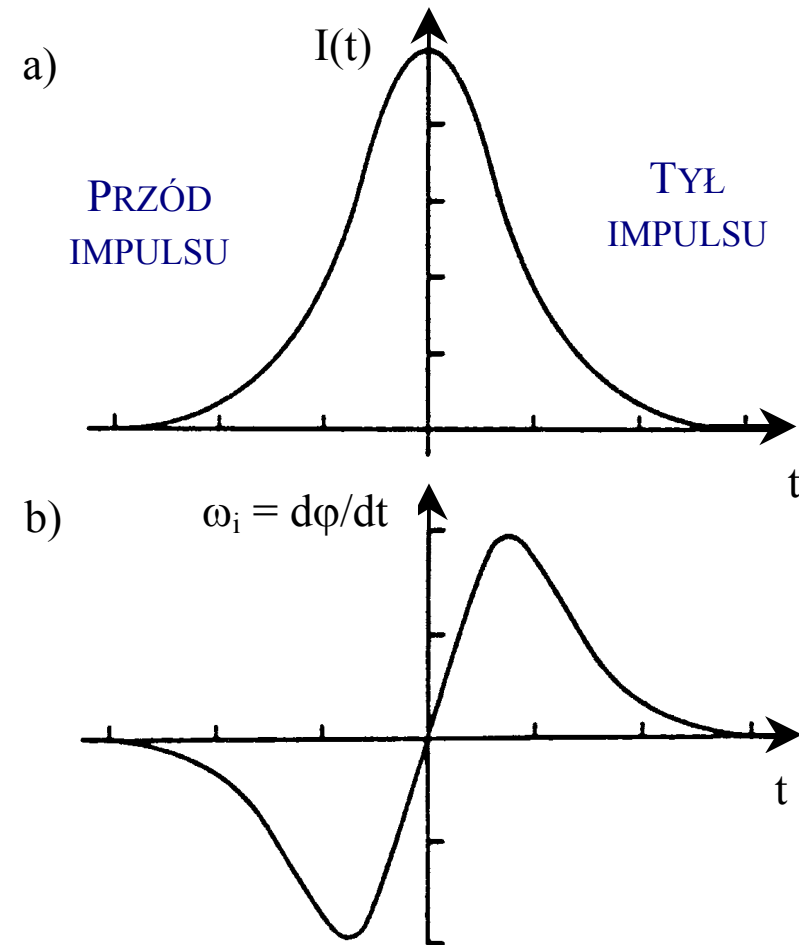
- Przesunięcie impulsu o odległość Δz przesunie fazę $\varphi(t)$ o:

$$\varphi(t) = \omega_0 t - k_0 [n_0 + n_2 I(z, t)] \Delta z;$$

- Chwilowa pulsacja ω_i wynosi:

$$\omega_i = \frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 - k_0 n_2 \Delta z \frac{dI(z, t)}{dt};$$

- Gdy $n_2 > 0$, to $\omega_i - \omega_0 < 0$ dla $dI/dt > 0$ i na odwrót.
- Sygnal impulsowy o stałej pulsacji zaczyna różnicować swoją częstotliwość w miarę posuwania się, pojawia się efekt „ćwierkania” („chirping), przy czym na czole impulsu sygnał ma mniejszą częstotliwość!



Rys.9.17. Automodulacja fazy i częstotliwości sygnału nośnej impulsu w ośrodku nieliniowym

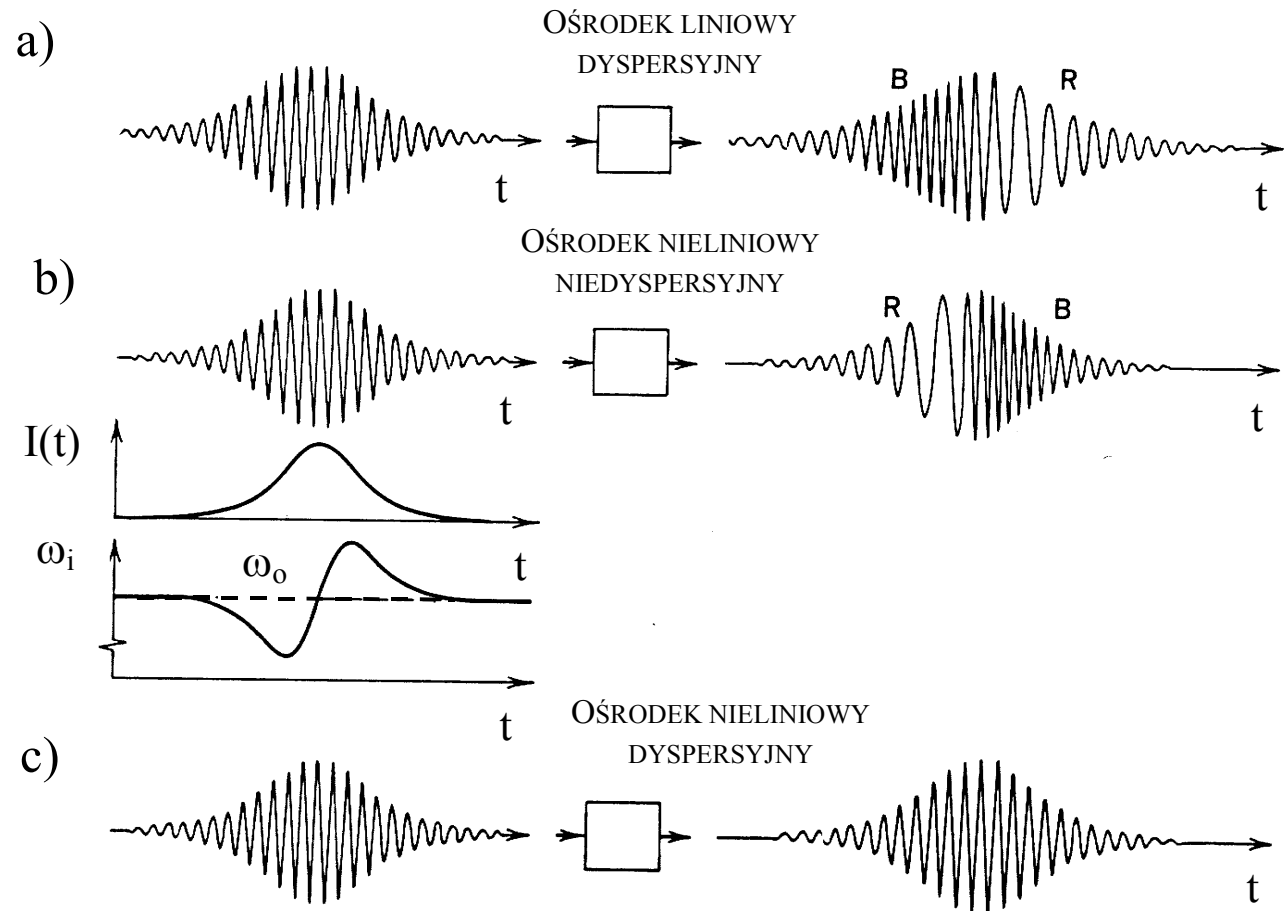
9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - OŚRODEK NIELINIOWY I DYSPERSYJNY- ILUSTRACJE (A)

Rys.9.18. Ilustracja zachowania się impulsu.

a) Ośrodek liniowy, dyspersyjny, zróżnicowanie częstotliwości rezultatem transformacji Fouriera, fale krótkie podróżują szybciej, impuls poszerza się,

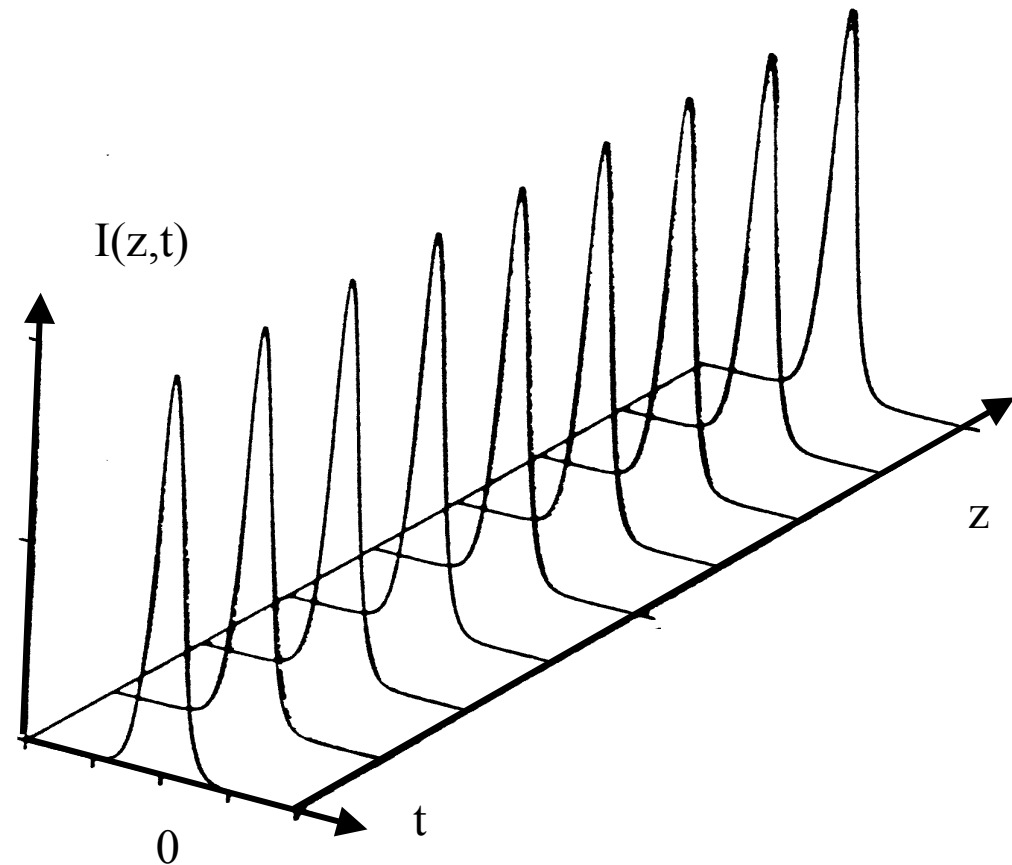
b) Ośrodek nieliniowy bez dyspersji, zróżnicowanie częstotliwości jest efektem nieliniowości, ćwierkanie bez zmiany kształtu,

c) Ośrodek nieliniowy i dyspersyjny, na czole impulsu pojawia się składowa o mniejszej częstotliwości, poruszająca się wolniej, następuje kompresja impulsu.



9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - OŚRODEK NIELINIOWY I DYSPERSYJNY- ILUSTRACJE (B)

- W ośrodku liniowym dyspersyjnym na czole impulsu pojawiają się składniki o większej częstotliwości jako szybciej poruszające się,
- Przy propagacji impulsu w ośrodku nieliniowym bezdyspersyjnym impuls zachowuje kształt, częstotliwość zmienia się i na początku impulsu jest mniejsza, niż na końcu.
- W ośrodku nieliniowym i dyspersyjnym efekty kompresji równoważą efekty poszerzania impulsu, są warunki propagacji solitonu.
- Równowaga wymaga odpowiednio dużej amplitudy sygnału optycznego.



Rys.9.19. Ilustracja propagacji solitonu w ośrodku nieliniowym i dyspersyjnym o ujemnej dyspersji prędkości grupowej.

9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW - OŚRODEK NIELINIOWY I DYSPERSYJNY- PRZYKŁAD

Przykład liczbowy:

- Współczynnik załamania kwarcu:

$$n = n_0 + n_2|E|^2 = 1,46 + 6,1 \times 10^{-19} [\text{cm}^2 / \text{V}^2] |E|^2;$$

- Efektywny promień modu: $r = 5 \mu\text{m}$; a przekrój: $A_{\text{eff}} = \pi r^2 = 78,5 \mu\text{m}^2$;
- Czas trwania impulsu: $\Delta t = 50 \text{ps}$, szerokość $\tau = 28,4 \text{ps}$,
- Długość $300 \mu\text{m} / \text{ps} \times 28,4 \text{ps} = 8 \text{mm}$.
- Moc potrzebna do podtrzymania istnienia solitonu:

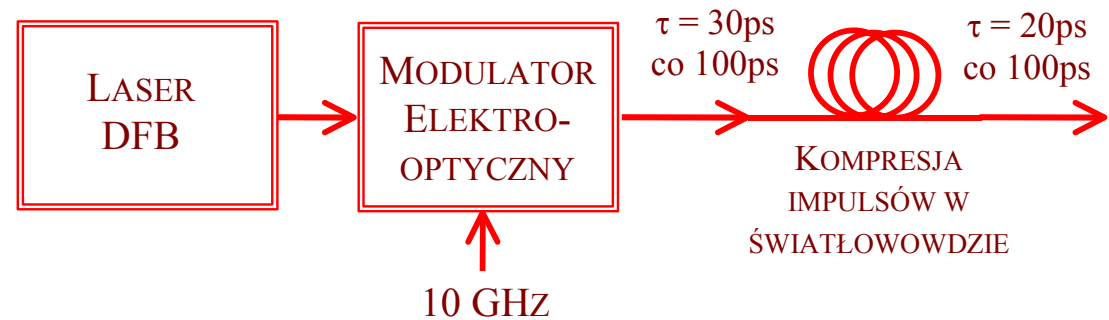
$$P_{\text{max}} = 1,3 \text{ mW}, \text{ energia: } W_e = 73,8 \text{ fJ}.$$

- Gdy skracamy czas trwania impulsu, to potrzebna moc w impulsie jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z czasu trwania.
- Np. gdy skracamy czas do $\Delta t = 10 \text{ps}$, to potrzebna moc w impulsie jest równa 375 mW.
- W układach rzeczywistych straty obniżają poziom mocy impulsu, przy zbyt małym poziomie efekty kompresji zanikają, procesy dyspersji zaczynają dominować.
- W torze umieszcza się wzmacniacze mocy optycznej EDFA, co kilkadziesiąt kilometrów. Całkowita długość toru bez konieczności wprowadzania regeneratorów może przekraczać tysiące kilometrów.

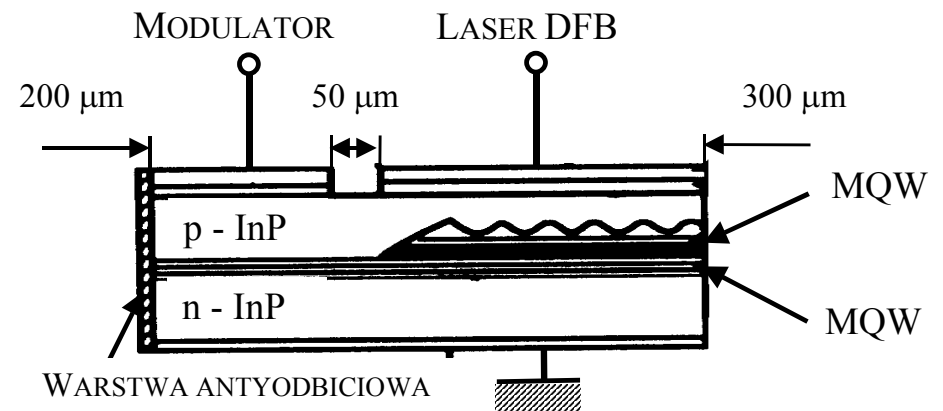
9.5. TRANSMISJA SOLITONÓW – GENERACJA SOLITONÓW

- Źródła solitonów stosują zwykle półprzewodnikowe lasery DFB i modulatory zewnętrzne.

Rys.9.20. Jeden z możliwych układów generacji solitonów z laserem DFB z falą ciągłą, zewnętrznym modulatore Mach-Zender'a i światłowodem dokonującym kompresji impulsów (duża wartość D , długość kilka km).



Rys.9.21. Kolejna możliwe rozwiązanie, to laser DFB z falą ciągłą, wraz z elektroabsorbcyjnym modulatore, wykonane na wspólnym podłożu InP. W realizacji praktycznej częstotliwość powtarzania 20 GHz, a długość impulsu 14 ps.

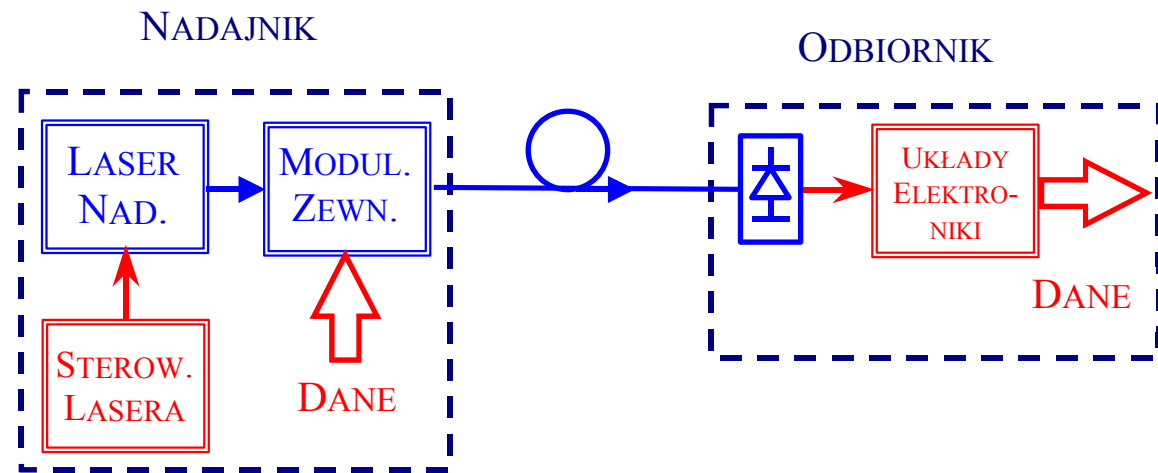


- Stosowane są także lasery światłowodowe wykonane na bazie wzmacniaczy EDFA. Dzięki technice synchronizacji modów impulsy mocy są odpowiednio krótkie, nawet poniżej 10 ps.

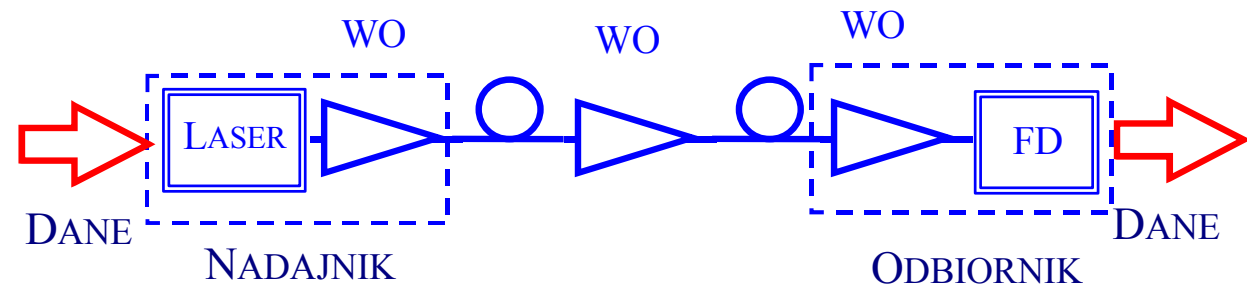
9.6. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ – ROZMAITE STRUKTURY ŁĄCZA CYFROWEGO (A)

- Najprostsze łącze cyfrowe wykorzystujące technikę IM-DD (ang. *Intensity Modulation – Direct Detection*) składa się z nadajnika światłowodu i odbiornika. Zasięg łącza ograniczony jest budżetem mocy – rys.9.22.
- Wzmacniacze optyczne WO pozwalają istotnie zwiększyć zasięg łącza bez potrzeby stosowania regeneratorów – rys.9.23.

Rys.9.22. Prosta struktura łącza cyfrowego IM-DD.



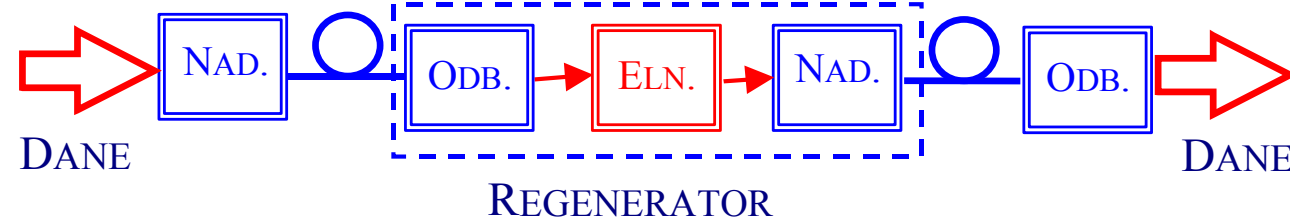
Rys.9.23. Łącze cyfrowe ze wzmacniaczami optycznymi



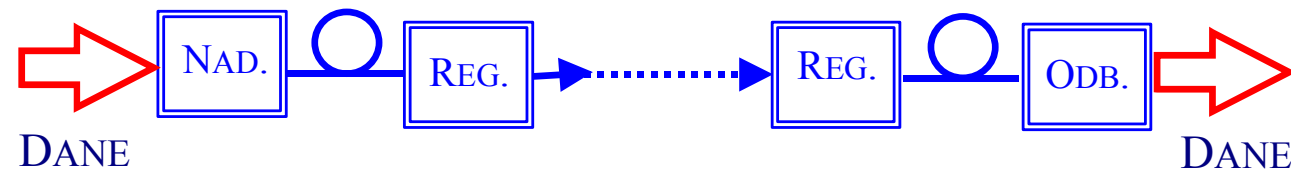
9.6. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ – ROZMAITE STRUKTURY ŁĄCZA CYFROWEGO (B)

- Aby zwiększyć długość łącza IM-DD stosuje się układy regeneracyjne (ang. *repeater*) impulsów typu 3R: *retiming*, *reshaping*, *regenerating*, z odbiornikiem i nadajnikiem optycznym – rys.9.24.
- Przy transmisji na duże odległości koniecznym jest zastosowanie łańcucha regeneratorów – rys.9.25.
- Systemy z regeneratorami impulsów mają istotne wady:
 - Nie mogą być stosowane w systemach z multipleksacją WDM, ponieważ laser nadajnika pracuje na jednej częstotliwości.
 - Regeneratory są z natury rzeczy jednokierunkowe.
 - Układy elektroniczne regeneratorów ograniczają szybkość transmisji.

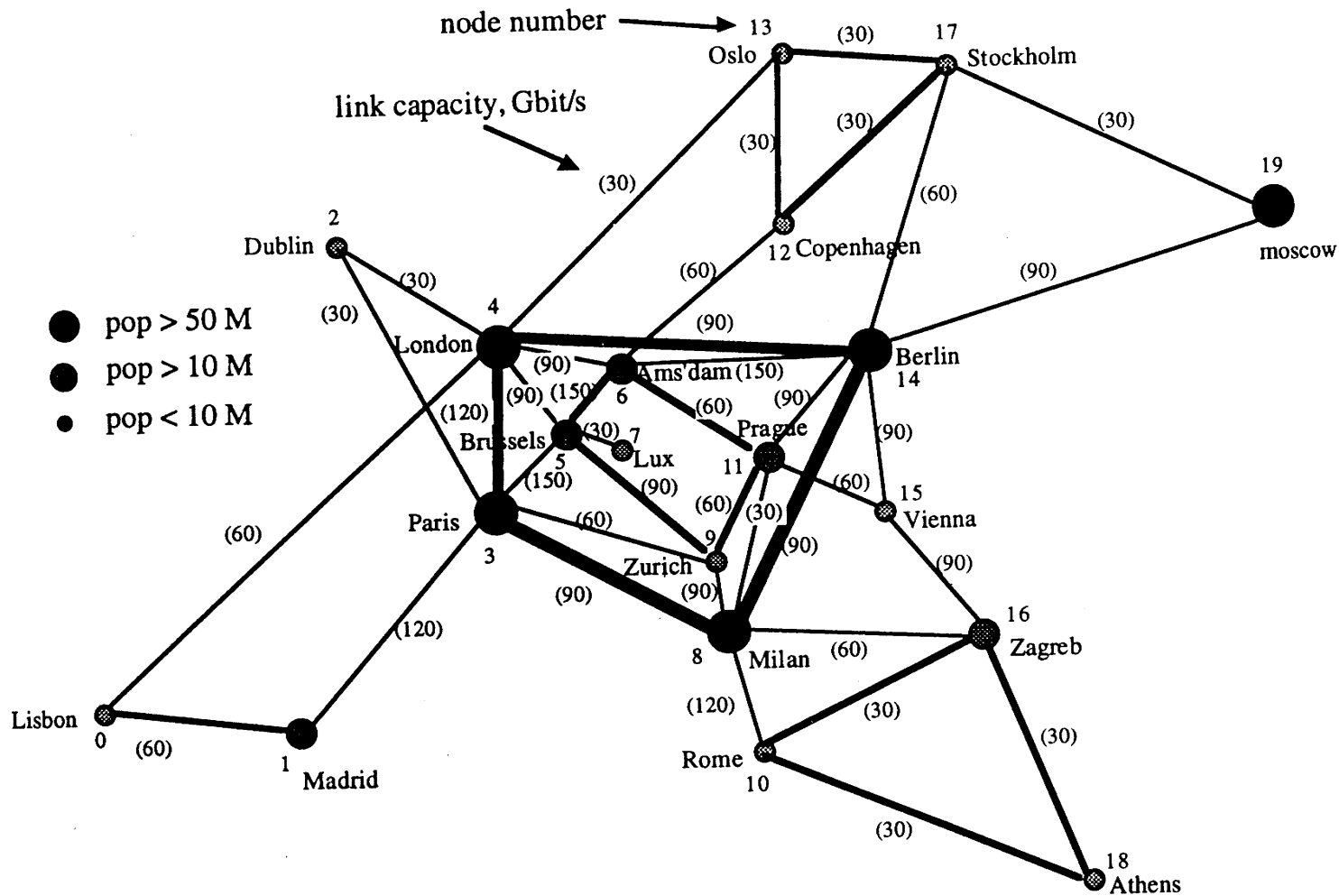
Rys.9.24. Łącze z regeneratorem.



Rys.9.25. Łącze z łańcuchem regeneratorów.



9.6. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ – EUROPEAN OPTICAL NETWORK



Rys.9.26. Propozycja optycznej sieci europejskiej

9.6. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ – TABELA 9.1: SYSTEMY PODWODNE - ROZWÓJ

| SYSTEM | ROK | PASMO LUB PRĘDKOŚĆ TRANSMISJI | LICZBA KANAŁÓW | TECHNOLOGIA |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------|
| TAT-1/2 | 1955/59 | 0,2 MHz | 48 | KABEL MIEDZIANY, TRANSMISJA ANALOGOWA, LAMPY PRÓŻNIOWE |
| TAT-3/4 | 1963/65 | 1,1 MHz | 140 | |
| TAT-5 | 1970 | 6 MHz | 840 | TRANZYSTORY Ge |
| TAT-6/7 | 1976/83 | 30 MHz | 4.200 | TRANZYSTORY Si |
| TAT-8 TPC-3 | 1988 1989 | 280 Mb/s | 8.000 | ŚWIATŁOWÓD, TRANSMISJA CYFROWA, $\lambda = 1300$ nm |
| TAT-9 TPC-4 TAT-10/11 | 1991 1992 1992/3 | 560 Mb/s | 16.000 24.000 | ŚWIATŁOWÓD DSF $\lambda = 1500$ nm |
| Tat-12 TPC-5 TAT-13 | 1995 1996 | 5 Gb/s 2 x 5 Gb/s | 122.880 | WZMACNIACZ OPTYCZNY $\lambda = 1500$ nm |

9.6. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ – TABELA 9.2: SYSTEMY I PRODUCENCI

| Bitrate Gbit/s | Length km | Tbit/s km | Fibre | in line Amps | Company | Year | Ref. | Technique |
|-------------------|--------------|-----------|-------|-----------------|---------|------|------|----------------------|
| 100 | 50 | 5.0 | DSF | 0 | NTT | 1993 | 27 | OTDM/PDM, NOLM Demux |
| 80 | 80 | 6.4 | DSF | 2 | NTT | 1993 | | OTDM/PDM |
| 40 | 750 | 30.0 | DSF | 14 | NTT | 1993 | | OTDM/PDM, Solitons |
| 40 | 65 | 2.6 | DSF | 3 | NTT | 1992 | 22 | OTDM, Solitons |
| 32 | 90 | 2.9 | DSF | 2 | ATT | 1991 | | OTDM, Solitons |
| 20 | 1850 | 37.0 | DSF | 36 | NTT | 1993 | | OTDM, Solitons |
| 17 | 150 | 2.6 | DSF | 0 | NTT | 1990 | 20 | LN mod. |
| 10 | 9000 | 90.0 | DSF | 274 | ATT/KDD | 1993 | 46 | EA mod. |
| 10 | 252 | 2.5 | DSF | 0 | Alcatel | 1993 | 18 | LN mod. |
| 10 | 204 | 2.0 | SMF | 1 | Alcatel | 1993 | 52 | DST |
| 10 | 180 | 1.8 | SMF | 0 | BNR | 1993 | 47 | DCF, LN mod. |
| 10 | 151 | 1.5 | SMF | 0 | Alcatel | 1993 | 52 | DST |
| 10 | 150 | 1.5 | SMF | 0 | Alcatel | 1992 | 48 | DCF |
| 10 | 120 | 1.2 | SMF | 0 | BNR | 1993 | 19 | MQW-MZ mod. |
| 10 | 100 | 1.0 | SMF | 0 | NEC | 1991 | | OTDM, prechirp |
| 10 | 81 | 0.8 | SMF | 0 | NTT | 1993 | 41 | 1.3 μm TX, APD rec. |

9.7. PODSUMOWANIE

- Transmisja sygnałów cyfrowych powoli staje się dominującą i uniwersalną techniką transmisji głosu, obrazu i danych cyfrowych.
- Cyfrowe łącza optyczne IM-DD są najważniejszymi i głównymi elementami struktury współczesnych sieci telekomunikacyjnych.
- Szybkość transmisji i zasięgi tych łączy stale rosną.
- Milowymi krokami rozwoju techniki łączy cyfrowych było:
 - ograniczanie wpływu dyspersji na szybkość transmisji i długość toru transmisyjnego,
 - zastosowanie wzmacniaczy optycznych,
 - zastosowanie techniki transmisji solitonów.
- Ograniczenie pasma pracy układów elektronicznych stało się ograniczeniem szybkości transmisji łączy cyfrowych. Naturalnym dążeniem jest eliminowanie elektroniki „gdzie się da” i zastępowanie jej układami optycznymi.