

Zenon Drabik¹

CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE TRANSMISJĘ W SYSTEMACH ŚWIATŁOWODOWYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono najistotniejsze czynniki ograniczające zasięg i szybkość transmisji w systemach światłowodowych (tłumienie i dyspersja chromatyczna) oraz sposoby pokonywania tych ograniczeń – wzmacniacze światłowodowe oraz kompensacja dyspersji. Przedstawiono również skutki zastosowania wzmacniaczy światłowodowych oraz zwielokrotnienia w dziedzinie długości fali zwiększa zasięg i pojemność informacyjną systemu, z drugiej zaś wprowadza kolejne ograniczenia związane z występowaniem zjawisk nieliniowych.

Słowa kluczowe: światłowody jednomodowe, zwielokrotnianie w dziedzinie długości fali, wzmacniacze światłowodowe, zjawiska nieliniowe w światłowodach, dyspersja chromatyczna, tłumienność światłowodów, kompensacja dyspersji.

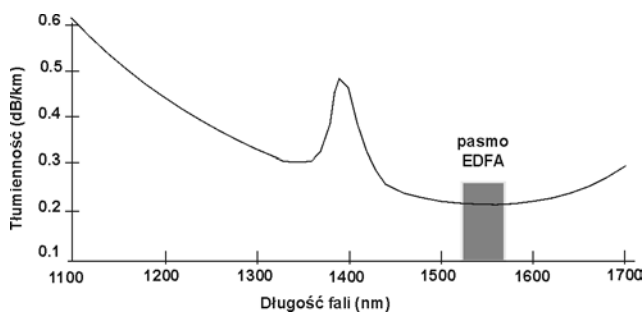
1. Wstęp

Światłowody jednomodowe o nie przesuniętej dyspersji DU-SMF (*Dispersion Unshifted Single Mode Fibres*) jak i światłowody o przesuniętej, niezerowej dyspersji NZDS-SMF (*Non-Zero Dispersion Shifted Single Mode Fibres*) posiadają podobne charakterystyki spektralne oraz podobną, niską wartość tłumienności w paśmie 1550 nm. Stosowanie światłowodowych wzmacniaczy EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*) istotnie zmniejszyło znaczenie problemu tłumienności linii, natomiast w paśmie tym (1535 - 1565 nm), ze względu na wzrastającą szybkość transmisji sygnałów oraz wprowadzanie systemów transmisyjnych z gęstym zwielokrotnianiem w dziedzinie długości fali DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), coraz ważniejszą rolę odgrywa dyspersja chromatyczna.

2. Metody regeneracji transmitowanego sygnału

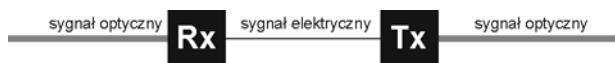
W metodzie klasycznej sygnał optyczny zamieniany jest na sygnał elektryczny i w takiej postaci podlega regeneracji. Regeneracja elektroniczna sygnału - 3R obejmuje: odwrócenie

¹ TP S.A. Ośrodek Techniki Optotelekomunikacyjnej w Lublinie, ul. Energetyków 23, 20-468 Lublin
tel.: (81) 524-44-05; e-mail: drabikz@zt.lublin.tpsa.pl



Rys. 1. Tłumienność spektralna światłowodów jednomodowych

zależności czasowych sygnału (*ang. Retime*), odtworzenie charakterystyki amplitudowo-fazowej sygnału (*ang. reshape*) i wzmocnienie sygnału (*ang. reamplify*)

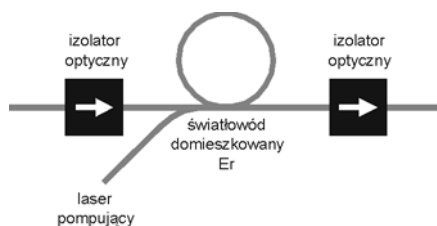


Rys.2 . Regenerator elektroniczny.

Właściwości regeneracji elektronicznej:

- kasowanie dyspersji
- kasowanie efektów nieliniowych
- regeneracja sygnału
- poziom mocy wyjściowej (3 dBm)
- droga elektronika dużej szybkości
- modulacja/przypliwność binarna specyfikowana (< 10 Gb/s)
- pojedynczy kanał (TDM)

Regeneracja sygnału drogą optyczną z wykorzystaniem wzmacniaczy światłowodowych domieszkowanych erbem – EDFA (*ang. erbium – doped fibre amplifier*) to wzmocnienie wszystkich sygnałów optycznych zawartych w paśmie wzmacniacza, niezależnie od rodzaju i formatu transmisji.



Rys. 2. Regenerator elektroniczny

Właściwości wzmacniaczy optycznych:

- akumulacja dyspersji
- akumulacja efektów nieliniowych
- akumulacja szumów
- poziom mocy wyjściowej (> 20 dBm)
- prosta i tania elektronika

- modulacja/przypływność binarna przezroczystość (> 10 Gb/s)
- systemy wielokanałowe > 80 (DWDM)

3. Idea systemu DWDM.

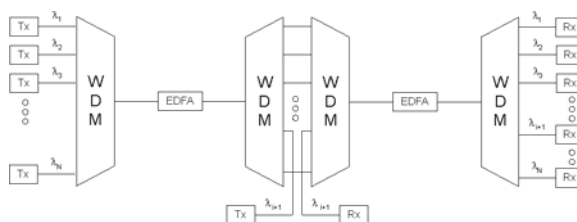
W systemie transmisyjnym z gęstym zwielokrotnianiem w dziedzinie długości fali DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), wszystkie kanały transmisyjne (długości fali), przesyłane są w jednym światłowodzie jednomodowym.

Zalecenia ITU-T proponują dla techniki DWDM - 43 długości fali w paśmie 1530,3 – 1563,9 nm, z odstępem ~ 0.8 nm (100 GHz). Z tego zakresu 32 długości fali są już stosowane komercyjnie, natomiast prace badawcze obejmują jednoczesną transmisję 132 kanałów DWDM.



Rys. 4. Schemat ideowy systemu DWDM

System DWDM posiada możliwość łatwej rozbudowy lub rekonfiguracji poprzez przydzielanie długości fali pracy w dowolnej lokalizacji sieci. Rozbudowa systemu odbywa się przez dostawienie terminali o małej prędkości i nie wymaga instalacji dodatkowych kabli światłowodowych.



Rys. 5. Możliwości rozbudowy systemu DWDM - „add/drop”

4. Zjawiska nieliniowe w światłowodach

Wysokie poziomy mocy optycznej uzyskiwane we wzmacniaczach EDFA są źródłem powstawania w światłowodach zjawisk nieliniowych, niekorzystnie wpływających na sprawność systemu. Zjawiska nieliniowe w to rozpraszanie wymuszone oraz fluktuacje współczynnika załamania. Poziomy mocy optycznej przy których efekty te występują nazywamy progowymi.

4.1. Rozpraszanie wymuszone

Nieliniowe rozpraszanie wymuszone występuje w systemach z modulacją amplitudy i jest spowodowane oddziaływaniem sygnałów optycznych z falami akustycznymi lub fono-

nami generowanymi przez cząsteczki materiału rdzenia światłowodów, powodując zarówno rozpraszanie światła jak i przesunięcie długości fali sygnału w kierunku fal dłuższych.

Wymuszone rozpraszanie Brillouina – SBS

Wymuszone rozpraszanie Brillouina – SBS – *Simulated Brillouin Scattering* polega na rozpraszaniu propagowanej fali świetlnej przez fale akustyczne, wskutek czego maleje efektywna moc sygnału użytecznego.

Ten rodzaj rozpraszania ma najniższą moc progową (rzędu kilku mW), a dokładna jej wartość zależy od szerokości spektralnej źródła oraz charakterystyki światłowodu. Ponieważ szerokość linii widmowej SBS jest stosunkowo wąska ~20 MHz, moc progowa nie zależy od ilości kanałów i może być zwiększona poprzez modulację lasera niewielkim sygnałem niskiej częstotliwości.

Wymuszone rozpraszanie Ramana – SRS

Wymuszone rozpraszanie Ramana – SRS – *Simulated Raman Scattering* polega na rozpraszaniu propagowanej fali świetlnej przez fonony wibrujących cząsteczek materiału światłowodu, powodując przesunięcie w dół częstotliwości optycznej fali propagowanej. Ponieważ szerokość linii widmowej SRS jest bardzo duża ~15 THz, powoduje to sprzęganie kanałów w systemach DWDM, czyli przepływ mocy z kanałów wysokiej częstotliwości do kanałów o niższej częstotliwości.

Wielkość progowa mocy SRS dla jednego kanału wynosi ~1W i nie może być zwiększona w tak prosty sposób jak przy SBS. Zjawisko to może narzucać fundamentalne ograniczenia na przepustowość przyszłych systemów światłowodowych.

4.2. Fluktuacje współczynnika załamania – efekt Kerra

Współczynnik załamania światła światłowodów kwarcowych pozostaje stały przy niskich poziomach mocy optycznej (nie wykazuje istotnej nieliniowości), natomiast przy wysokich poziomach mocy uzyskiwanych w EDFA następuje jego modulacja zależnie od natężenia światła:

$$n = n_L + n_N \cdot I$$

gdzie: n_L – liniowy współczynnik załamania światła przy $I \sim 0$; n_N – nieliniowy współczynnik załamania; $n_N = 3,18 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; I – efektywna gęstość mocy promieniowania w światłowodzie.

Zmiany gęstości mocy promieniowania fali propagowanej powodują modulację współczynnika załamania światła, te zaś zmiany fazy i częstotliwości sygnału. Zjawisko to wzmacniane jest poprzez dyspersję światłowodu.

Własna modulacja fazy – SPM

Własna modulacja fazy – SPM (*Self Phase Modulation*) jest zjawiskiem wpływania impulsu na jego własną fazę. Krawędź impulsu reprezentuje zmienną w czasie moc promieniowania, generującą zmienną w czasie wartość współczynnika załamania. Zmiany te modulują fazę transmitowanych długości fali poszerzając widmo impulsu co w skrajnym przypadku

może powodować zachodzenie na siebie sąsiednich kanałów w systemie DWDM. Efekt ten dodatkowo wzmacniany jest przez dyspersję chromatyczną światłowodów. Minimalizację wpływu efektów związanych z SPM na sprawność systemu osiągniemy stosując światłowody z zerową lub małą dyspersją chromatyczną.

Własna modulacja fazy może być zjawiskiem korzystnym, przy wzajemnym oddziaływaniu „chirpu” lasera (w laserach z modulacją bezpośrednią prądem lasera, przy włączeniu długość fali lasera przesuwają się w kierunku fal krótszych, natomiast przy wyłączeniu w kierunku fal dłuższych) z dyspersją chromatyczną światłowodu, może nastąpić zawężenie transmitowanego impulsu. Pozwala to zwiększyć ograniczenie dyspersji o 50% w stosunku do dyspersji w systemie liniowym wolnym od „chirpu”.

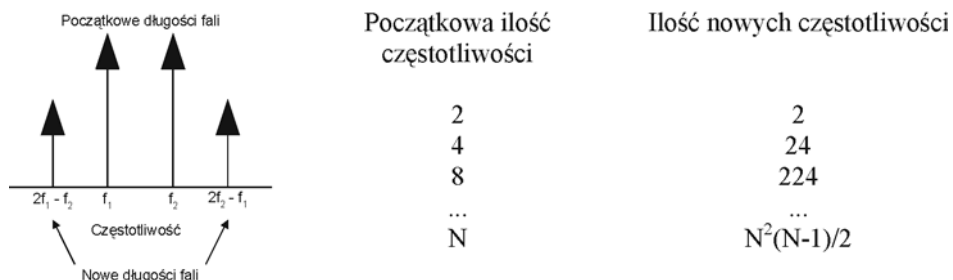
Skrośna modulacja fazy

Skrośna modulacja fazy – CPM (*Cross Phase Modulation*) jest zjawiskiem powstającym zasadniczo na takiej samej zasadzie jak SPM. Własna modulacja fazy dotyczyła oddziaływania impulsu na siebie (wewnątrz pojedynczego kanału transmisji), natomiast CPM jest efektem oddziaływania impulsu z danego kanału transmisji na fazę impulsu w innym kanale. SPM występuje w systemach jedno i wielokanałowych, natomiast CPM tylko w systemach wielokanałowych.

Poza pewnymi wyjątkami, kolizja pomiędzy dwoma impulsami o różnych długościach fali powoduje na ogół zwiększenie ich szerokości spektralnej. Dyspersja chromatyczna światłowodu odgrywa w takim przypadku podwójną rolę. Z jednej strony osłabia oddziaływanie pomiędzy dwoma impulsami ponieważ poruszają się one z różnymi prędkościami grupowymi. Z drugiej strony gdy dwa impulsy ze sobą oddziałują, dyspersja chromatyczna dodatkowo zwiększa ich szerokość spektralną. Działanie CPM jest więc złożone i może być ograniczane stosowaniem światłowodów o niskiej, jednak różnej od zera dyspersji chromatycznej.

Mieszanie czterofalowe

Mieszanie czterofalowe – FWM (*Four Wave Mixing*) jest zjawiskiem nieliniowej intermodulacji dwóch lub więcej fal o różnych częstotliwościach. Mieszanie dwóch fal o częstotliwościach f_1 i f_2 powoduje z jednej strony modulację współczynnika załamania z częstotliwością różnicową ($f_1 - f_2$), z drugiej zaś powstanie prążków o częstotliwościach ($2f_1 - f_2$) i ($2f_2 - f_1$).

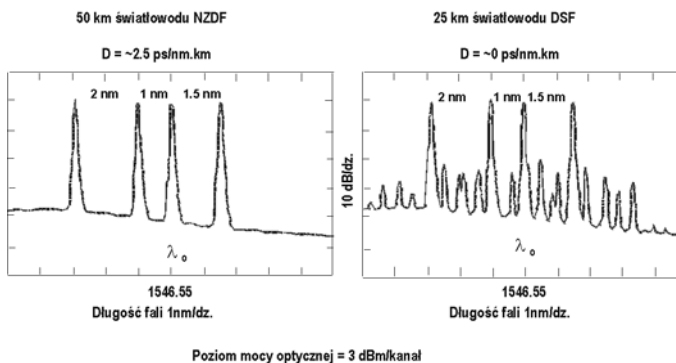


W trakcie propagacji moc niesiona przez prążki boczne rośnie kosztem mocy prążków głównych powodując przesłuchy. Ponadto modulacja współczynnika załamania ma inną

prędkość grupową niż fale początkowe, więc moc niesiona przez prążki boczne będzie się zmieniała okresowo.

Istnieje kilka sposobów ograniczenia efektów FWM, najważniejsze z nich to:

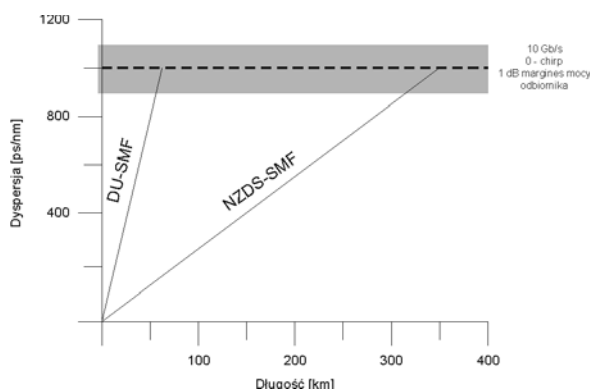
- zmniejszenie odstępów pomiędzy wzmacniaczami EDFA pozwala na obniżenie poziomów mocy optycznej i ograniczenie wielkości wszystkich efektów nieliniowych;
- różna od zera dyspersja chromatyczna ogranicza generację produktów FWM, burząc dopasowanie fazy oddziaływujących fal.



Rys. 8. Efekt mieszania czterofalowego w światłowodzie DSF i NZDF

5. Dyspersyjne ograniczenie odległości transmisji

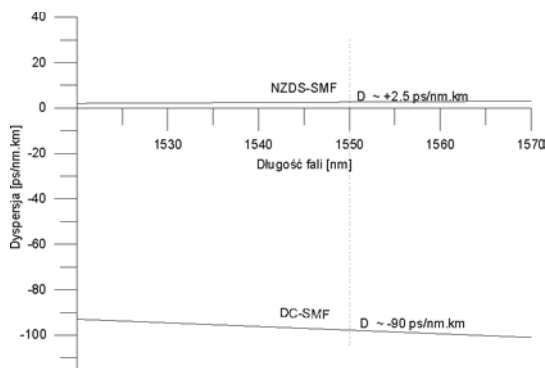
Odległość transmisji zależy od dyspersji światłowodu oraz szybkości transmisji. Przykładowo dla szybkości transmisji 10 Gb/s, odbiornikiem z 1 dB marginesem poziomu mocy odpowiadającym stopniu błędów BER = 10^{-9} i granicznej dyspersji całkowitej linii ~1000 ps/km – światłowody o nieprzesuniętej dyspersji mają odległość graniczną około 60 km, natomiast NZDF-SMF do około 360 km.



Rys. 9. Ograniczenie długości linii spowodowanej dyspersją dla światłowodów DU-SMF i NZDS-SMF

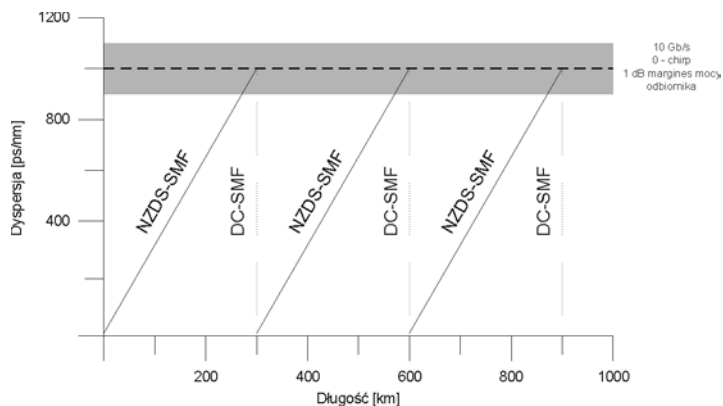
6. Kompensacja dyspersji

Najprostszym sposobem kompensacji dyspersji jest wstawienie w linii, w miejscu gdzie osiągnięto odległość graniczną, światłowodu kompensującego dyspersję DCF (*Dispersion Compensating Single Mode Fiber*). Charakterystykę dyspersyjną tego światłowodu w porównaniu z charakterystyką światłowodu NZDS-SMF przedstawia poniższy rysunek.



Rys. 10. Charakterystyki dyspersyjne światłowodów NZDS-SMF i DC-SMF

Mała dyspersja światłowodów NZDS-SMF umożliwia szybką transmisję na znaczne odległości. System transmisyjny z zastosowaniem światłowodów NZDS-SMF praktycznie nie wymaga kompensacji dyspersji dla odległości do 1000 km przy prędkości transmisji 2.5 Gb/s lub do 360 km przy prędkości 10 Gb/s. Nieznaczna kompensacja dyspersji (~ 3 km światłowodu DC-SMF na każde 120 km linii) daje możliwość późniejszego zwiększenia prędkości transmisji. Światłowody kompensujące dyspersję zwiększają jednak istotnie tłumienność linii, gdyż ich tłumienności sięgają kilku dB/km.



Rys. 11. Kompensacja dyspersji światłowodu NZDS-SMF z zastosowaniem światłowodu DC-SMF

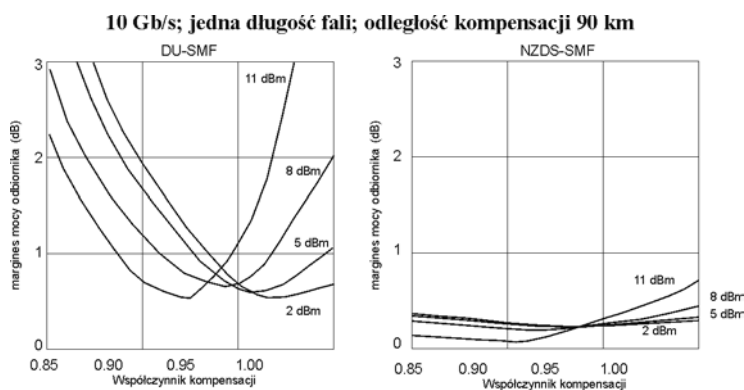
Współczynnik kompensacji teoretycznie określa zależność:

$$c = \left| \frac{D_{DC-SMF} \cdot L_{DC-SMF}}{D_{NZDS-SMF} \cdot L_{NZDS-SMF}} \right|$$

gdzie:

- D_{DC-SMF} – współczynnik dyspersji chromatycznej światłowodu DC-SMF
- $D_{NZDS-SMF}$ – współczynnik dyspersji chromatycznej światłowodu NZDS-SMF
- L_{DC-SMF} – długość światłowodu DC-SMF
- $L_{NZDS-SMF}$ – długość światłowodu NZDS-SMF

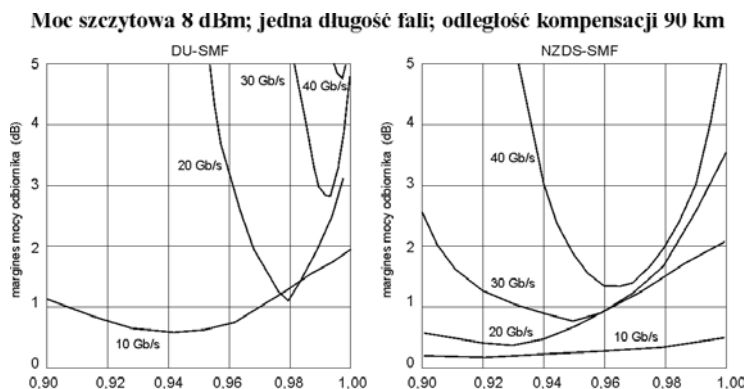
W praktyce jednak kompensacja dyspersji z wykorzystaniem włókna DC-SMF niesie za sobą ograniczenia przy jednoczesnym stosowaniu wzmacniaczy EDFA. W takiej sytuacji współczynnik kompensacji nie jest wielkością stałą i zależy od poziomu mocy transmitowanej i szybkości transmisji. Efekt ten związany jest z własną modulacją fazy i dyspersją światłowodu. Przy niskich poziomach mocy $c = 1$, natomiast gdy poziom mocy wzrasta, wzrasta własna modulacja fazy powodująca kompresję impulsu, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie kompensacji. Zależność współczynnika kompensacji dyspersji od poziomu mocy w światłowodach DU-SMF oraz NZDS-SMF przedstawia rysunek:



Rys. 12. Kompensacja dyspersji dla różnych poziomów mocy w liniach o długości 720 km zbudowanych odpowiednio ze światłowodów DU-SMF i NZDS-SMF

Ze wzrostem szybkości transmisji, rośnie współczynnik kompensacji dyspersji oraz margines mocy odbiornika. Zależność kompensacji dyspersji od szybkości transmisji w światłowodach DU-SMF oraz NZDS-SMF przedstawia poniższy rysunek 13.

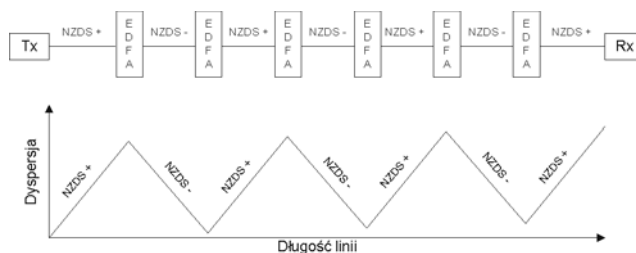
Z powyższych danych wynika, że kompensacja dyspersji szczególnie w liniach ze światłowodami o nieprzesuniętej dyspersji DU-SMF jest krytyczna ze względu na dobór długości włókna kompensującego przy danej szybkości transmisji i poziomie mocy transmitowanej. W procesie kompensacji konieczny jest po pierwsze dokładne określenie dyspersji chromatycznej odcinka linii przeznaczonego do kompensacji.



Rys. 13. Kompensacja dyspersji dla różnych szybkości transmisji w liniach o długości 720 km zbudowanych odpowiednio ze światłowodów DU-SMF i NZDS-SMF

7. Równoważenie dyspersji

Zarządzanie dyspersją linii polega na zestawieniu jej na przemian z odcinków z włóknem o ujemnej oraz o dodatniej. Dyspersja w każdej części składowej takiej linii ogranicza lokalną generację efektów nieliniowych, natomiast niewielka dodatnia średnia wartość dyspersji pomiędzy odcinkami regeneracyjnymi redukuje poszerzenie transmitowanych impulsów. Jeżeli długości odcinków linii są właściwie dobrane, linia taka nie wymaga dodatkowej kompensacji dyspersji – jest samokompensująca.



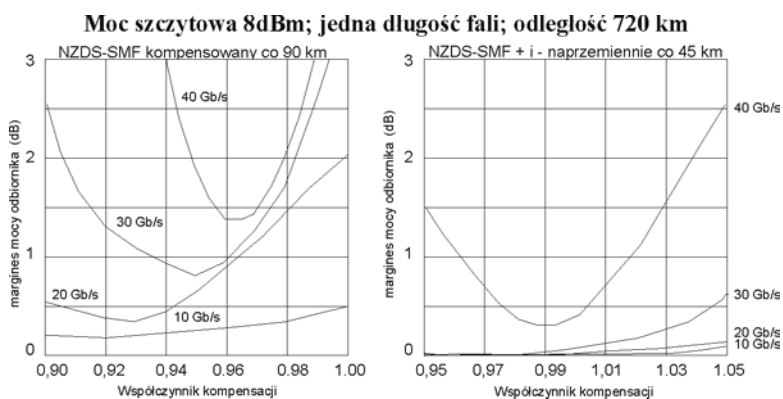
Rys. 14. Równoważenie dyspersji

Porównanie linii kompensowanej światłowodem DCF oraz linii samokompensującej, przy różnych szybkościach transmisji przedstawia rysunek 15

Linia światłowodowa z równoważoną dyspersją, zbudowana w oparciu o równą ilość naprzemiennie ułożonych odcinków kabli z włóknem światłowodowym NZDS-SMF + i NZDS-SMF -, sukcesywnie kompensuje wzrost dyspersji. Ponadto dyspersja w takiej linii może być bardzo dokładnie zaplanowana i dostosowana odpowiednio do transmisji z szybkością 10, 20 lub 40 Gb/s dla jednej długości fali.

Wykorzystując równoważenie dyspersji można zbudować system transmisyjny o zasięgu 640 km, zawierający 8 wzmacniaczy EDFA co 80 km każdy, transmitujący 32 długości fali zgodnie z ITU-T z rastrem 100GHz (0.8 nm), z szybkością 10 Gb/s na jedną długość fali. Przy

braku dodatkowej kompensacji dyspersji uzyskamy łączną szybkość transmisji 320Gb/s w jednym włóknie światłowodowym.



Rys. 15. Kompensacja i równoważenie dyspersji

Literatura

- [1] **Siuzdak J. :** *Wstęp do nowoczesnej telekomunikacji światłowodowej* – WKŁ 1997.
- [2] **Refi J. J., Clark L.:** *20 Gb/s transmission over dispersion-unshifted and non-zero dispersion fiber* - NFOEC 1995.
- [3] Materiały firmowe: *Lucent Technologies, Bell Labs Innovations.*

FACTORS LIMITING TRANSMISSION IN THE OPTICAL FIBER SYSTEMS

Summary: In the article were presented all the most important factors limiting the range and transmission speed in the optical fiber systems (the attenuation and the chromatic dispersion), as well as the methods of these restrictions overcoming – the optical amplifiers and the dispersion's compensation. There were also presented the results of the optical amplifiers usage and the transmission multiplexing in the range of wavelength that on the one hand increase the range and the storage capacity of a system while on the other hand introduce next restrictions connected with nonlinear effects occurrence.