

# Łącza światłowodowe – zjawiska nieliniowe

## MODUŁ 3

AGNIESZKASZYMAŃSKA

ŁĄCZA ŚWIATŁOWODOWE, MIESZANIE CZTEROFALOWE, SAMOMODULACJA FAZY, SKROŚNA MODULACJA FAZY, WYMUSZONE ROZPRASZANIE RAMANA, WYMUSZONE ROZPRASZANIE BRILLOUINA, DWDM, BER (BITOWA STOPA BŁĘDU), WYKRES OCZKOWY, TŁUMIENIE, DYSPERSJA, KOMPENSACJA DYSPERSJI, ŁĄCZA W

W NINIEJSZYM WYKŁADZIE ZOSTANIE OMÓWIONY WPŁYW ZJAWISK NIELINIOWYCH NA PROPAGACJĘ SYGNAŁÓW W ŁĄCZACH ŚWIATŁOWODOWYCH. PONADTO OMOWIONE ZOSTANĄ TAKIE ZJAWISKA JAK, MIESZANIE CZTEROFALOWE, SAMOMODULACJA FAZY, SKROŚNA MODULACJA FAZY, WYMUSZONE ROZPRASZANIE RAMANA, WYMUSZONE ROZPRASZANIE BRILLOUINA. DLA WYBRANYCH PRZYPADKÓW PRZEDSTAWIONE ZOSTANĄ WYNIKI SYMULACJI DLA RÓŻNYCH PARAMETRÓW TORU. DODATKOWO ZBADANY ZOSTANIE WPŁYW ILOŚCI KANAŁÓW NA ZASIĘG ŁĄCZA WIELOKANAŁOWEGO.

## Spis treści

1	Wprowadzenie .....	2
2	Efektywna powierzchnia rdzenia.....	2
3	Modulacja fazy.....	6
3.1	Samomodulacja fazy.....	7
3.2	Skośna modulacja fazy .....	7
4	Mieszanie czterofalowe.....	9
5	Wymuszone rozpraszanie.....	14
5.1	Wymuszone rozpraszanie Ramana.....	15
5.2	Wymuszone rozpraszanie Brillouina.....	18
6	Bibliografia.....	19

# 1 Wprowadzenie

Poniższy moduł powstał z myślą o osobach, które chciałyby zrozumieć podstawowe zjawiska nieliniowe występujące we łączach światłowodowych, które w znaczny sposób wpływają na jakość i odległość przesyłanego sygnału.

Autorem jest wieloletni wykładowca przedmiotu Telekomunikacja Optofalowa prowadzonego na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych – dr inż. Agnieszka Szymańska.

Materiały poza teorią uwzględniają wiele aspektów praktycznych, pomocnych przy wykonywaniu projektów łącz światłowodowych, co ma ułatwić ich realizację. Czytelnik zanim przystąpi do lektury musi posiadać podstawową wiedzę z dziedziny fizyki i matematyki, nie wykraczającą poza pierwszy rok studiów na kierunkach technicznych oraz zapoznać się ze zjawiskiem dyspersji i tłumienia we włóknach światłowodowych oraz z budżetem łącza optycznego. Polecam lekturę wcześniejszych modułów „Łącza światłowodowe – tłumienie i dyspersja” i „Łącza światłowodowe – budżet mocy”.

Poniższe materiały mogą stanowić dodatkową lekturę dla osób zaliczających przedmioty z dziedziny propagacji fal w światłowodach, dodatkowo są również doskonałym uzupełnieniem prowadzonych przeze mnie wykładów z takich przedmiotów jak *Telekomunikacja Optofalowa* czy *Fizyczne Podstawy Transmisji i Przechowywania Informacji*.

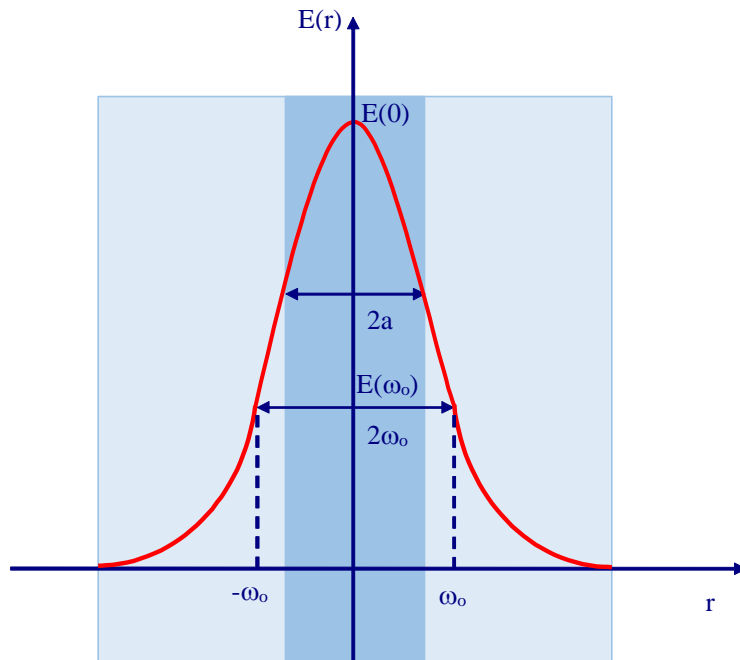
Efektom przestudiowania poniższych materiałów będzie opanowanie pojęć takich jak mieszanie czterofalowe, samomodulacja fazy, skrośna modulacja fazy, wymuszone rozpraszanie Ramana, wymuszone rozpraszanie Brillouina.

## 2 Efektywna powierzchnia rdzenia

We wcześniejszych modułach omówione zostały dwa główne zjawiska występujące w łączach światłowodowych (dyspersja i tłumienie). Poniżej zajmiemy się zjawiskami nieliniowymi, które zazwyczaj mają mniejszy wpływ na działanie łącza, ale są trudniejsze do skompensowania, a często wręcz jest to niemożliwe. W przypadku tłumienia w sieci telekomunikacyjnej wystarczyło zastosować wzmacniacz np. *EDFA*, zaś w przypadku dyspersji chromatycznej światłowody o ujemnym współczynniku dyspersji (np. *DCF*) czy światłowodowe siatki Bragga.

Problem występowania zjawisk nieliniowych jest nierozdzielnie związany z gęstością mocy sygnału. Praktycznie już przy mocy powyżej  $10\text{ mW}$  ( $10\text{ dB}$ ) zauważalne są efekty nieliniowe, natomiast powyżej  $100\text{ mW}$  ( $20\text{ dB}$ ) zjawiska nieliniowe są tak silne, że uniemożliwiają prawidłową transmisję sygnału.

W światłowodzie światło propaguje się w postaci modów. Pole elektromagnetyczne nie ogranicza się jedynie do samego rdzenia, ale część jego przenika do płaszczu, co schematycznie pokazano na poniższym rysunku. Od wartości częstotliwości znormalizowanej zależy jaka część mocy sygnału propaguje się w rdzeniu. Dla światłowodów jednomodowych optymalna wartość parametru  $V$  wynosi od 2 do 2,4. Przykładowo dla  $V = 2$  w rdzeniu propaguje się 80% mocy sygnału, natomiast dla  $V = 1$  w rdzeniu propaguje się tylko 20%.



Rysunek 1 Rozkład pola magnetycznego w rdzeniu światłowodu jednomodowego.

Na powyższym rysunku średnicę pola modu (*ang. MFD – ModeField Diameter*) oznaczono symbolem  $2\omega_0$ . Dla tej wartości natężenie pola przyjmuje wartość  $E(\omega_0) = \frac{E(0)}{e}$ , gdzie  $e = 2,7183$ .

#### DEFINICJA

**Średnica pola modu (MFD)** – jest miarą rozciągłości natężenia pola elektromagnetycznego,  $MFD = 2\omega_0$ .

Dla światłowodu o profilu skokowym *MFD* wyznaczyć można z poniższej zależności:

$$\frac{\omega_0}{a} = 0,65 + 1,619V^{-\frac{3}{2}} + 2,879V^{-6} \quad (2.1)$$

natomiast dla światłowodu o profilu gradientowym zależność jest następująca:

$$\frac{\omega_0^2}{a} = \frac{1}{n_1 k} \left( \frac{2}{\Delta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

gdzie

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.3)$$

gdzie

$a$  – promień rdzenia światłowodu [m]

$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ . W stosowanych włóknach telekomunikacyjnych wynosi od 0,001 do 0,02

$n_1$  – współczynnik załamania rdzenia

$n_2$  – współczynnik załamania płaszczka.

### PRZYKŁAD 1

Korzystając z powyższych zależności oblicz  $MFD$  dla światłowodu o profilu skokowym wiedząc, że częstotliwość znormalizowana wynosi 7, a średnica rdzenia  $50 \mu\text{m}$ .

$$\frac{\omega_0}{a} = 0,65 + 1,619V^{-\frac{3}{2}} + 2,879V^{-6}$$

$$V = 7$$

$$2a = 50 \mu\text{m}$$

$$MFD = 2\omega_0$$

Po przekształceniu i podstawieniu do wzoru otrzymujemy, że  $MFD = 73,7 \mu\text{m}$ .

### ZADANIE 1

Korzystając z powyższych zależności oblicz średnicę pola modu dla światłowodu o profilu gradientowym, wiedząc, że współczynniki załamania rdzenia i płaszczka wynoszą odpowiednio  $n_1=1,46$  i  $n_2=1,44$ , a średnica rdzenia  $50 \mu\text{m}$ . Obliczenia wykonaj dla trzeciego okna telekomunikacyjnego.

Dzięki znajomości wartości średnicy pola modu, możemy wyznaczyć efektywną powierzchnię ( $A_{eff} = \pi\omega_0^2$ ) wiązki propagującej się we włóknie światłowodowym, jest to jeden z głównych parametrów włókien podawany przez producentów. Przykładowe wartości dla różnych modeli światłowodów przedstawiono w poniższej tabeli.

Tabela 1 Wartości efektywnej powierzchni dla wybranych włókien stosowanych w telekomunikacji

	<b>Efektywna powierzchnia [<math>\mu\text{m}^2</math>]</b>
Vascade®EX3000 Fiber	150
Vascade®EX2000 Fiber	112
Vascade®EX1000 Fiber	76
Vascade®LEAF® EP Fiber	65
Vascade®L1000 Fiber	100
Vascade®S1000 Fiber	27

Znając wartość powierzchni efektywnej można obliczyć gęstość mocy, od której wartości zależeć będzie powstawanie zjawisk nieliniowych.

## PRZYKŁAD 2

Korzystając z powyższej tabeli wyznacz średnicę pola modu dla włókien typu a) Vascade®LEAF® EP Fiber i b) Vascade®EX3000 Fiber.

$$A_{eff} = \pi \omega_o^2$$

po przekształceniu

$$\omega_o = \left( \frac{A_{eff}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$a) A_{eff} = 65 \mu m^2$$

$$b) A_{eff} = 150 \mu m^2$$

po podstawieniu do wzoru otrzymujemy, że dla

$$a) \text{ Vascade®LEAF® EP Fiber } 2\omega_o = 9,1 \mu m$$

$$b) \text{ Vascade®EX3000 Fiber } 2\omega_o = 13,8 \mu m$$

Wniosek: Projektując łącze światłowodowe warto wziąć pod uwagę średnicę pola modu.

W optyce klasycznej przyjmuje się, że współczynnik załamania nie zależy od mocy sygnału optycznego, natomiast w optyce nieliniowej współczynnik załamania szkła ( $n'$ ) jest funkcją mocy i zapisuje się go w następującej postaci.

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (2.4)$$

gdzie

$P$  – moc wiązki [W]

$n_0$  – liniowy współczynnik załamania zależny od długości fali

$n_2$  – nieliniowy współczynnik załamania (stała Kerra),

dla kwarcu  $n_2 = 3,2 \cdot 10^{-16} \left[ \frac{cm^2}{W} \right]$ .

Proszę zwrócić uwagę, że jest to całkowicie inny parametr niż współczynnik załamania płaszczka (oznaczany w ten sam sposób).

## DEFINICJA

**Efektywna gęstość mocy** – inaczej nazywana intensywnością promieniowania jest to ilość mocy na jednostkę powierzchni. Zdefiniowana jest następująco:

$$I = \frac{P}{A_{eff}} \quad (2.5)$$

### PRZYKŁAD 3

Korzystając z *Tabeli 1* wyznacz efektywną gęstość mocy dla włókien typu a) Vascade®LEAF® EP Fiber i b) Vascade®EX3000 Fiber, dla mocy 10 mW.

$$I = \frac{P}{A_{\text{eff}}}$$

$$P = 10 \text{ mW}$$

$$a) A_{\text{eff}} = 65 \mu\text{m}^2$$

$$b) A_{\text{eff}} = 150 \mu\text{m}^2$$

podstawieniu do wzoru otrzymujemy, że dla

$$a) \text{ Vascade}^{\circlearrowleft}\text{LEAF}^{\circlearrowleft} \text{ EP Fiber} \quad I = 154 \left[ \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \right]$$

$$b) \text{ Vascade}^{\circlearrowleft}\text{EX3000 Fiber} \quad I = 67 \left[ \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \right]$$

Żeby zaobserwować zjawiska nieliniowe w światłowodach wystarczy, że efektywna gęstość mocy będzie większa niż  $13 \left[ \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \right]$ . Zatem w obydwu rozpatrywanych powyżej przypadkach będziemy mieli do czynienia ze zjawiskami nieliniowymi. Jedynie zmniejszenie mocy do  $1 \text{ mW}$  spowoduje, że dla światłowodu *Vascade®EX3000 Fiber* otrzymamy wartość  $I = 6,7 \left[ \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \right]$ , co oznacza, że nie będą tu występowały zjawiska nieliniowe, a ściślej mówiąc będą one pomijalne. Jednak moc  $1 \text{ mW}$  jest bardzo mała i niewystarczająca do zapewnienia bezbłędnej transmisji w większości przypadków łącz światłowodowych. Większość laserów wykorzystywanych w łączach telekomunikacyjnych ma moc minimum  $10 \text{ mW}$ .

## 3 Modulacja fazy

Wartość współczynnika załamania szkła zależy od gęstości mocy propagującej się wiązki. Zmiana ta jest spowodowana występowaniem zjawiska Kerra, co opisano powyżej wzorem (2.5), poniżej zapisujemy jego ogólną postać:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (3.1)$$

W efekcie we włóknie pojawi się opóźnienie fazy, które można zapisać za pomocą zależności:

$$\phi(L) = \frac{2\pi n_0 L}{\lambda} + \frac{2\pi n_2 I L}{\lambda} \quad (3.2)$$

Zatem, wszelkie zmiany natężenia światła powodować będą modulację fazy fali propagującej się we włóknie światłowodowym.

## 3.1 Samomodulacja fazy

### DEFINICJA

**Samomodulacja fazy (ang. SFM – Self Phase Modulation)** – zależny od natężenia światła nieliniowy współczynnik szkła powoduje przesunięcie fazy sygnału. W ośrodku, w którym występuje efekt Kerra powstaje nieliniowe opóźnienie fazowe, które zależy od mocy i długości włókna.

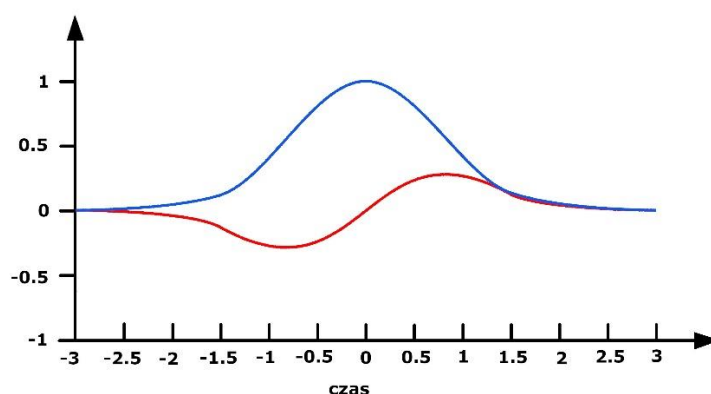
Samomodulacja fazy w łączach o typowych parametrach ma znikomy wpływ na transmisję danych, a największe zmiany zaobserwować można na pierwszych kilometrach włókna. Korzystając z powyższej zależności możemy zapisać fazę nieliniową w następujący sposób:

$$\phi_{NL} = -\frac{2\pi n_2 L}{\lambda} I(t) \quad (3.3)$$

Należy pamiętać, że jest ona zmienna w czasie. Przesunięcie nieliniowe powoduje poszerzenie widma krótkich impulsów, co można zapisać następującym równaniem:

$$\Delta\omega(t) = \frac{2,8}{T} \left( \frac{2\pi n_2 L I_{max}}{\lambda} + 1 \right) \quad (3.4)$$

Obwiednię impulsu oraz zmianę częstotliwości w wyniku samomodulacji fazowej przedstawiono poniżej:



Rysunek 2 Obwiednia impulsu (niebieski), b) zmiana częstotliwości w wyniku samomodulacji fazowej (linia czerwona).

W przypadku, kiedy mamy do czynienia z dużym wpływem SPM widmo może wykazywać silne oscylacje, jest to wynikiem tego, że częstotliwość chwilowa ulega dużym zmianom.

## 3.2 Skrośna modulacja fazy

### DEFINICJA

**Skrośna modulacja fazy (ang. XPM – Cross Phase Modulation)** – zmiana natężenia pola w jednym kanale powoduje przesunięcie fazy pola w innym kanale.



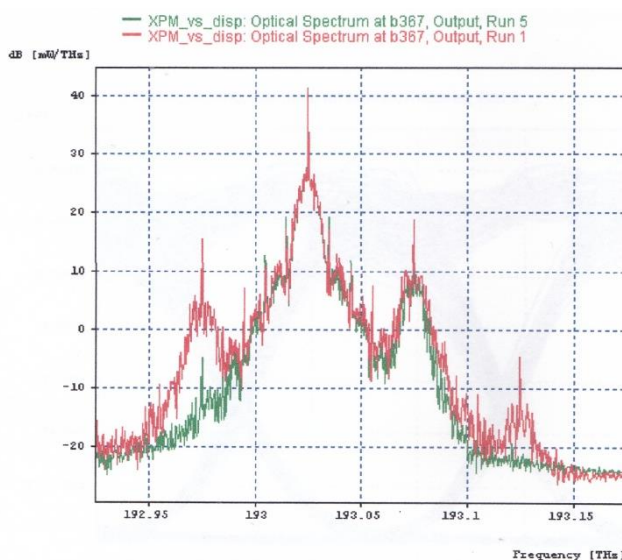
Współczynnik  $n_2$  jest tu dwa razy większy niż w przypadku wcześniej omówionej samomodulacji fazy, i można go opisać następująco:

$$n^{(2)} = 2n_2 I^{(1)} \quad (3.5)$$

Jak widać natężenie wiązki pierwszej powoduje zmianę współczynnika załamania dla wiązki drugiej. Efektem tego będzie fluktuacja mocy w poszczególnych kanałach. W typowych łączach wpływ *XPM* jest stosunkowo nieduży i nie wpływa znacząco na zasięg. Problem pojawia się wtedy, kiedy mamy do czynienia z systemem koherentnym, gdzie istnieje bezpośrednia modulacja lasera. W tym przypadku oddziaływanie to jest wprost proporcjonalne do ilości kanałów. Żeby został spełniony warunek, że spadek mocy w kanale nie może być mniejszy niż  $1 \text{ dB}$ , to moc ( $P$ ) w kanale musi spełniać nierówność:

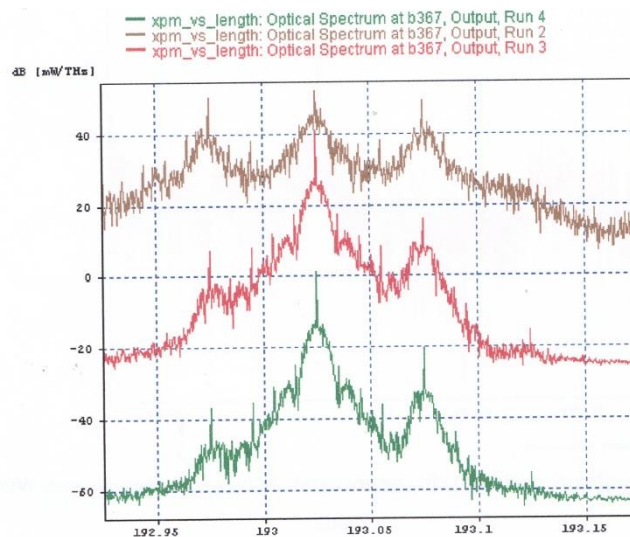
$$P < \frac{21}{N} [mW] \quad (3.6)$$

Ponadto, *XPM* zależy od wartości współczynnika dyspersji, wraz z jego wzrostem obserwuje się mniejszy wpływ tego niepożądanego zjawiska. Na poniższym rysunku przedstawiono charakterystyki dla łącza dwukanałowego ( $f_1 = 193,025 \text{ THz}$  i  $f_2 = 193,075 \text{ THz}$ ) dla dwóch różnych wartości współczynnika dyspersji.



Rysunek 3 Widmo mocy sygnału dla 100 km odcinka światłowodu dla  $D = 0 \text{ ps/km/nm}$  (linia czerwona) i  $D = 4 \text{ ps/km/nm}$  (linia zielona)

Największy wpływ zjawiska *XPM* obserwuje się na pierwszych kilometrach łącza, gdyż tu mamy do czynienia z największą gęstością mocy. Na poniższym wykresie przedstawiono wyniki pomiaru dla trzech różnych długości światłowodu ( $20 \text{ km}$ ,  $50 \text{ km}$  i  $100 \text{ km}$ ). Ze względu na różne długości mamy do czynienia z inną wartością tłumienia toru, stąd wykresy są przesunięte względem siebie w pionie. Współczynnik tłumienia włókna wynosił  $0,2 \text{ dB/km}$ , zatem odpowiednio wniesione tłumienie wynosiło  $50 \text{ km} \cdot 0,2 \frac{\text{dB}}{\text{km}} = 10 \text{ dB}$ ,  $100 \text{ km} \cdot 0,2 \frac{\text{dB}}{\text{km}} = 20 \text{ dB}$  i  $200 \text{ km} \cdot 0,2 \frac{\text{dB}}{\text{km}} = 40 \text{ dB}$ .



Rysunek 4 Widmo mocy dla łączy o długości 50 km (linia brązowa), 100 km (linia czerwona) i 200 km (linia zielona)

Skrośna modulacja fazy prowadzi głównie do przesłuchów między kanałami.

## 4 Mieszanie czterofalowe

Obecnie wszystkie łączy dalekiego zasięgu wykorzystują technikę *DWDM* (ang. *Dense Wavelength Division Multiplexing*), która jest oparta na siatkach o częstotliwościach o odstępach 100 GHz (0,8 nm) i 200 GHz (1,6 nm). Natomiast techniki *UWDM* (ang. *Ultra Wavelength Division Multiplexing*) o odstępach wynoszących 12,5 GHz (0,1 nm) i 50 GHz (0,4 nm).

Do najważniejszych i dominujących zjawisk nieliniowych w łączych wielokanałowych należy mieszanie czterofalowe (*FWM* – ang. *Four Wave Mixing*). Fale optyczne o różnych długościach np.  $f_1$  i  $f_2$  oddziałują wzajemnie na siebie w skutek czego powstają nowe fale – produkty, które mogą oddziaływać z podstawowymi falami. W efekcie przesyłany sygnał jest osłabiany i zakłócany. Powstanie dodatkowych fal, a także zmniejszenie mocy fal pierwotnych, będzie pogarszało pracę systemów wielokanałowych poprzez przesłuchy i zwiększenie tłumienia.

### DEFINICJA

**Mieszanie czterofalowe** – zjawisko występujące podczas transmisji fali świetlnej o trzech różnych długościach, w wyniku interferencji generowane są kolejne fale o innych długościach.

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (4.1)$$

gdzie  $i, j \neq k$

Oznacza to, że dla każdej trójki fal powstaje dziewięć produktów

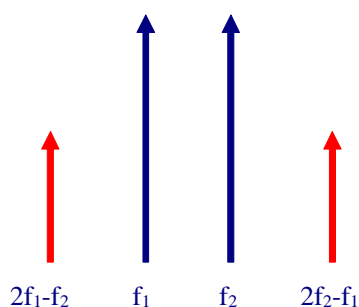
Liczbę fal ( $L$ ) powstałych w wyniku zjawiska mieszania czterofalowego można wyznaczyć z następującej zależności:

$$L = \frac{N^2(N-1)}{2} \quad (4.2)$$

gdzie

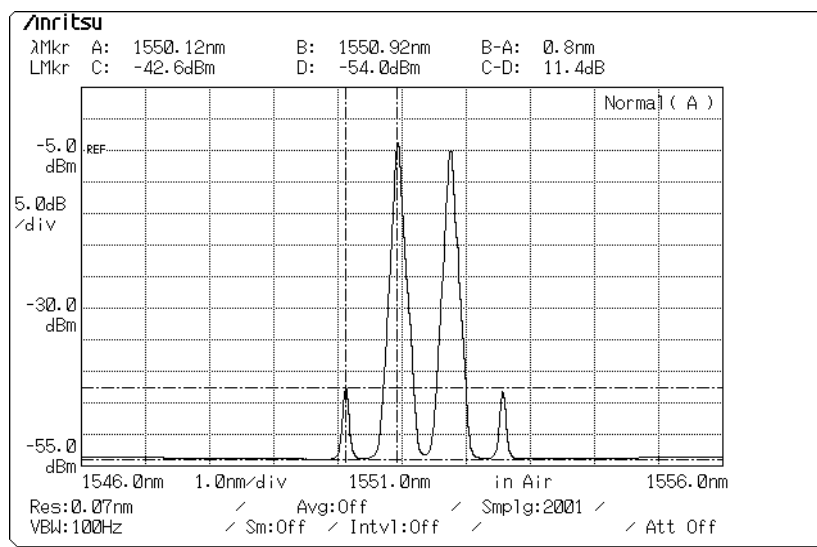
$N$  - liczba fal podstawowych.

Na poniższym rysunku przedstawiono graficznie jak wygląda mieszanie czterofalowe dla dwóch fal o bliskich częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$ . W wyniku mieszania powstają dodatkowo dwie składowe o częstotliwościach  $2f_1-f_2$  i  $2f_2-f_1$ .



Rysunek 5 Mieszanie czterofalowe dla dwóch częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ .

W tym przypadku łatwo jest odfiltrować nieużyteczne sygnały. Jednak taki przypadek, kiedy mamy do czynienia tylko z dwoma częstotliwościami jest daleki od rzeczywistości.

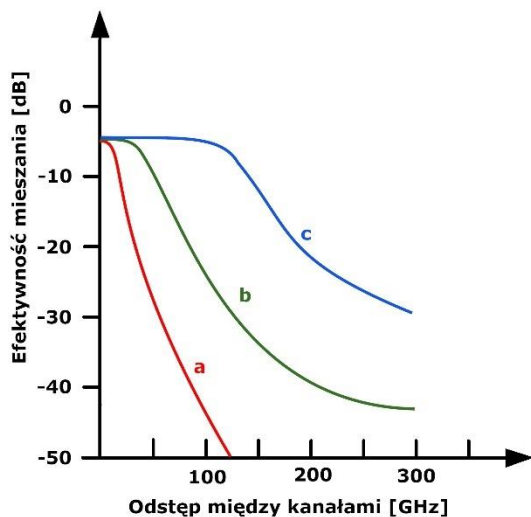


Rysunek 6 Mieszanie czterofalowe charakterystyka uzyskana dla światłowodu SMF-28 o długości 10 km dla dwóch długości fali 1555 nm i 1555 nm.

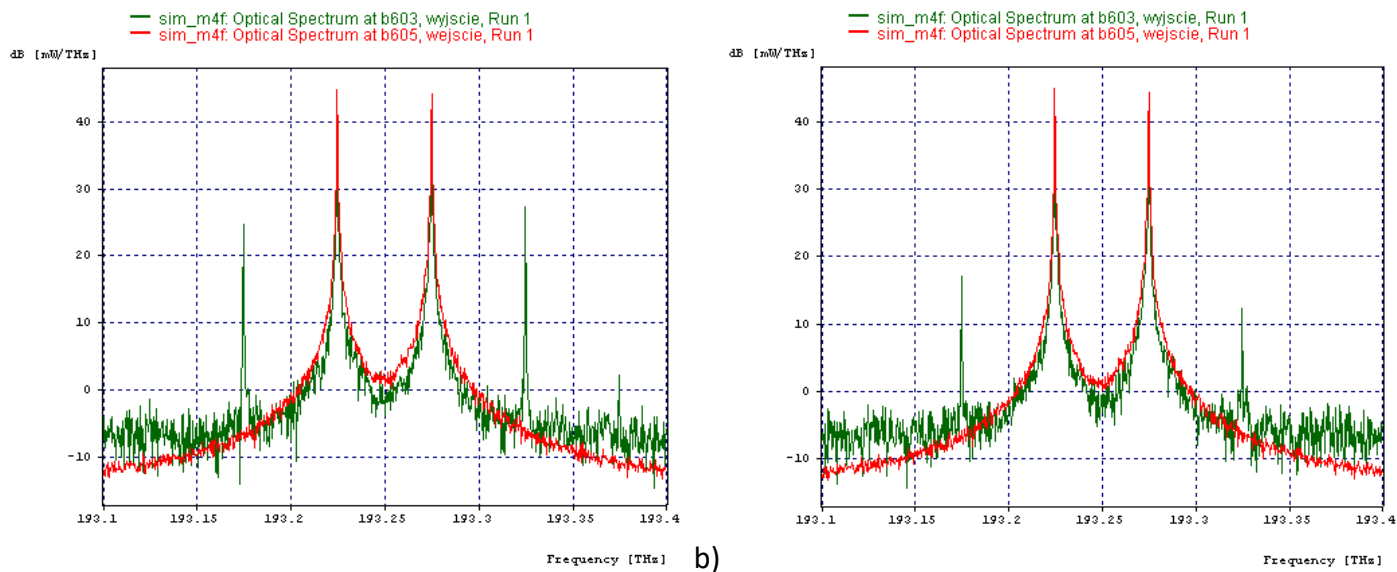
Fale podstawowe, jak i wtórne rozchodzą się w tym samym kierunku, a moc fal wtórnych rośnie kosztem fal podstawowych. Ponadto w zależności od tego, czy odległość między kanałami jest równa czy nie fale te będą się częściowo pokrywały lub nie, co w efekcie końcowym będzie miało wpływ na jakość otrzymanego sygnału. Część fal podstawowych będzie miała mniejszą moc i dodatkowo powstaną nowe fale. W efekcie pojawi się tłumienie i przesłuchy.

Włókna o niezerowym współczynniku dyspersji wykonane zgodnie z normą G.655 eliminują efekt FWM. Z tego też powodu doskonale znajdują zastosowanie w systemach DWDM. Im większa wartość współczynnika dyspersji tym mniejsza jest efektywność mieszania czterofalowego. Przykładowo dla światłowodu SMF-28 o współczynniku dyspersji  $16 \text{ ps/nm/km}$  odległość między kanałami może wynosić około  $20 \text{ GHz}$ , natomiast dla włókien o niskim współczynniku dyspersji ( $2.5-6 \text{ ps/km/nm}$ ) odległość ta wynosi ponad  $50 \text{ GHz}$ . Szerokość

wykorzystywanego pasma jest ograniczona, zatem korzystnym wydaje się użycie światłowodów o większym współczynniku dyspersji, gdzie różnica prędkości grupowych jest większa. Co przedstawiono na poniższym rysunku. Należy pamiętać, że im wyższa wartość współczynnika dyspersji tym dłuższy musi być światłowód kompensujący, co prowadzi do zmniejszenia mocy, problem szczegółowo został omówiony w module dotyczącym dyspersji.

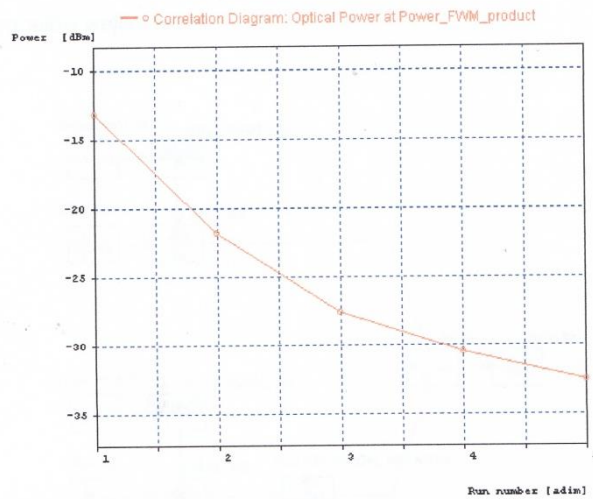


Rysunek 7 Efektywność mieszania czterofalowego w funkcji odległości między kanałami dla światłowodu o współczynniku dyspersji a)  $D = 17 \text{ ps/km/nm}$ , b)  $D = 1 \text{ ps/km/nm}$  i c)  $D = 0 \text{ ps/km/nm}$ .



Rysunek 8 Sygnał wyjściowy (linia zielona) oraz wejściowy (linia czerwona) dla wartości współczynnika dyspersji a)  $4.2 \text{ ps/km/nm}$  i b)  $8.2 \text{ ps/km/nm}$

Na powyższych rysunkach można zauważyć, że dla niższego współczynnika dyspersji wartości prążków bocznych mają wyższą moc, co niekorzystnie wpływa na działanie łącza. Na poniższym rysunku przedstawiono jak zmienia się moc produktów mieszania wraz ze wzrostem współczynnika dyspersji.



Rysunek 9 Zależność mocy produktów mieszania od współczynnika dyspersji.

Zwiększenie odległości pomiędzy kanałami zmniejsza negatywny wpływ tego nieliniowego zjawiska. Jednak nie zawsze można zwiększyć odległość między kanałami, gdyż szerokość pasma jest ograniczona. Zatem zwiększając odległości zmniejsza się ilość kanałów, co w rezultacie wpływa na przepływność łącza.

Moc produktów zależy również od mocy sygnału. Im wyższa moc sygnałów podstawowych tym moc produktów jest wyższa. Stosunek ten nieliniowo maleje.

Rozpatrzmy teraz przypadek dla trzech częstotliwości  $f_i$ ,  $f_j$  i  $f_k$ . Ostatecznie na wyjściu otrzymamy zgodnie z zależnością (4.2) 9 dodatkowych częstotliwości, i jak łatwo zauważyć część z nich jest taka sama:

Przykładowo dla trzech fal podstawowych  $f_1 = 193,4 \text{ GHz}$ ,  $f_2 = 193,5 \text{ GHz}$  i  $f_3 = 193,6 \text{ GHz}$ , otrzymamy

$$f_{113} = f_1 + f_1 - f_3 = 193,4 \text{ GHz} + 193,4 \text{ GHz} - 193,6 \text{ GHz} = 193,2 \text{ GHz}$$

$$f_{123} = f_1 + f_2 - f_3 = 193,4 \text{ GHz} + 193,5 \text{ GHz} - 193,6 \text{ GHz} = 193,3 \text{ GHz}$$

$$f_{112} = f_1 + f_1 - f_2 = 193,4 \text{ GHz} + 193,4 \text{ GHz} - 193,5 \text{ GHz} = 193,3 \text{ GHz}$$

$$f_{223} = f_2 + f_2 - f_3 = 193,5 \text{ GHz} + 193,5 \text{ GHz} - 193,6 \text{ GHz} = 193,4 \text{ GHz}$$

$$f_{132} = f_1 + f_3 - f_2 = 193,4 \text{ GHz} + 193,6 \text{ GHz} - 193,5 \text{ GHz} = 193,5 \text{ GHz}$$

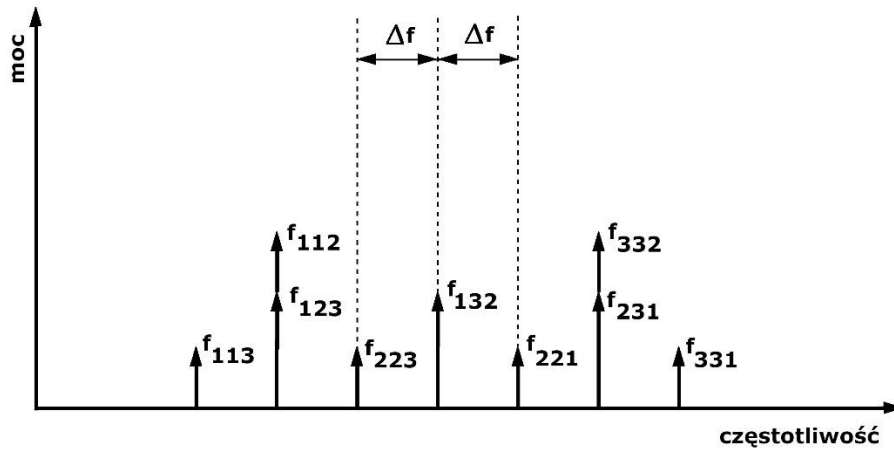
$$f_{221} = f_2 + f_2 - f_1 = 193,5 \text{ GHz} + 193,5 \text{ GHz} - 193,4 \text{ GHz} = 193,6 \text{ GHz}$$

$$f_{332} = f_3 + f_3 - f_2 = 193,6 \text{ GHz} + 193,6 \text{ GHz} - 193,5 \text{ GHz} = 193,7 \text{ GHz}$$

$$f_{231} = f_2 + f_3 - f_1 = 193,5 \text{ GHz} + 193,6 \text{ GHz} - 193,4 \text{ GHz} = 193,7 \text{ GHz}$$

$$f_{331} = f_3 + f_3 - f_1 = 193,6 \text{ GHz} + 193,6 \text{ GHz} - 193,4 \text{ GHz} = 193,8 \text{ GHz}$$

Co zilustrowano na poniższym rysunku:



Rysunek 10 Mieszanie czterofalowe dla trzech częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$ .

Jak widać w łączy wielokanałowym, powstają różne kombinacje sygnałów, część z nich pokrywa się z wiązkami sygnałowymi i w żaden sposób nie można ich odfiltrować. Częstotliwości  $f_{113}$ ,  $f_{123}$ ,  $f_{112}$ ,  $f_{332}$ ,  $f_{231}$  i  $f_{331}$  można byłoby odfiltrować, natomiast  $f_{223}$ ,  $f_{132}$  i  $f_{221}$  pokrywają się z wiązkami sygnałowymi.

W łącach telekomunikacyjnych liczba laserów zazwyczaj wynosi od 8 do 32, a nawet do 128.

#### PRZYKŁAD 4

Korzystając z powyższej zależności oblicz ile pojawi się dodatkowych częstotliwości w wyniku mieszania czterofalowego dla łączy a) 8-kanałowego i b) 128-kanałowego.

$$L = \frac{N^2(N - 1)}{2}$$

Po podstawieniu do wzoru otrzymujemy, że

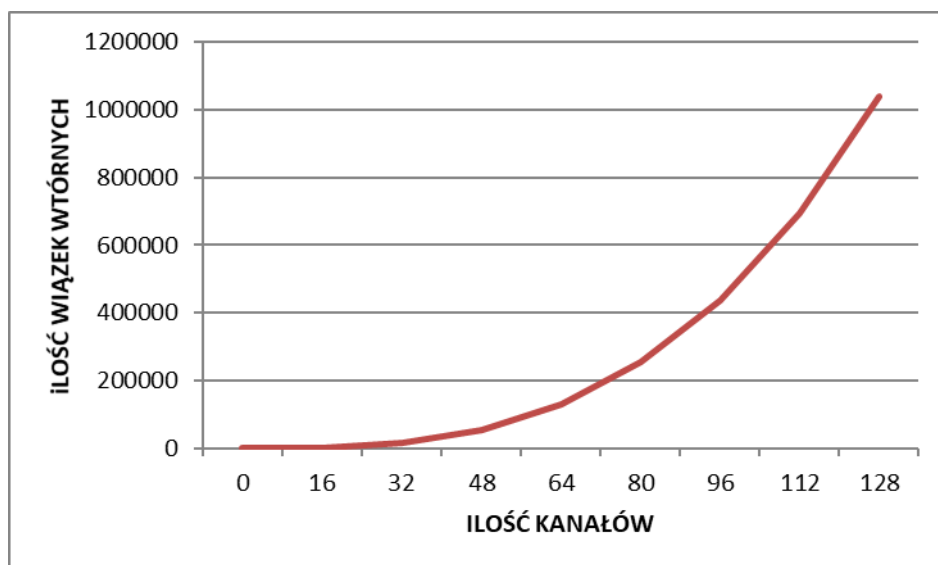
a) dla  $N = 8$

$$L = \frac{8^2(8 - 1)}{2} = 224$$

b) dla  $N = 128$

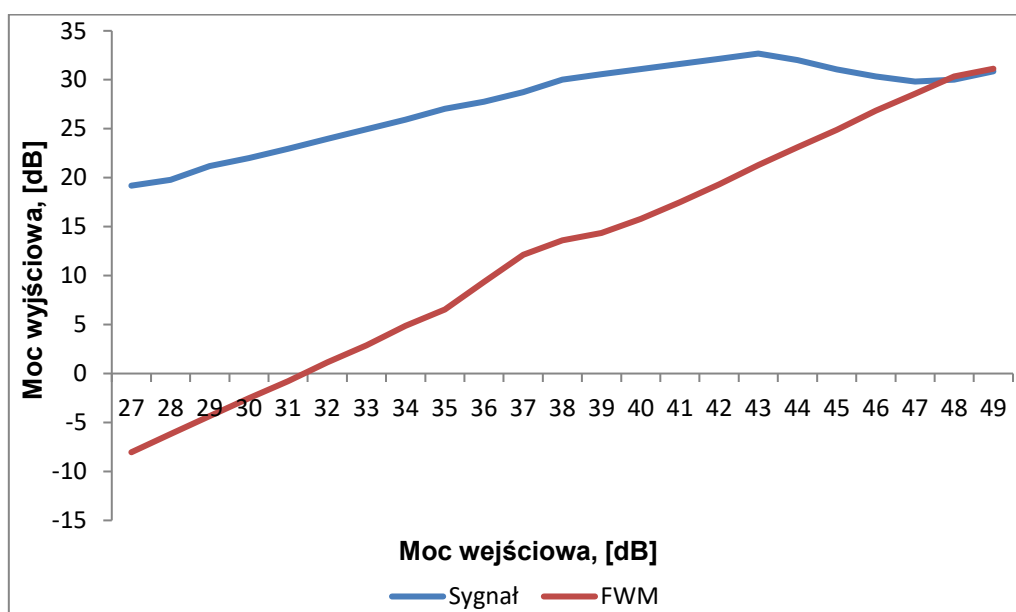
$$L = \frac{128^2(128 - 1)}{2} = 1\,040\,384$$

Liczba dodatkowych częstotliwości powstałych w wyniku interferencji rośnie zgodnie z zależnością (4.2) i można ją przedstawić graficznie.



Rysunek 11 Liczba nowopowstałych częstotliwości w zależności od ilości kanałów we włóknie.

Poniżej przedstawiono charakterystykę zależności mocy fal podstawowych i produktów wyjściowych od mocy laserów dla dwóch częstotliwości.



Rysunek 12 Zależność mocy wyjściowej od wejściowej dla sygnału i produktów mieszania czterofalowego..

Spośród wszystkich zjawisk nieliniowych mieszanie czterofalowe ma największy wpływ na pracę systemów telekomunikacyjnych. Żeby ograniczyć jego wpływ należy stosować jak największe odległości między kanałami, lub odległość pomiędzy kanałami powinna być niesymetryczna. Ponadto nie można stosować włókien, których współczynnik dyspersji chromatycznej wynosi zero w paśmie pracy łącza.

## 5 Wymuszone rozpraszanie

Innymi nieliniowymi zjawiskami są zjawisko wymuszonego rozpraszania Ramana i zjawisko wymuszonego rozpraszania Brillouina, polegające na oddziaływaniu fal świetlnych propagowanych w światłowodzie.

## 5.1 Wymuszone rozpraszanie Ramana

Z wymuszonym rozpraszaniem Ramana (*ang.* SRS – *Simulated Raman Scattering*) mamy do czynienia kiedy dojdzie do oddziaływania fali elektromagnetycznej i wibracji molekularnych  $SiO_2$ . W wyniku tego oddziaływania dochodzi do przemiany częstotliwości propagujących się fal świetlnych i w efekcie powstają listki boczne o wyższej i niższej częstotliwości (odpowiednio nazywa się je falą anty Stokesa i Stokesa). Listki te oddzielone są od częstotliwości głównej o tyle ile wynosi częstotliwość drgań molekuł. Zazwyczaj fala Stokesa jest dużo silniejsza niż anty Stokesa.

### DEFINICJA

**Wymuszone rozpraszanie Ramana** – zjawisko zachodzi, gdy do światłowodu zostaną wprowadzone dwie fale o różnych częstotliwościach odległych od siebie o częstotliwość Stokesa. Moc fali o niższej częstotliwości (fala sondująca) będzie rosła kosztem mocy fali o wyższej częstotliwości (fala pompująca).

$$P_1(L) = P_1(0)e^{\frac{gL_e P_2}{bA_e}} \quad (5.1)$$

gdzie

$P_1(0)$  – moc fali sondującej na wejściu do światłowodu

$P_1(L)$  – moc fali sondującej na wyjściu światłowodu

$P_2$  – moc fali pompującej

$A_e$  – powierzchnia przekroju wspólnego dla fali sondującej i pompującej

$g$  – współczynnik wzmocnienia, jest on odwrotnie proporcjonalny do długości fali

$b$  – współczynnik zależny od polaryzacji (dla światłowodu SMF wynosi 2)

$L_e$  – efektywna długość światłowodu

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (5.2)$$

gdzie

$\alpha$  – jednostkowa tłumienność światłowodu

### ZADANIE 2

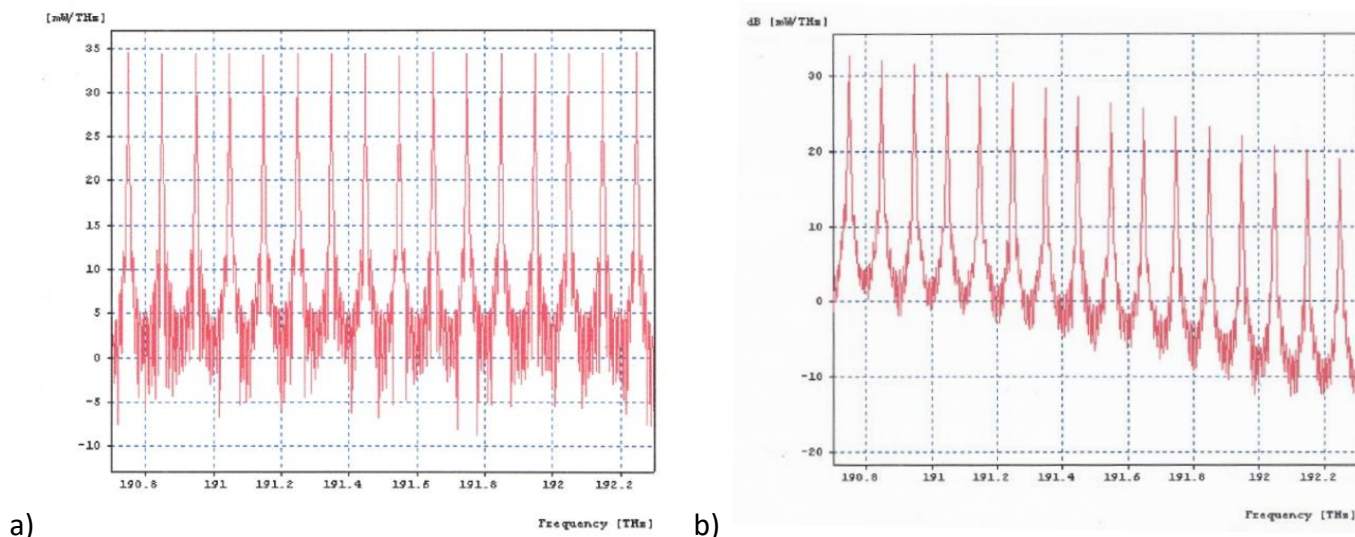
Korzystając ze wzoru (5.2) oblicz efektywną długość światłowodu. Współczynnik tłumienia wynosi 0,2 dB/km, a długość włókna 100 km.

Moc fali sondującej na wyjściu ze światłowodu o długości  $L$  zależy przede wszystkim od jej mocy początkowej, mocy fali pompującej i efektywnej długości światłowodu.



Współczynnik wzmocnienia Ramana zwykle wynosi około  $3 \cdot 10^{-14} [m/W]$ , a jego maksymalna wartość wynosi  $7 \cdot 10^{-12} [m/W]$ . Wraz z jego wzrostem moc sygnałów o wyższych częstotliwościach maleje, natomiast o niższych rośnie.

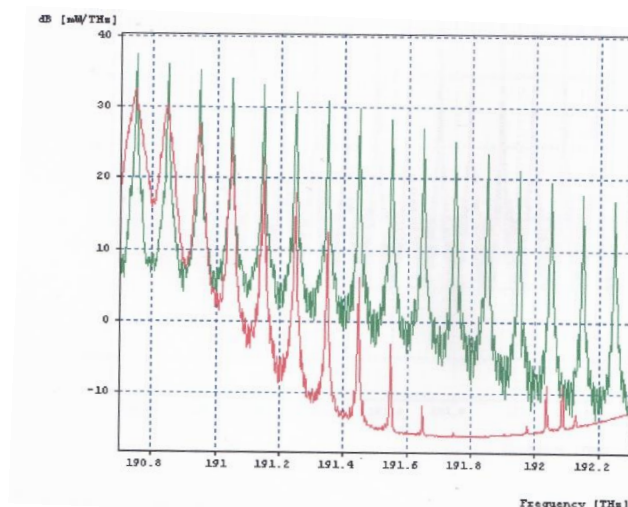
Zatem w transmisji światłowodowej w systemach DWDM kanały o niższych częstotliwościach będą wzmocniane kosztem mocy z kanałów o wyższych częstotliwościach. Na poniższych rysunkach przedstawiono widmo mocy dla sygnału wchodzącego i wychodzącego dla włókna światłowodowego o długości 20 km liczącego 16 kanałów.



Rysunek 13 Widmo mocy sygnału a) wejściowego i b) wyjściowego.

Współczynnik tłumienia światłowodu równy jest  $0,2 [dB/km]$ , zatem sumaryczna strata wynosi  $20 \cdot 0,2 = 4 dB$ . Łatwo zauważyć, że pomimo tłumienia moc dla niższych częstotliwości w sygnale wyjściowym jest wyższa niż w sygnale wejściowym. Spowodowane jest to wymuszonym rozpraszaniem Ramana. Moc sygnałów o niższych częstotliwościach rośnie kosztem sygnałów o wyższych częstotliwościach.

Ponadto im dłuższe włókno tym bardziej widoczny jest wpływ SRS co przedstawiono na poniższym rysunku.



Rysunek 14 Widmo mocy sygnału wejściowego dla światłowodu o długości 20 km (linia zielona) i 100 km (linia czerwona).

Zjawisko Ramana nie występuje w łączach jednokanałowych, jednak w sieciach DWDM, kanały o większych częstotliwościach fal będą wzmocniane kosztem kanałów o mniejszych długościach. Dzieje się tak tylko, gdy

jednocześnie w obu kanałach wystąpią bity niezerowe. Jeśli w łączy  $N$ -kanałowym, kanały o jednakowych mocach ( $P$ ) będą równomiernie oddalone od siebie o częstotliwość  $\Delta f$ , to żaden z kanałów nie będzie miał mocy pomniejszonej o więcej niż  $1 \text{ dB}$ , jednakże warunkiem jest zachodzenie poniższej nierówności:

$$(N \cdot P) \cdot [(N - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (5.3)$$

gdzie

$P$  – moc sygnałów

$N$  – liczba kanałów

$\Delta f$  – odległość pomiędzy kanałami

Wymuszone rozpraszanie Ramana powoduje ograniczenie mocy wraz ze wzrostem ilości kanałów, problemy pojawiają się zwłaszcza w łączach gdzie propaguje się ponad  $100$  częstotliwości. Im więcej kanałów tym większe oddziaływanie między nimi i maksymalna moc w kanale zmniejsza się proporcjonalnie do odwrotności kwadratu ilości kanałów w systemie ( $1/N^2$ ).

Na podstawie wyliczeń i badań wykazano, że każde dwie częstotliwości (kanały) oddalone od siebie o mniej niż  $15 \text{ THz}$  będą ulegały rozpraszaniu Ramana (czyli w każdym wielokanałowym łączy). Jednakże zjawisko wymuszonego rozpraszania Ramana będzie uwidaczniało się dopiero od pewnego poziomu mocy fali pompującej.

#### PRZYKŁAD 5

Wyznacz wartości mocy dla których w łączy wielokanałowym DWDM żaden z kanałów nie będzie miał mocy zmniejszonej o więcej niż  $1 \text{ dB}$ . Obliczenia wykonaj dla łączy a) 8-kanałowego i b) 128-kanałowego.

Odległość między kanałami wynosi  $100 \text{ GHz}$

$$(N \cdot P) \cdot [(N - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$\Delta f = 50 \text{ GHz}$$

Po podstawieniu do wzoru otrzymujemy, że

a) dla  $N = 8$

$$(8 \cdot P) \cdot [(8 - 1)50 \text{ GHz}] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$P < 0,18 \text{ W}$$

b) dla  $N = 128$

$$(128 \cdot P) \cdot [(128 - 1)50 \text{ GHz}] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$P < 0,6 \text{ mW}$$

## PRZYKŁAD 6

Wyznacz odległość pomiędzy kanałami w łączy wielokanałowym DWDM, korzystając z zależności opisanej wzorem (5.1). Obliczenia wykonaj dla łączy a) 8-kanałowego i b) 128-kanałowego. Moc sygnałów wynosi 10 mW.

$$(N \cdot P) \cdot [(N - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$P = 10 \text{ mW}$$

a) dla  $N = 8$

$$(8 \cdot 10 \text{ mW}) \cdot [(8 - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$\Delta f < 893 \text{ GHz}$$

b) dla  $N = 128$

$$(128 \cdot 10 \text{ mW}) \cdot [(128 - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$\Delta f < 3 \text{ GHz}$$

## PRZYKŁAD 7

Załóżmy, że dysponujemy 10 mW laserami, każdy o częstotliwości o 25 GHz większej od poprzedniego. Wyznacz ile kanałów może mieć łączy, żeby na wyjściu żaden z kanałów nie miał mocy pomniejszonej o więcej niż 1 dB.

$$(N \cdot P) \cdot [(N - 1)\Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$P = 10 \text{ mW}$$

$$\Delta f < 25 \text{ GHz}$$

$$(N \cdot 10 \text{ mW}) \cdot [(N - 1)25 \text{ GHz}] < 500 \text{ GHz} \cdot W$$

$$N(N - 1) < 2000$$

$$N < 45$$

Warto zwrócić uwagę, iż w standardowych łączy DWDM minimalna odległość między kanałami wynosi 12,5 GHz, a liczba kanałów nie jest większa niż 128.

## 5.2 Wymuszone rozpraszanie Brillouina

Wymuszone rozpraszanie Brillouina powstaje na skutek oddziaływania fal świetlnych i dźwiękowych w światłowodzie. Konsekwencją tego jest przemiana częstotliwości i odwrócenie kierunku propagacji fali. Istnieje tu spore podobieństwo do wymuszonego rozpraszania Ramana, padająca fala zamieniana jest w falę Stoksa o większej długości, równocześnie wzbudzany jest fonon akustyczny. Jednakże wymuszone

rozpraszanie Brillouina w światłowodach jednomodowych zachodzi tylko w kierunku wstecznym. Fala propagująca się w kierunku nadajnika osłabia moc fali podstawowej.

Współczynnik wzmocnienia Ramana zwykle wynosi około  $4 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{cm}{W} \right]$ , jak łatwo zauważyć jest on ponad dwa rzędy wielkości wyższy od współczynnika wzmocnienia Ramana. Jednak pasmo wzmocnienia optycznego jest tu dużo mniejsze i dla III okna telekomunikacyjnego wynosi  $20 MHz$ , czyli największe wzmocnienie będzie dla laserów pompujących o szerokości linii widmowej większej niż  $20 MHz$ .

W łączach jednokanałowych wpływ tego zjawiska można zaobserwować dla mocy powyżej wartości krytycznej:

$$P_c = \frac{21bA_e}{g_{BL_e}} \quad (5.4)$$

W łączach wielokanałowych kanały oddziałują z włóknem niezależnie od innych kanałów, zatem moc krytyczna nie będzie zależała od ilości kanałów. Wymuszone rozpraszanie Brillouina jest bardzo wrażliwe na rodzaj i szybkość modulacji sygnału. SBS maleje wraz ze wzrostem szybkości modulacji, natomiast najbardziej korzystnymi rodzajami modulacji są ASK (*ang. Amplitude Shift Keying*) i FSK (*ang. Frequency Shift Keying*).

## 6 Bibliografia

- B. Galwas „Podstawy telekomunikacji optofalowej”, Akademicka Seria WWSI, 2018
- J. Siuzdak „Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej”, WKŁ, 1999.
- <https://www.thorlabs.com/>
- <https://www.alibaba.com/>
- <http://www.corning.com/>
- <http://www.polskaszerokopasmowa.pl/>
- <https://www.ofsoptics.com/>
- <https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/>
- <https://www.photonics.com/>