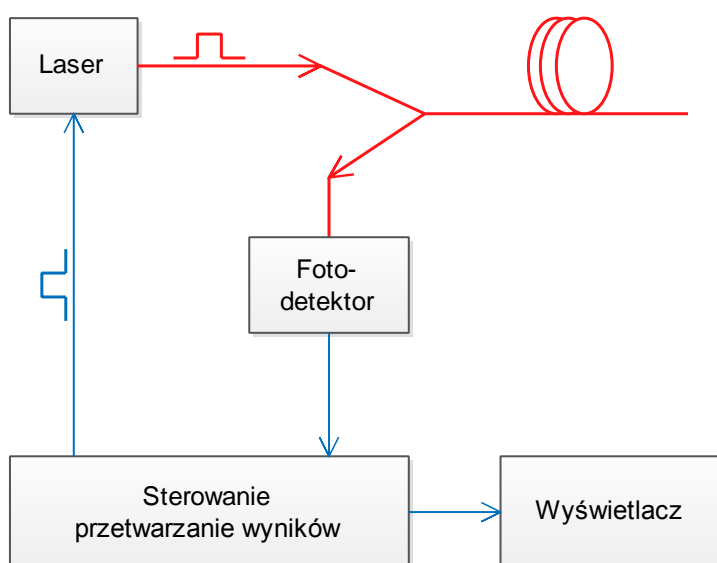


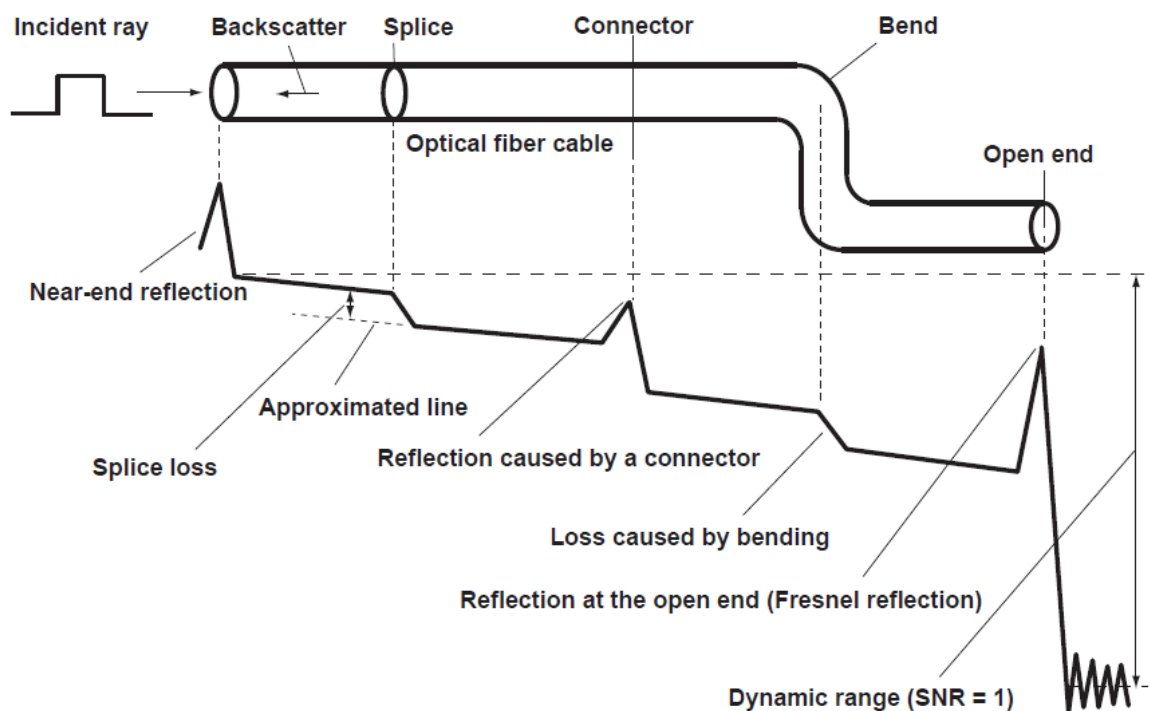
Część 1: OTDR

Reflektometria OTDR (ang. *optical time domain reflectometry*) jest podstawowym narzędziem diagnostycznym wykorzystywanym w sieciach optycznych. Umożliwia pomiar tłumienia światłowodu, jego długości, lokalizację złączy i spawów, określenie czy złącza i spawy są wykonane zgodnie z normami telekomunikacyjnymi, lokalizację zgięć światłowodu. Aby przeprowadzić pomiar reflektometrem całej linii wystarczy dostęp do jednego z zakończeń sieci/ kabla optycznego, co jest istotnym ułatwieniem dla operatora sieci. W szczególności może on zlokalizować uszkodzenie linii bezpośrednio ze stacji nadawczej.

Reflektometr to urządzenie, przy pomocy którego wykonywany jest pomiar reflektometryczny. Pomiar opiera się na analizie mocy promieniowania rozproszonego w linii światłowodowej w funkcji czasu. Dominującym rodzajem rozpraszania w transmisji światłowodowej jest rozpraszanie Rayleigha. Jednak oprócz rozpraszania, promieniowanie wsteczne może być wywołane odbiciem. Schemat funkcjonalny reflektometru pokazano na rys. 2.1. Dioda laserowa wysyła periodycznie impulsy w trakt światłowodowy. Światło impulsu, rozproszone i odbite w trakcie światłowodowym poprzez sprzęgacz kierunkowy (lub cyrkulator) wraca do urządzenia OTDR i podlega detekcji przez fotodiodę o wysokiej czułości. Układ przetwarzania danych na podstawie analizy odebranej mocy optycznej w funkcji opóźnienia od wysłania impulsu tworzy wykres reflektometryczny. Szybkość propagacji w światłowodzie wynosi $v=c/n$, gdzie c to szybkość światła w próżni a n to grupowy współczynnik załamania na danej długości fali. Domyślnie urządzenia pomiarowe mają wpisany n dla światłowodu SSMF-28 (G.682). Pomiar innego światłowodu wymaga przestawienia parametru urządzenia (lub ręcznej korekcy błędu odległości). Reflektometr tak naprawdę przelicza więc czas po którym promieniowanie powróciło na odległość: $x=0.5vt$ i taką też zmienną przyjmuje dla osi OX. Na osi OY wyświetlana jest względna moc promieniowania powracającego $\times 1/2$ (w [dB]) - z uwzględnieniem tłumienia w obie strony.



Rys. 2.1. Schemat blokowy OTDR



Rys. 2.2. Typowy przebieg reflektometryczny i rozkład "zdarzeń" w światłowodzie. Źródło: AQ7280 user manual.

Typowy wykres reflektometryczny przedstawiono na rys. 2.2. Pokazano na nim typowe zdarzenia w linii oraz odpowiadające im zmiany na wykresie. Na początku traktu jest zwykle silne odbicie początkowe, od złącza reflektometru ze światłowodem. Odbicia tego typu opisane są wzorami Fresnela na moc światła odbitego przy przejściu granicy ośrodków o dwóch różnych współczynnikach załamania (próżni i światłowodu). Ze względu na to, że moc odbita od pierwszego złącza jest bardzo silna, a detektor skalibrowany jest na odbiór bardzo słabych sygnałów rozproszonych w torze, może on wejść w nasycenie. Nasycenie trwa pewien przedział czasu sprawiając, że wyniki dla pierwszych kilkudziesięciu(set) metrów są bardzo niedokładne. Dlatego w praktyce za OTDR stosuje się tzw. **kabel rozbiegowy**, czyli światłowód o długości kilkuset metrów, który na stałe wpięty jest do reflektometru i dopiero ten światłowód łączy się z badaną linią. Na rys. 2.2 widoczny jest również spaw (brak odbicia), złącze (odbicie), zgięcie, silne odbicie od końca światłowodu, po którym następuje znaczny spadek mocy odbieranej (bo promieniowanie nie ma skąd już wracać). Ponadto, mierząc nachylenie przebiegu reflektogramu pomiędzy zdarzeniami ($X[\text{dB}]/x[\text{km}]$) można obliczyć tłumienie jednostkowe światłowodu.

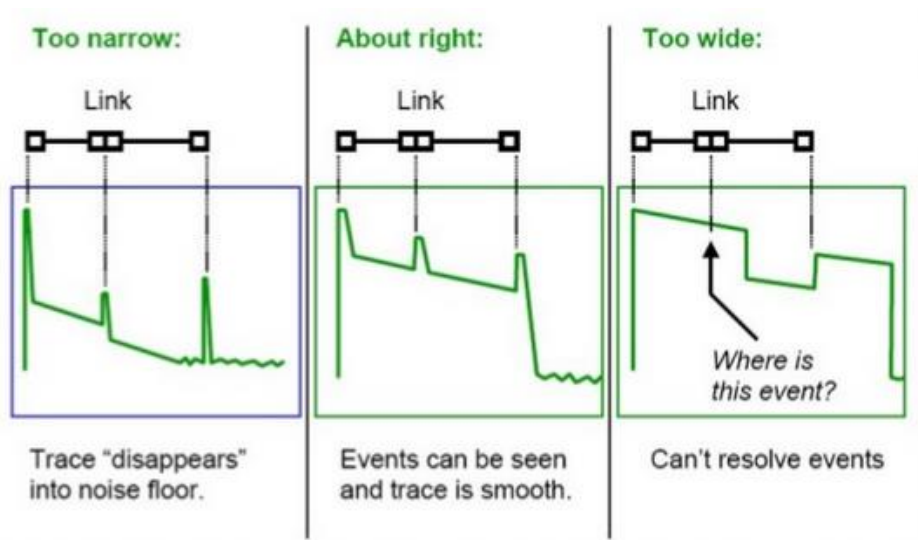
Podstawowe cechy urządzeń OTDR:

1. Dynamika - zależna od czułości fotodetektora, mocy lasera, długości impulsu, czasu uśredniania - maksymalna ilość [dB] na osi OY dla której sygnał powracający odróżniany jest od szumu.
2. Zasięg pomiarowy - najdłuższy odcinek światłowodu dla którego reflektometr będzie w stanie mierzyć zdarzenia.

3. Rozdzielczość - zdolność do identyfikacji zdarzeń położonych blisko siebie - najmniejsza odległość pomiędzy zdarzeniami jaką reflektometr identyfikuje jako dwa osobne zdarzenia.

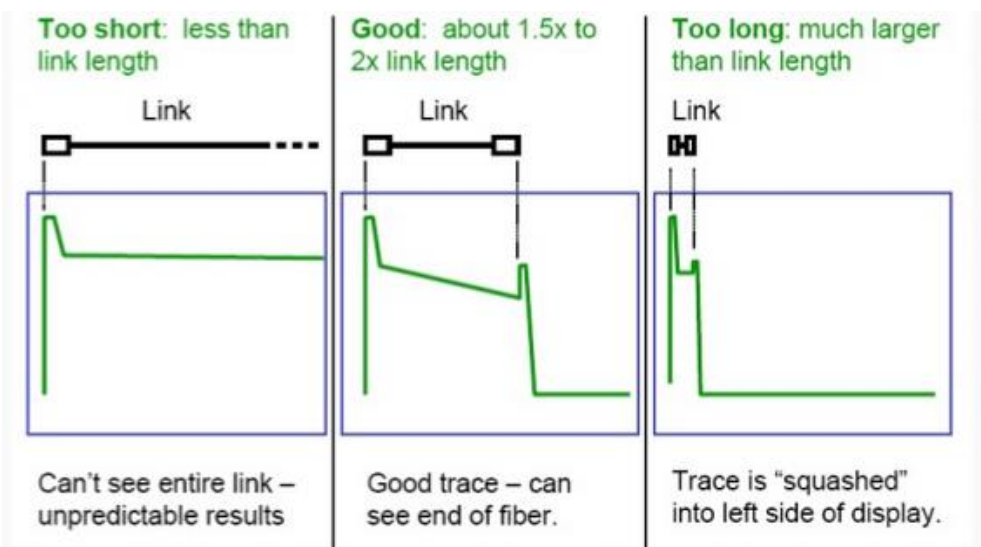
Podstawowe parametry pomiaru

1. Długość fali pomiarowej - typowo 1310 nm i 1550 nm. Mierząc tę samą linię na 2 długościach fali można odróżnić spaw od zgięcia. Zagadka: w jaki sposób?
2. Szerokość impulsu. Reflektometry pozwalają zmieniać szerokość impulsu światła, np. od 10 ns do 20 μ s. Im dłuższy impuls tym lepsza dynamika reflektometru - większa energia wysyłana w linię. Zwiększając długość impulsu 10 krotnie, tyle samo razy wzrasta dynamika. Niestety, o tyleż samo spada rozdzielczość reflektometru.



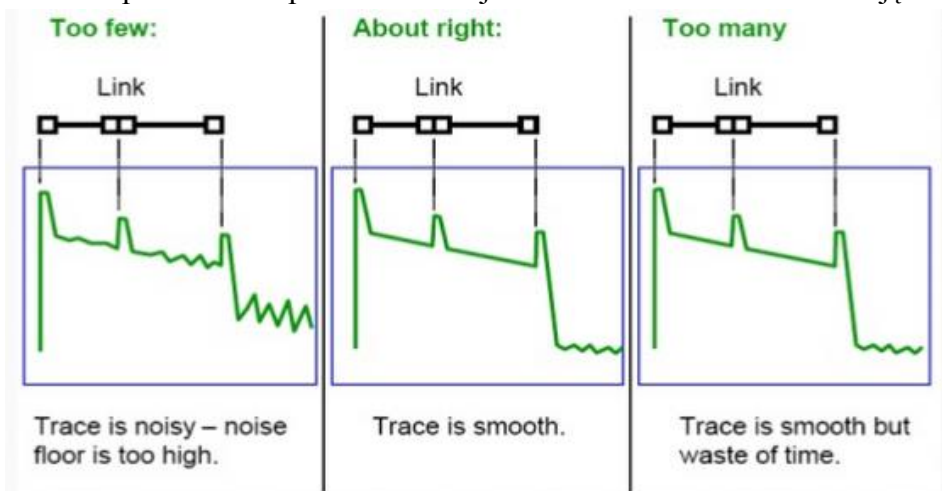
Rys. 2.3. Przykład dobrze i źle dobranej szerokości impulsu

1. Zasięg (ang. range) - predefiniowana odległość do której analizowane są zdarzenia. Powinna być o kilkadziesiąt procent większa niż spodziewana długość linii.
- 2.



Rys. 2.4. Przykład dobrze i źle dobranego zasięgu

4. Czas uśredniania - aby zwiększyć dynamikę, ten sam pomiar powtarzany jest wielokrotnie. N-krotne powtórzenie pomiaru zmniejsza również N-krotnie wariancję szumu

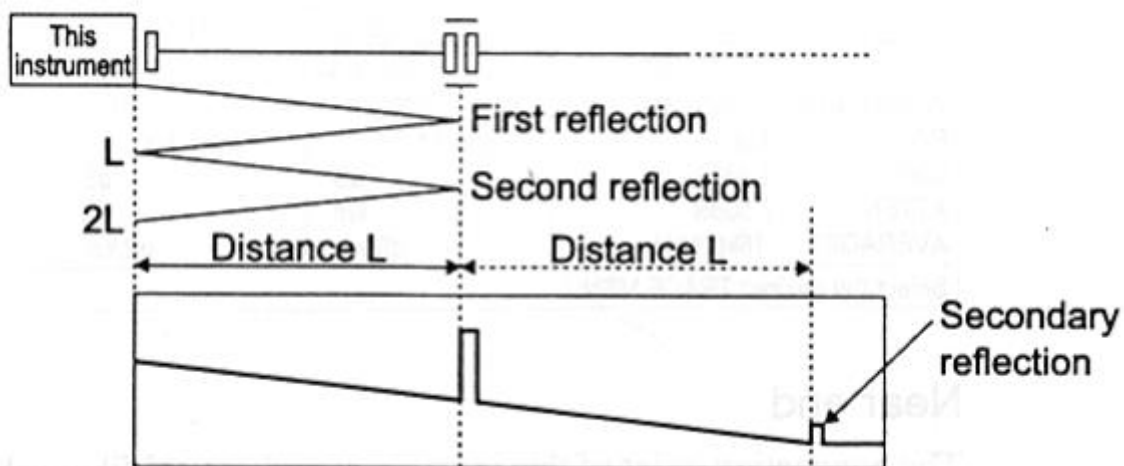


Rys. 2.5. Przykład dobrze i źle dobranego czasu uśredniania

5. Odstęp próbkowania (sampling interval). Niezależnie od szerokości impulsu można ustawić szybkość próbkowania odbiornika, a tym samym rozdzielczość odległościową. Oczywiście przy zbyt szerokim impulsie mniejszy odstęp próbkowania niewiele pomoże, a spowoduje większą zajętość pamięci.

Inne zjawiska

Reflektometr może czasem wprowadzić w błąd. Np. często w reflektogramie widoczne jest silne odbicie w odległości, gdzie już jesteśmy pewni, że nie ma światłowodu. To jest tzw. duch, czyli pik utworzony przez impuls, który odbił się od końca światłowodu, następnie od pierwszego złącza reflektometru i ponownie od końca światłowodu. Tworzenie ducha zilustrowano na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Ilustracja tworzenia się ducha

Podstawowe zasady obsługi urządzenia

1. Reflektometr wysyła silne, niewidzialne dla oka ludzkiego impulsy laserowe. Nie wolno kierować wzroku w końcówkę linii światłowodowej, która jest dołączona do reflektometru. Nie wolno uruchamiać reflektometru gdy nie jest podłączony do niego kabel. Podczas trwania pomiaru nie wolno rozłączać toru i manipulować przy nim.
2. Nie wolno doprowadzić do zapętlenia linii światłowodowej (impuls wysłany dotarłby do fotodiody nie poprzez rozpraszanie ale po prostu wróciłby). Mogłoby to uszkodzić fotodiode.
3. Nie wolno odłączać kabla lub tłumika "connector-saver". Złącza optyczne po ok. 300-500 połączeniach zużywają się mechanicznie. Szczególnej ochronie podlegać musi złącze w drogim urządzeniu jakim jest reflektometr, dlatego należy je chronić przez specjalny patch-cord/tłumik 0 dB.

Literatura pozwalająca rozszerzyć wiedzę potrzebną do wykonania ćwiczeń laboratoryjnych:

- (1) K. Perlicki: *Pomiary w optycznych systemach telekomunikacyjnych*, WKŁ, Warszawa 2002
- (2) J. Siuzdak: *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa 1997, 1999
- (3) K. Holejko: *Podstawy telekomunikacji światłowodowej*, Wydawnictwo Francusko-Polskiej Wyższej Szkoły Nowych Technik Informatyczno-Komunikacyjnych, 1995
- (4) Yokogawa, AQ7280 OTDR Getting Started Guide
- (5) Yokogawa, AQ7280 OTDR User Manual

Sprawdzenie przygotowania studenta do ćwiczenia laboratoryjnego

Przykładowe pytania sprawdzające przygotowanie studenta do ćwiczenia laboratoryjnego:

1. Podaj przyczyny tłumienia mocy optycznej w światłowodzie (wymień dwa podstawowe zjawiska fizyczne).
2. Podaj parametr opisujący straty mocy w światłowodzie, w jakich jednostkach jest on wyrażany oraz podaj wzór opisujący ten parametr.
3. Narysuj wykres przedstawiający przykładową zależność tłumienności światłowodu kwarcowego od długości fali (z zaznaczeniem okien transmisyjnych oraz przyczyn tłumienia na danych długościach fali).
4. Czym jest dyspersja? Przedstaw jej podział.
5. Opisz, czym jest dyspersja chromatyczna oraz przedstaw opisujący ją wzór.
6. Wykreśl typową charakterystykę dyspersji od długości fali.

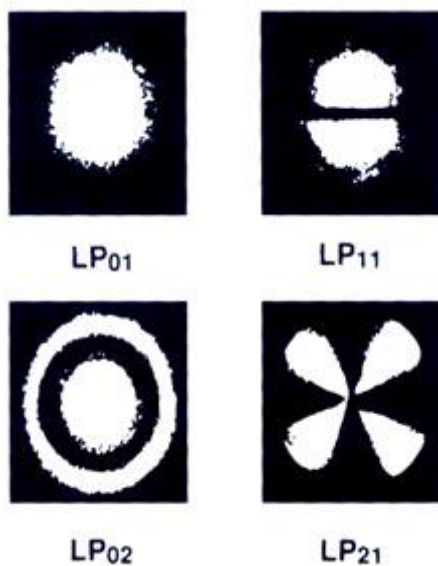
7. Czym jest dyspersja polaryzacyjna oraz czym jest spowodowana?
8. Opisz zasadę działania reflektometru (OTDR).

Część 2: światłowody wielomodowe

W światłowodach wielomodowych mogą rozchodzić się dwa i więcej mody optyczne. W ujęciu optyki geometrycznej każdemu modowi odpowiada promień świetlny o innym kącie pomiędzy kierunkiem propagacji a osią światłowodu. Z uwagi na warunek konstruktywnego sumowania faz, tylko niektóre kąty (mody) są dozwolone. Każdemu modowi odpowiada inna stała propagacji, opóźność grupowa a także przestrzenny rozkład światła w przekroju światłowodu. Przykładowe rozkłady mocy w rdzeniu światłowodu wielomodowego dla kilku modów niższych rzędów pokazano na rys. 1.

Dyspersja modowa, występuje tylko w światłowodach wielomodowych, a spowodowana jest różnymi prędkościami grupowymi dla różnych modów. Z punktu widzenia optyki geometrycznej mody przebywają różną drogę doznając przez to różnych opóźnień.

Zastosowanie światłowodów gradientowych (współczynnik załamania światła zmienia się w sposób ciągły przyjmując maksymalną wartość na osi rdzenia, a minimalną na granicy rdzenia i płaszczu) zmniejsza różnice opóźnień, gdyż mody rozchodzące się w większej odległości od środka poruszają się w ośrodku o mniejszym współczynniku załamania, oznacza to, że mają większą prędkość liniową.



Rys. 1. Rozkład mocy w rdzeniu dla 4 pierwszych modów *LP* [1]

Częstotliwość znormalizowana wyraża się wzorem [1]:

$$v = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5.30)$$

gdzie:

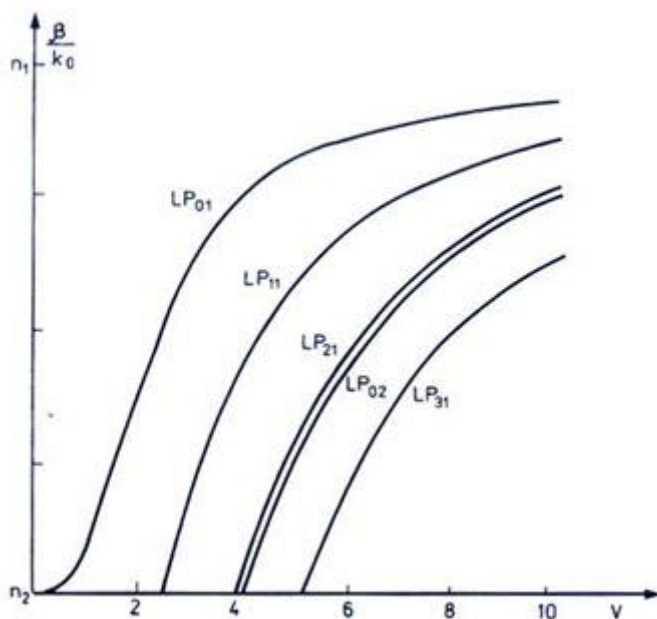
d - średnica rdzenia światłowodu,

λ - długość fali optycznej rozchodzącej się w światłowodzie,

n_1, n_2 - odpowiednio: współczynniki załamania rdzenia i płaszczka.

Dany mod może się rozchodzić w światłowodzie dopiero wtedy, gdy wartość znormalizowanej częstotliwości v przekroczy określoną, charakterystyczną dla każdego modu wielkość, zwaną częstotliwością odcięcia [1].

Charakterystyczną wartością v jest wielkość 2,405 (której odpowiada długość λ_c zwana **długością fali odcięcia**). Dla fal dłuższych niż λ_c , światłowód jest jednomodowy, a dla fal krótszych wielomodowy.



Rys. 2. Przebieg znormalizowanej stałej fazowej β/k_0 w funkcji częstotliwości znormalizowanej dla kilku modów LP najniższego rzędu [1]

Bibliografia

- [1] J. Siuzdak: *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa 1997, 1999

Przygotowanie studenta do ćwiczenia laboratoryjnego

Literatura przygotowująca studenta do ćwiczenia laboratoryjnego

Literatura pozwalająca rozszerzyć wiedzę potrzebną do wykonania ćwiczeń laboratoryjnych:

- (1) J. Siuzdak: *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa 1997, 1999
- (2) K. Perlicki: *Pomiary w optycznych systemach telekomunikacyjnych*, WKŁ, Warszawa 2002

Sprawdzenie przygotowania studenta do ćwiczenia laboratoryjnego

Przykładowe pytania sprawdzające przygotowanie studenta do ćwiczenia laboratoryjnego:

2. Co to jest dyspersja modowa?
3. Co to jest pasmo modowe? Jak pasmo zależy od długości światłowodu?
4. Jak maksymalna szybkość modulacji w światłowodzie związana jest z jego pasmem?
5. Co to jest częstotliwość znormalizowana?
6. Co to jest długość fali odcięcia?
7. Narysuj przebieg znormalizowanej stałej fazowej β/k_0 w funkcji częstotliwości znormalizowanej dla kilku modów *LP* najniższego rzędu. Wyjaśnij co przedstawia wykres.
8. Narysuj rozkład mocy w rdzeniu dla 4 pierwszych modów *LP*.

TRP: Instrukcja do części 2: MMF

Uruchomić skrypt *MMF_main*.

1. Ustaw *odległość lasera* od światłowodu na 100 μm , offset 0 mm. W ten sposób laser równomiernie oświetla cały rdzeń światłowodu.
 - a. Sporządź wykres odwrotności pasma 3 dB od długości światłowodu [x] dla parametru mieszania modów 0 i 5 [1/km]. Dla mieszania 0 wykres zrób od x, a dla mieszania 5 od \sqrt{x} . Jaką zależnością wyraża się odwrotność pasma światłowodu wielomodowego od długości MMF przy braku i przy mieszanii modów? ¹
 - b. Dla ustalonego pasma światłowodu 1 GHz (uzyskanego np. zmianą długości światłowodu) przeprowadź symulację wykresu oczkowego dla różnych przepływności. Jaka maksymalna przepływność jest możliwa do uzyskania przy braku szumu w odbiorniku? Przy jakiej szybkości modulacji oko jest w pełni otwarte?

¹ J. Siuzdak, Wstęp do wsp. transmisji światłowodowej, str. 93

2. Dla ustawień domyślnych zmieniać przesunięcie osiowe (offset) w zakresie od 0 do $25\mu\text{m}$ i wykreślić wykres pasma od offsetu. Podczas przeprowadzania eksperymentu zaobserwować jak zmienia się pobudzenie poszczególnych grup modowych (wykres *Sprężenie źródło światła-światłowód*)
 - a. Dlaczego pasmo zależy od przesunięcia osiowego?
 - b. Czy analizując wykres opóźności grupowych można przewidzieć, dla jakich offsetów pasmo będzie najgorsze?
3. Ustawić offset na $10\mu\text{m}$. Z badać zależność pasma od długości fali (sporządzić wykres) w zakresie od 600 do 1500 nm (co 100 nm). Odpowiedzieć na pytania:
 - a. Jaki rodzaj krzywej otrzymaliśmy?
 - b. Na jakiej długości fali jest maksimum?
 - c. Jak zależy pasmo od profilu opóźności grupowych? Kiedy jest największe?
 - d. Czym charakteryzują się profile opóźności grupowych „po lewej” i „po prawej” stronie od maksimum pasma?