

Laboratorium sieci światłowodowych

Sprawozdanie

Ćwiczenie 5: Pomiary parametrów kabla wielomodowego - miernik mocy

Autor Pierwszy, Autor Drugi, Autor Trzeci

16 maja 2012

Dąbrowa Górnicza 2012

1 Cel ćwiczenia

Doświadczenie przeprowadzane na laboratorium ma na celu zapoznanie z podstawami technologii transmisji danych w torach optycznych.

2 Podstawy teoretyczne

2.1 Całkowite wewnętrzne odbicie

Rozwój techniki światłowodowej możliwy jest dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia. Istnienie tego zjawiska można przewidzieć ze zjawiska załamania światła, które znane było już na przełomie X i XI wieku. W XVII opisywane było już matematycznie (przez Kartezjusza i Snella). Obecnie matematycznie przedstawia się je jako:

$$\frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

gdzie v_i , λ_i to odpowiednio prędkość światła i długość jego fali w i -tym ośrodku, n_i to współczynnik załamania światła i -tego ośrodka, a Θ_1 (Θ_2) to kąt padania (wyjścia) w ośrodku 1 (2), obliczany względem prostej normalnej do powierzchni odbijającej. Wartości v , λ , n są stałymi materiałowymi, dla ustalonych n_1 i n_2 można więc wyliczyć kąt padania $\sin \Theta_1$, dla którego kąt odbicia będzie równy 90° (a $\sin \Theta_2 = 1$), tj. promień *nie wniknie*¹ do ośrodka 2:

¹Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia jest zjawiskiem czysto kwantowym i w rzeczywistości promieniowanie elektromagnetyczne *wnika w 2 ośrodek*, jednak na niewielką głębokość.

$$\Theta_C = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

Jeżeli skonstruujemy przewód, w którym światło biegnąc będzie zawsze padać pod kątem większym niż Θ_C promień świetlny zostanie „zamknięty” w światłowodzie.

2.2 Tłumienność światłowodów

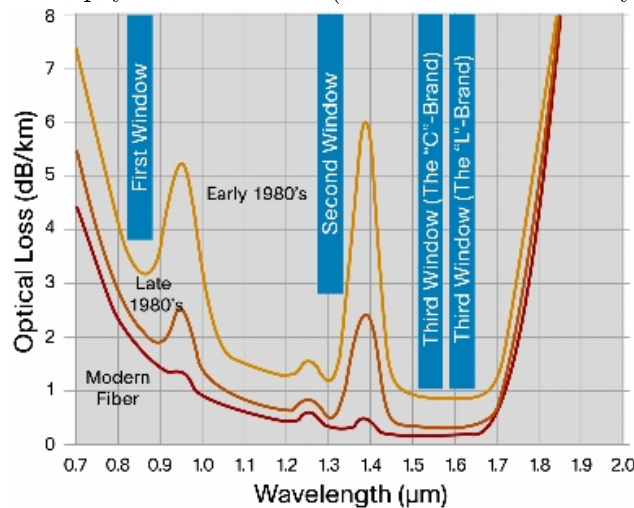
Chociaż zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia wykorzystywane było już na początku XX wieku w przyrządach optycznych, to technika światłowodowa długo była niemożliwa do wykorzystania ze względu na niecałkowitą przezroczystość substancji. Nawet najlepszej jakości szkło okazywało się tłumić sygnał świetlny tak mocno, że praktyczne wykorzystanie światłowodów wydawało się niemożliwością. Miarą przezroczystości substancji jest jej tłumienność α , której definicja wynika z zależności:

$$P_O = P_I e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

gdzie P_O (P_I) to moc wyjściowa (wejściowa) światła w światłowodzie o długości l .

Dopiero odkrycie tzw. okien optycznych dla światła podczerwonego spowodowało błyskawiczny rozwój komunikacji światłowodowej. Okna optyczne są to przedziały długości fali światła, dla których tłumienność w szkłe okazuje się być rzędu wielkości mniejsza niż dla innych długości fal (rys. 1). Trudności związane z emisją i detekcją fal w zakresach trafiających

Rysunek 1: Okna optyczne dla szkła (z materiałów edukacyjnych CISCO)



w okna optyczne spowodowały, że trzecie z okien dla którego tłumienność jest najmniejsza (odpowiadające fali ok. 1550nm) wykorzystuje się dopiero od końca lat 90-tych.

2.3 Propagacja fal elektromagnetycznych o różnej długości

Poważną trudnością w praktycznych zastosowaniach światłowodów okazuje się relacja dyspersyjna substancji. W zależności od długości fali światła prędkość jej rozchodzenia się jest

różna. Ponieważ typowy impuls świetlny nie jest monoenergetyczny, a charakteryzuje go pewne rozmycie, więc na większych odległościach obserwuje się rozmycie impulsu. Rozmycie to może być na tyle silne, że iloraz mocy sygnału do poziomu szumów $\frac{S}{N}$ uczyni światłowód bezużytecznym (gdyż tw. Shannona mówi, że przepustowość łącza jest proporcjonalna do $\log_2(1 + \frac{S}{N})$, gdy $\frac{S}{N} \rightarrow 0$ przepustowość także zmierza do 0). W istotny sposób narzuca to ograniczenie na maksymalną odległość, na jaką propagować można sygnał. Aby uniknąć tego stosuje się odpowiednie kształtowanie impulsu, monochromatyczne światło (laserowe) oraz światłowody na tyle cienkie, że mogą przesyłać tylko jedną długość fali światła (mod), tj. jednomodowe. W praktycznych zastosowaniach jednomodowe światłowody umożliwiają przesyłanie sygnału na setki kilometrów bez wzmacniania i regeneracji sygnału. Zastosowanie światłowodów wielomodowych ogranicza się do odległości mniejszych niż 1km, jednak ze względu na ich większą średnicę znacznie łatwiej się je łączy, co obniża koszty eksploatacji i utrzymania.

2.4 Emisja i dektekcja światła

Wytwarzanie światła nadającego się do transmisji danych okazało się zadaniem dosyć trudnym. W zakresie widzialnym światło źle propaguje się w ciałach stałych. W zakresie podczerwonym, stosowanym w obecnej transmisji światłowodowej potrzebne były źródła światła o dużej mocy, monoenergetycznej wiązce a ponadto musiały dawać się szybko włączać i wyłączać. Dobrym rozwiązaniem okazały się diody półprzewodnikowe, jednak ich masowa produkcja możliwa jest stosunkowo krótko. W zakresie 830-1300nm, dla światłowodów wielomodowych stosuje się diody półprzewodnikowe, zaś dla światłowodów jednomodowych - źródła laserowe (np. oparte o interferometr Fabry-Pérot). Działanie diody elektroluminescencyjnej oparte jest o rekombinację dziur i elektronów w półprzewodniku.

Podstawowymi detektorami światła w elektronice są fotorezystory i fototranzystory. W fotorezystorach promieniowanie świetlne wpływa na wartość oporności. Ze względu na ich dużą bezwładność czasową w technice światłowodowej wykorzystuje się fototranzystory, które wykorzystują w działaniu zjawisko fotoelektryczne: fotony padają na bazę tranzystora generując prąd. Prąd ten powoduje przepływ prądu emiter-kolektor, o większym natężeniu niż fotoprąd. Ze względu na chemiczną i fizyczną budowę fototranzystora prąd ten jest nieliniową funkcją długości fali światła.

3 Aparatura

W ćwiczeniu zastosowany był światłowód szklany średnicy rdzenia $50/125\mu\text{m}$.

Oprócz tego przy konstrukcji toru optycznego wykorzystano:

1. Źródło światła laserowego Apointtech B1315,
2. miernik mocy świetlnej Apointtech C1000,
3. pigtaile,

oraz spawarkę to światłowodów.

4 Wyniki

4.1 Współczynniki tłumienia dla różnych długości fal światła i światłowodów.

Wyniki pomiarów mocy sygnału świetlnego przedstawia tabela 1.

Tablica 1: Wyniki pomiarów mocy światła dla światłowodów o długości 0,97m i 2,94m, dla źródła laserowego fal o długościach 1310nm i 1560nm [μW]. Wartość średnia jest średnią arytmetyczną zmierzonych wartości, obarczona niepewnością równą odchyleniu standardowemu średniej.

Laser światłowod	1310nm		1560nm	
	0,97m	2,94m	0,97m	2,94m
1.	66,5	34,1	76,4	43,0
2.	66,3	34,2	76,3	43,1
3.	66,3	34,1	76,2	44,0
4.	66,5	34,2	76,6	43,7
5.	66,4	34,1	76,5	43,7
6.	66,7	34,1	76,5	43,0
7.	66,3	34,0	76,5	44,0
8.	66,5	34,0	76,6	41,9
9.	66,4	34,1	76,5	44,2
10.	66,3	34,0	76,9	44,2
średnia	$66,4 \pm 0,1$	$34,1 \pm 0,1$	$76,5 \pm 0,2$	$43,5 \pm 0,7$

Miarą strat sygnału w światłowodzie może być współczynnik osłabienia, wyznaczony z równania 1. Niech P_0 oznacza moc światła wchodzącego do światłowodu, P_1 i P_3 oznaczają moc światła wychodzącego ze światłowodu odpowiednio 1- i 3-metrowego, a l_1 i l_3 oznaczają ich długości. Wtedy:

$$\begin{cases} P_3 = P_0 e^{-\alpha l_3} \\ P_1 = P_0 e^{-\alpha l_1} \end{cases} \quad (2)$$

Dzieląc pierwsze z równań przez drugie i logarytmując stronami otrzymujemy:

$$\ln \frac{P_3}{P_1} = \alpha(l_1 - l_3),$$

co pozwala wyznaczyć współczynnik osłabienia:

$$\alpha_n = \frac{\ln \frac{P_3}{P_1}}{l_1 - l_3}, \quad (3)$$

a niepewność wyznaczenia α_n propaguje się z niepewności P_3, P_1, l_3, l_1 co można wyliczyć metodą różniczki zupełnej:

$$\delta\alpha_n = \sqrt{\left| \frac{\delta P_3}{P_3(l_1 - l_3)} \right|^2 + \left| \frac{\delta P_1}{P_1(l_1 - l_3)} \right|^2 + \left| \frac{\delta l_1 \ln(\frac{P_3}{P_1})}{(l_1 - l_3)^2} \right|^2 + \left| \frac{\delta l_3 \ln(\frac{P_3}{P_1})}{(l_1 - l_3)^2} \right|^2}.$$

Aby wynik móc porównać z wartościami tablicowymi lepiej wykorzystać logarytm dziesiętny i (korzystając z definicji decybel) pomnożyć wsp. α_n przez 10:

$$\alpha = \frac{10 \log \frac{P_3}{P_1}}{l_1 - l_3} \left[\frac{dB}{m} \right]. \quad (4)$$

Korzystając z powyższego wzoru oraz z otrzymanych średnich wartości mocy można obliczyć współczynnik osłabienia (tabela 2).

Tablica 2: Współczynniki α dla światła zielonego, czerwonego i podczerwonego w dB/m . Niepewność wyznaczona jest metodą różniczki zupełnej.

$\alpha[dB/m]$	światło	
	1310nm	1560nm
	$0,147 \pm 0,001$	$0,125 \pm 0,004$

4.2 Obliczenie mocy wejściowej i wyjściowej światła

Przy wybranych jednostkach równanie 2 przyjmuje postać:

$$\begin{cases} P_3 = P_0 10^{-\frac{\alpha}{10} l_3} \\ P_1 = P_0 10^{-\frac{\alpha}{10} l_1} \end{cases} .$$

Przekształcając je i korzystając ze znajomości wartości liczbowej α możemy wyliczyć moc wyjściową P_0 :

$$\begin{cases} P_0 = P_3 10^{\frac{\alpha}{10} l_3} \\ P_0 = P_1 10^{\frac{\alpha}{10} l_1} \end{cases} .$$

Tabela 3 przedstawia otrzymane wartości.

Tablica 3: Mocy wejściowej światła dla przewodu $1m[\mu W]$

światło	przewód 1m
1310nm	92,7
1560nm	101,0

4.2.1 Moc wyjściowa światła po przejściu przez światłowód 1500m

Korzystając z otrzymanych wartości można wyliczyć z równania:

$$P_{1500} = P_0 10^{-l \frac{\alpha}{10}}$$

moc wyjściową światła, gdyby przeszło przez światłowód o długości $l = 1500m$. Tabela 4 przedstawia otrzymane wyniki.

Tablica 4: Moc światła po przejściu przez światłowód 1500m [μW]

światło	1500m
1310	$5,6 \cdot 10^{-218}$
1560	$8,48 \cdot 10^{-185}$

5 Omówienie wyników i podsumowanie

5.1 Omówienie otrzymanych wyników

5.1.1 Porównanie współczynników tłumienia z wartościami tablicowymi

Otrzymane liczbowe wartości współczynnika tłumienia zupełnie nie zgadzają się (nawet co do rzędu wielkości) z parametrami światłowodu, gdyż dla fali 1310nm powinny być rzędu $0,2 \frac{dB}{km}$ (podkreślamy jednostkę: $\frac{dB}{km}$), tymczasem wyliczone wartości są rzędu $0,15 \frac{dB}{m}$. Różnica między zmierzonymi i tablicowymi wartościami sięga więc trzech rzędów wielkości. Ponieważ pomiary wykonywane były wielokrotnie i dawały wyniki z rozsądnym rozkładem, a obliczenia wykonane niezależnie przez członków sekcji doświadczalnej wydaje się, że przyczyną musi leżeć po stronie fizycznych własności badanych układów.

Uzasadnieniem błędu wyznaczenia współczynników osłabienia sygnału wydaje się być spadek mocy na złączach oraz mała różnica długości światłowodów, służących do wyznaczenia α . Spadek mocy w przypadku szklanego światłowodu w obszarze jego okien optycznych na długości 2m powinno być rzędu 0,001dB, tymczasem niedokładność pomiaru sięga 0,2dB, ze względu na dosyć duży rozrzut otrzymanych wartości mocy. Rozrzut ten może spowodowany być zarówno uszkodzeniem fizycznym światłowodu, zmianą jego ułożenia w trakcie eksperymentu, jak i niskiej jakości złączami.

Ponieważ złącza były różne dla kabla 1 i 3 metrowego, a rozrzut w spadku mocy na nich może sięgać 0,5dB nie ma możliwości wiarygodnie ocenić różnicy w mocy wychodzącej z kabla 1 i 3 metrowego. O rozrzucie spadku sygnału na złączu świadczyć może fakt, że pomiary dla kabla 1m przeprowadzaliśmy dla światłowodu wykonanego fabrycznie oraz wykonanego samodzielnie i zmierzone wartości mocy transmitowanego wynoszą odpowiednio $66\mu W$ oraz $52\mu W$, mimo praktycznie takiej samej długości światłowodu oraz takiego samego źródła światła i odbiornika mocy.

Wreszcie stabilność źródła laserowego jest rzędu $\pm 0,05dBm$ (wg producenta), co także jest wielkością większą niż wyznaczana. Wszystkie te błędy propagowały się na wyliczone wartości α w efekcie dając nieprawidłowe wartości.

5.1.2 Omówienie mocy wejściowej i wyjściowej światła

Moc światła emitowanego przez źródło laserowe podawana przez producenta jest równa ok $500\mu W$ ($-3dBm$). Zmierzone wartości mocy są rzędu $80\mu W$, a wyliczona na podstawie α moc wejściowa źródła - rzędu $100\mu W$. Duża różnica spowodowana jest zapewne numeryczną aperturą światłowodu oraz spadkiem mocy na złączach.

Różnica otrzymanej w drodze obliczeń mocy wejściowej i zmierzonej eksperymentalnie mocy wyjściowej wynosi ok. $20\mu W$. W przypadku światłowodu szklanego wartość ta w zasadzie nie powinna być mierzalna i wydaje się, że spadek mocy nie wynika z współczynnika

tłumienności światłowodu, a raczej z różnego tłumienia sygnału na złączach w kablu 1- i 3-metrowym.

Moc wyjściowa dla kabla 1500m, wyliczona dla otrzymanych współczynników α , jest mniejsza niż $10^{-215}\mu W$, co jest wielkością tak małą, że sygnał nie dotarłby do końca światłowodu wcale. Ponownie - mała otrzymana wartość wynika z zbyt dużej wartości wyznaczonego α .

6 Obliczenia według instrukcji laboratoryjnej

Współczynniki liczbowe α , otrzymane ze wzoru 3 różnią się tylko czynnikiem multiplikatywnym od tych z równania 4 (α_n). Wyliczana moc wejściowa i wyjściowa powinny dawać być takie same w obydwu przypadkach. W niniejszym rozdziale pokrótce przedstawiamy wyniki otrzymane przy pomocy równań podanych w instrukcji laboratoryjnej. Tabele 5-8 przedstawiają otrzymane wyniki. Z porównania tabeli 4 z tabelą 8 widać, że otrzymane wartości mocy są takie same.

Tablica 5: Zmierzone średnie wartości mocy dla światłowodu 3 i 1 metrowego [μW]

światło [nm]	P_3	P_1
1310	34,1	66,4
1560	43,5	76,5

Tablica 6: Wyliczenie współczynnika osłabienia sygnału

Światło	$\frac{P_3}{P_1}$	$\ln \frac{P_3}{P_1}$	$\alpha = \frac{\ln \frac{P_3}{P_1}}{1-3}$
1310nm	0,513	-0,667	0,333
1560nm	0,568	-0,565	0,283

Tablica 7: Obliczenie mocy wejściowej dla światłowodu długości 1m [μW]

światło [nm]	P_1	α	$e^{\alpha(1)}$	$P_0 = P_1 e^{\alpha(1)}$
1310	66,4	0,333	1,40	92,7
1560	76,5	0,283	1,33	101

6.1 Wnioski

Wartości α otrzymane w doświadczeniu bardzo mocno różnią się od wyników tablicowych. Autorom wydaje się, że wynika to z sumarycznego wpływu trzech czynników: różnicy w spadkach mocy na złączach światłowodów służących do wyznaczenia α , niestabilności źródła światła wystarczającej do zmierzenia różnic w spadku mocy na kablach o różnicy długości 2m (lub też zbyt małej różnicy długości) oraz niestabilności źródła światła wystarczającej do wykonania tak precyzyjnego pomiaru, aby na 2m zaobserwować spadek mocy światła.

Duże wartości współczynnika osłabienia α powodują, że wyliczone dla światłowodów 1500m spadki mocy transmitowanego sygnału są pozbawione sensu ($\frac{P_{1500}}{P_0} < 10^{-215}$). Także

Tablica 8: Obliczenie mocy wyjściowej dla światłowodu 1500m [μW]

światło	P_0	α	$l[m]$	$e^{-\alpha(1500)}$	$P_{1500} = P_0 e^{-\alpha(1500)}$
1310	92,7	0,333	1500	$5,57 \cdot 10^{-218}$	$5,17 \cdot 10^{-216}$
1560	101,0	0,283	1500	$8,48 \cdot 10^{-185}$	$8,61 \cdot 10^{-183}$

różnica pomiędzy mocą sygnału emitowanego i odbieranego po przebyciu 1m, sięgająca $20\mu W$ (20% mocy wchodzącej do światłowodu) jest tak duża, że gdyby rzeczywiście światłowód wykazywał taką tłumienność, to nadawałby się co najwyżej do zastosowań lokalnych.

Literatura

- [1] Materiały szkoleniowe udostępniane przez Cisco na www.cisco.com (linki 1, 2)
- [2] Materiały firmy Appointech dotyczące źródła światła B2000 (następcy B1315, do którego dokumentacji niestety nie udało się dotrzeć autorom) (link)
- [3] *Sieci komputerowe*, A. S. Tanenbaum, Helion 2006