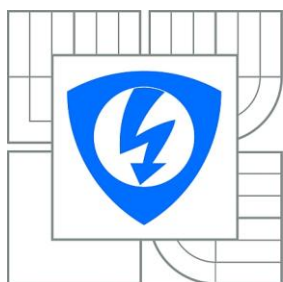


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

LIMITUJÍCÍ FAKTORY OPTICKÉHO VLÁKNA NA PŘENOSOVOU KAPACITU OPTICKÝCH TRAS

OPTICAL FIBRE FACTORS THAT LIMIT THE TRANSMISSION CAPACITY OF OPTICAL LINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ ROUČA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL REICHERT

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Tomáš Rouča
Ročník: 3

ID: 106751
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Limitující faktory optického vlákna na přenosovou kapacitu optických tras

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Analyzujte působení útlumu optického vlákna na přenosovou kapacitu optického vlákna a popište požadavky přenosového systému na spektrální charakteristiku. Dále charakterizujte mechanismy útlumu a disperze optického vlákna a jejich spektrální závislost. Toto proveďte s ohledem na nasazení vysokorychlostních přenosových systémů xWDM. Dále navrhnete a sestavte matematický model spektrální útlumové charakteristiky optického vlákna.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Přenosová média. Skripta laboratoře. VUT FEKT, Brno 2003.
- [2] BLAŽEK, V., BROUČEK, J.: Měření a diagnostika v optických přístupových sítích FTTx, seminář ČVTSS, Praha 2005
- [3] Pužmanová, R.: Komunikace – normalizace, DATA COMMUNICATIONS č.6/99

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 2.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Pavel Reichert

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce blíže specifikuje působení útlumu a disperze optických vláken v souvislosti s ovlivněním šířky pásma přenášeného signálu a kapacity přenesených dat. Dále se zabývá vlivy působícími na optický signál při průchodu optickým vláknem a mechanismy, které vedou k zeslabení nebo úplnému potlačení signálu.

První kapitola detailně popisuje přenosové prostředí optických vláken z hlediska charakteristiky útlumu signálu, ztrátám způsobeným nešetrnou manipulací s optickým vláknem, výrobními a materiálovými specifikacemi, které mají za následek rozptyl nebo absorpci přenášeného signálu. Také též popisem vláknové disperze, jejímž následkem se zmenšuje spektrum přenášeného signálu a tím i množství dat, které lze v určitém časovém okamžiku přenést na definovanou vzdálenost.

Druhá kapitola se zabývá analýzou působení útlumu a disperze optického vlákna na kapacitu přenosu u v současnosti používaných optických kabelů, mechanických spojek, konektorů a aktivních prvků. A to uvedením několika málo příkladů reálných přenosových tras s ohledem na spektrální charakteristiku přenosu, kterou uvedené systémy vyžadují. Do této studie jsou zahrnuty i používané protokoly pro přenos informace pomocí xWDM systémů.

Třetí kapitola pojednává o moderních metodách navázání několika optických signálů do jediného přenosového vlákna. Zvláštní pozornost je věnována popisu principu sdružování kanálů v oblasti optických kmitočtů xWDM, jelikož je tato metoda v současnosti již standardním řešením přenosu informací optickým vláknem pro její výrazně větší využití přenosové kapacity, delší překlenutelné vzdálenosti při zachování rychlosti přenosu a možnosti jejího pružného rozšíření bez nutnosti pokládky nových kabelů a tím i snížení nákladů na výstavbu přenosových tras.

Poslední kapitola je zaměřena na popis realizace matematického modelu spektrální útlumové charakteristiky optického vlákna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Útlum, absorpční ztráty, rozptylové ztráty, disperze, vlnový multiplex

ABSTRACT

Bachelor's thesis more closely specifies effects of attenuation and dispersion of optical fibers in connection with influencing transmitted signal bandwidth and data transfer capacity. It also examines the influences acting on the optical signal passes through an optical fiber and the mechanism that lead to the attenuation or complete suppression of the signal.

The first chapter describes in detail the transmission environment in terms of optical fiber attenuation characteristics of the signal loss caused by rough handling of the optical fiber, manufacturing and material specifications, resulting in scattering or absorption of the transmitted signal. Also, whether the description of fiber dispersion, resulting in the shrinking spectrum of transmitted signal and thus the amount of data at a certain point in time transfer to a defined distance.

The second chapter analyzes the effects of attenuation and dispersion in fiber optic transmission capacity currently used in presently optic cables, mechanical couplings, connectors and active components. By mentioning a few examples of real transmission lines with regard to the spectral transmission characteristics that these systems require. This study also includes protocols used to transfer information using xWDM systems.

The third chapter deals with modern methods to establish a number of optical signals into a single transmission fiber. Particular attention is devoted to describing the principle of association of the channels in the optical frequencies xWDM, since this method does not currently have a standard solution of information transmission optical fiber for its use significantly more bandwidth, longer distances while maintaining vaulted speed transmission and the possibility of flexible extension without laying new cables and reduce the cost of building transmission lines.

The last chapter focuses on describing the implementation of a mathematical model to the spectral characteristics of optical fibers.

KEYWORDS

Attenuation, absorption loss, scattering loss, dispersion, wave-division multiplexing

ROUČA, T. *Limitující faktory optického vlákna na přenosovou kapacitu optických tras*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Reichert.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Limitující faktory optického vlákna na přenosovou kapacitu optických tras jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Reichertovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Útlum a Disperze v optických vláknech	2
1.1 Útlum optických vláken	2
1.1.1 Ohybové ztráty	3
1.1.2 Ztráty v důsledku absorpce	4
1.1.3 Příměšová absorpce	5
1.1.4 Rayleigho rozptyl	7
1.1.5 Mieův rozptyl	7
1.2 Disperzní ztráty	8
1.2.1 Materiálová disperze	9
1.2.2 Vlnovodová disperze	11
1.2.3 Chromatická disperze	12
1.2.4 Vidová disperze	13
1.2.5 Polarizační disperze	14
2 Působení útlumu a disperze na kapacitu přenosové trasy	17
2.1 Analýza návrhu skutečných optických tras	18
2.1.1 Příklady návrhu reálné optické trasy	20
2.1.2 10 Gigabit Ethernet	23
3 Vícekanálové světlovodné spoje	25
3.1 Technologie vlnového multiplexu WDM	26
3.1.1 Původní WDM (Wavelength Division Multiplexing)	26
3.1.2 WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)	27
3.1.3 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)	27
3.1.4 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)	29
3.1.5 Příklad návrhu reálné CWDM trasy	30

4	Matematický model spektrální útlumové charakteristiky optického vlákna	31
5	Závěr	32
	Literatura	33
	Seznam zkratek a symbolů	34

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Ohyb optického vlákna.....	3
Obrázek 2: IR/UV absorpce a Rayleigho rozptyl	5
Obrázek 3: Celková závislost útlumu na vlnové délce.....	6
Obrázek 4: Průběh závislosti vlnové délky indexu lomu n na skupinovém indexu lomu n_{sk} u čistého křemičitého skla	10
Obrázek 5: Závislost materiálové disperze na vlnové délce pro čisté křemenné sklo	11
Obrázek 6: Závislost vlnovodové disperze pro vid LP ($\lambda=1\mu m$, $\Delta=0,001$) na frekvenci V	12
Obrázek 7: Závislost koeficientu chromatické disperze D na vlnové délce záření pro vlákno z křemenného skla	13
Obrázek 8: Závislost skupinového zpoždění vidů τ_{sk} na souhrnném vidovém čísle pro vlákna s různým koeficientem α	14
Obrázek 9: Příklad Polarizační vidové disperze	15
Obrázek 10: Závislost útlumu b_1 a chromatické disperze D_1 jednovidových světlovodů na vlnové délce	16
Obrázek 11: Dosah digitálního světlovodného spoje v závislosti na přenosové rychlosti	17
Obrázek 12: Úrovňový diagram světlovodného spoje	19
Obrázek 13: Detailní zobrazení útlumového rozpočtu na trasu pro 100Mhz Ethernet [9]	22
Obrázek 14: Příklad vlnového multiplexu s řídkým kanálováním	26
Obrázek 15: Rozložení kanálů CWDM dle standardu ITU-T G.652.....	30
Obrázek 16: Program pro analýzu matematického modelu spektrální útlumové charakteristiky optického vlákna	31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty útlumu některých iontů kovu při koncentraci nečistot $1:10^9$	4
Tabulka 2: Jednotlivá pásma vlnových délek optických oken jednovidových vláken [1]	6
Tabulka 3: Hodnoty útlumu a šířky pásma používaných optických kabelů dle normy EIA 568-B.3 [15].....	18
Tabulka 4: Hodnoty útlumu a zpětného odrazu optických konektorů dle normy EIA 568-B.3 [15].....	18
Tabulka 5: Detailní výpis útlumového rozpočtu na trasu pro 100Mhz Ethernet [9]	22
Tabulka 6: Závislost šířky pásma na překlenutelné vzdálenosti pro Gigabit Ethernet [8]	23
Tabulka 7: Závislost šířky pásma na překlenutelné vzdálenosti pro 10 Gigabit Ethernet [8]	24
Tabulka 8: Výpis vhodných typů optických vláken v závislosti na délce optické trasy a typu přenosu [8]	24
Tabulka 9: Tabulka vlnových délek části pásma „C“ DWDM 100GHz podle standardu ITU-T G.694.1 [18].....	28
Tabulka 10: Rozložení vlnových délek CWDM podle standardu ITU-T G.694.2 [19]..	29

ÚVOD

Bakalářská práce blíže specifikuje působení útlumu a disperze optických vláken v souvislosti s ovlivněním šířky pásma přenášeného signálu a kapacity přenesených dat. Dále se zabývá vlivy působícími na optický signál při průchodu optickým vláknem a mechanismy, které vedou k zeslabení nebo úplnému potlačení signálu.

První kapitola detailně popisuje přenosové prostředí optických vláken z hlediska charakteristiky útlumu signálu, ztrátám způsobeným nešetrnou manipulací s optickým vláknem, výrobními a materiálovými specifikacemi, které mají za následek rozptyl nebo absorpci přenášeného signálu. Také též popisem vláknové disperze, jejímž následkem se zmenšuje spektrum přenášeného signálu a tím i množství dat, které lze v určitém časovém okamžiku přenést na definovanou vzdálenost.

Druhá kapitola se zabývá analýzou působení útlumu a disperze optického vlákna na kapacitu přenosu u v současnosti používaných optických kabelů, mechanických spojek, konektorů a aktivních prvků. A to uvedením několika málo příkladů reálných přenosových tras s ohledem na spektrální charakteristiku přenosu, kterou uvedené systémy vyžadují. Do této studie jsou zahrnuty i používané protokoly pro přenos informace pomocí xWDM systémů.

Třetí kapitola pojednává o moderních metodách navázání několika optických signálů do jediného přenosového vlákna. Zvláštní pozornost je věnována popisu principu sdružování kanálů v oblasti optických kmitočtů xWDM, jelikož je tato metoda v současnosti již standardním řešením přenosu informací optickým vláknem pro její výrazně větší využití přenosové kapacity, delší překlenutelné vzdálenosti při zachování rychlosti přenosu a možnosti jejího pružného rozšíření bez nutnosti pokládky nových kabelů a tím i snížení nákladů na výstavbu přenosových tras.

Poslední kapitola je zaměřena na popis realizace matematického modelu spektrální útlumové charakteristiky optického vlákna.

1 ÚTLUM A DISPERZE V OPTICKÝCH VLÁKNECH

1.1 Útlum optických vláken

Z hlediska šíření optického záření představují optická vlákna ztrátové a disperzní prostředí. Tyto vlastnosti způsobují tlumení optického signálu při průchodu vlnovodem a zároveň i jeho rozptýlení v čase.

Měřítkem celkových ztrát ve vláknech je jeho útlum udávaný v decibelech (dB).

Útlum optického vlákna:

$$u(\lambda) = 10 \cdot \log(P_1/P_2) \quad [\text{dB}] \quad (1.1.)$$

kde P_1 a P_2 je optický výkon naměřený na začátku a na konci vlákna.

Dalším neméně významným parametrem útlumu optických vláken je koeficient útlumu, což je útlum vztažený na jednotkovou délku vlákna.

Koeficient útlumu optického vlákna:

$$\alpha(\lambda) = u(\lambda)/L \quad [\text{dB.km}^{-1}] \quad (1.2.)$$

kde L značí délku vlákna v kilometrech.

Útlum a koeficient útlumu představují základní a zároveň nejdůležitější přenosové parametry optického vlákna a potažmo i celé optické trasy. Jsou měřítkem kvality vlákna a umožňují výpočet maximálního dosahu optického spoje. [10] [12] [13]

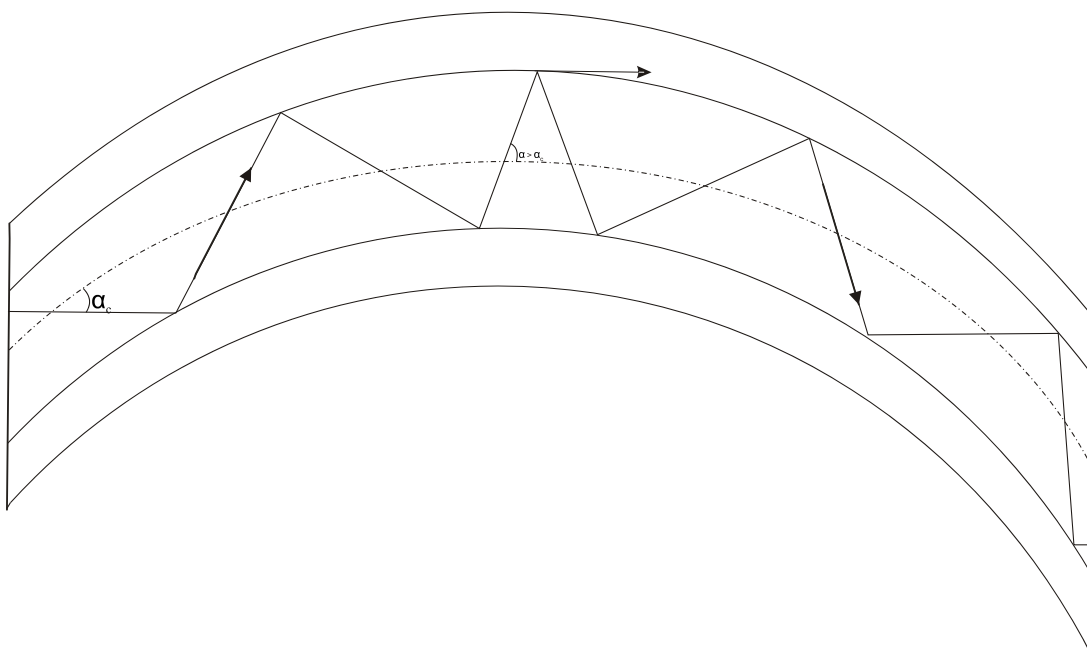
1.1.1 Ohybové ztráty

Tyto ztráty jsou způsobeny přílišným ohybem vlákna, respektive pro část vedené energie vidu je porušena podmínka úplného odrazu na rozhraní jádra a pláště, paprsek dopadá pod větším úhlem a láme se do pláště. Další jev, přispívající k ohybovým ztrátám je fotoelastický jev, při kterém se index lomu vlákna stává funkcí tlaku. Při ohybu vlákna vzniká na vnitřní straně tlak a na vnější tahové napětí, čímž dochází ke změně indexů lomu v jádře a plášti. [5]

Koeficient ohybových ztrát:

$$\alpha_r = c_1(R) \cdot e^{-c_2(R) \cdot R} \quad (1.3.)$$

kde R je poloměr zakřivení vlákna.



Obrázek 1: Ohyb optického vlákna

Pro úplnou ztrátu energie ve vlákne se zavádí pojem kritický poloměr zakřivení vlákna. Citlivost vlákna na ohyby je úměrná poloze vedení světla jádrem optického vlákna. Čím více se poloha vedení jednotlivých vidů přibližuje jádru optického vlákna, tím méně jej ovlivňují ohybové ztráty. U starších typů jednovídných vláken je tato hodnota zhruba $R_{cs} = 10\text{ mm}$, čehož lze v praxi například neodborným uložením lehce dosáhnout, proto je nutné při návrhu trasy s tímto parametrem počítat. Pro mnohovidová vlákna bývá hodnota kritického poloměru $R_c = 10^9\mu\text{m}$, toto zakřivení je v praxi nedosažitelné. [5] [10]

Kritický poloměr mnohovidového vlákna:

$$R_c \cong \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda}{4\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad [\text{m}] \quad (1.4.)$$

Kritický poloměr jednovidového vlákna:

$$R_{cs} \cong \frac{20 \cdot \lambda}{(n_1 - n_2)^2} \cdot \left(2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad [\text{m}] \quad (1.5.)$$

Redukce ohybových ztrát:

- Návrh trasy z velkými poloměry zakřivení
- Přesunutí přenosového pásna signálu do nižších vlnových délek (ale vyvstává problém z Rayleiho rozptylem)

Současná vlákna typu G.657.C dle doporučení ITU-T jsou odolná na mikroohyby až do poloměru 5mm.

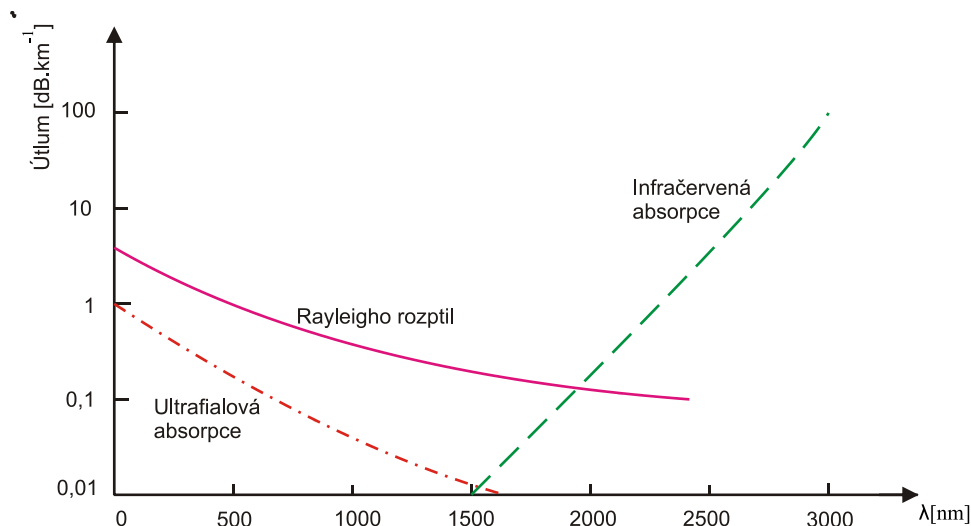
1.1.2 Ztráty v důsledku absorpce

Absorpce je jev, kdy se elektromagnetická energie mění v energii tepelnou. V oblasti krátkých vlnových délek je způsobena v důsledku vybuzení elektronů z valenčního do vodivostního pásu a nastává tak absorpce v ultrafialové oblasti. Při vyších vlnových délkách vznikají ztráty následkem rozkmitu molekul oxidu křemíku, tato absorpce se nazývá absorpcí v infračervené oblasti. Další absorpční ztráty vznikají na nečistotách, například kovové ionty Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} v oblasti vlnových délek od 0,8 do 1,0 μm při koncentraci 1 partes per milion (ppm) zvyšují koeficient absorpce až 10^3 dB/km .

Tabulka 1: Hodnoty útlumu některých iontů kovu při koncentraci nečistot $1:10^9$

Ionty	Vlnová délka maxima absorpce [nm]	Útlum [$\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$]
Cr^{3+}	625	1,6
C^{2+}	685	0,1
Cu^{2+}	850	1,1
Fe^{2+}	1100	0,68
Fe^{3+}	400	0,15
Ni^{2+}	650	0,1
Mn^{3+}	460	0,2
V^{4+}	725	2,7

V současnosti se však zdokonalením výrobního procesu dosahuje hodnot kovových iontů okolo 10^{-3} ppm a absorpce je tím posunuta na hodnotu desetin dB/km, jak je uvedeno v Tab. 1. [2] [5] [6]



Obrázek 2: IR/UV absorpce a Rayleigho rozptyl

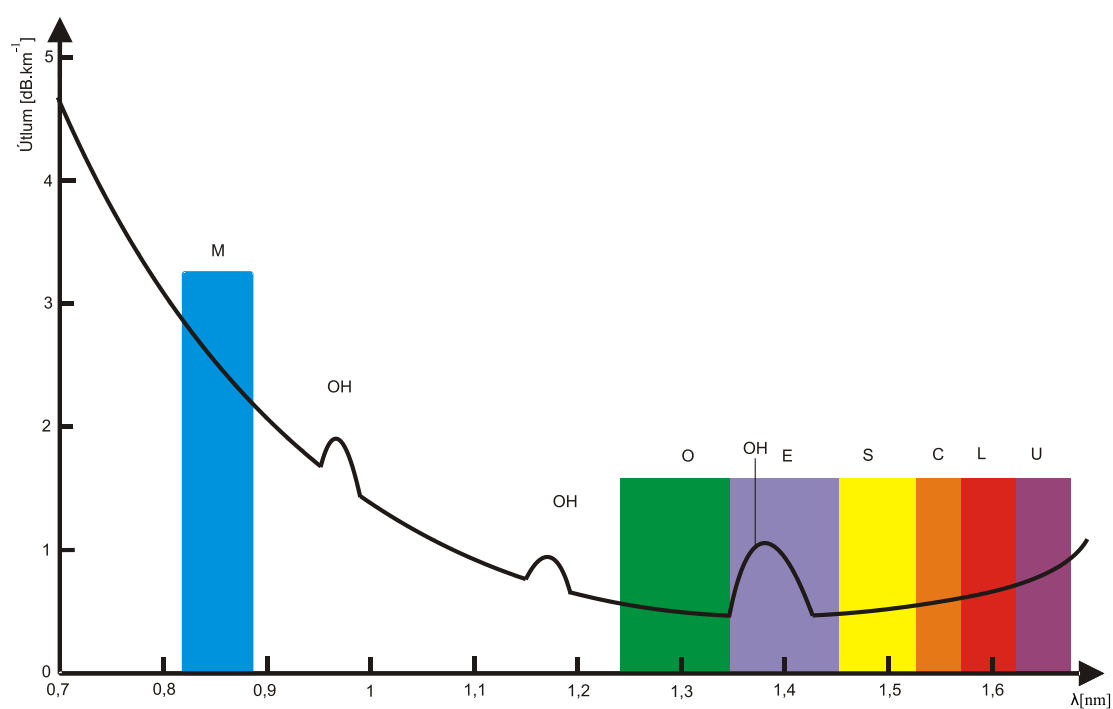
1.1.3 Příměsová absorpce

Největší příměsová absorpce je zapříčiněna absorpcí fotonů na hydroxidových iontech (OH). Příměs OH iontů vytváří ve skle mikrotrhliny, díky kterým je sklo náchylné na praskání.

Průběh útlumu OH iontů:

- základní vibrační módy $2,7\text{ }\mu\text{m}$ a $4,2\text{ }\mu\text{m}$
- vyšší harmonické $1,38\text{ }\mu\text{m}$, $0,95\text{ }\mu\text{m}$, $0,72\text{ }\mu\text{m}$
- kombinační složky $1,24\text{ }\mu\text{m}$, $1,13\text{ }\mu\text{m}$, $0,88\text{ }\mu\text{m}$

Souhrn útlumu světlovodů i se znázorněním jednotlivých pásem přenosu jednovídných optických vláken je naznačen na Obr. 3. [3] [4] [5]



Obrázek 3: Celková závislost útlumu na vlnové délce

Tabulka 2: Jednotlivá pásma vlnových délek optických oken jednovidových vláken [1]

Pásma	Název	Rozsah [nm]
O	Original	1260 – 1360
E	Extended	1360 – 1460
S	Short	1460 – 1530
C	Conventional	1530 – 1565
L	Long	1565 – 1625

1.1.4 Rayleigho rozptyl

Je dominujícím jevem v oknech pro optické komunikace. Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky, při níž se vytvářejí malé nehomogenity ve srovnání s vlnovou délkou přenášeného světla. Tyto nehomogenity následně ovlivňují index lomu vlákna. Dá se pouze částečně odstranit vylepšením technologie výroby vlákna. Jeho hodnota se dá popsat Rayleigho rozptylovým koeficientem. [5] [6]

Rayleigho rozptylový koeficient pro jednosložková vlákna:

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^2} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot kT_F \quad (1.6.)$$

Propustnost po Rayleigho rozptylu:

$$T_r = e^{-\gamma_r \cdot L} \quad (1.7.)$$

1.1.5 Mieův rozptyl

Vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou, má velkou úhlovou závislost. [6]

Příčiny:

- nedokonalá cylindrická struktura vlnovodu
- změny indexu lomu na rozhraní jádra a pláště
- kolísání průměru jádra
- napětí ve vlákně
- mikroskopické bubliny
- nedostatečně jakostní výrobní proces skloviny

Možnosti minimalizace:

- pečlivé řízení tažicího procesu a plášťování jádra vlákna
- zlepšení vodivostních vlastností vlákna zvětšení rozdílů indexů lomu

1.2 Disperzní ztráty

Pokud by přenášený signál dorazil na konec optického vlákna bez změny tvaru, pouze s menší energií, byl by maximální dosah vlákna omezen jen jeho útlumovou charakteristikou. Ve skutečnosti je však přenášený signál nejenom zeslabován, ale příčinou disperze ve vláknech je i zkreslení (rozprostření v čase). Disperzní vlastnosti vlákna určují mezní frekvenci, kterou lze bez zkreslení přenést.

Toto zkreslení přenášeného signálu se definuje jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky, na konci a na začátku vlákna.

Pokud rychlost šíření harmonického signálu ve vedení, jehož fázová konstanta je $\beta(\omega) = n(2\pi/\lambda)$ a ω je kruhová frekvence vlny, je dána vztahem

$$v = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad (1.8.)$$

V homogenním optickém prostředí se rychlost šíření signálu vypočítá dle vztahu

$$v = \frac{\omega}{c} \quad (1.9.)$$

kde c je rychlost šíření vlny, takže

$$\beta = n \cdot \frac{\omega}{c} \quad (1.10.)$$

V případě šíření impulzního signálu (signálu složeného ze skupiny vln s různými frekvencemi) je definován pojem skupinová rychlost šíření

$$v_{sk} = \left. \frac{\partial \omega}{\partial \beta} \right|_{\omega_0} \quad (1.11.)$$

ω_0 - nosná frekvence

Kombinací těchto základních pojmů je umožněna definice skupinové doby zpoždění, která je dána vztahem

$$\tau_{sk} = \frac{1}{v_{sk}} \cdot L = \frac{\partial \beta(n_1, n_2, \lambda, \text{vid}, \text{polarizace})}{\partial \omega} \cdot L \quad (1.12.)$$

L - délka dráhy vlny v daném prostředí

Skupinová doba zpoždění je funkcí vlnové délky, indexu lomu jádra a pláště optického vlákna, je ji třeba definovat pro každý vid samostatně.

Rozlišujeme:

- **Materiálovou disperzi**
 - zapříčiněna tím, že index lomu materiálu vlákna je závislý na vlnové délce optického záření
- **Vlnovodovou disperzi**
 - způsobena tím, že přenosová funkce jednotlivých vidů je závislá na vlnové délce optického záření
- **Chromatickou disperzi**
 - tvořena materiálovou a vlnovodovou disperzí, způsobena nelineární kmitočtovou závislostí skupinové rychlosti šíření vidu ve světlovodu
- **Vidová disperze**
 - zapříčiněna tím, že přenosové charakteristiky jednotlivých vidů v mnohovidovém vlákne se od sebe liší
- **Polarizační disperze**
 - způsobena tím, že vid jednovidového vlákna se skládá ze dvou ortogonálně polarizovaných vidů, které v případě anizotropie nebo nedokonalé kruhovosti optického vlákna nemají stejné fázové konstanty šíření [2] [5] [7] [10] [14]

1.2.1 Materiálová disperze

Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu skla použitého při výrobě optického vlákna na vlnové délce záření. Tato závislost lze popsat Sellmeirovými vztahy.

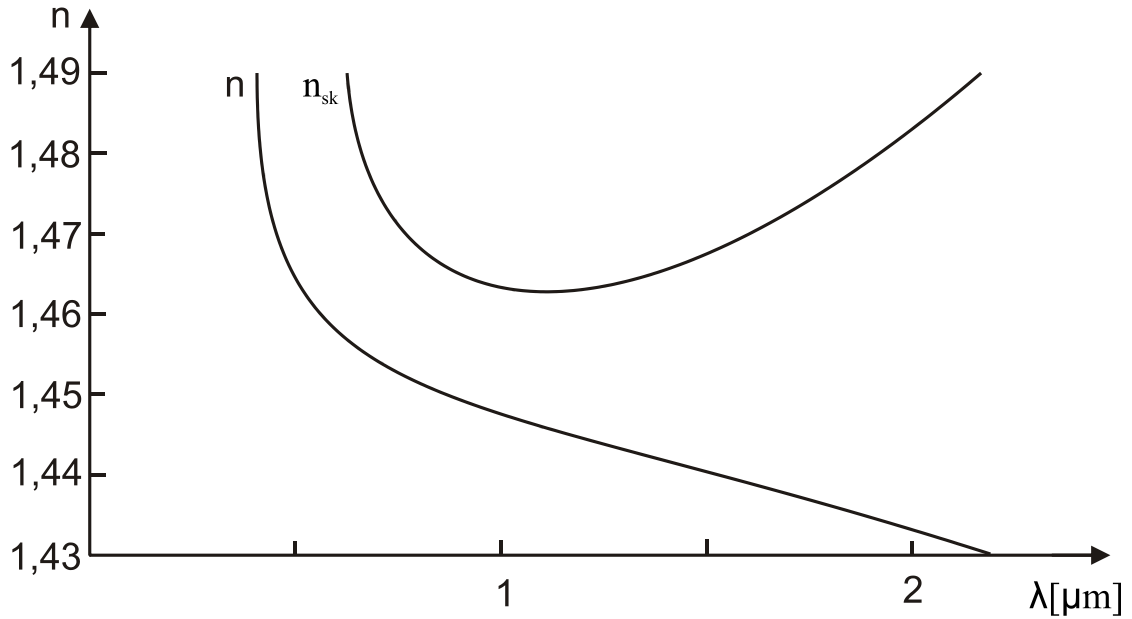
Pro rovinnou vlnu v homogenním prostředí s konstantou šíření $\beta = k_0 \cdot n$, je určen vztah pro skupinovou dobu šíření

$$\tau'_{sk} = \frac{\tau_{sk}}{L} = \frac{1}{v_{sk}} = \frac{n_{sk}}{c} = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \quad (1.13.)$$

kde

$$n_{sk} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} = n + \frac{dn}{d\omega} \omega \quad (1.14.)$$

vyjadřuje skupinový index lomu.



Obrázek 4: Průběh závislosti vlnové délky indexu lomu n na skupinovém indexu lomu n_{sk} u čistého křemičitého skla

Rozdíl skupinových zpoždění dvou signálů vzájemně posunutých o $\Delta\lambda$ přenášených na různých vlnových délkách, ale ve stejném vidu je dán rozvojem do řady ve tvaru

$$\Delta\tau'_{sk} = \frac{d\tau_{sk}}{d\lambda} \Delta\lambda + \frac{1}{2} \frac{d^2\tau_{sk}}{d\lambda^2} (\Delta\lambda)^2 + \dots \quad (1.15.)$$

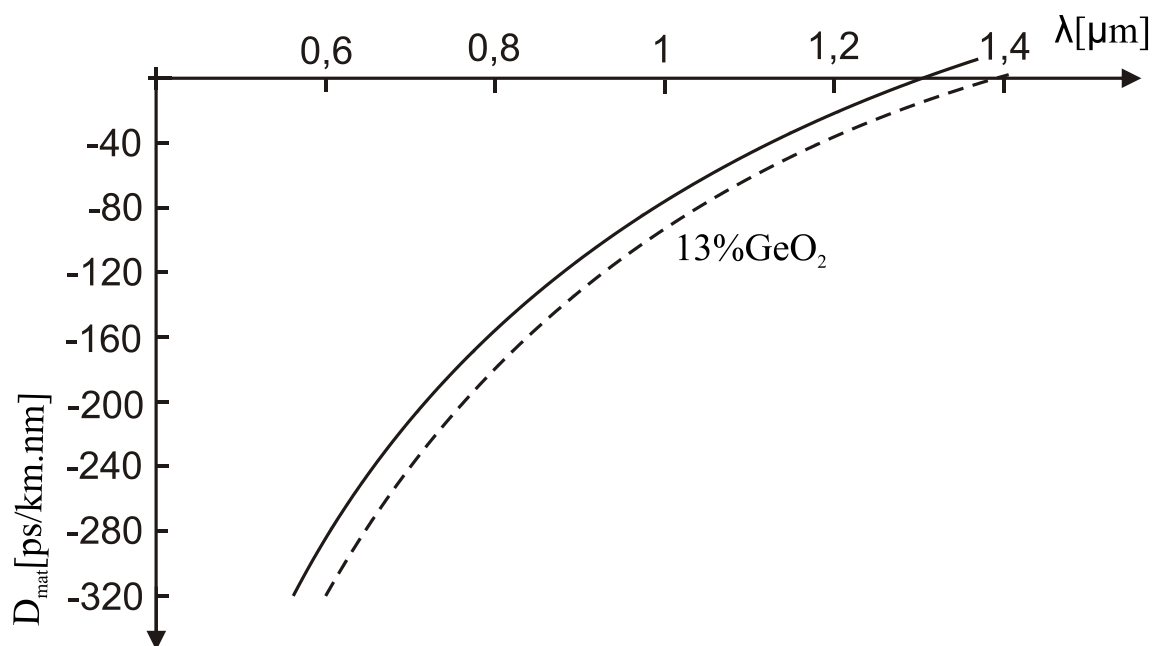
zároveň pro rovinnou vlnu v nekonečném médiu platí

$$\tau_{sk} = L \cdot \frac{n}{c} \text{ a tedy } \Delta\tau_{sk} = 0 \quad (1.16.)$$

na základě (2.15.) a (2.16.) platí

$$\frac{\Delta\tau_{sk}}{L} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \Delta\lambda - \frac{1}{2c} \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3n}{d\lambda^3} \right) \cdot (\Delta\lambda)^2 \quad (1.17)$$

Pro křemenné sklo je $\frac{d^2n}{d\lambda^2}$ roven nule při $\lambda = 1270 \text{ nm}$. Z hlediska materiálové disperze je tedy vhodné pracovat v oblasti vlnových délek okolo 1270 nm, jak je znázorněno na Obr. 5.



Obrázek 5: Závislost materiálové disperze na vlnové délce pro čisté křemenné sklo

Materiálovou disperzi lze charakterizovat druhou derivací indexu lomu n podle kruhové frekvence ω , nebo jejím disperzním koeficientem. [14]

Disperzní koeficient:

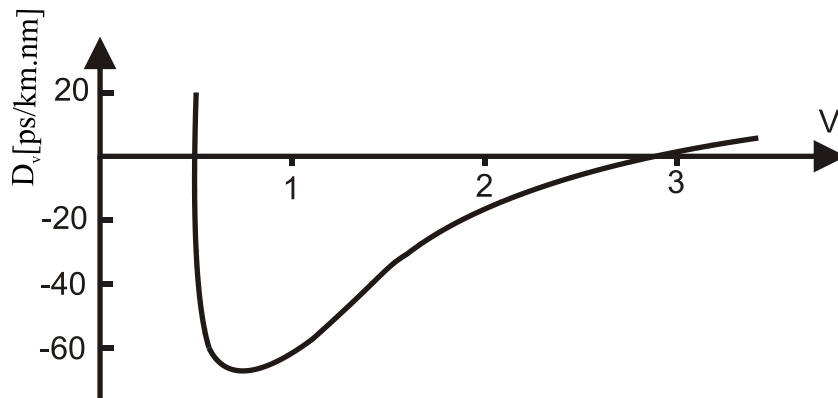
$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad [\text{ps/km.nm}] \quad (1.18.)$$

1.2.2 Vlnovodová disperze

Konstanta šíření každého vidu probíhajícího optickým vláknem je závislá nejenom na vlnové délce a indexu lomu materiálu (materiálová disperze), ale i na geometrických rozměrech vlákna. Přesněji na poměru vlnové délky k poloměru jádra vlákna a na profilu indexu lomu. Tedy i za podmínek nulové materiálové disperze je skupinové zpoždění a konstanta šíření každého vidu funkcí vlnové délky. Tento jev označujeme jako vlnovodovou disperzi.

Při přenosu nemonochromatického záření přispívá ke zkreslení signálu stejným způsobem jako disperze materiálová.

Míra zkreslení optického signálu je zde stejná jako u disperze materiálové ($\frac{d\tau_{sk}}{d\lambda}$), ale za podmínky nulové hodnoty materiálové disperze. [5] [7] [10] [14]



Obrázek 6: Závislost vlnovodové disperze pro vid LP ($\lambda=1\mu\text{m}$, $\Delta=0,001$) na frekvenci V

1.2.3 Chromatická disperze

Zapříčiněna tím, že index lomu vlákna závisí na frekvenci přenášeného signálu $n = n(f)$, díky tomu se jednotlivé frekvence v optickém vlákne šíří po různých trajektoriích a tak doba šíření jednotlivých kmitočtů není stejná.

Charakterizujeme ji pomocí koeficientu chromatické disperze D definované vztahem

$$D = \frac{d\tau_{sk}}{d\lambda} \quad (1.19.)$$

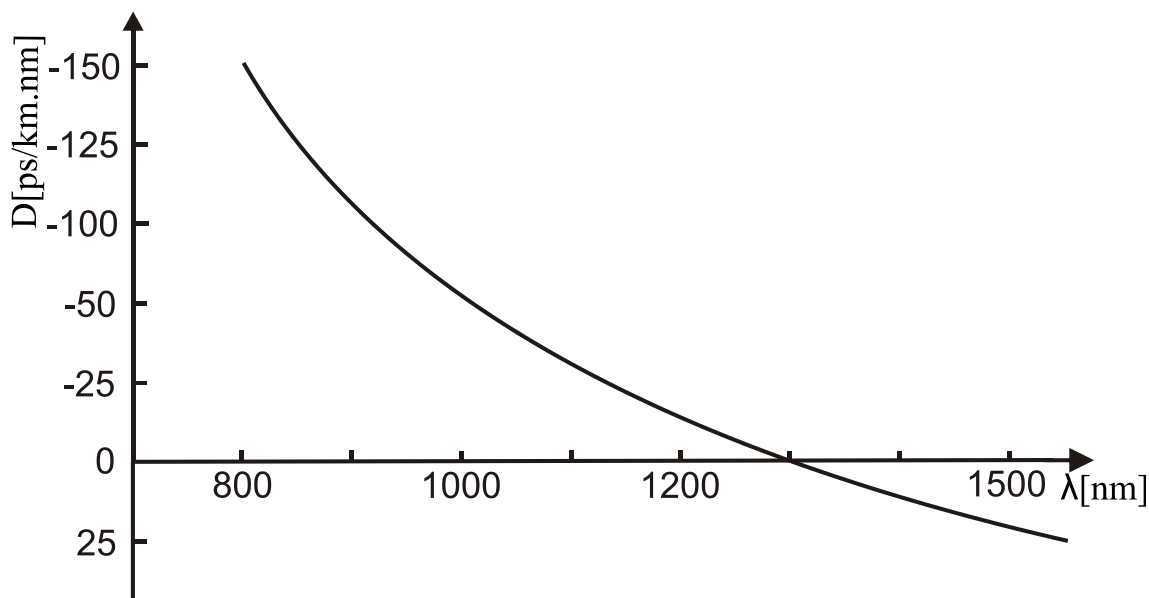
kde τ_{sk} značí celkové skupinové zpoždění optického signálu při průchodu uvažovaným optickým vlákem. Podle předchozí definice (1.15.) zahrnuje toto zpoždění součet všech vidů vedených daným vlákem. Pro tyto vidy platí

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right) \quad (1.20.)$$

Pro koeficient chromatické disperze jsme tedy určily přibližný výraz

$$D = \frac{\lambda}{c} \cdot \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right) \quad [\text{ps/km.nm}] \quad (1.21.)$$

Chromatická disperze lineárně závisí na spektrální šířce laserového zdroje, nesmí přesáhnout 20% délky pulsu. [7] [14]



Obrázek 7: Závislost koeficientu chromatické disperze D na vlnové délce záření pro vlákno z křemenného skla

1.2.4 Vidová disperze

Každý vid, který se šíří optickým vláknem má svou specifickou skupinovou rychlost šíření. V důsledku rozdílných skupinových rychlostí jednotlivých vidů se jimi přenášená energie ocitne na konci optického vlákna v různých časových okamžicích a tím je zapříčiněno zkreslení přenášeného signálu.

Pro vlákna s mocninným profilem indexu lomu platí

$$n^2(r) = n_1 \cdot \left(1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right) \quad (1.22.)$$

kde $n(r)$ je profil indexu lomu v jádře vlákna, $\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2}$ značí relativní rozdíl indexu lomu jádra a pláště, a je poloměr jádra, α je parametr mocninného profilu a r je vzdálenost daného bodu od osy vlákna.

Skupinové zpoždění vláken s tímto profilem je definováno vztahem

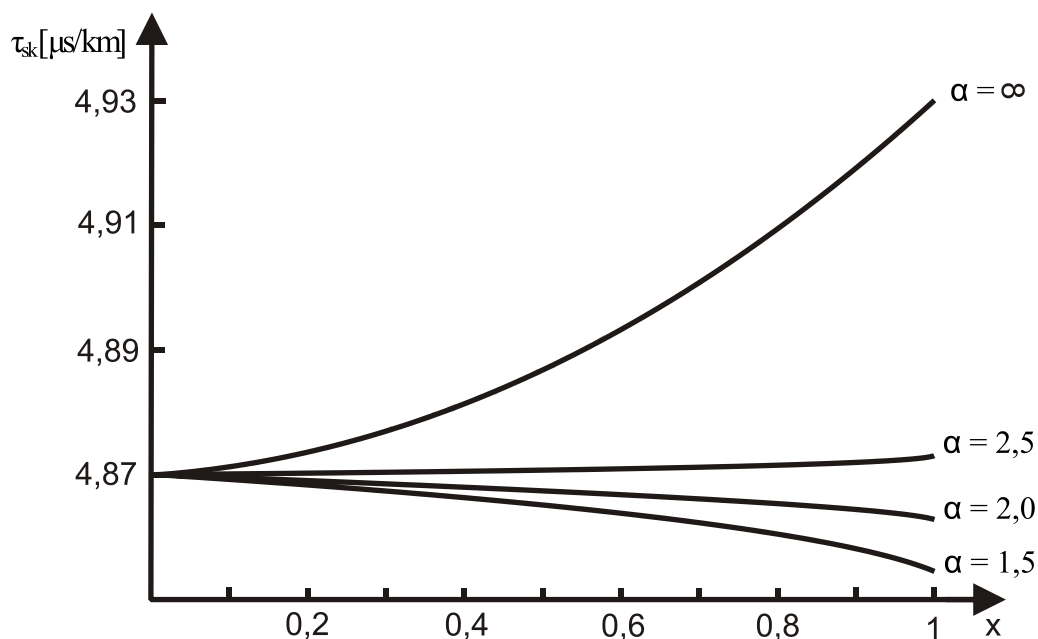
$$\tau_{sk} = \frac{N_1}{c} \left(1 + \Delta \frac{\alpha - 2}{\alpha + 2} x^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}}\right) \quad (1.23.)$$

kde N_1 je skupinový index lomu v jádře vlákna a x je souhrnný vidový index.

Se vzrůstajícím poloměrem jádra optického vlákna lineárně stoupá počet vidů vedených optickým vláknem. V souladu s touto přímou úměrností také klesá šířka pásma přenášeného signálu jednotlivých vidů.

Šířka pásma monohvidových vláken je definována jako pokles špičky přenášeného signálu o 3 dB (na polovinu) při zvyšování modulační rychlosti a je udávána v MHz.km.

Vidová disperze lze do velké míry omezit vhodnou volbou parametru λ , který by se měl co nejvíce blížit hodnotám okolo 1,95 - 2,00, což odpovídá parabolickému profilu. Vlákná se skokovým profilem indexu lomu naproti tomu mají až o tři řády vyšší vidovou disperzi. [7] [10]



Obrázek 8: Závislost skupinového zpoždění vidů τ_{sk} na souhrnném vidovém čísle pro vlákna s různým koeficientem α

1.2.5 Polarizační disperze

Jednovidové vlákno ve skutečnosti vede dva ortogonálně polarizované vidy, pokud jsou zachovány podmínky šíření, potom vid ve směru osy x i osy y má stejnou rychlost šíření. V praxi však anizotropie vlákna a nedokonalá kruhovost způsobují s přibývajícím vzdáleností rozdíl rychlosti šíření jednotlivých vidů.

Stupeň rozdílnosti rychlosti šíření vidů je definován vidovým dvojlomem:

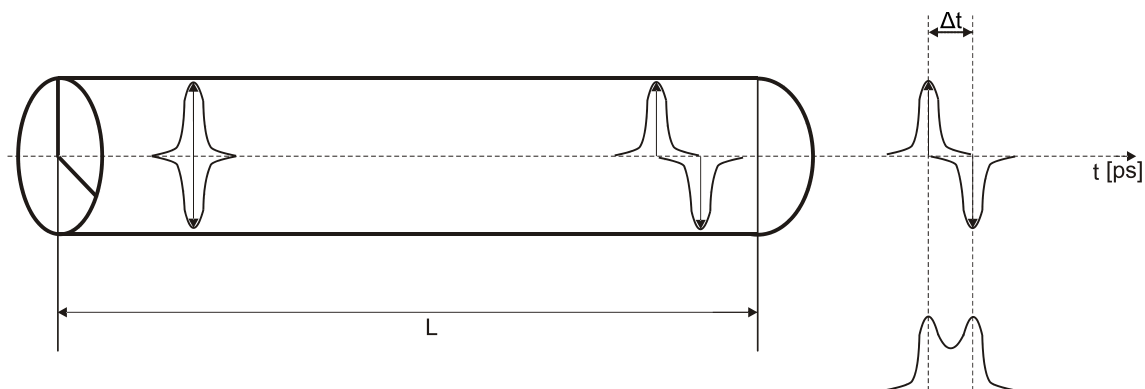
$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| \quad (1.24.)$$

kde β_x a β_y vyjadřují konstanty šíření ve směru osy x a y a n_x a n_y jsou efektivní indexy lomu ortogonálně polarizovaných vidů.

Koeficient polarizační disperze se udává v $ps/\sqrt{km}$. Jeho typická hodnota je cca 0,1 až 0,5 $ps/\sqrt{km}$, zároveň nesmí být větší jak 10% délky impulsu. Závisí na kvalitě

vláken a kabelů, způsobu pokládky kabelů, namáhání kabelu při provozu, teplotě a tlaku.

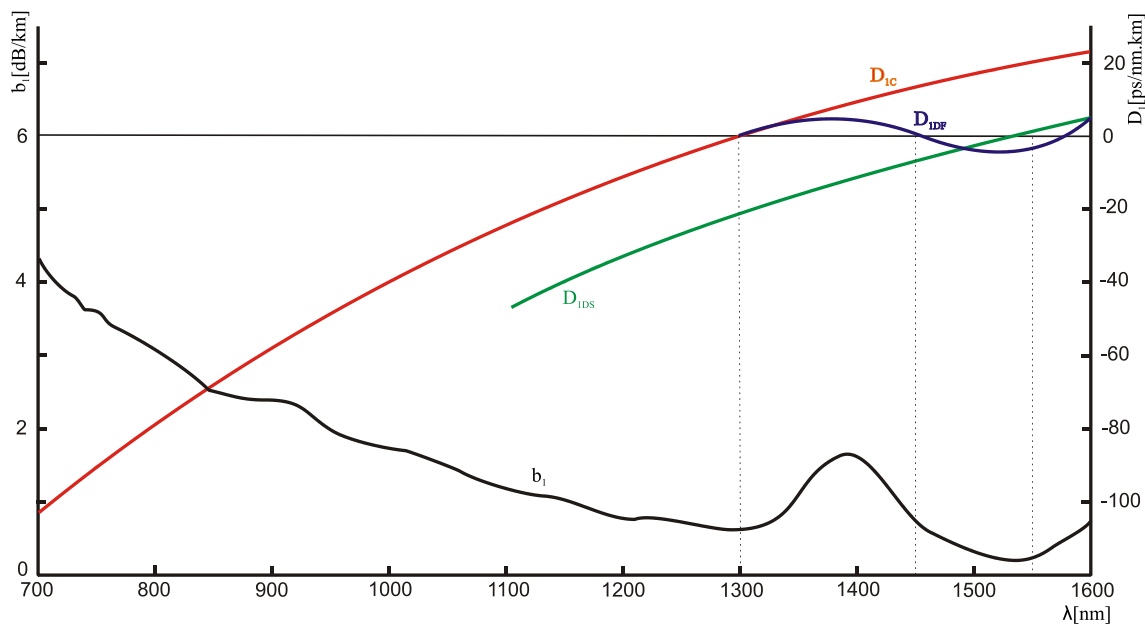
Na rozdíl od vlnovodové a materiálové disperze je polarizační disperze jen velmi málo závislá na šířce pásma přenášeného signálu a má tak náhodný charakter, jak náhodně se mění geometrické a materiálové vlastnosti vlákna. [2] [5] [7] [10]



Obrázek 9: Příklad Polarizační vidové disperze

Disperze ovlivňuje přenos optického signálu s nenulovou šířkou spektra, protože ve skutečnosti způsobuje, že jednotlivé spektrální složky se optickým vláknem šíří různou rychlostí.

Na Obr. 10 jsou znázorněny disperzní křivky pro tři základní technologie výroby optických vláken.



Obrázek 10: Závislost útlumu b_1 a chromatické disperze D_1 jednojádrových světlovodů na vlnové délce

D_{1C} – standardní vlákno, u nichž je chromatická disperze nulová na $\lambda = 1300 \text{ nm}$

D_{1DS} – vlákno s posunutou vlnovou délkou nulové chromatické disperze, nejčastěji do oblasti okolo $\lambda = 1500 \text{ nm}$

D_{1DF} – vlákno s plochou charakteristikou vlnové disperze a několika vlnovými délkami v rozsahu $\lambda = 1200 - 1600 \text{ nm}$, na nichž je chromatická disperze rovna nule. [7] [11] [14]

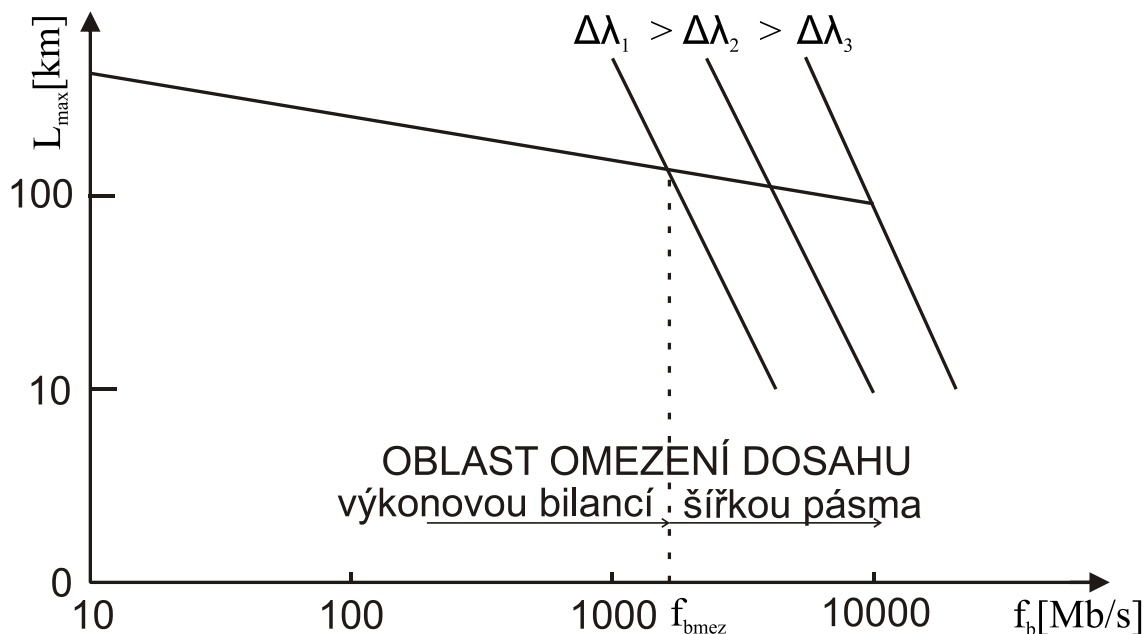
2 PŮSOBENÍ ÚTLUMU A DISPERZE NA KAPACITU PŘENOSOVÉ TRASY

Při návrhu optické trasy je třeba vypracovat útlumový a disperzní rozpočet.

- Útlumový rozpočet je nezbytný pro stanovení rezervy v přenášeném výkonu.
- Disperzní rozpočet je vytvářen kvůli definici rychlosti přenášených dat, volba protokolu přenosu určuje dynamiku výkonu.

Spojením těchto základních podmínek dostaneme dvě oblasti překlenutelné vzdálenosti digitálního světlovaného spoje $L_{\max}$ na rychlosti přenášeného signálu, jak je naznačeno na Obr. 11.

Oblast přenosových rychlostí $f_b < f_{b\max}$ je omezena útlumem trasy, citlivostí přijímače a výkonem optického zdroje neboli výkonovou bilancí spoje. Oblast $f_b > f_{b\max}$ je omezena šířkou spektra zdroje záření a šířkou pásma spoje (disperzí světlovodu). [11]



Obrázek 11: Dosah digitálního světlovodného spoje v závislosti na přenosové rychlosti

2.1 Analýza návrhu skutečných optických tras

Nejdříve je třeba uvážit několik základních parametrů:

- typ vlákna, typ konektorů, technologie spojování vláken
- délka jednotlivých kabelových úseků
- vložný útlum, odrazy na spojích, celková délka trasy

Pro názornou ukázkou je zde kalkulováno se standardem EIA 568-B.3, který je v současnosti nejpoužívanějším řešením pro realizaci optických tras v USA a s malými odchylkami i v Evropě.

Tabulka 3: Hodnoty útlumu a šířky pásma používaných optických kabelů dle normy EIA 568-B.3 [15]

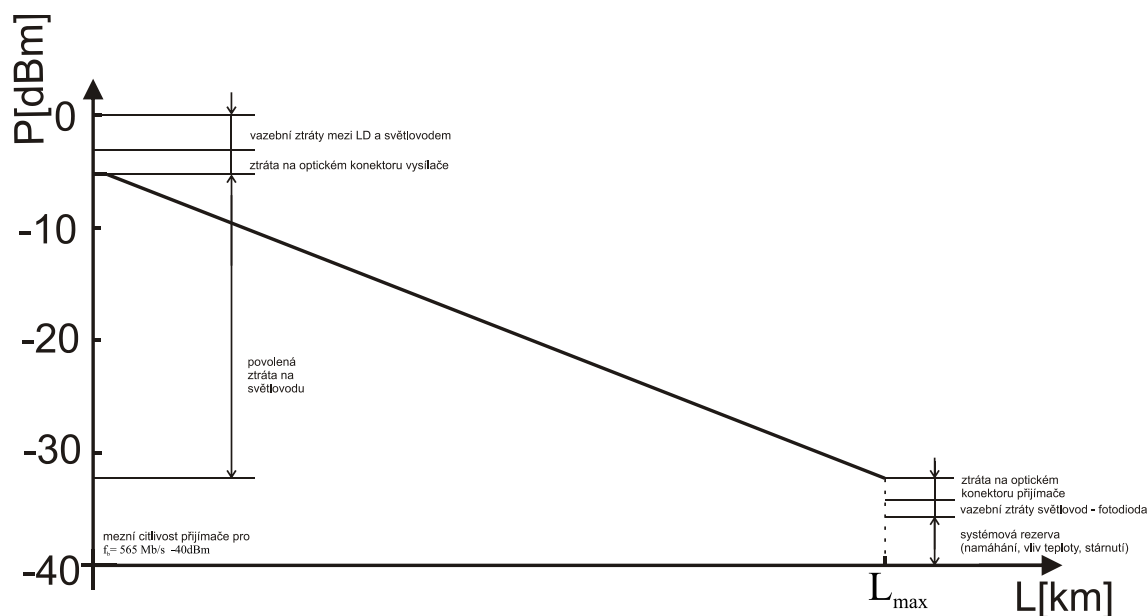
Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Maximální útlum [dB/km]	Šířka pásma [MHz.km]
MM 50/125 (OM2, OM3)	850	3,5	500 (OM2) 2000 (OM3)
	1300	1,5	500
MM 62,5/125 (OM1)	850	3,5	160
	1300	1,5	500
SM (OS1, OS2) (vnitřní prostory)	1310	1,0	Neuvedeno
	1550	1,0	Neuvedeno
SM (OS1, OS2) (venkovní prostory)	1310	0,5	Neuvedeno
	1550	0,5	Neuvedeno

Tento standard je, co se týče šířky přenosového pásma optických kabelů značně konzervativní. Reálné hodnoty udávané výrobci se pro vlnovou délku 850 nm pohybují okolo 3500 MHz.km.

Tabulka 4: Hodnoty útlumu a zpětného odrazu optických konektorů dle normy EIA 568-B.3 [15]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Maximální útlum [dB]	Hodnota zpětného rozptylu [dB]
Mnohovidová	850	0,75	20
	1300	0,75	20
Jednovidová	1310	0,75	26 (CATV:55)
	1550	0,75	26 (CATV:55)

Máme-li u digitálního spoje zadanou přenosovou rychlost spoje f_b a šířku přenosového pásma, přičemž do výpočtu zahrneme i disperzní vlastnosti světlovodu, jeho délku a frekvenční vlastnosti vysílače a přijímače, vypracujeme jeho návrh podle úrovněového diagramu na Obr. 12. [12] [15]



Obrázek 12: Úrovněový diagram světlovodného spoje

Výpočet maximální hodnoty útlumu trasy:

$$\begin{aligned} \text{Max. Útlum} = & \text{délka kabelu} \times \text{útlum kabelu} + \text{počet svarů} \times 0,3 \\ & + \text{počet konektorů} \times 0,75 \end{aligned} \quad (2.1.)$$

2.1.1 Příklady návrhu reálné optické trasy

Trasa 1 (délka 3 km, bez svarů či spojek) :

Protokol

- Ethernet 10BASE-FL

Optické vlákno

- MM 62.5/125 (OM1)
- Vlnová délka: 850 nm
- Útlum: 3,5 dB/km
- Šířka pásma: 160 Mhz.km

Konektor

- BFOC/2,5 (dle standardu IEC 60874-10:1992) = ST
- Maximální vložený útlum: 1dB
- Hodnota zpětného rozptylu: 25 dB

Útlum optické trasy: 12,5 dB, trasa vyhovuje z hlediska útlumu.

Trasa 2 (délka 2 km) :

Protokol

- Ethernet 100BASE-FX

Optické vlákno

- MM 62.5/125 (OM1)
- Vlnová délka: 1300 nm
- Útlum: 3,5 dB/km
- Šířka pásma: 500 Mhz.km

Konektor

- SC duplex (dle normy ANSI X3.237-1995)
- MIC, key M (dle standardu ISO/IEC 9314-1:1989)
- BFOC/2,5 (dle standardu IEC 60874-10:1992) = ST

Optická trasa

- Přímé spojení dvou DTE 412m
- Opakovač třída I 272m
- Opakovač třída II 320m
- Dva opakovače třída II 228m

Útlum optické trasy: 11 dB, trasa vyhovuje z hlediska útlumu.

Trasa 3 (délka 220 m) :

Protokol

- Ethernet 1000BASE-FX

Optické vlákno

- MM 62.5/125 (OM1)
- Vlnová délka: 850 nm
- Útlum: 3,5 dB/km
- Šířka pásma: 160 Mhz.km

Konektor

- SC duplex (dle normy ANSI X3.237-1995)
- Maximální vložný útlum všech konektorů: 1,5dB
- Hodnota zpětného rozptylu všech konektorů: 20 dB

Útlum optické trasy: 2,33 dB, trasa vyhovuje z hlediska útlumu.

Trasa 4 (délka 550 m) :

Protokol

- Ethernet 1000BASE-FX

Optické vlákno

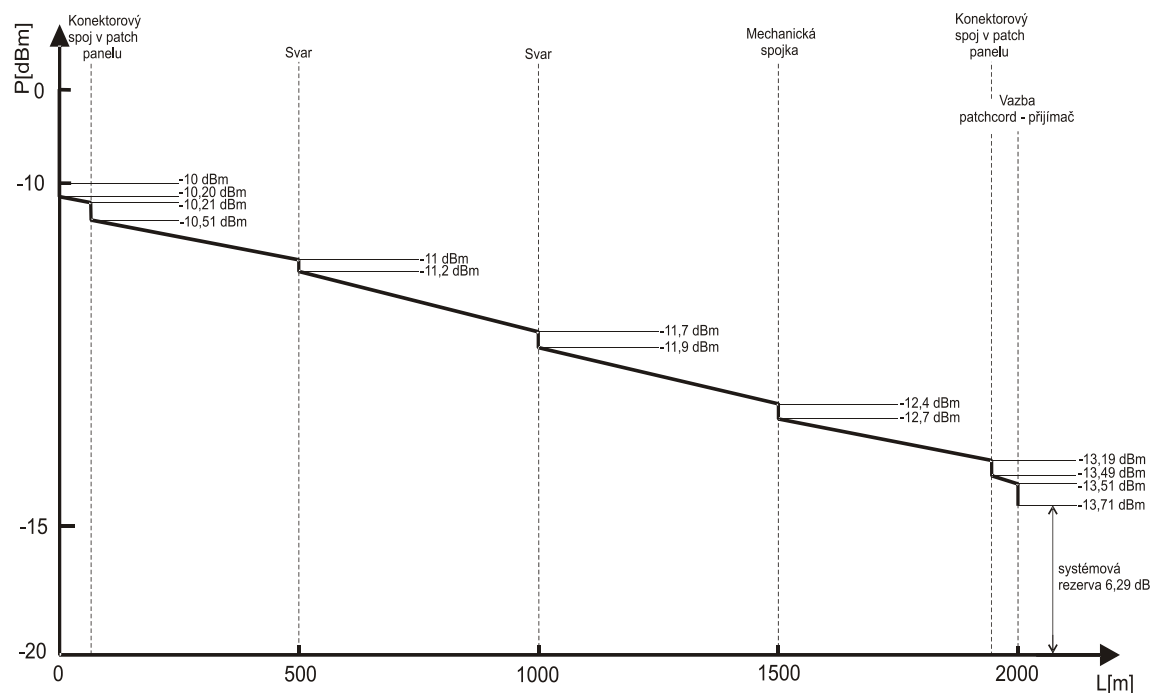
- SM 50/125 (OM3)
- Vlnová délka: 850 nm
- Útlum: 3,5 dB/km
- Šířka pásma: 500 Mhz.km

Konektor

- SC duplex (dle normy ANSI X3.237-1995)
- Maximální vložný útlum všech konektorů: 2 dB
- Hodnota zpětného rozptylu všech konektorů: 26 dB

Útlum optické trasy: 3,43 dB, trasa vyhovuje z hlediska útlumu.

Trasa 5:



Obrázek 13: Detailní zobrazení útlumového rozpočtu na trasu pro 100Mhz Ethernet [9]

Tabulka 5: Detailní výpis útlumového rozpočtu na trasu pro 100Mhz Ethernet [9]

Příčina poruchy	Útlum poruchy	Celkový útlum
Výkon vysílače v konektoru	0,10 mW	-10,00 dBm
Vazba vysílač – patchcord	0,20 dB	-10,20 dBm
Patchcord 10m, 1dB/km	0,01 dB	-10,21 dBm
Konektorový spoj v patch - panelu	0,30 dB	-10,51 dBm
Kabel s útlumem 1dB/km, 500m	0,50 dB	-11,01 dBm
Svar	0,20 dB	-11,21 dBm
Kabel s útlumem 1dB/km, 500m	0,50 dB	-11,71 dBm
Svar	0,20 dB	-11,91 dBm
Kabel s útlumem 1dB/km, 500m	0,50 dB	-12,41 dBm
Mechanická spojka	0,30 dB	-12,71 dBm
Kabel s útlumem 1dB/km, 490m	0,49 dB	-13,20 dBm
Konektorový spoj v patch - panelu	0,30 dB	-13,50 dBm
Patchcord 20m, 1dB/km	0,02 dB	-13,52 dBm
Vazba patchcord – přijímač	0,20 dB	-13,72 dBm

Mez citlivosti přijímače	-20,00 dB
Útlum trasy	3,72 dB
Výkonová rezerva systému	6,28 dB
Rezerva pro stárnutí	3,00 dB
Zůstatek	3,28 dB
Závěr	Optická trasa vyhovuje z hlediska útlumu.

Tabulka 6: Závislost šířky pásma na překlenutelné vzdálenosti pro Gigabit Ethernet [8]

Označení	Typ vlákna	Šířka pásma [MHz.km]	Překlenutelná vzdálenost [m]	Celkový útlum [dB]
1000 BASE-SX (850 nm)	MM 62.5/125	160	220	2,33
	MM 62.5/125	200	275	2,53
	MM 50/125	400	500	3,25
	MM 50/125	500	550	3,43
1000 BASE-LX (1310 nm)	MM 62.5/125	500	550	2,32
	MM 50/125	400	550	2,32
	SMF 9/125	500	5000	4,5

2.1.2 10 Gigabit Ethernet

- Dle standardu IEEE 802.3ae
- Pro optické transceivery 850, 1300 a 1550 nm
- WWDM pro 1300 nm
- LAN PHY- lokální síť, samostatné vlákno
- WAN PHY- využití vrstvy SONET/SDH
- Ethernet PON – na pasivních SM sítích

Tabulka 7: Závislost šířky pásma na překlenutelné vzdálenosti pro 10 Gigabit Ethernet [8]

Označení	Typ vlákna	Šířka pásma [MHz.km]	Překlenutelná vzdálenost [m]
10G BASE-SR	MM 62.5/125	600/200 (OM1)	26/33
	MM 50/125	400/500 (OM2)	66/82
	MM 50/125	2000 (OM3)	300
10G BASE-LX4	MM 62.5/125	500 (OM1)	300
	MM 50/125	400 (OM2)	240
	MM 50/125	500 (OM3)	300
10G BASE-LX4	SM 9/125 (OS1)	500 (OM1)	10 000
10G BASE-LR	SM 9/125 (1310 nm) (OS1)	400 (OM2)	10 000
10G BASE-ER	SM 9/125 (OS1)	500 (OM3)	40 000
10G BASE-LRM	MM 62.5/125	200/500 (OM1)	220
	MM 50/125	500/500 (OM2)	220
	MM 50/125	1500/500 (OM3)	220

Tabulka 8: Výpis vhodných typů optických vláken v závislosti na délce optické trasy a typu přenosu [8]

Překlenutelná vzdálenost [m]	Fast Ethernet	1G Ethernet	10G Ethernet
0 - 100	OM1	OM1	OM1/OM2
100 - 275	OM1	OM1	OM3
275 - 300	OM1	OM1/OM2	OM3
300 - 500	OM1	OM1/OM2	OS1
500 - 1500	OM1	OM2/OM3	OS1
1500 - 2000	OM1	OM2/OM3	OS1

3 VÍCEKANÁLOVÉ SVĚTLOVODNÉ SPOJE

Pásmo propustnosti konvenčních světlovodů, kde jejich měrný útlum nepřekračuje hodnotu 10 dB/km je rozprostřeno v oblasti vlnových délek 700 až 1600 nm, což představuje kmitočtové pásmo asi 250 THz.

U dnešních telekomunikačních spojů se pracuje v oblasti 1200 až 1600 nm, protože je zde dosaženo měrného útlumu řádově menšího než 1 dB/km a navíc je hodnota disperze jednovidových světlovodů omezena na úroveň jen několika ps/(nm.km). Tato oblast je široká asi 60 THz a i s útlumovým omezením na vlnové délce 1390 nm, které je ve vláknech dle standardu ITU-T G.652C již potlačeno, máme stále k dispozici 40 THz kmitočtového pásma s relativně malým útlumem.

Při přenosu signálu pouze na jediné optické nosné bychom byli nuceni použít ultra širokopásmový signál (řádově THz), nebo posloupnost impulzů širokých jen jednotky pikosekund pro efektivní využití přenosového pásma. Dalším omezením přenosové kapacity je kombinovaný vliv disperze světlovodu, která je ještě závislá na jeho délce a šířky spektra přenášeného signálu.

Přenosová kapacita světlovodného spoje užívajícího jediné optické nosné:

$$C = f_b \cdot L \quad [\text{Gb/s.km}] \quad (3.1.)$$

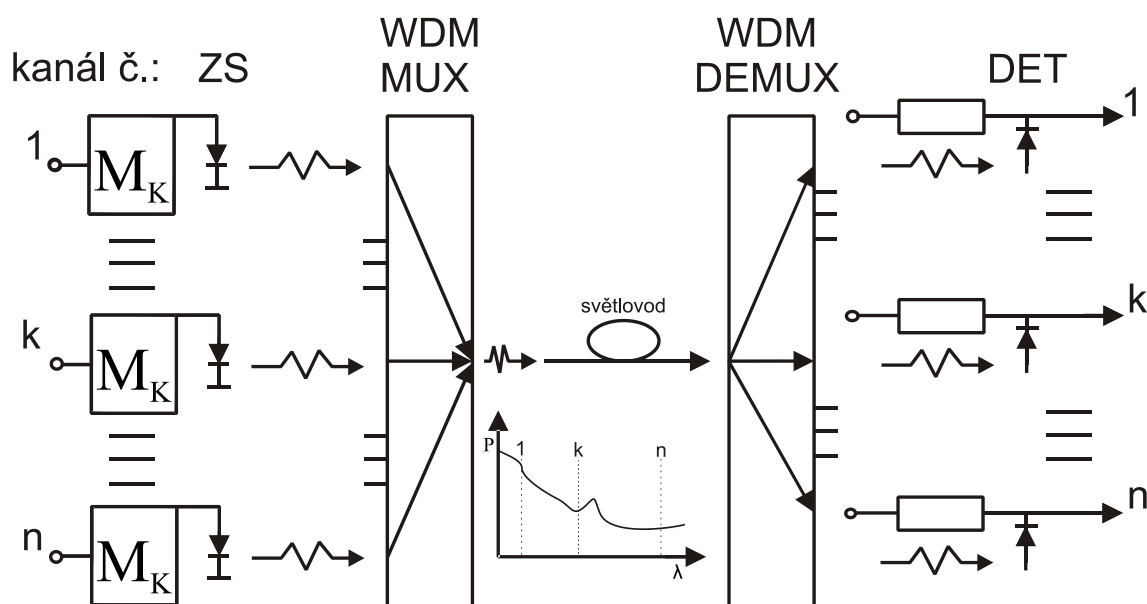
Důvody vícenásobného využívání jednovidových světlovodů:

- snaha lépe využít přenosovou kapacitu
- snížení nákladů na výstavbu světlovaných tras
- zajištění možnosti budoucího pružného rozšíření přenosové kapacity optické sítě bez nutnosti pokládky nových kabelů [11]

3.1 Technologie vlnového multiplexu WDM

Používá se pro zvýšení přenosové kapacity optického vlákna a tehdy, když potřebujeme kupříkladu sdílet přenos více nezávislých aplikací po jednom vlákně.

Úkolem WDM multiplexoru je sdružit jednotlivé kanály ze všech zdrojů do jednovidového světlovodu. Při požadavku velmi malého rozestupu kanálů musí také obsahovat vlnové selektivní členy, aby nedošlo ke vzniku vnitrokanálové interference. Následné rozdělení svazku zpět na dílčí paprsky se odehrává ve vlnovém demultiplexoru. Podle typu multiplexoru a demultiplexoru lze najednou přenášet několik desítek, případně až stovek optických kanálů.



Obrázek 14: Příklad vlnového multiplexu s řídkým kanálováním

M – modulátory, ZS – zdroje světla, WDM MUX – vlnový multiplexor,
WDM DEMUX – vlnový demultiplexor, DET – detektory světla

3.1.1 Původní WDM (**Wavelength Division Multiplexing**)

Využívá pro přenos pouze dvě vlnové délky většinou v obousměrném provozu na jednom optickém vlákně. Pasivní vlnový multiplexor WDM je jednoduché a levné zařízení, které je schopné spojit nebo rozdělit dvě vlnové délky do jediného vlákna.

Pro přenos signálu na MM vláknech se používá kombinace vlnových délek 850 nm a 1300 nm a pro přenos na SM vláknech to jsou vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. [8]

3.1.2 WWDWM (Wide Wavelength Division Multiplexing)

Takzvaný široký vlnový multiplex využívá čtyři vlnové délky pro přenos signálu na MM vláknech (oblast okolo 850 nm), nebo pro SM vlákna (1275, 1300, 1325, 1350 nm). Tyto vlnové délky (SM vlákno) jsou používány nejčastěji pro přenos 10Gigabitového Ethernetu (10G BASE LX-4). Jednotlivé vlnové délky WWDWM multiplexu mají typicky odstup 25 nm. [8]

3.1.3 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

Hustý vlnový multiplex je nasazován hlavně na dálkových optických trasách. Vyžaduje precizní laserové chlazené zdroje a ostatní náročné optické komponenty, jako jsou optické zesilovače EDFA, kompenzátory disperze apod.

Dle doporučení ITU T G.694.1 jsou specifikovány jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz), (tzv. S, C a L pásmo). Typický odstup mezi jednotlivými používanými vlnovými délkami je 100GHz, ale existují i starší systémy DWDM s odstupem 200 GHz a novější systémy s vyšším počtem vlnových délek, které využívají odstup 50 GHz , případně i jemnější dělení 25 a 12,5 GHz.

Pro další použití v metropolitních sítích je vhodné omezit technologii DWDM pouze na využití pásma v oblasti 1530 až 1565 nm (tzv. pásmo C), kdy existují vhodné cenově dostupné komponenty (výměnné transceivery DWDM v provedení SFP, XFP a Xenpak a EDFA zesilovače pro C pásmo). [16] [18]

Tabulka 9: Tabulka vlnových délek části pásma „C“ DWDM 100GHz podle standardu ITU-T G.694.1 [18]

Frekvence [THz]	Kanál DWDM dle ITU	Vlnová délka [nm]
192,0	920	1561,42
192,1	921	1560,61
192,2	922	1559,79
192,3	923	1558,98
192,4	924	1558,17
192,5	925	1557,36
192,6	926	1556,55
192,7	927	1555,75
192,8	928	1554,94
192,9	929	1554,13
193,0	930	1553,33
193,1	931	1552,52
193,2	932	1551,72
193,3	933	1550,92
193,4	934	1550,12
193,5	935	1549,32
193,6	936	1548,51
193,7	937	1547,72
193,8	938	1546,92
193,9	939	1546,12
194,0	940	1545,32
194,1	941	1544,53
194,2	942	1543,73
194,3	943	1542,94
194,4	944	1542,14
194,5	945	1541,35
194,6	946	1540,56
194,7	947	1539,77
194,8	948	1538,98
194,9	949	1538,19
195,0	950	1537,40
195,1	951	1536,61
195,2	952	1535,82
195,3	953	1535,04
195,4	954	1534,25
195,5	955	1533,47
195,6	956	1532,68
195,7	957	1531,90
195,8	958	1531,12
195,9	959	1530,33
196,0	960	1529,55

3.1.4 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

Tato forma vlnového multiplexu využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie hustého multiplexu DWDM.

Princip CWDM byl prvně specifikován v doporučení ITU-T G.671 a měl mít odstup jednotlivých kanálů menší než 50 nm a větší než 1000 GHz - což je přibližně 8 nm pro vlnovou délku 1550 nm, ale prakticky byl systém CWDM nasazován až jako levná varianta systému DWDM.

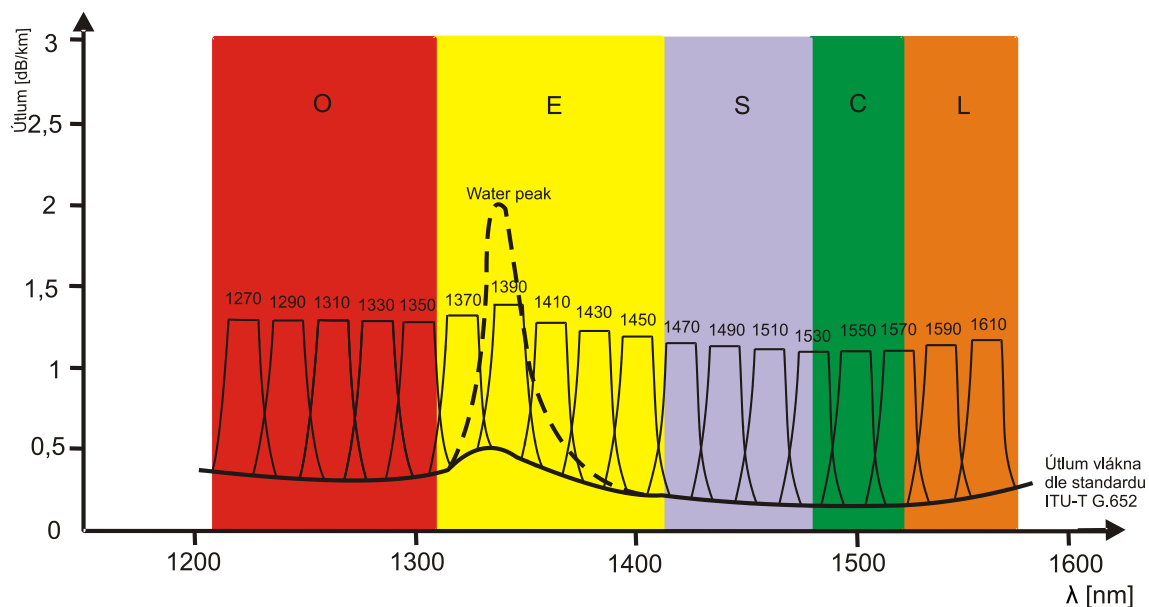
Teprve standard ITU-T G.694.2 definuje velikost odstupů jednotlivých kanálů vlnových délek pro použití CWDM technologie tak, aby bylo možné jako zdroje záření použít laserové diody bez nároku na chlazení s celkovou tolerancí od nominální střední vlnové délky v rozsahu 6 až 7 nm. Jednotlivé vlnové délky byly také zvoleny tak, aby byly kompatibilní s klasickými používanými vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm.

Jednotlivé vlnové délky CWDM technologie jsou definovány v rozsahu 1270 nm až 1610 nm se vzájemným odstupem 20 nm.

V praxi jsou používány přepínače Ethernet s porty SFP pro MM (protokol 1000BASE-SX) a SM (protokol 1000BASE-LX).

Tabulka 10: Rozložení vlnových délek CWDM podle standardu ITU-T G.694.2 [19]

Označení kanálu CWDM	Vlnová délka [nm]	Rozdělení spektra SM vlákna 9/125 nm
27	1270	O – Original 1260 – 1360 nm Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm
29	1290	
31	1310	
33	1330	
35	1350	
37	1370	E – Extended 1360 – 1460 nm Nové pásmo, využitelné pouze s novými typy vláken typu „Low Water Peak“ podle standardu ITU-T G.652.C
39	1390	
41	1410	
43	1430	
45	1450	
47	1470	S – Short 1460 – 1530 nm Pásmo kratších vlnových délek, které je využíváno pro nové typy přenosů, zvláště CWDM
49	1490	
51	1510	
53	1530	
55	1550	C – Conventional 1530 – 1565 nm
57	1570	L – Long 1565 – 1625 nm Pásmo dlouhých vlnových délek, využíváno pro novější typy přenosů
59	1590	
61	1610	



Obrázek 15: Rozložení kanálů CWDM dle standardu ITU-T G.652

3.1.5 Příklad návrhu reálné CWDM trasy

Trasa 6 (délka 75 km) :

Optické vlákno

- SM 50/125 (OM3)
- Vlnová délka: 1550 nm
- Útlum: 19,9 dB/km
- Vlnová délka: 1470 nm = + 0,4 dB/km
- Počet kanálů: 8
- Transpondér: GBE (2,5 Mb/s)
- Útlum MUX a DEMUX : 3,2 dB
- Chromatická disperze pro transceiver CWDM Multirate 80km : 3dB
- TRX1000015 POVER BUDGET: 0-(-28dB)

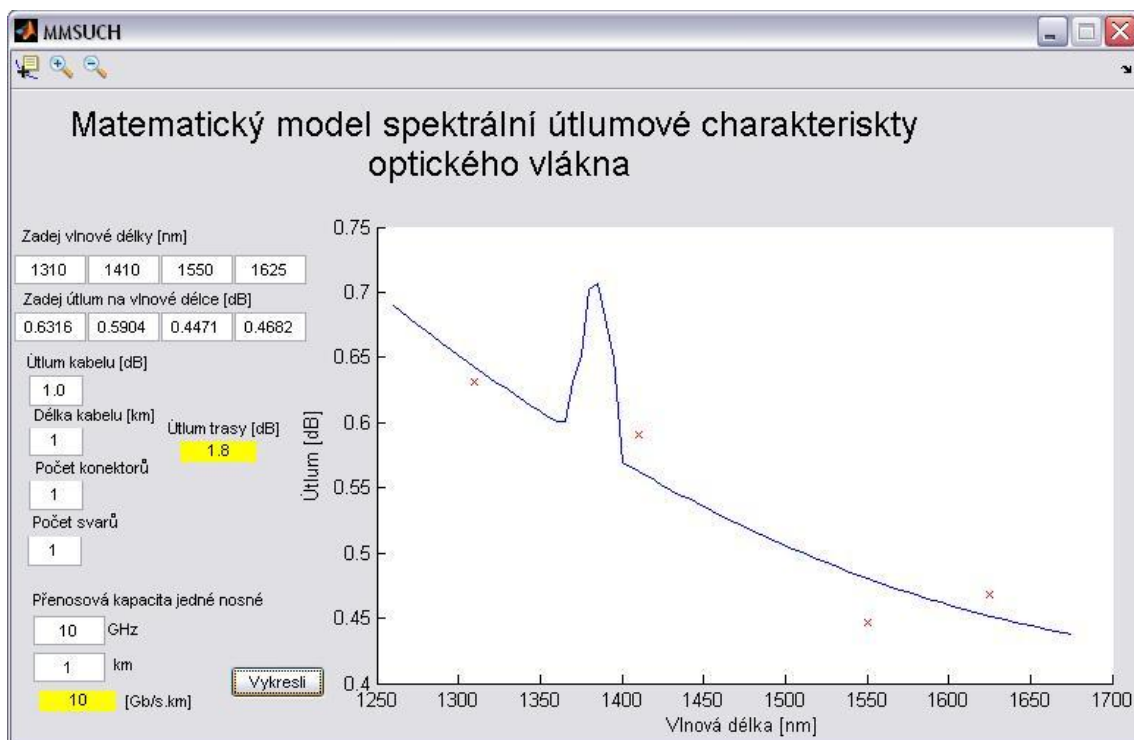
Útlum optické trasy: $16,9 + 3,2 + 2 + 3 + 2 = 27,1$ dB, trasa vyhovuje z hlediska útlumu. [8]

4 MATEMATICKÝ MODEL SPEKTRÁLNÍ ÚTLUMOVÉ CHARAKTERISTIKY OPTICKÉHO VLÁKNA

Program MMSUCH slouží k vizualizaci útlumové charakteristiky optických vláken dle standardu ITU-T G.652. Je naprogramován v programu MATLAB s využitím GUI.

V programu lze nastavit útlum optického vlákna v závislosti na vlnové délce vlákna, která je později vykreslena s použitím Laganžerova interpolačního polynomu druhého řádu. V oblasti vlnových délek od 1360 nm do 1400 nm je patrný prudký nárůst vypočteného útlumu, tohoto je dosaženo manuálně definicí útlumu jednotlivých bodů útlumové charakteristiky, jelikož žádnou aproximační funkcí, ani kombinací několika z nich nebylo dosaženo alespoň přibližného modelu skutečné útlumové charakteristiky vlákna v této oblasti.

Pro bližší analýzu přenosové trasy je zde ještě vypočítán maximální útlum zadané přenosové trasy (viz vzorec 2.1.) a hodnota přenosové kapacity optického vlákna užívající pouze jedné optické nosné (viz vzorec 3.1.), ze které lze lehce vyvodit počet reálných přenosových kanálů CWDM nebo DWDM systému.



Obrázek 16: Program pro analýzu matematického modelu spektrální útlumové charakteristiky optického vlákna

5 ZÁVĚR

Při tvorbě bakalářské práce bylo snahou popsat působení útlumu optického vlákna na jeho přenosovou kapacitu a vymezit požadavky přenosového systému na spektrální charakteristiku přenosu.

V první kapitole byl popsán pomocí základních charakteristik útlum optického vlákna, ztráty způsobené ohybem optického vlákna, ztráty v důsledku absorpce přenosového signálu na nečistotách jako jsou příměsová absorpce Rayleigha a Mieův rozptyl. Dále byla práce zaměřena na definici disperze optického vlákna v závislosti na spektrální charakteristice přenášeného signálu. Detailně popsána byla disperze materiálová, vlnovodová, vidová, polarizační a zejména chromatická, u které byl kladen zvláštní důraz na její spektrální závislost, jelikož je v současnosti jedním z nejvíce ovlivňujících faktorů při tvorbě, měření a provozu optických vláken a kabelů.

Další kapitola se zabývala shrnutím těchto základních charakteristik optických vláken a nejdříve teoreticky a posléze i prakticky byly tyto poznatky využity při analýze návrhu reálných přenosových tras s využitím v současnosti nejvíce používaných optických kabelových systémů, spojek a konektorů dle standardu EIA 568-B.3.

Nejdříve bylo pojednáno o přenosových systémech využívajících protokolů 10BASE-FL a 100BASE-FX s uvedením názorných příkladů návrhu optické trasy.

Jelikož jsou tyto přenosové protokoly v současnosti již dosti zastaralé, v následujících odstavcích jsme se více věnovali optickým přenosovým systémům využívajícím protokoly 1G BASE-x a 10G BASE-x.

Zprvu je uvedeno několik příkladů návrhu optických tras pro rodinu protokolů 1G BASE-x posléze jsou tyto poznatky shrnuty v přehledné tabulce.

Následující podkapitola je zaměřena na rodinu protokolů 10G BASE-x, údaje získané při analýze reálných optických tras jsou zde opět shrnuty do přehledné tabulky a to s důrazem na definici parametrů umožňujících nasazení xWDM systémů. Nakonec je zobrazena tabulka předpokládané překlenutelné vzdálenosti optického spoje v závislosti na jeho přenosové kapacitě a typu přenosového média.

Třetí kapitola je věnována popisu vícekanálových světlovodných spojů. Byly zde popsány všechny způsoby přenosu signálu pomocí vlnového multiplexu.

V úvodu jsou charakterizovány systémy WDM a WDM, následuje podrobný popis dnes nejpoužívanějších vlnových multiplexů DWDM a CWDM. Jsou zde mimo jiné uvedeny parametry jednotlivých přenášených signálů i s charakteristickým odstupem vlnových délek přenášených vidů.

V poslední kapitole je zpracováno téma konstrukce matematického modelu útlumové charakteristiky optického vlákna, tato aproximační funkce ale není zcela přesná z důvodu prudkého navýšení útlumové charakteristiky vlákna v oblasti okolo 1360 až 1400 nm. K vizualizaci útlumové charakteristiky byl využit program MATLAB s doplněním několika málo dalších výpočtových vzorců pro usnadnění návrhu optické přenosové trasy.

LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] DADO, Milan, et al. *KAPITOLY Z OPTIKY PRE TECHNIKOV*. Žilina : ŽU, 1998. 348 s. ISBN 80-7100-390-5.
- [3] *Útlum komunikačných vláken* [online]. [2008] , 4.2.2008 [cit. 2009-12-01]. Dostupný z WWW: <http://www.ofacom.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=129:moznosti-optickych-vlaken&catid=80:ofs-v-&Itemid=96>.
- [4] HLUBINA, Petr. Optická vlákna a komunikace . *Slezská univerzita v Opavě* [online]. 2004 [cit. 2009-12-04], s. 78. Dostupný z WWW: <<http://www.fpf.slu.cz/~hlu10uf>>.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna : verze 2.1.3 . *Technická univerzita Ostrava* [online]. 2006 [cit. 2009-11-22], s. 172.
- [6] VAŠINEK, Vladimír. Optoelektronika 1 : Podrobnější popis optických vláken – díl 2 . *VŠB-TU Ostrava* [online]. 2007 [cit. 2009-11-30], s. 28.
- [7] VAŠINEK, Vladimír. Optoelektronika 2 : Jednomódová vlákna – podrobnější popis. *VŠB-TU Ostrava* [online]. 2008 [cit. 2009-11-10], s. 41..
- [8] ŠÍMA , Jaromír. Vláknová optika . *RLC* [online]. 2008 [cit. 2009-12-01], s. 93. Dostupný z WWW: <www.optickesite.cz>.
- [9] VAŠINEK, Vladimír. Optoelektronika 2 : Měření optických vláken a kabelů. *VŠB-TU Ostrava* [online]. 2008 [cit. 2009-12-13], s. 20.
- [10] DUPSKÝ, Pavel; KUCHARSKY, Maciej. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Praha : Mikrom, 1994. 133 s.
- [11] KUCHAR, Anton; KHODL, Miroslav. Perspektivní optické systémy pro přenos informace. Praha : Neoset, 1996. 138 s. ISBN 80-902180-1-6.
- [12] FISHER, Pavel, et al. *Optical Devices I*. Brno : Univerzita obrany, 2008. 80 s. ISBN 978-80-7231-539-0.
- [13] FISHER, Pavel, et al. *Optical Devices II*. Brno : Univerzita obrany, 2008. 83 s. ISBN 978-80-7231-538-3.
- [14] KARÁSEK, Miroslav; ZAHRÁDKA, Tomáš. *Disperze signálu v optických vláknových vlnovodech*. Praha : Academia, 1990. 132 s. ISBN 80-200-0216-2.
- [15] *Thefoa* [online]. 2004 [cit. 2010-05-28]. EAI/TIA 568 B.3 For Fiber Optics. Dostupné z WWW: <<http://www.thefoa.org/tech/tia568b3.htm>>.
- [16] *RLC Praha a.s.* [online]. 2005 [cit. 2010-05-28]. Technologie multiplexu WDM. Dostupné z WWW: <http://www.rlc.cz/publikujeme/technologie_wdm/>.
- [17] *G.671* [online]. 2009 [cit. 2010-05-29]. International Telecommunication Union. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.671-200901-I/en>>.
- [18] *G.694.1* [online]. 2002 [cit. 2010-05-29]. International Telecommunication Union. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-200206-I/en>>.
- [19] *G.694.2* [online]. 2003 [cit. 2010-05-29]. International Telecommunication Union. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/en>>.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

α_r	koeficient ohybových ztrát
$\alpha(\lambda)$	koeficient útlumu optického vlákna [dB.km ⁻¹]
$\beta(\omega)$	fázová konstanta
B	stupeň rozdílnosti rychlosti šíření vidů
C	přenosová kapacita světlovodného spoje [Gb/s.km]
c	rychlost světla ve vakuu
$D(\lambda)$	disperzní koeficient [ps/km.nm]
n_{sk}	skupinový index lomu
L	délka [km]
MM	mnohovidové vlákno
n	index lomu vlákna
P	optický výkon [W]
R	poloměr zakřivení vlákna
R_c	kritický poloměr mnohovidového vlákna [m]
R_{cs}	kritický poloměr jednovidového vlákna [m]
SM	jednovidové vlákno
T_r	propustnost po rayleigho rozptylu
γ_R	rayleigho rozptylový koeficient pro jednosložková vlákna
ω	kruhová frekvence
v	rychlost šíření harmonického signálu ve vedení
λ	vlnová délka[nm]
v_{sk}	skupinová rychlost šíření vlny
τ_{sk}	skupinová doba zpoždění
$u(\lambda)$	útlum optického vlákna [dB]