Úloha č. 8 Vlastnosti optických vláken (2015v6)

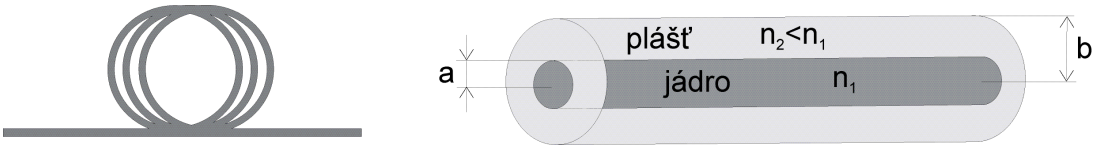
Optická vlákna jsou důležitou komponentou optických komunikačních sítí. Jejich vysoká přenosová kapacita a nízký útlum jsou hlavní výhody, které je staví před klasické kabelové a rádiové komunikační prostředky.

Cílem této úlohy je vyzkoušet si práci s optickými vlákny, seznámit se s možnostmi měření charakteristik optických vláken a analyzovat vlivy, které způsobují ztráty při přenosu. Pro účely měření útlumu bude v rámci praktika využívána metoda OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).

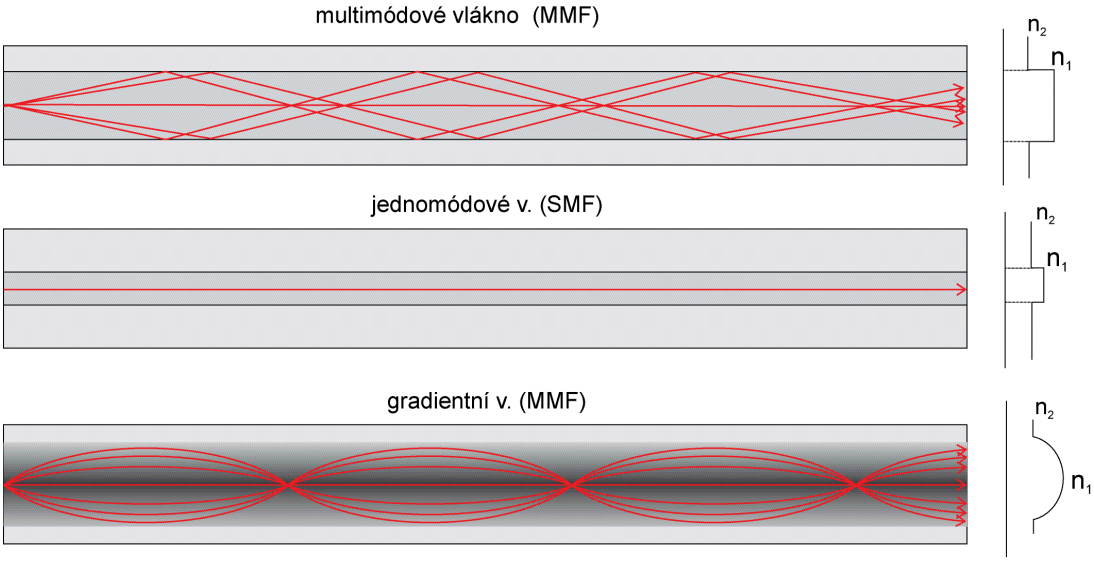
1 Teoretický úvod

Optická vlákna

V dnešní době se vyrábějí optická vlákna především z materiálů na bázi skla (SiO_2) a z průhledných polymerů. Základní části vlákna tvoří jádro a plášť (viz Obr. 1), které jsou obaleny primární a sekundární ochranou proti poškození. Vlákna rozdělujeme podle počtu vedených módů na jednomódová a multimódová, která dále můžeme rozlišit podle profilu indexu lomu na vlákna se skokovým profilem a vlákna gradientní (viz Obr. 1). V Tab. 1 jsou uvedeny průměry běžně užívané pro jednotlivé typy vláken.



Obrázek 1: Optické vlákno je kruhový vlnovod s vnitřním **jádrem** a vnějším **pláštěm**



Obrázek 2: Geometrie typických optických vláken a jejich rozložení indexu lomu; zobrazení paprsků šířících se jednotlivými vlákny.

	rozměry $[\mu m]$	
	jádro	plášť
jednomódové v.	8.3-10	125
multimódové v.	50-100 (62.5)	125 - 300

Tabulka 1: Nejčastější rozměry optických vláken

V přiblížení geometrické optiky je možné popsat šíření optického záření ve vlákně jako šíření paprsků, které se totálně odráží na rozhraní jádro - plášť. Hodnota indexu lomu jádra n_1 se pohybuje v rozmezí 1,44 - 1,46 a index lomu pláště je typicky jen o několik tisícin nižší. Plastová mnohomódová vlákna mají rozdíl indexů lomu typicky 0.1 [1]. Mezní úhel dopadu na čelo vlákna θ_a, který ještě odpovídá vedenému svazku (viz Obr. 1), je důležitým parametrem optických vláken. Sinus tohoto úhlu násobený indexem lomu okolí n_a se nazývá numerická apertura:

$$NA = n_a \sin(\theta_a). \tag{1}$$

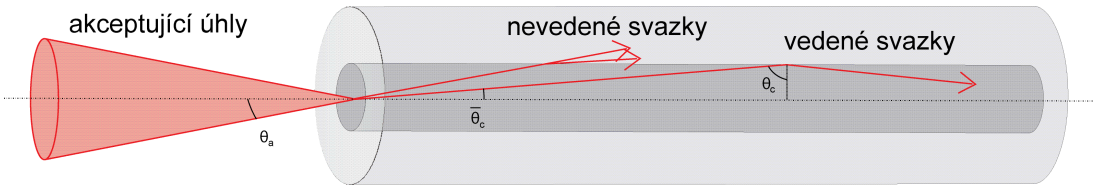
Lze ukázat, že numerická apertura závisí na indexech lomu jádra a pláště. Pro $n_a = 1$ platí

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{(2\Delta)}, \tag{2}$$

kde Δ značí relativní změnu indexu lomu

$$\Delta \mathrm{n} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \tag{3}$$

Pro více informací o optických vláknech se podívejte online [2, 3] nebo do knihy Základy fotoniky 2 [4].



Obrázek 3: Přípustné úhly dopadajícího svazku θ_a do vlákna. Paprsky z kužele jsou vedeny ve vlákně pomocí totálního odrazu.

S pomocí numerické apertury lze určit další parametr optického vlákna, tzv. normalizovanou frekvenci:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA, \tag{4}$$

kde a je průměr jádra vlákna. Normalizovaná frekvence určuje počet vedených módů ve vlákně; pro jednomódová vlákna platí $V \leq 2.405$. Ztráty při přenosu vláknem jsou způsobovány ohybem vlákna, absorpcí, odrazem a rozptylem. Ohybové ztráty jsou způsobeny porušením podmínky totálního odrazu ve vlákně. Paprsek dopadá na rozhraní pod menším úhlem a láme se do pláště. Jednomódová vlákna jsou na tyto ztráty náchylnější, z teorie vedených vln vyplývá, že se v jednomódových vláknech větší část energie šíří v plášti, a lze ji snáze vyvázat ohybem. Ztráty způsobené odrazem a rozptylem ve vláknech a možnosti jejich měření budou přiblíženy v následující sekci (OTDR). Pro vyjádření ztráty, resp. útlumu většinou nevyužíváme jednotky výkonu, ale jednotky [dB], kdy ztráta, resp. útlum mezi body 1 a 2 jsou definovány jako

$$A = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \text{ [dB]}. \tag{5}$$

Ztráta je tedy definována jako kladná veličina. V případě odrazu od sváru, spojky, resp. konce vlákna definujeme reflexi jako

$$R = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \text{ [dB]}, \tag{6}$$

kde P_i, resp. P_r jsou dopadající, resp. odražený výkon. Odraz je tedy záporný, přičemž menší číslo v [dB] značí menší reflexi. Definuje se také měrný útlum, který je vztažený na jednotku délky vlákna

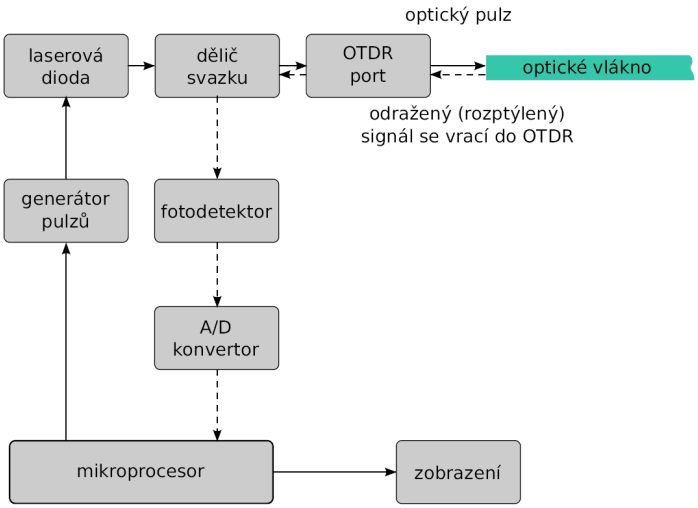
$$\alpha = \frac{A}{L} \text{ [dB/km]}. \tag{7}$$

OTDR - Optical Time Domain Reflectometry

Měření parametrů optických vláken metodou zpětného rozptylu představuje v současnosti velmi důležitý nástroj pro zajišťování spolehlivého provozu a údržby přenosových systémů s optickými vlákny. Metoda zpětného rozptylu, nazývaná také optická reflektometrie (OTDR), je metoda založená na měření optického výkonu, který je rozptýlen, resp. odražen v různých bodech vlákna zpět ke vstupnímu čelu vlákna. Měřící přístroj vysílá do vlákna příslušný signál a měří zpětně rozptýlenou, resp. odraženou energii v závislosti na čase. Ze známé rychlosti šíření potom určí polohu daného rozptylového centra. Z podstaty vyplývá, že touto metodou je možné měřit útlum vlákna, analyzovat útlum jak v celé délce, tak i v jednotlivých úsecích, zjišťovat podélnou homogenitu vlákna, útlum svárů a konektorů, délku vlákna a zároveň i lokalizovat poruchy. OTDR se používá rovněž ke zjišťování optické kontinuity trasy. Základními fyzikálními procesy, které umožňují fungování metody jsou Rayleighův rozptyl a Fresnelův odraz. K Rayleighově rozptylu dochází po celé délce vlákna, a je proto možné měřit jeho útlum spojitě i v úsecích, kde se nevyskytují žádné makroskopické nečistoty, resp. poruchy. K Fresnelově odrazu dochází v místech se skokovou změnou indexu lomu jako jsou sváry, konektory, konec vlákna, apod. Pro využití OTDR v technické praxi existuje v současné době řada různě dokonalých měřicích přístrojů. Převážnou většinou přístrojů OTDR lze měřit následující parametry:

- celkový útlum trasy
- délka trasy
- kontinuita tras pro ověření správnosti montáže optické trasy a optických rozvaděčů
- nehomogenita vláken
- útlum (zpětný odraz) všech svárů a spojek
- měrný útlum všech vláken jednotlivých kabelových délek trasy

Blokové schéma metody je na Obr. 4.



Obrázek 4: Blokové schema OTDR.

Pro matematickou závislost detekovaného výkonu rozptýleného ve vlákně platí:

$$P_b(z) = \frac{1}{2} P_0 \Delta t v_g S \alpha_R 10^{-\frac{\alpha z}{5}}, \tag{8}$$

kde P_0 je navázaný výkon, P_b měřený (detekovaný) výkon, Δt šířka pulsu, v_g grupová rychlost, S koeficient zpětného rozptylu, α_R je ztráta rozptylem, z je vzdálenost a α jsou celkové ztráty (rozptylem a absorpcí) v jednotkách [dB/km]. Koeficient zpětného rozptylu S závisí na materiálových vlastnostech (čistotě a homogenitě vlákna), geometrickém provedení (průměru vidového pole) optického vlákna, ale také na parametrech měřícího impulsu (spektrální šířce). Pro orientaci se hodnota S pohybuje pro jednovidová (SM) vlákna okolo $S \approx -50$ dB, pro mnohovidová (MM) okolo $S \approx -23$ dB. Výhodou této metody měření je její relativní jednoduchost a možnost monitorovat průběh (profil) nehomogenit v celé délce

měření včetně lokalizace poruchy. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a nutnost měřit z obou stran vlákna.

Přístroje OTDR lze charakterizovat několika parametry, které udávají možnosti měření pomocí daného zařízení. Mezi nejdůležitější z nich patří:

- *Délková přesnost* - Přesnost měřícího přístroje závisí na přesnosti zadané hodnoty indexu lomu vlákna (hodnota by měla být zadána s přesností alespoň 10^{-3}), přesností časové základny a samotné chybě způsobené měřením rozptylu. Vzdálenost d je určena vztahem

$$d = \frac{c}{n}\frac{t}{2}, \tag{9}$$

  kde c je rychlost světla, n index lomu vlákna a t je časový interval, který uběhne od vyslání signálu k jeho přijetí.

- *Linearita (přesnost měření útlumu)* - Udává schopnost přístroje zachovat přímočarý průběh útlumu měřeného vlákna s lineární závislostí útlumu na délce a nezkreslovat ho přídavným zakřivením.

- *Dynamický, resp. měřicí rozsah* - Tento rozsah vypovídá o maximální hodnotě útlumu měřené trasy při určité přesnosti měření poruchy blízko jejího konce.

- *Mrtvá zóna* - Délka mrtvé zóny závisí na použité šířce impulsu, velikosti odrazu poruchy, provedení detekční části přístroje a na použitém algoritmu analýzy. Rozlišují se dvě mrtvé zóny, a to identifikační mrtvá zóna (event dead zone), která udává nejmenší vzdálenost dvou odrazných poruch, při které lze poruchu bezpečně rozlišit, a dále útlumová mrtvá zóna (attenuation dead zone), která charakterizuje vzdálenost za poruchou s určitou velikostí odrazu, kde nelze spolehlivě měřit útlum vlákna. Podstatou existence mrtvých zón je saturace detektoru na jistou dobu po přijetí intenzivního signálu většinou způsobeného odrazem. Velikost mrtvé zóny lze ovlivnit volbou délky pulzu.

- *Vlnová délka použitého záření* - většina přístrojů umožňuje měřit na více typických komunikačních vlnových délkách, které byly zvoleny s ohledem na minimum disperze a útlumu používaných materiálu pro výrobu vláken. Jedná se zejména o vlnové délky 1310 nm a 1550 nm.

Typický výstup z měření pomocí OTDR je zobrazen na Obr. 5.

Obrázek 5: Příklad měření optické trasy pomocí OTDR. Na obrázku jsou demonstrovány projevy některých základních součástí optické trasy.

2 Zadání úlohy

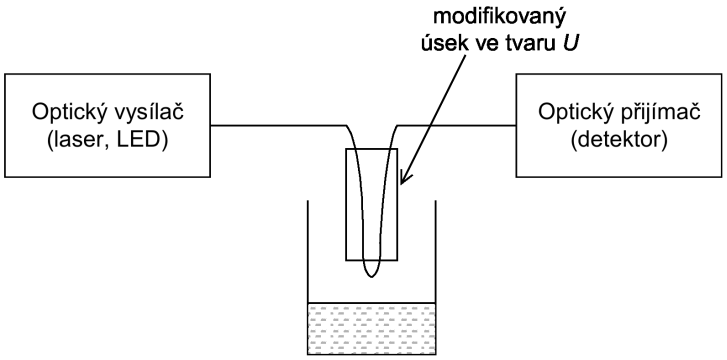
Pomůcky:

Sada optických vláken různých délek s konektory a spojkami, OTDR - EXFO FTB-200, detektor optického výkonu, He-Ne laser, laserová dioda, kolimační optika, mikroposuvný stolek, řezačka vláken, kroužky různých průměrů, úhloměr, voda, ethanol, svářečka optických vláken S46999-M7-A60.

Postup měření:

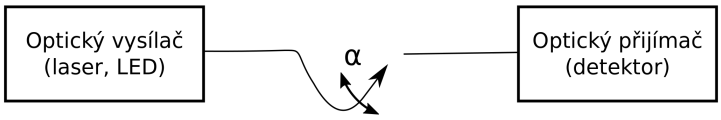
1. Základní charakteristiky optických vláken

   - Prohlédněte si konce jednomódového a mnohomódového vlákna pod mikroskopem. Navažte do druhého konce vlákna optické záření a prohlédněte si svítící jádro vlákna.
   - Navažte do plastového mnohomódového vlákna záření pod různými úhly (průměr jádra 980um, černé, plastové). Pozurujte na stínítku vystupující záření. Popište a zdůvodněte výsledky pozorování. Určete alespoň přibližně velikost jádra měřeného vlákna.
   - Odstraňte sekundární ochranu z konců vlákna (skleněné vlákno, průměr jádra 60-70um) a ty pak zarovnejte na speciální řezačce. Pod mikroskopem porovnejte konec vlákna uříznutý řezačkou a nůžkami.
   - Navažte do vlákna záření He-Ne laseru pomocí fokusačního objektivu a mikroposuvného stolku. Dbejte, aby osa dopadajícího svazku korespondovala s osou jádra optického vlákna. Měřte optický výkon prošlý vláknem a studujte vliv navázání. Určete celkový útlum na vlákně A a podíl přenesené energie od zdroje k detektoru.



Obrázek 6: Senzor hladiny kapaliny - měření ohybových ztrát v různých okolních prostředích.

   - Podle Obr. 6 sestavte senzor hladiny kapaliny. Ohyb vlákna o 180° s velmi malým poloměrem ohybu způsobí značné ohybové ztráty závislé na hodnotě indexu lomu okolního prostředí. Určete výkon přenesený vláknem v jednotlivých kapalinách (+ vzduch). Určete závislost přenesené energie na indexu lomu. Předpokládejte lineární závislost útlumu na indexu lomu a na základě měření kapalin se známým indexem lomu určete index lomu „neznámé“ kapaliny. Výsledky diskutujte.

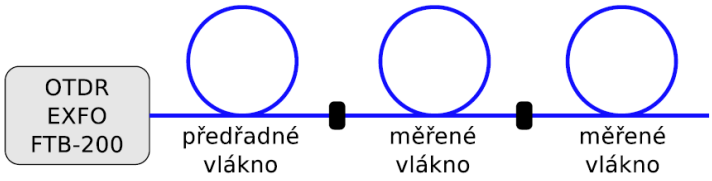


Obrázek 7: Měření numerické apertury optického vlákna.

   - Změřte vyzařovací charakteristiku vlákna (plastové, mnohomódové, 980um) - numerickou aperturu - pomocí uspořádání na Obr. 7. Šířku vyzařovací charakteristiky určete z poklesu této závislosti na 5% maximální hodnoty. Určete hodnotu normalizované frekvence V a v závislosti na hodnotě V zdůvodněte, zda je vlákno jednomódové nebo mnohomódové. Určete rozdíl indexů lomu jádra a plášte měřeného vlákna. Předpokládejte index lomu vlákna $n_1 = 1.46$.

2. Měření útlumu optických vláken

   - Seznamte se se základními parametry měřicích přístrojů OTDR. Připravte pracoviště pro měření úkolů. Příklad uspořádání je na Obr. 8. Nastavte základní parametry měřícího přístroje (délku pulsu, délkový rozsah, průměrování signálu). Při prácí s vlákny dbejte na čistotu konektorů, která zásadně ovlivňuje optické ztráty.
   - Změřte hodnoty útlumu zvoleného systému vláken podle instrukcí vyučujícího. Určete útlum a odraz různých typů konektorů. Připojte měřené vlákno k vláknu předřadnému a OTDR nastavte tak, aby zobrazoval zpětně rozptýlený signál z měřeného vlákna.Proveďte manuální



Obrázek 8: Experimentální uspořádání pro měření pomocí OTDR

odečtení hodnot měrného útlumu všech částí trasy a také odečtení útlumu a odrazu všech svárů a konektorů. (Pokud je požadovaná větší rozlišovací schopnost, je možné požadovaný úsek zobrazit ve větším měřítku.) Výsledky porovnejte s automatickým zpracováním, které provedl přístroj. Měření a vyhodnocování na obou vlnových délkach 1310 nm a 1550 nm.

- Demonstrujte vliv délky pulzu na viditelnost blízkých poruch (použijte systém krátkých vláken umístěných někde v průběhu optické trasy) a vliv nesprávné volby délkového rozsahu přístroje (přítomnost vícenásobných odrazů).
- Vybranou optickou trasu uložte a zpracujte pomocí software EXFO OTDR_VIEWER, který je součastí balíku ZPOP_08_software.zip na serveru optics.fjfi.cvut.cz.

3. Svařování optických vláken
   - Na základě instrukcí vyučujícího svařte pomocí svářečky optická vlákna.
   - Pomocí OTDR změřte odraz na sváru. Porovnejte se s profesionálně svařenými vlákny.

3 Požadované výsledky

1. Naměřte optický výkon prošlý vláknem a popište vliv navázání. Určete útlum a podíl přenesené energie.
2. Popište závislost hodnoty útlumu na prostředí (ethanol, voda, vzduch), ve kterém je umístěn senzor hladiny kapaliny. Do tabulky zapište naměřené hodnoty výkonu a příslušné hodnoty indexu lomu jednotlivých kapalin. Na základě interpolace naměřených hodnot určete hodnotu indexu lomu neznámé kapaliny.
3. Změřenou vyzařovací charakteristiku vyneste do grafu v normovaném tvaru a vypočtěte numerickou aperturu optického vlákna (do talbulky uveďte naměřené hodnoty). Určete hodnotu normalizované frekvence a rozhodněte zda je vlákno jednomódové nebo mnohomódové. Určete rozdíl indexů lomu měřeného vlákna.
4. Vybranou naměřenou trasu OTDR zpracujte pomocí software EXFO OTDR_VIEWER. Uveďte naměřené hodnoty útlumu a měrného útlumu vláken, útlumu a odrazu různých konektorů pro obě vlnové délky. Hodnoty útlumu a odrazu na určete v **decibelech** i **procentech**. Na základě měření zhodnoťte která vlnová délka je pro přenos informaci vhodnější. Porovnejte různé typy použitých konektorů. Výsledky stručně okomentujte - shrňte jaký je typická reflektance, absorpce na konektoru (v procentech), jaký je typický útlum na jednom km vlákna (v procentech), ...
5. Stručně popište proces sváření optických vláken. Zhodnoťte úspěšnost sváření vlákna na základě OTDR měření svařeného vlákna.

Reference

[1] Plastová optická vlákna (POF). URL: <www.lss.fd.cvut.cz/vyuka/tkms/soubory/semestralni-prace-2009-2010/mlynarova_plastova-opticka-vlakna-final.doc> [cit. 05. 3. 2015]

[2] Index Profiles and Types of Fibers. URL: <http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument c1.pdf?SGWID=0-0-45-503402-p173796625> [cit. 26. 3. 2015]

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber

[4] SALEH, Bahaa E a Malvin Carl TEICH. Základy fotoniky: svazek 2. 1. vyd. Praha: Matfyzpress, 1994, xxxii, 226 s. ISBN 80-85863-01-4.