

Přenos optickými medii a jeho vlastnosti

Transmission through optical media
and his properties

Pavel Rolenc

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel ROLENC**
Osobní číslo: **A08367**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Přenos optickými medii a jeho vlastnosti**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte historii optického přenosu dat včetně vývoje optických medií používaných pro tyto přenosy.
2. Technologii porovnejte s jinými typy přenosu dat.
3. Vypracujte studii na trhu v současnosti dostupných zařízení a kabelů pro takovéto přenosy.
4. Tyto porovnejte z hlediska důležitých parametrů a ceny.
5. V praktické části se zaměřte na chybovost přenosu optickými vlákny.
6. Provedte vyhodnocení přenosu zpráv s vyčíslením pravděpodobnosti chyb po testování přenosu binárními pseudonáhodnými vektory.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **BOHÁČ, Leoš; LUCKI, Michal. Optické komunikační systémy. Vyd. 1. V Praze : České vysoké učení technické, 2010. 165 s. ISBN 978-80-01-04484-1.**
2. **DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha : BEN – technická literatura, 2005. 154 s. ISBN 80-7300-184-5.**
3. **KOCOUREK, Petr; NOVÁK, Jiří. Přenos informace. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2004. 241 s. ISBN 8001028925.**
4. **TOŠOVSKÝ, Petr. Tester pro sériový digitální spoj. [s.l.], 2007. 72 s. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Kolouch, CSc.**
5. **MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna : verze 2.1.3 [online]. [s.l.] : VŠB TU Ostrava FEI, 2006 [cit. 2011-02-01]. Dostupné z WWW: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lubomír Macků, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce se zabývá základy a principy přenosu informace optickým vláknem. Je zde zpracována historie optického přenosu dat. Dále jsou v práci popsány výhody a nevýhody takového přenosu oproti jiným typům přenosu. V praktické části je proveden průzkum trhu, zabývající se zařízeními v této oblasti. Taktéž zde nalezneme výsledky praktických měření věnujících se chybovosti přenosu dat optickým vláknem a jejich následné vyhodnocení.

Klíčová slova: optické vlákno, disperze, útlum, přenos, chybovost

ABSTRACT

The thesis deals with the foundations and principles of information transmission through an optical fiber. A history of optical data transmission is here processed. Also the advantages and disadvantages of such transmission are compared to other types of transmission. In the practical part a market research is executed, engaged in devices in this field. Also results of the practical measurements devoted to error rate of data transmission through optical fiber and their subsequent evaluation can be found in the practical part.

Keywords: optical fiber, dispersion, attenuation, transmission, error rate

Chtěl bych zde poděkovat svému vedoucímu Ing. Lubomíru Mackovi, Ph.D. za odborné vedení, za konzultace, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval během zpracování mé bakalářské práce. Dále také Ing. Michalu Kubíčkoví, Ph.D. za obětavou pomoc a další cenné rady, jenž byly pro mne hodnotným přínosem znalostí a informací při zpracování mé praktické části. Poděkování patří také Ing. Ludvíku Hejdovi za obětavou pomoc a poskytnutí optického kabelu. Dík patří také firmě Zlín Net, a.s. zejména ing. Marku Kojeckému za cenné rady a poskytnutí materiálu k optickému kabelu. Také bych chtěl poděkovat prof. Ing. Karlovi Vlčkovi, CSc. za cenné rady a zajištění zápůjčky testeru z VUT v Brně.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 HISTORIE OPTICKÉ KOMUNIKACE	11
2 PŘENOS OPTICKÝMI VLÁKNY	12
2.1 ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM	12
2.2 PRINCIP PŘENOSU	13
2.2.1 Zákon odrazu a lomu.....	13
2.2.2 Geometrická optika	15
2.2.3 Numerická apertura	17
2.2.4 Elektromagnetická teorie šíření.....	19
2.3 ZÁKLADNÍ TYPY OPTICKÝCH VLÁKEN	20
2.3.1 Jednovidová vlákna – Single Mode (SM).....	21
2.3.2 Mnohovidová vlákna – Multi Mode (MM).....	22
2.3.3 Porovnání jednovidových a mnohovidových vláken	24
2.4 VLÁKNA PCF – PHOTONIC CRYSTAL FIBER	25
2.5 METODY SDRUŽOVÁNÍ SIGNÁLŮ.....	26
2.5.1 WDM.....	26
2.5.2 DWDM.....	27
2.5.3 CWDM.....	27
2.6 ZÁKLADNÍ PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN.....	28
2.6.1 Útlum.....	28
2.6.2 Disperze.....	30
2.7 BEZPEČNOST PŘENOSU	33
2.8 METODY SPOJOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN	33
2.8.1 Spojování optických vláken svařováním	33
2.8.2 Spojování optických vláken mechanickou spojkou	34
2.8.3 Spojování optických vláken optickým konektorem	34
3 OPTICKÉ ZDROJE A DETEKTORY ZÁŘENÍ	36
3.1 OPTICKÉ ZDROJE	36
3.1.1 LED.....	36
3.1.2 LASER	37
3.2 OPTICKÉ DETEKTORY	37
4 JINÉ TYPY PŘENOSŮ	38
4.1 PŘENOS PO METALICKÉM VEDENÍ	38
4.2 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS	38
4.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PŘENOSŮ	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
5 PRŮZKUM TRHU	41
5.1 OPTICKÁ VLÁKNA	41
5.1.1 Jednovidová vlákna.....	41
5.1.2 Mnohovidová vlákna.....	42
5.1.3 Porovnání parametrů a cen.....	45

5.2	KONVERTORY	46
5.2.1	Porovnání parametrů a cen	47
5.3	ZAŘÍZENÍ PRO SPOJOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN	48
6	MĚŘENÍ CHYBOVOSTI	53
6.1	DEFINICE CHYBOVOSTI.....	53
6.2	PRAVDĚPODOBNOST CHYBOVOSTI.....	54
7	TESTER TESTOS 05.....	56
7.1	ALGORITMUS TESTOVÁNÍ	56
7.2	TESTOVACÍ SEKVENCE	56
7.2.1	Posuvný registr LFSR	57
7.3	KOMUNIKACE MEZI PC A TESTEREM	57
7.3.1	Ukázka naměřených dat	58
8	MĚŘENÍ OPTICKÝCH VLÁKEN.....	60
8.1	NASTAVENÍ PŘENOSOVÉ RYCHLOSTI	60
8.2	ODHAD NUTNÉ DOBY MĚŘENÍ.....	62
8.3	MĚŘENÍ OPTICKÉHO KABELU.....	63
8.3.1	Optický kabel bez ohybu.....	63
8.3.2	Optický kabel s nekorektně zastrčeným konektorem.....	64
8.3.3	Optický kabel s ohybem 10x průměr 7,5 cm	67
8.3.4	Optický kabel s ohybem 10x průměr 4,5 cm	68
8.3.5	Optický kabel s ohybem 10x průměr 1,5 cm	69
8.3.6	Vlákno s ohybem 1x průměr 3,1 mm.....	70
8.3.7	Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1 mm.....	70
8.3.8	Vlákno s ohybem 1x průměr 2,3 mm.....	73
8.3.9	Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3 mm.....	74
8.4	SROVNÁNÍ MĚŘENÍ S VÝSKYTEM CHYBNĚ PŘENESENÝCH BITŮ	77
	ZÁVĚR	80
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	87
	SEZNAM TABULEK.....	89
	SEZNAM PŘÍLOH.....	90

ÚVOD

Potřeba přenášet informaci bylo, je a bude součástí našeho každodenního života. Tyto informace lze v dnešní době přenášet různými způsoby, z nichž každý má svoje výhody i nevýhody. V zásadě je můžeme rozdělit na přenos po metalickém vedení, bezdrátový přenos a přenos po optickém vlákne. Pro každý typ aplikace je vhodný jiný typ přenosu a nelze určit univerzální typ přenosu. Je tedy vhodné se zamyslet, jaký typ přenosu zvolit pro danou aplikaci. Abychom tak mohli ale učinit, měli bychom o daném možném způsobu přenosu něco znát.

Tato bakalářská práce se zabývá základní problematikou přenosu optického paprsku vláknem a má poskytnout veřejnosti mimo jiné i základní vlastnosti přenosu po optickém vlákne a jeho srovnání se současnými jinými typy přenosu.

V dnešní době vzrůstají požadavky uživatelů nejen na vyšší kvalitu a rychlost spojení, ale i bezpečnost přenášené informace. Zvýšení bezpečnosti přenášené informace můžeme zajistit například využitím šifrovacích metod. Je zde možnost využít i způsob přenosu, který poskytuje jistou bezpečnost již svou konstrukcí. Optické vlákno lze považovat za bezpečné přenosové médium, které poskytuje určitou formu zabezpečení již na fyzické vrstvě. Jde o to, že nelze získat použitelný optický signál bez snížení přenášeného výkonu – snížení výkonu se detekuje v koncovém zařízení.

Při pokládce optického vlákna je potřeba brát v úvahu i jeho vlastnosti. Optické vlákno totiž nelze libovolně ohýbat. Při ohybu s malým poloměrem dochází totiž k podstatnému navýšení chybovosti, což může mít nemalý vliv na kvalitu spoje.

To bylo také motivací ke zvolení měření chybovosti ohybů (závitů) na optickém kabelu. Měření chybovosti se využívá nejen pro popis kvality optického spoje. Jsou zde využívány parametry, které definovaným způsobem popisují výskyt chybných stavů. Tím lze případně porovnávat kvalitu několika systémů s různou realizací.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE OPTICKÉ KOMUNIKACE

K těm nejstarším a nejprimitivnějším způsobům optické komunikace lze zařadit přenos pomocí kouřových či světelných signálů. Vznik optické komunikace se často spojuje s francouzským vynálezcem Claude Chappem, který v roce 1792 demonstroval přenos zpráv na dlouhé vzdálenosti, který byl založený na principu světelné signalizace. K tomuto účelu použil rozhledny vybudované na kopcích. Touto metodou byl schopen přenést informaci až na vzdálenost kolem 200 km s použitím 15 mezilehlých „retranslačních“ rozhleden.

Za zmínku stojí také badatelé Daniel Colladon, Jacques Babinet, John Tyndall, kteří postupně prokázali, že se světlo může šířit i uvnitř opticky transparentní struktury a ne jen pouze podél přímé nebo lomené trajektorie. První pokusy s vedením světla byly určeny spíše pro oblast osvětlovací techniky a později v medicíně - endoskopie. Možnost přenosu hlasového signálu prostřednictvím světla v roce 1880 demonstroval Alexander Graham Bell svým zařízením, které nazval fototelefon. Základním problémem byly značné ztráty energie (útlum).

Optické vlákno skládající se z jádra a pláště bylo v roce 1954 nastíněno Abrahamem Van Heelemem. Měrný útlum takovýchto vláken byl kolem 1000 dB/km. Významnou prací se stala teoretická práce Dr. Charlese H. Kaoa, která se zabývala útlumem. Na základě této práce se v roce 1970 podařilo poprvé ve firmě Gorning Glass Works vyrobit třem badatelům, Robertu Maurerovi, Donaldu Keckovi a Peteru Schultzovi optická vlákna s měrným útlumem pod 20 dB/km. O dva roky později se podařilo stejným badatelům vyrobit optické vlákno s měrným útlumem 4 dB/km.

Z optických zdrojů stojí za zmínku rubínový laser, který byl v roce 1960 sestrojen Theodorem Heroldem Maimanem. O dva roky později byl demonstrován Robertem N. Hallovem polovodičový laser s vlnovou délkou 850nm.

2 PŘENOS OPTICKÝMI VLÁKNY

Každé optické vlákno má schopnost vést elektromagnetické záření. Jde o simplexní spoj, tedy na jedné straně se nachází vysílač a na druhé přijímač. Lze však využít duplexního spoje, kde se pro každý směr použije jiná vlnová délka na jednom vlákně. Pro duplexní spoj se většinou používá dvojice optických vláken, kde každý směr má vlastní optické vlákno.

2.1 Elektromagnetické spektrum

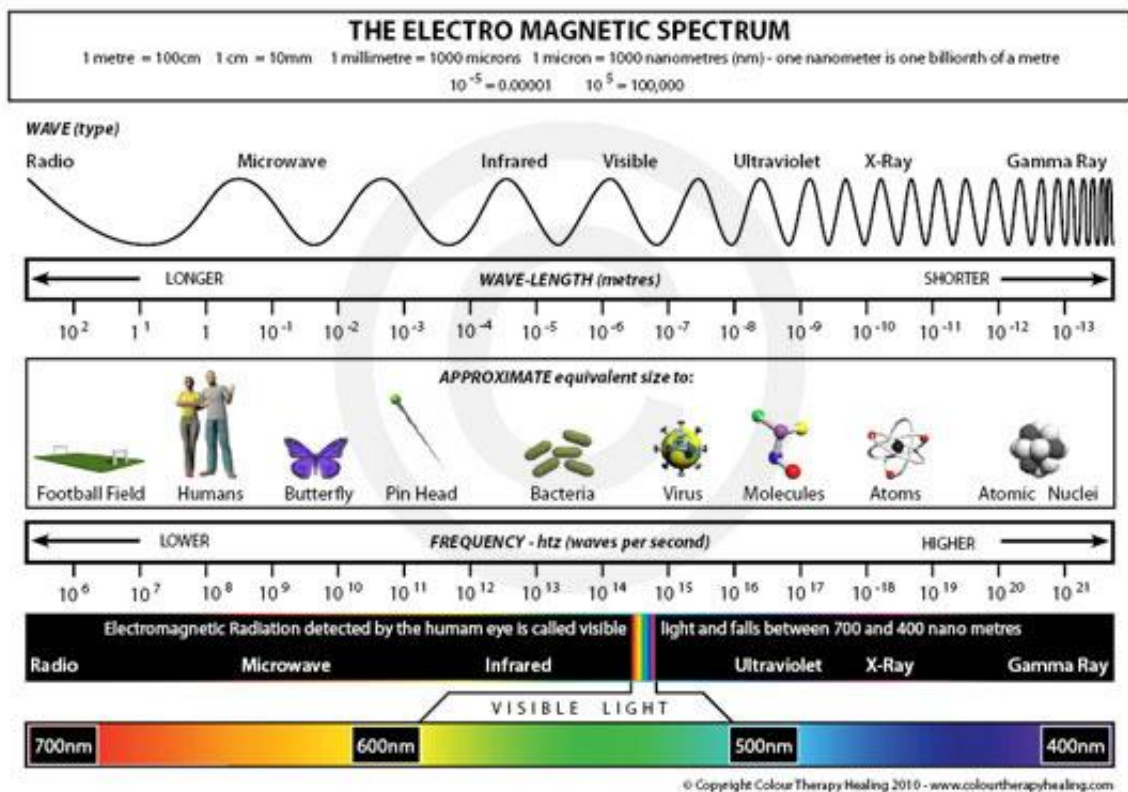
Elektrické a magnetické pole spolu úzce souvisí. Důležitým projevem je schopnost šíření elektromagnetické energie ve formě vlnění. Každé vlnění je popsáno parametry, jako je např. frekvence, vlnová délka a fázová rychlost šíření. Na obr.1 je znázorněno elektromagnetické spektrum.

Elektromagnetické vlnění je např. optické záření nebo radiové vlny. Jejich primárním rozdílem je frekvence. U optického záření nebo světla je frekvence o mnoho řádů vyšší než u radiových vln. Lze definovat rozdíl mezi světlem a optickým zářením. Světlem lze nazvat takové elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou, která je pro člověka viditelná. Jedná se o vlnovou délku v rozmezí od 380nm do 750nm. Za optické záření lze považovat takové elektromagnetické vlnění, jehož vlnová délka je kratší než 100 μ m. Pro oblast vláknové telekomunikační techniky se používá rozmezí přibližně od 800nm do 1675nm. Rychlost šíření takovýchto vlnění závisí na permeabilitě μ a permitivitě ε prostředí. Tuto rychlost lze vypočítat podle vztahu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (1)$$

Kde:

- v je rychlost optického záření v daném prostředí; [m/s]
- $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita prostředí; [F/m]
- $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, kde μ_0 je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita prostředí; [H/m]



Obr. 1 Elektromagnetické spektrum [10]

2.2 Princip přenosu

Jsou různé metody analýzy šíření světla v optických vláknech. Jednou z nich je geometrická optika. Tato metoda popisuje šíření optického záření formou paprsků s využitím odrazu a lomu na rozhraní dvou různých optických prostředí, tedy jádra a pláště. Druhou metodou je elektromagnetická teorie šíření, která vychází z numerického nebo analytického řešení pole pomocí Maxwellových rovnic v optickém vlnovodu.

2.2.1 Zákon odrazu a lomu

Mezi základní zákony geometrické optiky patří zákon odrazu a lomu na rozhraní dvou optických prostředí. Důležitou součástí v definici Snellova zákona lomu je index lomu prostředí.

Pro index lomu prostředí platí:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Kde:

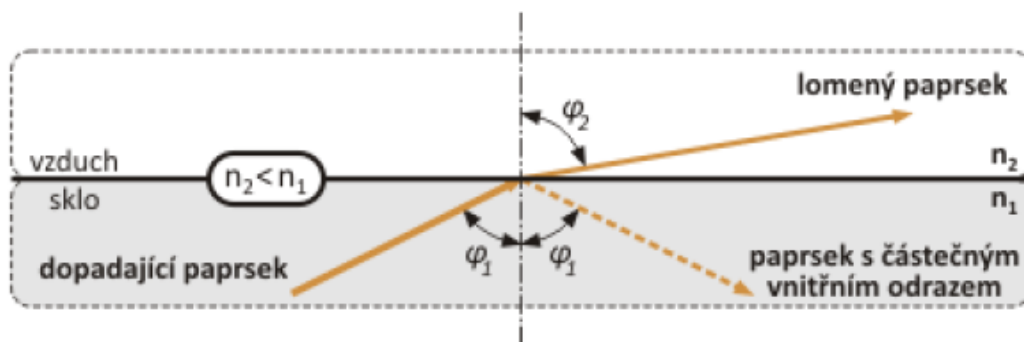
- n je index lomu optického materiálu; [-]
- c je fázová rychlost šíření záření ve vakuu; [m/s]
- v je fázová rychlost šíření záření v daném materiálu; [m/s]

Při dopadu paprsku pod úhlem φ_1 na rozhraní dvou optických materiálů s různými indexy lomu n_1 a n_2 platí, že úhel odraženého paprsku bude stejný. Pro lomený paprsek v prostředí s indexem lomu n_2 platí Snellův zákon lomu. Tento zákon je daný vztahem (3). Zákon odrazu a lomu máme znázorněn na obr.2.

$$n_1 \cdot \sin \varphi_1 = n_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (3)$$

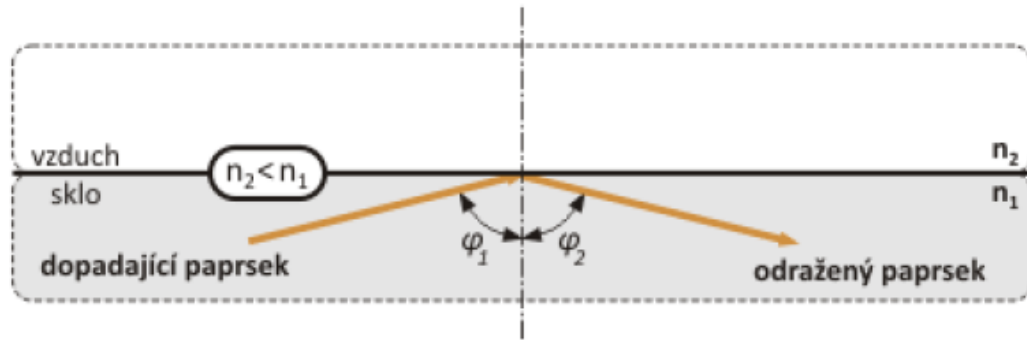
Kde:

- n_1 je index lomu opticky hustšího prostředí – jádro vlákna; [-]
- n_2 je index lomu opticky řidšího prostředí – plášť vlákna; [-]
- φ_1 je úhel dopadajícího paprsku; [rad]
- φ_2 je úhel lomeného paprsku; [rad]



Obr. 2 Zákon odrazu a lomu [12]

Za opticky hustší prostředí se považuje prostředí s větším indexem lomu. Naopak, prostředí s nižším indexem lomu je prostředí opticky řidší. Důležitým poznatkem pro analýzu šíření záření optickým vláknem je jev úplného odrazu (obr.3), tj. dopadající záření na rozhraní jádro/plášť se bez ztráty energie odrazí zpět do jádra.



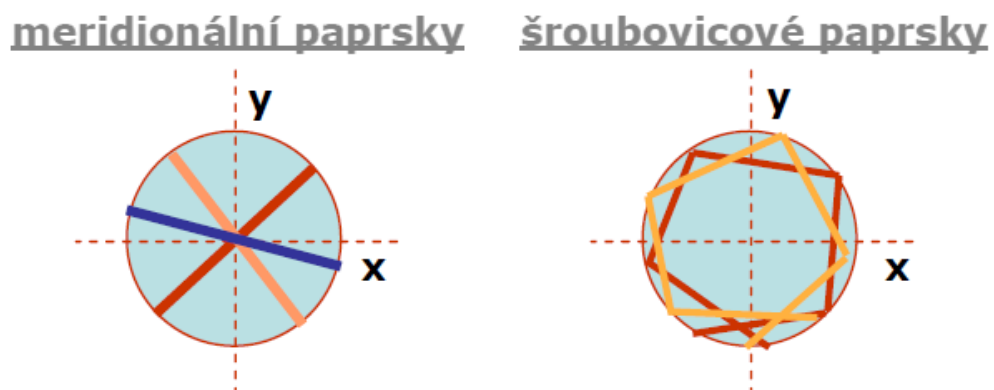
Obr. 3 Jev úplného odrazu [12]

Pokud paprsek dopadne na rozhraní jádro/plášť pod úhlem nesplňujícím podmínku úplného odrazu, část jeho energie převezme paprsek lomený, který se utlumí nebo se následně vyzáří z vlákna ven. Pro paprsek šířící se vláknem to ale znamená významnou ztrátu při každém dílčím odrazu. Těmto ztrátám se říká ztráty radiční, protože záření není transformováno na jinou energii (např. tepelnou), ale je vyzářeno z jádra ven. [1]

2.2.2 Geometrická optika

Využíváme Snellova zákona lomu k analýze šíření světla optickým vláknem. Pro správnou funkci je nezbytné, aby materiál jádra měl větší index lomu n_1 , než materiál pláště s indexem lomu n_2 . Do analýzy ještě vstupuje index lomu okolí n_0 . Pokud je plášť vlákna obklopen vzduchem je hodnota indexu lomu n_0 rovna přibližně hodnotě 1.

Pro zjednodušení budeme analyzovat šíření paprsků ležící v některé rovině podélného osového řezu vlákna (obr.4). Paprsky ležící v takové rovině nazýváme meridionální. Složitější analýza trajektorie paprsků je u paprsků, které se navazují do jádra v rovině sagitální. Ty tvoří také podélný řez vlákna, ale ne v jeho ose. Takovéto paprsky nazýváme šroubovicové.



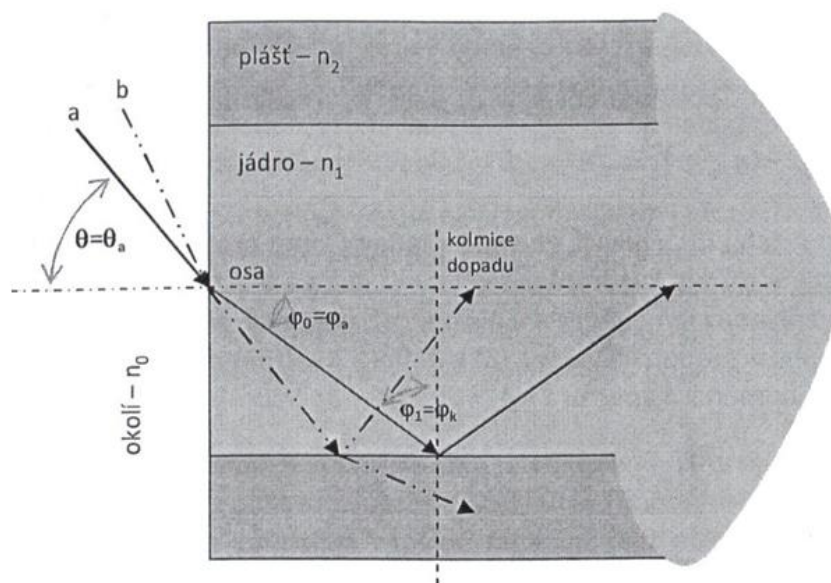
Obr. 4 Průřez paprsků do roviny kolmé (x-y) na směr šíření v ose z [11]

Na levé části obr.4 jsou znázorněny tři meridionální roviny. Meridionální paprsek je takový, jehož trajektorie leží vždy jen v jedné z těchto rovin. Podstatné je, že v každé meridionální rovině leží současně i osa vlákna. Na pravé části obr.4 jsou znázorněny průměty trajektorie dvou šroubovicových paprsků. Pokud osa vlákna neleží v rovině dopadu paprsku na čelní plochu jádra, bude paprsek opisovat šroubovicovou dráhu.

Na obr. 5 jsou znázorněny dva meridionální paprsky, jejich navázání a částečný průchod jádrem. Oba meridionální paprsky *a* i *b* se navazují do jádra vlákna z okolního prostředí s indexem lomu n_0 . Tímto prostředím je často vzduch. Po navázání paprsku do jádra vlákna paprsek změní svůj směr, protože dojde k jeho lomu na rozhraní okolí/jádro. Také dojde k jeho částečnému odrazu, který není na obrázku znázorněn.

Lomený paprsek nenesou stejnou energii, jakou měl před dopadem na rozhraní okolí/jádro, protože se jeho dílčí část odrazí, pokud ovšem není shodný index lomu okolí s indexem lomu jádra. Pokud materiál jádra je v celém svém objemu homogenní, bude paprsek pokračovat v přímkové dráze, až na rozhraní jádro/plášť. Při dopadu na toto rozhraní dojde jak k odrazu, tak i k lomu. Na obr. 5 je tato situace zakreslena pro trajektorii paprsku *b*.

Existuje skupina paprsků dopadajících na rozhraní okolí/jádro pod takovým úhlem θ , že úhel jejich dopadu na rozhraní jádro/plášť bude roven úhlu φ_1 , který je roven nebo větší než kritický úhel φ_k . Na obr. 5 je tento paprsek označený jako *a*. V této situaci dojde k úplnému odrazu paprsku, neboli energie dopadajícího paprsku na rozhraní jádro/plášť se beze ztrát odrazí nazpět do jádra.



Obr. 5 Navázání paprsků do vlákna v jedné meridionální rovině [1]

Na rozhraní jádro/plášť vznikne úplný odraz jen v případě, že navázání paprsku do jádra vlákna je provedeno pod úhlem θ v rozmezí od nuly do mezního úhlu θ_a . Paprsky navázané pod takovýmto úhlem jsou jádrem vedené. Při použití úhlu mimo tento rozsah dojde ke vzniku radiačního paprsku - paprsek zanikne. V jiném případě se paprsek do vlákna ani nenaváže, protože se plně odrazí.

2.2.3 Numerická apertura

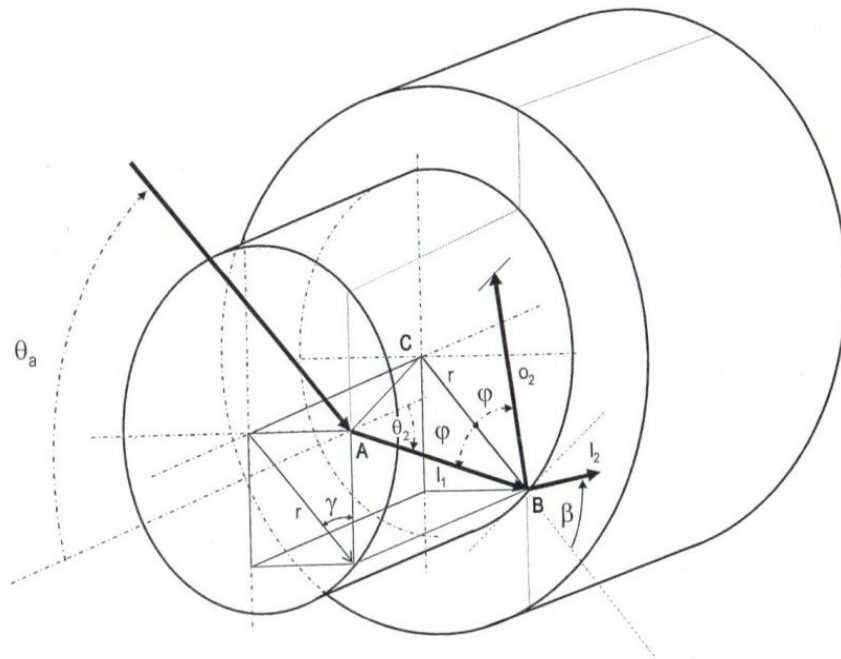
Pro správné navázání záření do optického vlákna je nutné znát velikost mezního úhlu θ_a . Tento úhel je dán Numerickou aperturou (NA), která je důležitým parametrem každého optického vlákna. Numerická apertura je dána vztahem:

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

Kde:

- NA je numerická apertura; [-]
- n_0 je index lomu okolního prostředí; [-]
- n_1 je index lomu jádra; [-]
- n_2 je index lomu pláště; [-]
- θ je úhel paprsku dopadajícího na čelo vlákna; [rad]

Numerická apertura je bezrozměrná veličina s hodnotou menší než jedna. Tato veličina vypovídá, do jaké míry je optické vlákno schopné přijmout záření do svého jádra tak, aby následně vedený paprsek nebyl radiační. Velikost mezního úhlu θ_a tedy závisí na numerické apertuře vlákna, čím větší je, tím je i větší mezní úhel. Výše uvedené platí pro paprsky meridionální.



Obr. 6 Trajektorie šroubovicového paprsku [1]

Trajektorii šroubovicového paprsku můžeme vidět na obr. 6. Tento paprsek je navázán do vlákna v rovině sagitální, jejíž polohu určuje úhel γ . Pro šroubovicové paprsky platí jiná podmínka pro velikost mezního úhlu θ_a . Numerická apertura šroubovicového paprsku je dána vztahem:

$$NA = n_0 \sin \theta_a \cos \gamma \quad (5)$$

Kde:

- NA je numerická apertura; [-]
- n_0 je index lomu okolního prostředí; [-]
- n_1 je index lomu jádra; [-]
- n_2 je index lomu pláště; [-]
- θ je úhel paprsku dopadajícího na čelo vlákna; [rad]
- γ je úhel určující polohu sagitální roviny; [rad]

Šroubovicové paprsky lze navázat i pod větším úhlem než paprsky meridionální. Jinak řečeno, pokud daný úhel θ je nevyhovující pro vedení meridionálního paprsku, pro vedení šroubovicového paprsku by vyhovující být mohl.

2.2.4 Elektromagnetická teorie šíření

Pomocí soustavy Maxwellových rovnic lze exaktně matematicky popsat vlastnosti a chování elektromagnetického pole. V dnešní době jsou Maxwellovy rovnice nejpřesnějším popisem elektromagnetického pole. Elektromagnetickým polem se zde myslí optické záření.

Řešení pole lze provést pomocí Maxwellových rovnic v různých souřadných systémech, z nichž nejběžnější je kartézský souřadnicový systém (x, y, z) . Kartézský souřadnicový systém je vhodný pro řešení polí, které jsou v útvaru obdélníkového nebo kvádrového typu. Optické vlákno je ale ve většině případů válec, a proto není kartézský systém nejvhodnější. Proto se provádí řešení ve válcových souřadnicích (r, φ, z) .

Elektromagnetické pole je charakterizováno elektrickým a magnetickým polem. Tato pole jsou Maxwellovými rovnicemi velice úzce svázána. Pro elektromagnetické pole hraje důležitou úlohu také materiál, ve kterém se toto pole šíří.

Průběh elektrického pole v optickém vlákne (obdobně pro magnetické pole) vycházející z řešení Maxwellových rovnic ve válcových souřadnicích můžeme matematicky zapsat následovně:

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re}[\vec{e} \cdot \hat{F}(r, \varphi) \cdot \hat{A}(z, t) \cdot e^{j(\omega_0 t - \beta(\omega)z)}] \quad (6)$$

Kde:

- \vec{E} je vektor intenzity elektrického pole
- Re je reálná část výrazu v závorkách
- \vec{e} je jednotkový vektor ve směru vektoru intenzity elektrického pole
- F je příčný tvar pole jednoho konkrétního vidu
- r je radiální souřadnice; [m]
- φ je úhlová souřadnice; [rad]
- A je časově proměnný tvar obálky optické nosné
- z je podélná souřadnice ve směru šíření; [m]
- t je čas; [s]
- ω_0 je optická úhlová frekvence, $\omega_0 = 2\pi f_0$; [rad/s]
- f_0 je optická frekvence; [Hz]
- $\beta(\omega)$ je fázová konstanta šíření vidu; [rad/m]

2.3 Základní typy optických vláken

Z hlediska způsobu přenosu záření můžeme rozdělit optická vlákna do dvou skupin:

- Jednovidová vlákna
- Mnohovidová vlákna

Významný rozdíl mezi nimi je ten, zdali je optické vlákno určeno pro provoz v jednovidovém nebo mnohovidovém režimu. Jinak řečeno zdali je vlákno určeno pro přenos jednoho paprsku (vidu) nebo více paprsků (vidů).

Jednovidová vlákna se označují zkratkou SM (Single Mode), mnohovidová vlákna zkratkou MM (Multi Mode).

Další možností, jak lze optická vlákna od sebe odlišit, je průběh indexu lomu v závislosti na poloměru r .

V telekomunikační praxi se nejčastěji používají dva průběhy, jimi jsou:

- Skokový průběh indexu lomu – SI (Step Index)
- Gradientní průběh indexu lomu – GI (Gradient Index)

Skokový průběh indexu lomu znamená, že jádro vlákna má hodnotu indexu lomu n_1 , která se skokově pro $|r| > a$ mění na hodnotu indexu lomu pláště n_2 ($n_1 > n_2$). Matematicky lze průběh indexu lomu $n(r)$ pro tento typ vyjádřit takto:

$$\begin{aligned} n(r) &= n_1, & \text{pro } |r| \leq a \\ n(r) &= n_2, & \text{pro } |r| > a \end{aligned} \quad (7)$$

Kde:

- n_1 je index lomu jádra; [-]
- n_2 je index lomu pláště; [-]
- a je poloměr jádra vlákna; [μm]
- r je proměnná poloměru; [μm]

U gradientního průběhu se index lomu n_1 mění téměř parabolicky. Matematicky lze průběh indexu lomu $n(r)$ pro tento typ vyjádřit takto:

$$\begin{aligned} n(r) &= n_1 \sqrt{1 - 2\Delta(r/a)^\alpha}, & \text{pro } |r| \leq a \\ n(r) &= n_2, & \text{pro } |r| > a \end{aligned} \quad (8)$$

Kde:

- n_1 je index lomu jádra ve středu; [-]
- n_2 je index lomu pláště; [-]
- a je poloměr jádra vlákna; [μm]
- r je proměnná poloměru; [μm]
- α je profilový parametr; [-]
- Δ je relativní změna indexu lomu $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/(2n_1^2)$; [-]

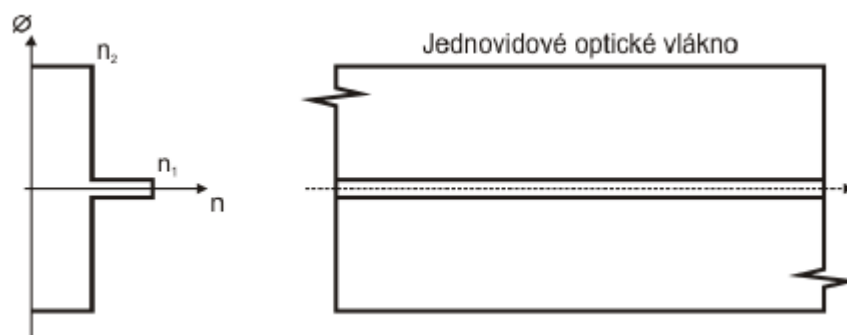
U standardního a disperzně optimalizovaného gradientního optického vlákna je profilový parametr $\alpha \approx 1,98$. U vláken s trojúhelníkovými průběhy indexu lomu je profilový parametr $\alpha = 1$.

2.3.1 Jednovidová vlákna – Single Mode (SM)

Jednovidová optická vlákna jsou ve většině případů používána pro přenos informace na velké vzdálenosti. Tato vlákna jsou používána hlavně díky tomu, že mají nízký útlum, velkou šířku přenosového pásma tedy i velkou přenosovou kapacitu, a že se u nich nevyskytuje vidová disperze. Na druhou stranu se u nich projevuje chromatická disperze.

Velmi malým průměrem jádra (jednotky mikrometrů) lze dosáhnout vedení jednoho vidu (paprsku) bez odrazů. Na obr.7 je znázorněn průchod paprsku SM vláknem.

Jednovidové vlákno je citlivější na mechanické vlastnosti prostředí. Jeho numerická apertura se pohybuje kolem hodnoty 0,1, což vede k nutnosti použít kvalitnější zdroje záření (laserová dioda). Přenosové vlastnosti jsou specifikovány v doporučeních ITU-T G65x (International Telecommunication Union).



Obr. 7 SM vlákno [13]

Podmínka jednovidového vlákna lze vypočítat z Besselových funkcí. Přesněji z prvního kořene Besselovy funkce. Pro jednovidový režim musí platit:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2,405 \quad (9)$$

Kde:

- V je normalizovaná frekvence; [-]
- λ je vlnová délka; [m]
- NA je numerická apertura; [-]
- a je poloměr jádra vlákna; [m]

Druhy jednovidových vláken:

- Klasická vlákna
 - G652 (NDSF – Non Dispersion Shifted Fiber) – standardní jednovidové vlákno s nulovou disperzí, označována jako konvenční, vlnová délka 1310nm a 1550nm.
 - G653 (DSF – Dispersion Shifted Fiber) – vlákna s posunutou kmitočtovou disperzí, nevhodné pro WDM (Wavelength Division Multiplexing) aplikace, vlnová délka 1550nm.
 - G655 (NZ-DSF – Non Zero Dispersion Shifted Fiber) – vlákno s nenulovou posunutou disperzí, někdy značená jen NZDF, vhodné pro DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)
- Polarizovaná vlákna – PM (Polarization Maintaining)
 - Jde o vlákna schopné udržet lineární polarizaci procházejícího paprsku vláknem. Paprsek musí být vzhledem k pomalé ose přesně vyrovnán a být lineárně polarizován. Pokud jsou splněny podmínky, je na výstupu optického vlákna paprsek lineárně polarizován. (Více v kapitole 2.6.2)

2.3.2 Mnohovidová vlákna – Multi Mode (MM)

Mnohovidová vlákna jsou schopné přenášet více vidů najednou. Jde o vlákna s velkým průměrem jádra ($>10\mu\text{m}$). Numerická apertura MM se pohybuje kolem hodnoty 0,2, což vede k možnosti buzení i LED diodou a snadnějšímu navázání paprsku do vlákna.

Mnohovidová vlákna mají menší přenosovou kapacitu, větší útlum a kvůli výskytu vidové disperze se používají na kratší vzdálenosti.

U mnohovidových vláken rozeznáváme tyto dva typy:

- Vlákno se skokovou změnou indexu lomu - Step Index (SI)

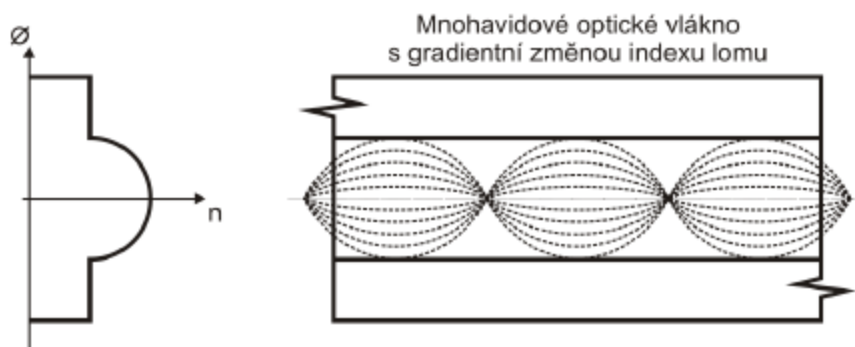
Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MM-SI) patří k technologicky jednodušším, jejich výroba je snadná a levná. Útlum MM-SI vlákna se pohybuje v rozsahu od 5 dB/km do 10 dB/km. Používá se na krátkých trasách a i mimo oblast spojovacích technologií, např. v lékařství. Na obr.8 je znázorněn průchod paprsku MM-SI vláknem.



Obr. 8 MM-SI vlákno [13]

- Vlákno s gradientní změnou indexu lomu - Gradient Index (GI)

Mnohovidové vlákno s postupnou změnou indexu lomu (MM-GI) se skládá z několika vrstev s rozdílným indexem lomu. Procházející vid kopíruje průběh sinusoidy. Ve středu jádra se nachází vrstva s největším indexem lomu a směrem k plášti se zmenšuje. Výsledkem je zvýšení šířky pásma až 25x oproti MM-SI. Vlákna částečně eliminují vidovou disperzi. Tento typ vláken se používá pro datovou komunikaci do vzdálenosti stovek metrů až kilometrů. Jde o kompromis mezi jednovidovým vláknem a MM-SI vláknem. Na obr.9 je znázorněn průchod paprsku MM-GI vláknem.



Obr. 9 MM-GI vlákno [13]

2.3.3 Porovnání jednovidových a mnohovidových vláken

Parametry jednovidových vláken oproti mnohovidovým

- Menší útlum – přenos dat na větší vzdálenosti
- Velká šířka přenosového pásma
- Nevyskytuje se u nich vidová disperze
- Větší přenosová rychlost
- Nízká hodnota NA
- Nutné použít kvalitnější zdroje záření (laserová dioda)

Parametry mnohovidových vláken oproti jednovidovým

- Větší útlum
- Výskyt vidové disperze
- Větší hodnota NA – snadnější navázání optického paprsku
- Jako zdroj lze použít LED diodu

V tab.1 lze vidět srovnání SM a MM vláken podle některých parametrů.

Parametr	SM	MM-SI	MM-GI	
Průměr jádra	< 10 μm	> 50 μm	50 μm	62,5 μm
Průměr pláště	125 μm	> 125 μm	125 μm	
Útlum	$\approx 0,2$ dB/km (pro $\lambda=1550$ nm)	≈ 10 dB/km (pro $\lambda=1385$ nm)	$\approx 0,6$ dB/km (pro $\lambda=1300$ nm)	
NA	$\approx 0,1$	$\approx 0,2 - 0,5$	$\approx 0,2$	$\approx 0,275$
Šířka pásma	> 100 GHz.km	20 – 100 MHz.km	0,3 – 1,5 GHz.km	

Tab. 1 Vlastnosti SM a MM vláken

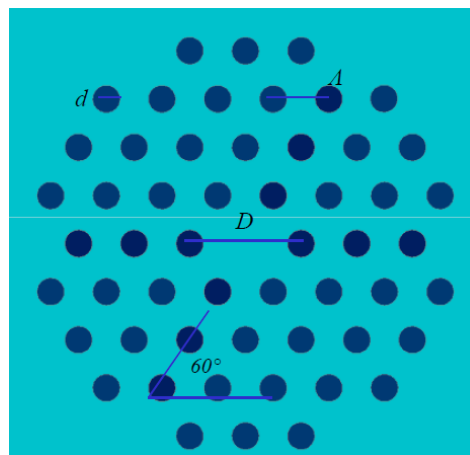
2.4 Vlákná PCF – Photonic Crystal Fiber

Jde o nový druh optických vláken. Při výrobě PCF vlákna jsou po celé jeho délce vytvořeny kapilární duté nebo plné otvory. Toto vede k dosažení lepších parametrů, jako je mnohem větší kontrast indexu lomu.

PCF jsou realizací dvojrozměrného fotonického krystalu - pravidelné prostorové opakování dvou (nebo více) optických materiálů. Tedy index lomu se pak mění podle dvou souřadnic a je konstantní podle třetí souřadnice.

Pojem „Photonic Crystal Fiber“ byl poprvé použit v roce 1995 Phillipem Ruselem. Koncepte fotonických krystalů byly poprvé prezentovány v roce 1987 v průkopnických pracích E. Yablonoviche a S. Johna.

U fotonických krystalů se uplatňuje jev zakázaného pásma - Photonic Band Gap (PBG¹). Geometrie PCF vlákna je znázorněna na obr.10.



Obr. 10 Geometrie PCF vlákna [9]

Kde:

- d je průměr mikrostruktury
- D je průměr jádra
- A je rozteč mikrostruktur
- 60° je tvořící úhel mřížky (většinou 60°)

¹ Fotony se v periodickém prostředí mohou šířit pouze v určitých frekvenčních (vlnových) pásmech. Ta jsou od sebe oddělena zakázanými energetickými pásmy. Pokud by měl foton energii z tohoto zakázaného pásma, nemohl by se fotonickým materiálem šířit. Řečeno zjednodušeně, leč snad názorněji, materiál by foton odrazil a neakceptoval. [1]

Základní druhy mikrostrukturních vláken:

- Vlákno se skleněným jádrem - IGPCF (Index Guiding Photonic Crystal Fiber)
Mechanismus šíření záření je založen na teorii modifikovaného vnitřního odrazu. Jde o téměř stejný mechanismus šíření záření, jako u klasických vláken se skokovou změnou indexu lomu.
- Vlákno s dutým jádrem - HCPCF (Hollow Core Photonic Crystal Fiber)
Mechanismus šíření záření je založen na teorii optického zakázaného pásma.

2.5 Metody sdružování signálů

Metody umožňující sloučit více nezávislých signálů a přenášet je jedním vláknem. U optických systémů máme následující metody sdružování digitálních signálů:

- ETDM (Electric Time Division Multiplexing) – elektrická multiplexace v časové oblasti
- WDM (Wavelength Division Multiplexing) – vlnové sdružování
 - DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – husté vlnové sdružování
 - CWDM (Course Wavelength Division Multiplexing) – hrubé vlnové sdružování
- OTDM (Optical Time Division Multiplexing) – optické časové sdružování
- OCDM (Optical Code Division Multiplexing) – kódové sdružování signálů v optické oblasti

2.5.1 WDM

Účelem vlnového sdružování je sdružovat optické signály o různých vlnových délkách a přenášet je tak po jediném vláknem. Tímto způsobem lze zvýšit přenosovou kapacitu. Základní princip WDM je znázorněna na obr.11:



Obr. 11 Princip WDM

Vstupem WDM multiplexeru jsou vlákna nesoucí informaci o různých vlnových délkách. Z obrázku je patrné, že WDM multiplexer plní funkci sdružování jednotlivých optických signálů do jednoho vlákna. Na druhé straně se pak nachází WDM demultiplexer, který je rozdělí do jednotlivých vláken.

2.5.2 DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) je tzv. hustý WDM. Pracuje v pásmu 191,2 – 196,3 THz (tj. vlnová délka 1528,77 – 1560,61 nm) podle doporučení ITU-T G.694.1. Standardní vlákno zde vykazuje nejnižší útlum. Dle ITU byl specifikován vlnový rastr, který je zakotven na kmitočtu 193,1 THz. Ten odpovídá vlnové délce 1552,55 nm. Od této frekvence se odvíjí frekvence ostatních DWDM kanálů.

Rozestupy mezi kanály lze volit ze škály 100 GHz, 50 GHz, 25GHz a 12,5GHz. To odpovídá rozestupům vlnových délek od 0,8 nm do 0,1 nm. V dnešní době se nejčastěji používají u DWDM rozestupy 50 GHz (0,4 nm) nebo 100 GHz (0,8 nm). Pro levnější aplikace, kde není požadován vysoký počet kanálů je vhodná varianta 100GHz. U varianty 50 GHz je prostor až pro 80 přenosových kanálů, tedy vzdálenost jednotlivých kanálů od sebe je 0,4 nm.

2.5.3 CWDM

CWDM (Course Wavelength Division Multiplexing) je systém pracující s hrubým vlnovým dělením. ITU-T zpracovala doporučení s názvem G.694.2. Dle tohoto doporučení je odstup vlnových délek oproti DWDM mnohem vyšší, a to 20 nm. Vlnová délka 1270 nm – 1610 nm. Celé použitelné spektrum je rozdělené do 18-ti kanálů. Používá se na kratší vzdálenosti než DWDM a tam, kde nejsou vysoké nároky na přenos.

2.6 Základní přenosové vlastnosti optických vláken

V tab.2 jsou nově definované rozsahy vlnových pásem, ve kterých lze provozovat optické přenosové systémy. K nim je ještě nutné pro úplnost přiřadit pásmo v oblasti 850 nm.

Pásmo	Název	Vlnový rozsah [nm]
O	Original	1260 – 1360
E	Extended	1360 – 1460
S	Short wavelength	1460 – 1530
C	Conventional	1530 – 1565
L	Long wavelength	1565 – 1625
U	Ultra Long wavelength	1625 – 1675

Tab. 2 Rozsah nově definovaných optických pásem

2.6.1 Útlum

Útlum je jedním z hlavních parametrů, které se u optických vláken sledují. Při přenosu optického signálu vláknem se jeho výkon postupně s rostoucí vzdáleností od optického zdroje snižuje. Útlum optického vlákna je měřítkem optických ztrát ve vláknech. Zpravidla se udává v dB/km.

Útlum optického vlákna:

$$A = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (10)$$

Kde:

- A je útlum [dB]
- P_1 je vstupní výkon záření [W]
- P_2 je výstupní výkon záření [W]

Měrný útlum optického vlákna:

$$\alpha = \frac{10}{l} \log \frac{P_1}{P_2} \quad (11)$$

Kde:

- α je měrný útlum [dB/km]
- l je délka optického vlákna [km]
- P_1 je vstupní výkon záření [W]
- P_2 je výstupní výkon záření [W]

Příčiny útlumu lze rozdělit takto:

- Absorpční ztráty
 - Vlastní absorpce
Projevuje se v ultrafialové oblasti a infračervené oblasti. Dále pak absorpce vlastním materiálem SiO_2 .
 - Nevlastní absorpce (příměsová)
Materiál vlákna obsahuje nečistoty ve formě kovů, jako je železo, měď, chrom. Při výrobě je nutné dodržet minimální koncentraci nežádoucích prvků (nečistot) a to kolem 10^{-10} (na 10^{10} iontu základního materiálu připadne 1 iont nečistot). Je to z toho důvodu, že již při relativních koncentracích řádu 10^{-9} se měrný útlum kvůli těmto nečistotám zvýší až o několik dB/km. Důležité je také zmínit hydroxylové ionty OH^- , které mají největší podíl na nevlastní absorpci.
- Ztráty rozptylem
Vznikají kvůli technologicky nedokonalým postupům při výrobě vlákna. Uvnitř optického vlákna dochází k tvorbě mikronehomogenit. Ty způsobují změnu indexu lomu v daném místě a tak dochází k těmto typům rozptylu:
 - Rayleigho rozptyl
Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Tento jev nelze odstranit, pouze omezit, a to tak, že posunem pracovní frekvenci k oblasti infračerveného světla.
 - Mieův rozptyl
Vzniká na nehomogenitách, které jsou srovnatelné s vlnovou délkou. Příčiny vzniku tohoto rozptylu jsou mikroskopické bublinky ve vlákne, mikroohyby, kolísání průměru jádra apod.
 - Rozptyl na nečistotách
Vzniká na nehomogenitách, které jsou větší než vlnová délka. Technologickými postupy jsme schopni jej odstranit.

- Ohybové ztráty

Vznikají porušením podmínky totálního odrazu a to změnou úhlu šíření paprsku ve vlákne. Ten se poté lomí do pláště. Při ohybu dojde ke změně indexu lomu vlivem změny tlakových poměrů na vnitřní a vnější straně ohybu. Kvůli tomu se změní i mezní úhel šíření paprsku ve vlákne.

Podle míry zakřivení je lze rozdělit na:

- Makroohyby – poloměr ohybu je větší než poloměr vlákna
- Mikroohyby – poloměr ohybu je menší než poloměr vlákna

Kritický poloměr MM vlákna:

$$R_c \cong \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad (12)$$

Kde:

- R_c je kritický poloměr ohybu [m]
- n_1 je index lomu jádra [-]
- n_2 je index lomu pláště [-]
- λ je vlnová délka [m]

Kritický poloměr SM vlákna:

$$R_{cs} \cong \frac{20\lambda}{\sqrt{(n_1 - n_2)^3}} \cdot \left(2,748 - 0,996 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^{-3} \quad (13)$$

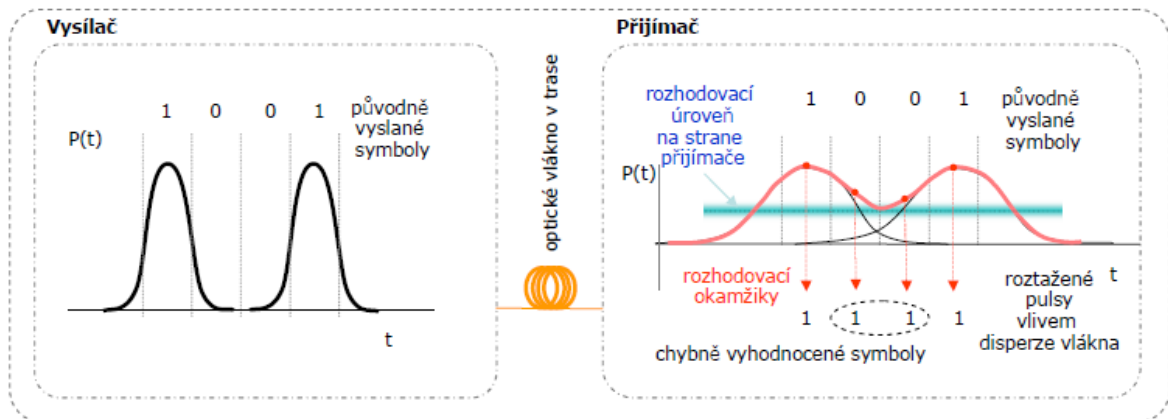
Kde:

- R_{cs} je kritický poloměr ohybu [m]
- n_1 je index lomu jádra [-]
- n_2 je index lomu pláště [-]
- λ je vlnová délka [m]
- λ_c je mezní vlnová délka [m]

2.6.2 Disperze

Disperzní jevy nezpůsobují úbytek energie, pouze energii rozprostírají v čase. Často se jev vysvětluje jako rozšíření optického pulsu po průchodu optickým vláknem (dochází k zmenšení špičkové velikosti pulsu a zvětšení jeho šířky). Tomuto jevu se říká mezisymbolová interference (ISI – Inter Symbol Interference). Vlivem disperze tak může

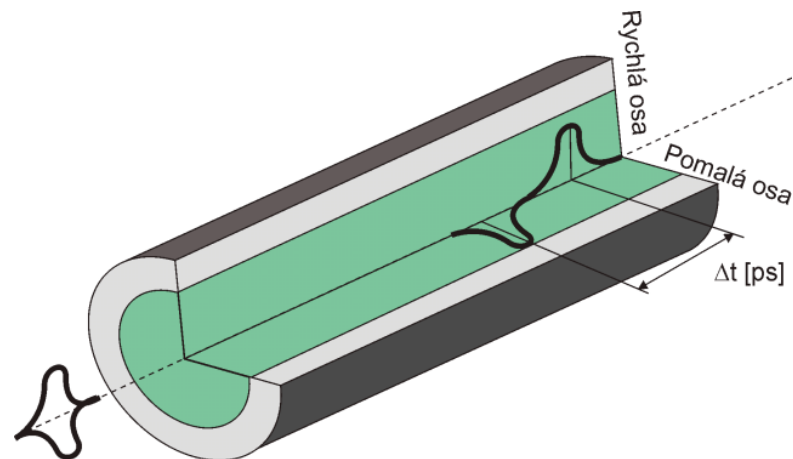
dojít k takovému prolnutí jednotlivých sousedních pulsů, že přijímač nebude schopen správně rozlišit stavy logická 1 a logická 0. Na obr.12 máme znázorněnou mezisymbolovou interferenci. Disperze ovlivňuje maximální dosažitelnou přenosovou rychlost.



Obr. 12 Mezisymbolová interference [14]

Mezi základní typy disperzí patří:

- Vidová disperze
Projevuje se u mnohovidových vláken. Vidová disperze je způsobena rozdílnými drahami jednotlivých vidů. Tyto se pohybují vláknem stejnou rychlostí, ale každý jinak dlouho. Je to dáno rozdílným úhlem odrazu. Na konci vlákna tak dojde k zmenšení amplitudy a rozšíření v čase.
Téměř nulovou vidovou disperzi lze získat použitím gradientních vláken. Nebo použitím jednovidových vláken, kde se tento typ disperze nevyskytuje.
- Chromatická disperze
Chromatická disperze se nejvíce projevuje u SM vláken. Používané optické zdroje vždy produkují záření s určitou šířkou spektra. Různé složky tohoto spektra se ve vlákně šíří různou rychlostí. Jednotlivé spektrální složky tak dorazí na konec vlákna v jiném okamžiku. To opět přispívá ke zkreslení přenášeného signálu.
- Polarizační vidová disperze
Polarizační vidová disperze se projevuje u SM vláken. Vlákno obsahuje dvě polarizované roviny. Celá energie se po navázání optického pulsu do vlákna rozdělí do dvou dílčích (na sebe kolmých) pulsů. Může dojít k tomu, že se pulsy budou těmito rovinami šířit jinou rychlostí (obr. 13), tedy zkreslení signálu na výstupu. Polarizační disperze je závislá na vlnové délce, nesymetrii vlákna a času. Polarizační vidová disperze se projevuje až u vysokých přenosových rychlostí.



Obr. 13 Polarizační disperze [6]

Pro kvantifikování velikosti polarizační vidové disperze se u krátkých vláken používá:

$$PMD = \frac{DGD}{L} \quad (14)$$

Kde:

- PMD je velikost polarizační vidové disperze (velikost roztažení pulsu na 1km vlákna) [ps/km]
- DGD (Δt) je časová diference příchodu obou pulsů na konec vlákna [ps]
- L je délka vlákna [m]

Pro dlouhá vlákna pak:

$$PMD = \frac{DGD}{\sqrt{L}} \quad (15)$$

Kde:

- PMD je velikost polarizační vidové disperze (velikost roztažení pulsu na 1km vlákna) [ps/ $\sqrt{\text{km}}$]
- DGD (Δt) je časová diference příchodu obou pulsů na konec vlákna [ps]
- L je délka vlákna [m]

2.7 Bezpečnost přenosu

Optické vlákno se považuje za bezpečné přenosové médium. A to hlavně z toho důvodu, že při přenosu nevyzařuje do svého okolí žádnou, nebo zanedbatelnou energii, a tak znemožňuje možnost odposlechu. U jiných přenosových médií, která vyzařují energii i do svého okolí je možnost případného odposlechu. Toto bývá často jedním z důvodů, proč je optické vlákno vhodné pro použití v armádě nebo bankovníctví.

Použitelný optický signál nelze získat bez snížení přenášeného výkonu – detekce v koncovém zařízení.

2.8 Metody spojování optických vláken

Využívají se ke vzájemnému propojení optických vláken. Liší se především v ceně a útlumu.

Mezi nejrozšířenější způsoby spojování optických vláken patří:

- Nerozebíratelné spoje
 - Svařováním
- Rozebíratelné spoje
 - Mechanickou spojkou
 - Optickým konektorem

2.8.1 Spojování optických vláken svařováním

Jde o nerozebíratelné spojení vlákna. Ke svařování je nutné mít speciální zařízení. Svařený spoj v dnešní době vykazuje útlum kolem 0,02 dB (SM) a 0,01 dB (MM).

Před samotným svařováním se musí oba svařované konce upravit. Nejprve se konce očistí a zalomí na lámačce optických vláken. Takto upravené konce se vloží do optické svářečky. Zde dojde k vycentrování a vystředění os vláken buď automaticky, nebo manuálně. Poté následují další procesy, které vedou k vytvoření pevného spoje. Příklad optické svářečky můžeme vidět na obr.14.



Obr. 14 Příklad svářečky optických vláken

2.8.2 Spojování optických vláken mechanickou spojkou

Jde o rozebíratelné spojení optických vláken. Pro instalaci mechanické spojky potřebujeme lámačku optických vláken a plastový přípravek pro uzamčení spojky. Maximální útlum spoje 0,4 dB. Montáž takového spoje trvá do 1 minuty. Příklad mechanické spojky můžeme vidět na obr.15.



Obr. 15 Příklad univerzální mechanické spojky

2.8.3 Spojování optických vláken optickým konektorem

Jde o rozebíratelné spojení optických vláken, které lze kdykoliv snadno rozpojit a spojit. K využití tohoto spoje je potřeba napojení příslušných konektorů na konce vláken. Optickou spojku SC/SC můžeme vidět na obr.16.



Obr. 16 Příklad optické spojky SC/SC

Konektory tvoří podstatnou část spojování optických vláken. Hodnota vložného útlumu se u konektorů pohybuje kolem 0,15 dB – 1,5 dB. Přehled některých optických konektorů lze vidět na obr.17.



Obr. 17 Optické konektory [8]

3 OPTICKÉ ZDROJE A DETEKTORY ZÁŘENÍ

Jde o prvky, které mění elektrický signál na optický a naopak.

3.1 Optické zdroje

Optické zdroje jsou důležitou součástí každého optického systému. Na zdroje, které jsou použitelné v optických komunikačních systémech, jsou kladeny určité požadavky. Těmi základními jsou:

- Snadné navázání záření do vlákna
- Úzká šířka vyzařovaného spektra
- Dostatečný výkon generovaného optického záření
- Časová a teplotní stálost generovaného záření
- Co největší energetická účinnost přeměny elektrické energie
- S koncepcí WDM snadné přeladění na jinou vlnovou délku
- Malé rozměry a hmotnost
- Cena

Těmto požadavkům nejlépe vyhovují polovodičové zdroje, a to:

- Diody LED
- Polovodičové lasery

3.1.1 LED

Jde o zdroje, které se používaly, jako první pro přenos informace po optickém vláknu. Podstata činnosti LED (Light Emitting Diode) diody je založena na zářivé rekombinaci na polovodičovém přechodu PN. Rekombinace je spontánní, a proto hovoříme o tzv. samovolné emisi. Toto má na svědomí většinu přenosových vlastností LED. Jednou z těchto vlastností jsou přechody elektronů a děr probíhající mezi širokým rozsahem energetických stavů. To vede k šířce spektra 50 – 60 nm na vlnové délce 850 nm a šířce 120 – 180 nm na vlnové délce 1300 nm. Další vlastností je to, že fotony jsou emitovány směrově nahodile, důsledkem je chování LED jako Lambertovského (všesměrového) zdroje – to snižuje výkon. Mezi vlastnosti patří také to, že jednotlivé rekombinace elektronů a děr nejsou synchronizovány v čase – vznik nekoherentního světla (bez fázové souvislosti).

LED nelze využít pro dálkové spoje a vysokorychlostní přenosy.

3.1.2 LASER

Dalším zdrojem, který se používá je LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tyto zdroje se vyznačují vysokým výkonem, velmi úzkou vyzařovací charakteristikou a schopností emitovat koherentní záření. Koherentní znamená, že fáze mezi jednotlivými fotony je navzájem definována, nikoliv chaotická. LASER ke své činnosti využívá stimulované emise. Díky této emisi dochází k rekombinaci světla na základě nějakého vnějšího popudu (stimulu). Tento popud je zajišťován samovolným fotonem. Nově vzniklý foton má stejné vlastnosti jako má částice stimulující. Výsledkem je úzké emitované spektrum (≈ 1 nm). Fotony se šíří stejným směrem – snadnější navázání do vlákna.

Používají se ve vysokorychlostních systémech a pro dálkové spoje zejména u SM vláken.

3.2 Optické detektory

Úkolem fotodetektoru je přeměna optického impulsu na elektrický impuls.

Mezi požadavky na detektor patří:

- Velká citlivost na pracovních vlnových délkách
- Vysoký stupeň věrnosti při konverzi signálu
- Minimální šum
- Časová, teplotní stabilita převodních parametrů
- Malé rozměry a hmotnost
- Cena

Fotodetektory podle PN přechodu:

- Klasické nezakryté PN přechody
- PIN přechody – mezi vrstvy P a N se vkládá vrstva intrinzického (s vlastní vodivostí) polovodiče
- Fototranzistory
- Lavinové APD (Avalanche Photo Diode) detektory

Princip činnosti fotodetektoru je podobný principu činnosti u LED, jen probíhá obráceně. Tedy na PN přechod v závěrném směru dopadne foton a díky absorpci dojde k rekombinačnímu procesu. Tento uvolňuje volné elektrony a dává tak možnost vzniku elektrického proudu.

4 JINÉ TYPY PŘENOSŮ

V současné době můžeme rozlišit tři základní typy přenosů. Mimo již zmíněného přenosu optickými vlákny můžeme ještě využít přenos po metalickém vedení nebo bezdrátový přenos.

4.1 Přenos po metalickém vedení

Nejvíce rozšířený způsob přenosu je přenos po metalickém vedení. Ten se uskutečňuje elektrickými impulsy, které se většinou přenáší po měděných vodičích. Metalické vedení můžeme rozdělit na:

- Symetrické vedení
- Koaxiální vedení

4.2 Bezdrátový přenos

Bezdrátové přenosy můžeme rozdělit na:

- Optické - bezdrátové
- Rádiové
- Mobilní
- Satelitní

Princip funkce je různý, ale podstata je v podstatě stejná. Informace je přenášena pomocí elektromagnetických vln, tedy mezi vysílačem a přijímačem neexistuje fyzické spojení.

4.3 Porovnání jednotlivých typů přenosů

Výhody optických vláken oproti metalickým vodičům:

- Velká šířka přenosového pásma, vysoká rychlost přenosu
- Nízké ztráty při přenosu
- Elektrická izolace
- Možnost použít v elektricky hazardních prostředích
- Bezpečnost přenosu
- Odolnost proti elektromagnetickému rušení
- Malé rozměry a hmotnost

Nevýhody optických vláken oproti metalickým vodičům:

- Ke spojování vláken nutno vlastnit speciální přístroj
- V ostrých ohybech vlákna dochází ke zvýšení útlumu
- Vlákno nelze libovolně ohýbat

Výhody bezdrátového přenosu oproti optickým vláknům:

- Snadná instalace a údržba
- Mobilita

Nevýhody bezdrátového přenosu oproti optickým vláknům:

- Snadnost odposlechu
- Náchylnost k rušení
- Možnost zarušení
- Nestálost vytvořeného spojení

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 PRŮZKUM TRHU

Na trhu je dostupných několik typů zařízení a kabelů pro takovéto přenosy. Některé z nich jsem vybral a níže uvedl.

5.1 Optická vlákna

Optická vlákna se na trhu liší v tom, zdali jsou určena pro jednovidový nebo mnohovidový režim. Dále pak v průměru jádra, průměru pláště, numerické apertury, měrnému útlumu, ceně a ostatních parametrech.

5.1.1 Jednovidová vlákna

Z jednovidových vláken jsem vybral tři typy, konkrétně SMF-28-J9, SM – SAMSUNG DROP a TKF LTMC. Souhrn jejich parametrů je uveden níže, pokud je uvedena cena v eurech a proveden přepočít na Kč, je uvažován kurz ČNB střed k datu 2.5.2011, tedy 1 € = 24,180 Kč.

- Parametry SMF-28-J9 dle [17]:
 - Průměr jádra: 8,2 μm
 - Průměr pláště: 125 \pm 0,7 μm
 - Numerická apertura: 0,14
 - Měrný útlum:
 - 0,33 – 0,35 dB/km pro $\lambda = 1310$ nm
 - 0,21 – 0,24 dB/km pro $\lambda = 1490$ nm
 - 0,19 – 0,20 dB/km pro $\lambda = 1550$ nm
 - 0,20 – 0,23 dB/km pro $\lambda = 1625$ nm
 - Polarizační vidová disperze: $\leq 0,1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$
 - Provozní teplota: od -60 do +85 °C
 - Cenu za 1m při odběru:
 - 1 m – 2,49 € = 60,21 Kč
 - 10 m – 1,86 € = 44,98 Kč
 - 100 m – 0,45 € = 10,88 Kč
 - 1 000 m – 0,41 € = 9,91 Kč

- Optický kabel SM – SAMSUNG DROP kabel [19]:
 - Průměr jádra: 9 μm
 - Průměr pláště: 125 \pm 0,7 μm
 - Měrný útlum:
 - $\leq 0,5$ dB/km pro $\lambda = 1550$ nm
 - Počet vláken: 4
 - Provozní teplota: od -40 do +70 $^{\circ}\text{C}$
 - Cena kabelu za 1m:
 - 15,00 Kč s DPH
- Optický kabel TKF LTMC [20]:
 - Průměr jádra: 9 μm
 - Průměr pláště: 125 \pm 0,5 μm
 - Měrný útlum:
 - 0,35 dB/km pro $\lambda = 1310$ nm
 - 0,22 dB/km pro $\lambda = 1550$ nm
 - Počet vláken: 12
 - Provozní teplota: od -30 do +70 $^{\circ}\text{C}$
 - Cena kabelu za 1m:
 - 28,20 Kč s DPH

5.1.2 Mnohovidová vlákna

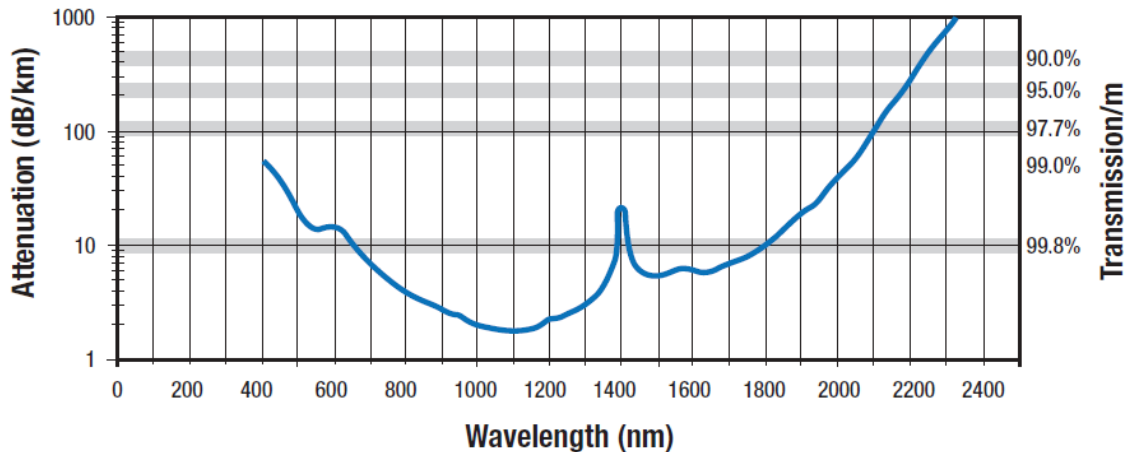
Mnohovidová vlákna mohou být SI i GI. Souhrn jejich parametrů je uveden níže, pokud je uvedena cena v eurech a proveden přepočítání na Kč, je uvažován kurz ČNB střed k datu 2.5.2011, tedy 1 € = 24,180 Kč.

Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu:

Z mnohovidových vláken se skokovou změnou indexu lomu jsem vybral tři typy, konkrétně AFS50/125Y, BLF48-200 a APCH400.

- Parametry AFS50/125Y dle [17]:
 - Průměr jádra: 50 $\mu\text{m} \pm 3\%$
 - Průměr pláště: 125 $\mu\text{m} \pm 3\%$
 - Numerická apertura: 0,22 \pm 0,02

- Měrný útlum (obr.18):
 - 15 dB/km pro $\lambda = 633$ nm
 - 10 dB/km pro $\lambda = 1385$ nm



Obr. 18 Útlum AFS50/125Y [17]

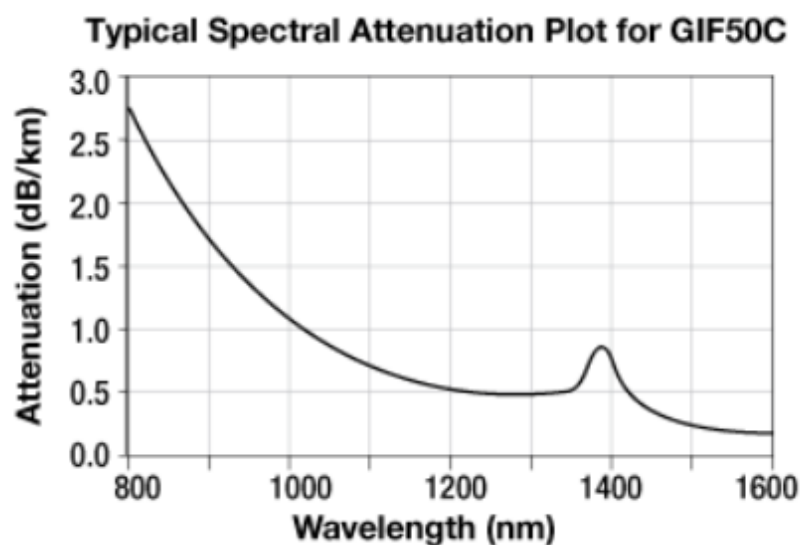
- Provozní teplota: od -40 do +85 °C
- Cena za 1m při odběru:
 - 1 m – 4,00 € = 96,73 Kč
 - 10 m – 2,80 € = 67,71 Kč
 - 50 m – 2,40 € = 58,03 Kč
- Parametry BLF48-200 dle [17]:
 - Průměr jádra: 200 $\mu\text{m} \pm 2\%$
 - Průměr pláště: 230 $\mu\text{m} \pm 2\%$
 - Numerická apertura: $0,48 \pm 0,02$
 - Měrný útlum:
 - < 10 dB/km pro $\lambda = 633$ nm
 - Provozní teplota: od -40 do +150 °C
 - Cena za 1m při odběru:
 - 1 m – 1,80 € = 43,53 Kč
 - 10 m – 1,40 € = 33,86 Kč
 - 50 m – 1,25 € = 30,23 Kč
- Parametry APCH400 dle [17]:
 - Průměr jádra: 400 ± 8 μm
 - Průměr pláště: 430 ± 10 μm
 - Numerická apertura: $0,39 \pm 0,02$

- Měrný útlum:
 - 5 dB/km pro $\lambda = 810$ nm
 - 6 dB/km pro $\lambda = 1064$ nm
- Provozní teplota: od -40 do +200 °C
- Cena za 1m při odběru:
 - 1 m – 2,94 € = 71,10 Kč
 - 10 m – 2,65 € = 64,08 Kč
 - 50 m – 2,43 € = 58,76 Kč

Mnohovidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu:

Z mnohovidových vláken s gradientní změnou indexu lomu jsem vybral dva typy, konkrétně GIF50C a GIF625.

- Parametry GIF50C dle [17]:
 - Průměr jádra: $50 \pm 2,5$ μm
 - Průměr pláště: 125 ± 1 μm
 - Numerická apertura: $0,2 \pm 0,015$
 - Měrný útlum (obr.19):
 - $\leq 2,3$ dB/km pro $\lambda = 850$ nm
 - $\leq 0,6$ dB/km pro $\lambda = 1300$ nm



Obr. 19 Útlum GIF50C [17]

- Provozní teplota: od -60 do +85 °C
- Cena za 1m při odběru:
 - 1 m – 2,20 € = 53,20 Kč
 - 10 m – 1,30 € = 31,44 Kč
 - 50 m – 0,65 € = 15,72 Kč
- Parametry GIF625 dle [17]:
 - Průměr jádra: $62,5 \pm 2,5 \mu\text{m}$
 - Průměr pláště: $125 \pm 1 \mu\text{m}$
 - Numerická apertura: $0,275 \pm 0,015$
 - Měrný útlum:
 - 2,7 – 3,2 dB/km pro $\lambda = 850 \text{ nm}$
 - 0,6 – 0,9 dB/km pro $\lambda = 1300 \text{ nm}$
 - Provozní teplota: od -60 do +85 °C
 - Cena za 1m při odběru:
 - 1 m – 1,90 € = 45,95 Kč
 - 200 m – 1,00 € = 24,18 Kč
 - 500 m – 0,50 € = 12,09 Kč

5.1.3 Porovnání parametrů a cen

V tab.3 máme pro srovnání výše zmíněné typy optických vláken. Můžeme vidět, že cena zmíněných optických vláken se pohybuje v rozmezí od $\approx 10\text{Kč}$ do $\approx 59\text{Kč}$. V tabulce je uvažována nejmenší možná cena (u vláken, kde se cena odvíjí v závislosti na odebíraném množství). V tabulce u typu SAMSUNG DROP a TKF LTMC není zobrazena hodnota numerické apertury. Je to z toho důvodu, že tento údaj nebyl na stránkách prodejce k dostání. Ne všichni prodejci totiž poskytují úplné parametry o prodáváných optických vláknech.

Můžeme vidět, že na přibližně stejné cenové relaci se pohybují jednovidové vlákna a mnohovidové vlákna s gradientní změnou indexu lomu. Dražší jsou pak mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu. Co se týká parametrů optických vláken je vhodné se zaměřit na útlum. Ten je nejmenší u SM vláken a jeho hodnota se zde pohybuje kolem $0,2 \text{ dB/km}$ pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

Typ	Druh	Jádro [μm]	Plášť [μm]	NA [-]	Útlum [dB/km]	Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Cena [kč]
SMF-28-J9	SM	8,2	125	0,14	0,33 – 0,35 $\lambda = 1310 \text{ nm}$	-60 až +85	9,91
					0,19 – 0,20 $\lambda = 1550 \text{ nm}$		
SAMSUNG DROP	SM	9	125	----	$\leq 0,5$ $\lambda = 1550 \text{ nm}$	-40 až +70	15,00
TKF LTMC	SM	9	125	----	0,35 $\lambda = 1310 \text{ nm}$	-30 až +70	28,20
					0,22 $\lambda = 1550 \text{ nm}$		
AFS50/125Y	MM-SI	50	125	0,22	15 $\lambda = 633 \text{ nm}$	-40 až +85	58,03
					10 $\lambda = 1385 \text{ nm}$		
BLF48-200	MM-SI	200	230	0,48	< 10 $\lambda = 633 \text{ nm}$	-40 až +150	30,23
APCH400	MM-SI	400	430	0,39	5 $\lambda = 810 \text{ nm}$	-40 až +200	58,76
					6 $\lambda = 1064 \text{ nm}$		
GIF50C	MM-GI	50	125	0,2	$\leq 2,3$ $\lambda = 850 \text{ nm}$	-60 až +85	15,72
					$\leq 0,6$ $\lambda = 1300 \text{ nm}$		
GIF625	MM-GI	62,5	125	0,275	2,7 – 3,2 $\lambda = 850 \text{ nm}$	-60 až +85	12,09
					0,6 – 0,9 $\lambda = 1300 \text{ nm}$		

Tab. 3 Porovnání parametrů a cen optických vláken

5.2 Konvertory

Z optických konvertorů jsem vybral tři typy, konkrétně TP-LINK MC112CS WDM, TP-LINK MC100CM a GT-906A60. Souhrn jejich parametrů je uveden níže.

Parametry TP-LINK MC112CS WDM konvertor [19]:

- Konvertor určený ke konverzi 100BASE-FX na 100Base-TX (optického kabelu na metalický)
- Konektory: SC, RJ45
- Typ vlákna: SM (9/125 μm)
- Dosah přenosu signálu: 20 km
- Využívá WDM (obousměrný přenos dat po jednom optickém vlákně)

- Vlnová délka pro vysílání / příjem: 1 310 nm / 1 550 nm
- Provozní teplota: od 0 do +50 °C
- Cena:
 - 720,00 Kč s DPH

Parametry TP-LINK MC100CM [20]:

- Media konvertor TP-LINK pro převod 10/100Base-T na optický 100Base-FX port
- Konektory: 2xSC (Duplex), RJ45
- Typ vlákna: MM (50/125 μm ; 62,5/125 μm)
- Dosah přenosu signálu: 2 km
- Vlnová délka pro vysílání / příjem: 1 310 nm / 1 310 nm
- Provozní teplota: od 0 do +50 °C
- Cena:
 - 637,80 Kč s DPH

Parametry konvertoru GT-906A60 (Planet Technology Corp.) [22]:

- Gigabit Ethernet konvertor 10/100/1000Base-T
- Konektory: SC, RJ45
- Typ vlákna: SM (9/125 μm)
- Dosah přenosu signálu: 60 km
- Využívá WDM (obousměrný přenos dat po jednom optickém vlákně)
- Vlnová délka pro vysílání / příjem: 1 310 nm / 1 550 nm
- Provozní teplota: od 0 do +50 °C
- Cena:
 - 10 489,20 Kč s DPH

5.2.1 Porovnání parametrů a cen

V tab.4 jsou pro porovnání výše zmíněné optické konvertory. Lze vidět, že cena konvertoru pro SM vlákna je o ≈ 100 Kč vyšší než pro MM vlákna. Na druhou stranu přenos MM vlákny je na kratší vzdálenosti – většinou do 2 km. Zatímco pomocí SM vláken lze přenášet informace i na větší vzdálenosti. Například pomocí zde zmíněného GT - 906A60 lze přenášet až do vzdálenosti 60 km, jen cena je zde výrazně vyšší.

Některé optické konvertory využívají technologii WDM, což snižuje náklady na nákup optických vláken. Tam, kde je tato technologie využita, postačuje pro vysílání a příjem jedno optické vlákno. Pokud zde není využita technologie WDM, tak je pro vysílací a přijímací část využito dvou oddělených optických vláken.

Typ	Vlák.	Base	Konektory	WDM	λ [nm] vys./příj.	Dosah [km]	Cena [Kč]
TP-LINK MC112CS	SM	10/100	SC, RJ45	ANO	1 310/1 550	20	720,00
TP-LINK MC100CM	MM	10/100	2xSC, RJ45	NE	1 310/1 310	2	637,80
GT- 906A60	SM	10/100/ 1 000	SC, RJ45	ANO	1 310/1 550	60	10 489,20

Tab. 4 Porovnání parametrů a cen optických konvertorů

5.3 Zařízení pro spojování optických vláken

Optické svářečky:

- Svářečka optických vláken Fiber Arsenal FA-730 [19]:
 - Hmotnost: 3,3 kg
 - Rozměry: 170 x 140 x 170 mm
 - 5" LCD monitor
 - Doba svařování: 9 s
 - Doba zapečení ochrany: 40 s
 - Útlum sváru:
 - 0,02 dB (SM)
 - 0,01 dB (MM)
 - Provozní teplota: od -25 do +50 °C
 - Cena:
 - 114 000,00 Kč s DPH
- Svářečka optických vláken Techwin TW-605 [19]:
 - Hmotnost: 2,8 kg
 - Rozměry: 160 x 150 x 140 mm
 - 5,7" LCD monitor
 - Doba svařování: 8 s
 - Doba zapečení ochrany: 30 s
 - Výdrž baterie: 220 svárů a zapečení

- Útlum sváru:
 - 0,02 dB (SM)
 - 0,01 dB (MM)
- Provozní teplota: od -25 do +50 °C
- Cena:
 - 130 800,00 Kč s DPH
- Svářečka optických vláken Ilsintech Keyman S1 + lámačka [20]:
 - Hmotnost: 2,6 kg
 - Rozměry: 150 x 190 x 200 mm
 - 5,6" LCD monitor
 - Doba svařování: 9 s
 - Doba zapečení ochrany: 26 s
 - Výdrž baterie: 200 svárů a zapečení
 - Útlum sváru:
 - 0,02 dB (SM)
 - 0,01 dB (MM)
 - Provozní teplota: od -10 do +50 °C
 - Cena:
 - 135 588,00 Kč s DPH
- Porovnání parametrů a cen optických svářeček

Optické svářečky se vesměs liší provedením, rozměry a programovým vybavením. V tab.5 pak dobou svařování a zapékání ochrany. Útlum sváru je takřka minimální, pouze 0,02 u SM vláken nebo 0,01 u MM vláken. Cena zde uvedených optických svářeček se pohybuje v cenové relaci do 150 000 Kč. Vlákno před samotným svárem je nutné nejprve upravit pomocí dalších prostředků. Mezi ně patří například lámačka optických vláken. Výdrž baterie u optických svářeček se pohybuje kolem 200 svárů vč. zapečení ochrany.

Typ	Doba svařování [s]	Doba zapečení ochrany [s]	Útlum sváru SM / MM [dB]	Provozní teplota [°C]	Cena [Kč]
FA-730	9	40	0,02 / 0,01	-25 až +50	114 000,00
TW-605	8	30	0,02 / 0,01	-25 až +50	130 800,00
Ilsintech Keyman S1	9	26	0,02 / 0,01	-10 až +50	135 588,00

Tab. 5 Porovnání parametrů a cen optických svářeček

Lámačky optických vláken:

- Lámačka optických vláken FC-1 [20]:
 - Životnost: 12 000 zalomení
 - Rozměry: 59 x 55 x 49 mm
 - Hmotnost: 250 g
 - Cena:
 - 15 906,00 Kč s DPH
- Lámačka optických vláken CT-02 [20]:
 - Životnost: 1 000 zalomení
 - Rozměry: 100 x 20 x 35 mm
 - Hmotnost: 75 g
 - Cena:
 - 7 914,00 Kč s DPH
- Lámačka optických vláken CT-30A [20]:
 - Životnost: 48 000 zalomení
 - Rozměry: 69 x 82 x 41 mm
 - Hmotnost: 180 g
 - Cena:
 - 25 898,40 Kč s DPH
- Porovnání lámaček optických vláken

Lámačky optických vláken se liší např. v provedení a životnosti, tedy počtu možných zalomení. Některé optické svářečky jsou dodávány spolu s lámačkou optických vláken, což může mírně snížit náklady, jako například výše zmíněná optická svářečka Ilsintech Keyman S1. Můžeme vidět, že ani lámačky optických vláken nejsou zrovna levnou záležitostí. Cena kolem 10 000Kč, ale i více.

Optické pigtaily:

Z optických pigtailů (tj. konektoru zakončujícího optické vlákno) jsem vybral typy s konektorem ST a SC pro SM a MM vlákna [23]:

- Pigtail ST pro SM vlákna:
 - Délka: 1 m
 - Cena za 1 ks:
 - 59,00 Kč s DPH

- Pigtail SC pro SM vlákna:
 - Délka: 1 m
 - Cena za 1 ks:
 - 65,00 Kč s DPH
- Pigtail ST pro MM vlákna:
 - Délka: 1 m
 - Cena za 1 ks:
 - 40,00 Kč s DPH
- Pigtail SC pro MM vlákna:
 - Délka: 1 m
 - Cena za 1 ks:
 - 40,00 Kč s DPH
- Porovnání pigtailů

Pigtaily se zejména nijak neliší. Jde hlavně o to, zdali jsou určené pro SM nebo MM vlákna. Podle toho se skládají z příslušného optického vlákna a požadovaného optického konektoru. Cena takovýchto pigtailů se zásadě odvíjí od použitého konektoru. Výše zmíněné se pohybují většinou do 100 Kč.

Spojky - konektorem:

- Optická spojka SC/SC [23]:
 - Vlákno: MM
 - Útlum: < 0,2 dB
 - Cena:
 - 38,00 Kč s DPH
- Optická spojka ST/ST [23]:
 - Vlákno: MM
 - Útlum: < 0,2 dB
 - Cena:
 - 43,00 Kč s DPH
- Optická spojka SC/SC [23]:
 - Vlákno: SM
 - Útlum: < 0,2 dB
 - Cena:
 - 53,00 Kč s DPH

- Optická spojka ST/ST [23]:
 - Vlákno: SM
 - Cena:
 - 88,00 Kč s DPH
- Porovnání spojek za využití optického konektoru

Zde též záleží na požadavku uživatele, jakou optickou spojku potřebuje. Zde se též cena vybraných optických spojek pohybovala do 100 Kč. Optických spojek je celá řada a podle konstrukce se odvíjí i cena. Útlum optických spojek tohoto druhu se pohybuje kolem 0,2 dB, což je ve srovnání s optickým svárem (útlum 0,01 dB u MM vlákna) razantní rozdíl. Hodnotu útlumu takovýchto optických spojek též někteří prodejci optického materiálu neuvádí.

Spojky – mechanickou spojkou:

- Optická spojka FIBRLOK II 2529 (univerzální) [19]:
 - Vlákno: SM i MM
 - Cena:
 - 174,00 Kč s DPH
- Montážní přípravek FIBRLOK II 2501 [19]:
 - Montážní přípravek pro spojky FIBRLOK II 2529
 - Cena:
 - 1 657,00 Kč s DPH
- Optická spojka FIBRLOK 2540G [19]:
 - Vlákno: SM
 - Cena:
 - 166,00 Kč s DPH
- Montážní přípravek FIBRLOK 2504G [19]:
 - Montážní přípravek pro spojky FIBRLOK 2540G
 - Cena:
 - 2 059,00 Kč s DPH
- Porovnání mechanických spojek

Útlum mechanických optických spojek se pohybuje kolem 0,1 dB, což je méně než u optické spojky konektorem. Mechanické spojky jsou dražší než spojky s konektorem a jistou nevýhodou může být nutnost vlastnit montážní přípravek, u kterého se cena pohybuje kolem 2 000 Kč.

6 MĚŘENÍ CHYBOVOSTI

Jedním ze způsobů, jak lze určit kvalitu a spolehlivost digitálního přenosového systému je změřit jeho BER (Bit Error Rate). Jde o to, že žádný optický systém není vždy dokonalý. To může vést k tomu, že binární posloupnost na vysilači a přijímači bude rozdílná – dochází ke vzniku chyb.

Měření chybovosti probíhá porovnáváním jednotlivých přijatých bitů s bity očekávanými. Výsledkem mohou být pouze dva stavy, tedy stav shody (bez výskytu chyby) nebo stav neshody (výskyt chyby).

Díky BER lze porovnávat kvalitu několika různých systémů. Maximální bitová chybovost optického systému se pohybuje v řádech od 10^{-9} do 10^{-12} .

6.1 Definice chybovosti

Chybovost digitálního systému je definována jako poměr počtu chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenesených bitů.

$$BER = \frac{N_{ERR}}{N_{BITS}} \quad (16)$$

Kde:

- BER je chybovost [-]
- N_{ERR} je počet chybně přenesených bitů [bit]
- N_{BITS} je celkový počet přenesených bitů [bit]

Vyhodnocení chybovosti je možné provádět pomocí logické funkce XOR. Porovnává se bit přenesený daným spojem se správnou hodnotou tohoto bitu. Pokud dojde k neshodě jednotlivých bitů tak se provede záznam o chybě. Ze vztahu (16) vyplývá, že pro výpočet BER, je nutné znát celkový počet přenesených bitů. Počet N_{BITS} získáme sledováním počtu přenášených bitů. Hodnotě $BER \approx 10^{-10}$ odpovídá jeden chybně přenesený bit na 10^{10} celkového počtu přenesených bitů.

Pro korektní získání údaje o BER je nutné měření provádět opakovaně a dlouhodobě. Pro spoje s nízkou úrovní chybovosti je pak měření velice časově náročné. [4]

Pro moderní přenosové sítě se ve většině případů používá přenos informací pomocí tzv. paketů. Paket je složen z většího počtu bitů. Tento počet je možné buď zvolit, nebo je již předepsán strukturou sítě. Pokud se vyskytne chybně přenesený bit tak dojde

k znehodnocení celého paketu. Dojde tedy ke ztrátě většího počtu dat. Někdy také dochází ke shlukovému výskytu chyb (více chybných bitů v jednom paketu). Chybovost paketová je určena následujícím vztahem:

$$PER = \frac{N_{ERRPACK}}{N_{PACKETS}} \quad (17)$$

Kde:

- PER je paketová chybovost [-]
- $N_{ERRPACK}$ je počet chybných paketů [bit]
- $N_{PACKETS}$ je celkový počet paketů [bit]

6.2 Pravděpodobnost chybovosti

Měření chybovosti, jak již bylo zmíněno lze provést posláním bitů daným spojem a jejich následné porovnávání s očekávanými. Jedná se o statistický proces, a proto se měřené BER bude pouze blížit skutečným hodnotám (BER - počet testovaných bitů se blíží k nekonečnu). Ve většině případů je pro nás dostačující provést měření podle požadované hodnoty BER. Vzhledem k tomu, že nemůžeme měřit nekonečný počet bitů a také nelze s jistotou předvídat, kdy k chybám dojde, úroveň spolehlivosti tak nikdy nedosáhne 100%.

Pravděpodobnost chybovosti lze vyjádřit podle vztahu:

$$P_{BIN}(N_{ERR}, N_{BITS}, BER) = \frac{N_{BITS}!}{(N_{BITS} - N_{ERR})!} \cdot BER^{N_{ERR}} \cdot (1 - BER)^{N_{BITS} - N_{ERR}} \quad (18)$$

Kde:

- P_{BIN} je pravděpodobnost výskytu počtu chyb [-]
- N_{ERR} je počet chybných bitů [bit]
- N_{BITS} je celkový počet přenesených bitů [bit]
- BER je bitová chybovost [-]

Pro výpočet pravděpodobnosti lze také využít jednodušší Poissonovo rozdělení. Zde není nutný výpočet faktoriálu N_{BITS} , ale pouze výpočet faktoriálu N_{ERR} , který při nízké chybovosti dosahuje pouze jednotek bitů.

$$P_{POISS}(N_{ERR}, \mu) = e^{-\mu} \cdot \frac{1}{N_{ERR}!} \cdot \mu^{N_{ERR}} \quad (19)$$

Kde:

- P_{POISS} pravděpodobnost určení výsledku podle Poissonova rozdělení [-]
- N_{ERR} je počet chybných bitů [bit]
- μ parametr poissonova rozdělení [bit]

Parametr μ reprezentuje míru chybovosti a celkový počet přenesených bitů N_{BITS} . Lze ho vyjádřit vztahem:

$$\mu = BER \cdot N_{BITS} \quad (20)$$

Kde:

- μ je parametr poissonova rozdělení [bit]
- BER je bitová chybovost [-]
- N_{BITS} je celkový počet přenesených bitů [bit]

Dále pak výpočet minimálního a maximálního počtu N_{BITS} potřebných pro otestování dané BER úrovně, při zvolené pravděpodobnosti P_{REQ} .

$$\sum_0^{N_{ERR}} P_{POISS}(N_{ERR}, \mu_{MIN}) = P_{REQ} \quad (21)$$

$$\sum_0^{N_{ERR}} P_{POISS}(N_{ERR}, \mu_{MAX}) = (1 - P_{REQ}) \quad (22)$$

Kde:

- P_{REQ} je požadovaná pravděpodobnost určení výsledku [-]

Pokud tedy budeme uvažovat $N_{ERR} = 1$; $P_{POISS}(N_{ERR}, \mu) = 0,99$ lze odvodit μ_{MIN} a μ_{MAX} a pro danou BER určit N_{BITS} . Podle uvedeného je $\mu_{MIN} = 0,1486$ a $\mu_{MAX} = 6,6384$. Pro výpočet času měření pak:

$$T = \frac{N_{BITS}}{R} \quad (23)$$

Kde:

- T je doba přenosu [s]
- N_{BITS} je celkový počet přenesených bitů [bit]
- R je přenosová rychlost [bit/s]

7 TESTER TESTOS 05

Pro testování chybovosti byla použita deska TestOS 05, která byla zapůjčena spolu s příslušným softwarem z VUT v Brně.

Jde o tester, kterým lze testovat chybovost optického vlákna. Tester je schopen zaznamenávat chybně přenesené bity. Testování optického vlákna je prováděno vysíláním pseudonáhodné bitové sekvence $2^{24}-1$ PRBS, kterou vytváří posuvný registr LFSR. Obvod FPGA zajišťuje detekci a záznam chybně přenesených bitů.

Na desce TestOS 05 je použit optický modul HFBR 5205. Tento modul podporuje pouze mnohovidová vlákna. Dále je tester vybaven FPGA Spartan 3 (Field-Programmable Gate Array). Což je druh programovatelných logických obvodů. Více lze nalézt v diplomové práci [4].

7.1 Algoritmus testování

Přenosovým optickým kanálem se vysílá bitová posloupnost, která se na přijímací straně porovnává s očekávanou posloupností. Kontroluje se shodnost příslušných bitů posloupnosti. Při neshodě se provádí záznam o chybě. Jako testovací sekvence byla použita pseudonáhodná posloupnost $2^{23}-1$ PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence).

Test přenosového optického kanálu probíhá tak, že se nejprve ve vysílací části testeru inicializuje generátor bitové posloupnosti. Ten v určitém taktu generuje posloupnost PRBS, která se vysílá přenosovým kanálem. Přijímací strana získá informaci o časování symbolů a synchronizuje svůj generátor bitové posloupnosti s generátorem ve vysílací části testeru. Po ověření shodnosti posloupností začíná samotné měření chybovosti. Vysílací část vysílá datovou posloupnost, kterou přijímací část porovnává s lokálně generovanou a synchronizovanou posloupností. V případě neshody vytváří záznam o chybě. V pravidelných intervalech se předává informace o chybovosti do PC (Personal Computer) programu. Více lze nalézt v literatuře [4][18].

7.2 Testovací sekvence

Pro testovací účely se používají posloupnosti, které lze jednoduše matematicky popsat (deterministické), a které se svým charakterem co nejvíc blíží posloupnosti náhodné. To je obvykle zabezpečeno použitím tzv. pseudonáhodné bitové posloupnosti (PRBS). [4]

Jako testovací sekvence byla použita pseudonáhodná posloupnost $2^{23}-1$ PRBS, což je posloupnost vytvářená 23 bitovým posuvným registrem LFSR (Linear Feedback Shift Register).

7.2.1 Posuvný registr LFSR

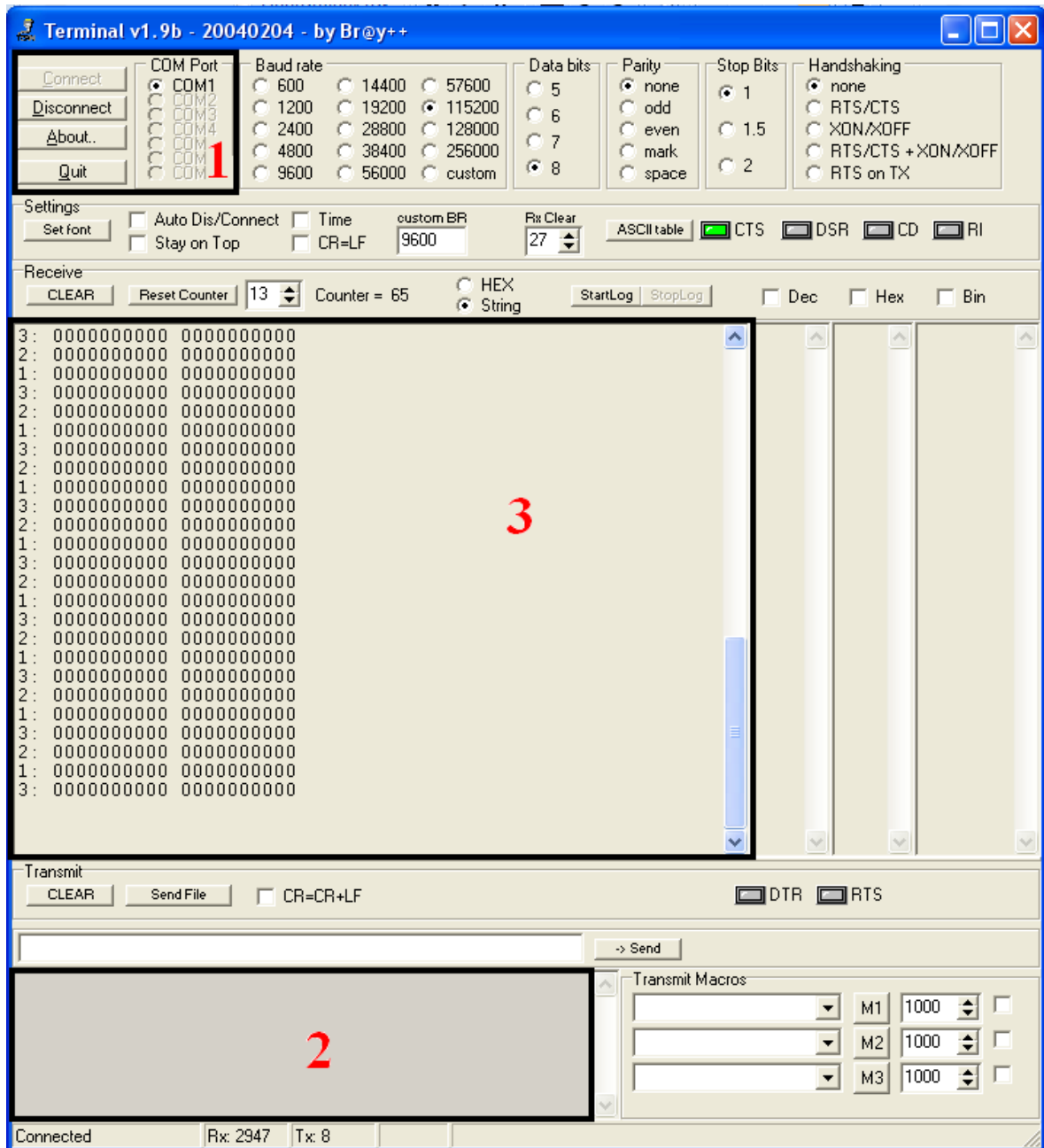
Jde o posuvný registr se zpětnou vazbou. Ta je vytvořená pomocí logické funkce XNOR. LFSR registr se pro testování používá hlavně z důvodu zdánlivě náhodného pořadí generovaných bitů. Ty jsou však při zahájení čítání od stejného počátečního stavu shodné. Sekvence generována LFSR registrem má přesnou délku, která je dána vztahem 2^N-1 (N- počet bitů posuvného registru). Při vytvoření celé sekvence se registr vrací do výchozího stavu a generování pokračuje od začátku. Pro účely testeru je v testeru použit LFSR registr s vícenásobnou zpětnou vazbou.

7.3 Komunikace mezi PC a testerem

Komunikace mezi TestOS 05 a programem v PC probíhá prostřednictvím sériového portu. Jako ovládací program v PC byl použit program Terminal v1.9b. Ovládací program vytváří uživatelské rozhraní pro získání informací o testovaném spoji. Vzhled ovládacího programu můžeme vidět na obr.20.

Pomocí programu se k testeru připojíme tak, že nejprve vybereme v levé horní části programu (obr.20 - část 1) port, na kterém je tester připojen. Kliknutím na tlačítko Connect se provede připojení.

Samotné měření lze zapnout kliknutím do spodní části programu (obr.20 - část 2) a stisknutím klávesy Esc. Ve střední části programu (obr.20 - část 3) se poté začnou vypisovat naměřená data. Ty lze současně vypisovat do textového souboru pomocí tlačítek StartLog a StopLog. Tlačítkem StartLog se zapne vypisování do textového souboru. Tlačítkem StopLog se vypisování do textového souboru zastaví. Měření lze zastavit stejným způsobem, jako zapnutí, tedy kliknutím do spodní části programu (obr.20 - část 2) a stisknutím klávesy Esc.



Obr. 20 Vzhled ovládacího programu Terminal v1.9b

7.3.1 Ukázka naměřených dat

Jak lze vidět v části 3 obrázku 20, naměřená data se zobrazují ve třech sloupcích. Levý (první) sloupec zobrazuje hodnoty kanálů po vyhodnocování chybovosti (nabývá hodnot 1 až 3). Prostřední (druhý) sloupec poskytuje údaj o počtu bytů ztracených chybou synchronizace. Ve třetím (posledním) sloupci nalezneme počet chybných bitů (bitů lišících se od vyslaných dat) z 125 000 000 bitů.

Příklad zpracování dat:

2: 0000000000 0000000002

2: 0000000000 0000000000

2: 0000000000 0000000001

2: 0000000000 0000000000

Pro přehlednost jsem zde vybral pouze kanál číslo 2. Každý takovýto řádek potom značí přenos a vyhodnocení 125 000 000 bitů. Celkový počet přenesených bitů se tedy spočítá: $N_{\text{BITS}} = n * 125\,000\,000$ bitů (n – počet kolikrát se daný kanál zobrazil, v uvedeném případě $n = 4$). Jak již bylo zmíněno, počet chybných bitů nalezneme ve třetím (posledním) sloupci. V uvedeném případě je počet chybných bitů $N_{\text{ERR}} = 3$ bity. Pokud by došlo k výskytu chyb i ve druhém (prostředním) sloupci, je nutné je připočítat k celkovému počtu chyb. Celkový počet chyb se tedy zjistí tak, že se sečtou chyby ve druhém a třetím sloupci. Jen je třeba si dát pozor na to, že druhý sloupec je v bytech, zatímco třetí v bitech.

Na základě konzultace s Ing. Michalem Kubíčkem, Ph.D. (od nějž bylo zapůjčeno testovací zařízení) jsem pro měření, respektive vyhodnocení, vybral kanál číslo 2.

8 MĚŘENÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

Měřil jsem chybovost ohybů – závitů, které byly prováděny kolem válcových předmětů o různém průměru, a to: 10x závit o průměru $\approx 7,5$ cm, 10x závit o průměru $\approx 4,5$ cm, 10x závit o průměru $\approx 1,5$ cm, 1x závit o průměru $\approx 3,1$ mm, 2x závit o průměru $\approx 3,1$ mm, 1x závit o průměru $\approx 2,3$ mm a 2x závit o průměru $\approx 2,3$ mm. Také jsem změřil chybovost nekorektně zastrčeného konektoru a kabelu bez ohybu. U každého typu měření bylo provedeno celkem deset měření.

Původně měly tyto měření být provedeny pro dvě přenosové rychlosti. První přenosová rychlost $\approx 19\text{Mb/s}$ a druhá $\approx 124\text{Mb/s}$. Tester, který byl zapůjčen, nebyl však vhodný pro nižší přenosové rychlosti. Při vyhodnocování naměřených výsledků u nižší přenosové rychlosti vycházely nesmyslné hodnoty (problém v hardwaru testeru). Z toho důvodu se zde nachází výsledky pouze pro rychlost $\approx 124\text{Mb/s}$.

Pro měření jsem zvolil hodnotu $\text{BER} = 10^{-10}$ s jistotou 95%. Tedy zjištění, zdali je chybovost v dané situaci menší nebo větší než $\text{BER} = 10^{-10}$.

Data získaná z testeru (viz kapitola 7.3) jsou kvůli obsáhlosti na příloženém CD.

8.1 Nastavení přenosové rychlosti

Nastavení přenosové rychlosti proběhlo pomocí programu Xilinx ISE Design Suite 12.4. Vzhled příslušného okna lze vidět na obr.21.

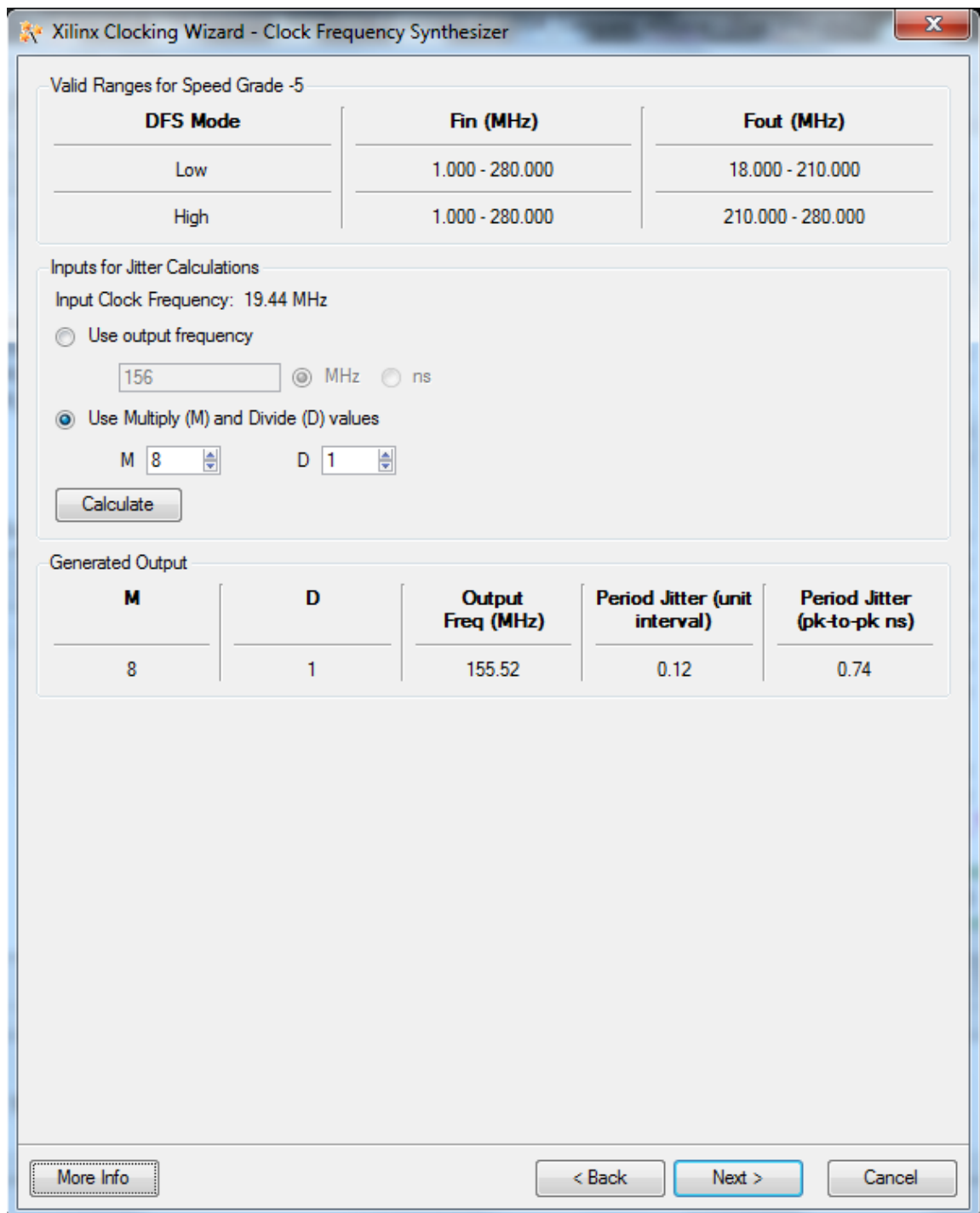
V kaskádě pro generování hodinového signálu jsou dvě jednotky DCM (Digital Clock Manager – jednotka pro úpravu hodinového signálu). První generuje pomocný hodinový signál, který má frekvenci $F_{\text{OutPut}} = 5/4 \cdot F_{\text{data}}$. Tato frekvence musí být menší než 160MHz a lze ji nastavit poměrem M a D (obr.21). Za první DCM je zařazena ještě druhá DCM s fixním poměrem nastaveným na 4/5. Druhá DCM generuje hodinový signál pro vysílání dat (F_{data}). Výstup druhé DCM musí být větší než 18MHz. Tím pádem minimální frekvence první DCM je $F_{\text{OutPut}} = 5/4 \cdot 18 = 22,5$ MHz. Platí zde vztah (24). Výpočet hodnoty pro měření je ve vztahu (25).

$$F_{\text{ref}} \cdot \frac{M}{D} = \frac{5}{4} \cdot F_{\text{data}} = F_{\text{OutPut}} \quad (24)$$

$$F_{\text{data}} = F_{\text{ref}} \cdot \frac{M}{D} \cdot \frac{4}{5} = 19,44 \cdot \frac{8}{1} \cdot \frac{4}{5} = 124,416\text{MHz} \quad (25)$$

Kde:

- $F_{ref} = 19,44\text{MHz}$
- $M \in \langle 2;32 \rangle, M \in \mathbb{N}$
- $D \in \langle 1;32 \rangle, D \in \mathbb{N}$
- $22,5\text{MHz} \leq F_{OutPut} \leq 160\text{MHz}$



Obr. 21 Vzhled okna pro nastavení přenosové rychlosti

8.2 Odhad nutné doby měření

K výpočtu nutné doby měření lze použít i jiné vzorce, než výše zmíněné. Tedy pokud chci s určitou jistotou tvrdit, že chybovost je menší, než nějaká stanovená hodnota BER, musí být přenesena posloupnost N_{BITS} zcela bezchybně. K zjištění potřebného počtu N_{BITS} lze využít i vztah (26). Tedy pokud chci zjistit, zda je s pravděpodobností 95% chybovost menší, než 10^{-10} musím přenést alespoň $N_{BITS} = 3 \cdot 10^{10}$ bitů a to zcela bez chyby. Dobu měření pak lze vypočítat podle vztahu (27). V tab.6 je vypočítána potřebná doba měření.

$$N_{BITS} = \frac{-\ln(1 - CL)}{BER} \quad (26)$$

Kde:

- N_{BITS} je celkový počet přenesených bitů [bit]
- BER je bitová chybovost [-]
- CL je jistota měření (confidence level) [-]

$$T = \frac{-\ln(1 - CL)}{F_{data} \cdot BER} \quad (27)$$

Kde:

- T je doba měření [s]
- CL je jistota měření (confidence level) [-]
- F_{data} je frekvence hodinového signálu pro vysílání dat [Hz]
- BER je bitová chybovost [-]

BER [-]	F_{data} [MHz]	N_{BITS} [-]	T [s]	T [hh:mm:ss]
10^{-9}	124,416	$\approx 3 \cdot 10^9$	24,1	00:00:25
10^{-10}	124,416	$\approx 3 \cdot 10^{10}$	240,8	00:04:01
10^{-11}	124,416	$\approx 3 \cdot 10^{11}$	2 407,84	00:40:08

Tab. 6 Nutná doba měření pro $CL = 0,95$

Pro měření jsem zvolil hodnotu $BER = 10^{-10}$ s jistotou 95%. Tedy zjištění, zdali je chybovost v dané situaci menší nebo větší než $BER = 10^{-10}$.

8.3 Měření optického kabelu

Měření probíhalo na mnohovidovém gradientním optickém kabelu.

Parametry měřeného optického kabelu:

- Typ: MM-GI
- Průměr jádra: $50 \pm 2,5 \mu\text{m}$
- Průměr pláště: $125 \pm 1 \mu\text{m}$
- Typy konektorů: SC
- Útlum: $\approx 0,6 \text{ dB/km}$
- Numerická apertura: $0,2 \pm 0,015$
- Délka kabelu: $\approx 10 \text{ m}$

Měření probíhalo při teplotě $22,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$. Pro vyhodnocení jsem zvolil kanál číslo 2 (viz výše).

8.3.1 Optický kabel bez ohybu

V tab.7 jsou zpracovány naměřené hodnoty pro optický kabel bez ohybu s přenosovou rychlostí $\approx 124\text{Mb/s}$. Je zde celkový počet přenesených bitů (N_{BITS}) v daném měření. Dále pak počet chyb v daném měření (N_{ERR}). Je vidět, že se v měření neobjevila chyba. Lze tedy s pravděpodobností 95% říci, že měřený optický kabel bez ohybu vykazuje chybovost menší, než předem zvolená hodnota $\text{BER} = 10^{-10}$.

Kabel bez ohybu				
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} [bit]	BER [-]
124,416	1.	30 875 000 000	0	< 1E-10
	2.	30 875 000 000	0	< 1E-10
	3.	34 000 000 000	0	< 1E-10
	4.	32 875 000 000	0	< 1E-10
	5.	33 375 000 000	0	< 1E-10
	6.	32 375 000 000	0	< 1E-10
	7.	32 125 000 000	0	< 1E-10
	8.	33 375 000 000	0	< 1E-10
	9.	31 125 000 000	0	< 1E-10
	10.	32 375 000 000	0	< 1E-10

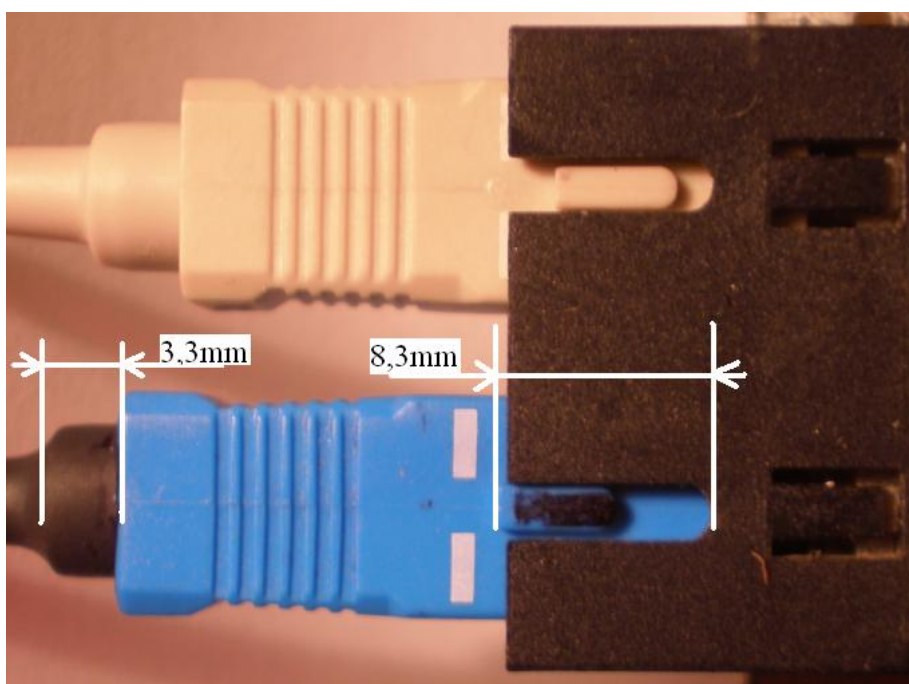
Tab. 7 BER - Kabel bez ohybu (124,416MHz)

8.3.2 Optický kabel s nekorektně zastrčeným konektorem

Na obr.22 je vyfocen povysunutý konektor. V tab.8 jsou zpracované naměřené hodnoty pro optický kabel s nekorektně zastrčeným konektorem. V tabulce lze vidět celkový počet přenesených bitů (N_{BITS}) a počet chyb v daném měření (N_{ERR}).

Tester posílá data o chybovosti do PC vždy po napočítání 125 000 000 bitů. V tab.8 je vypsán minimální a maximální počet chyb, který se v tomto počtu bitů objevil (za dané měření). Dále pak je v tabulce průměrný počet chyb, které se vyskytovaly při daném měření v jednotlivých 125 000 000 bitech. Také jsou zde vypočítány hodnoty BER podle vztahu (16).

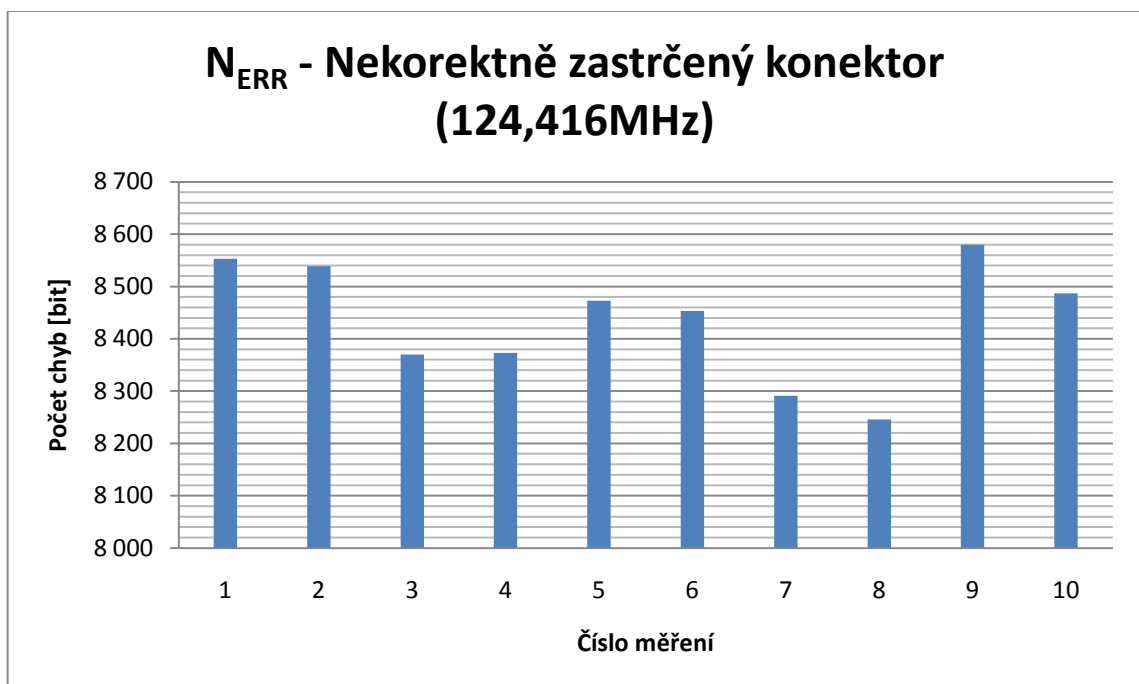
Počet chyb v jednotlivých měřeních je také graficky znázorněn na obr.23. Vypočtené hodnoty BER jsou graficky vyneseny na obr.24. V tab.8 nebo na obr.24 můžeme vidět, že chybovost optického kabelu s nekorektně zastrčeným konektorem se pohybovala kolem hodnoty $BER = 2,59 \cdot 10^{-7}$.

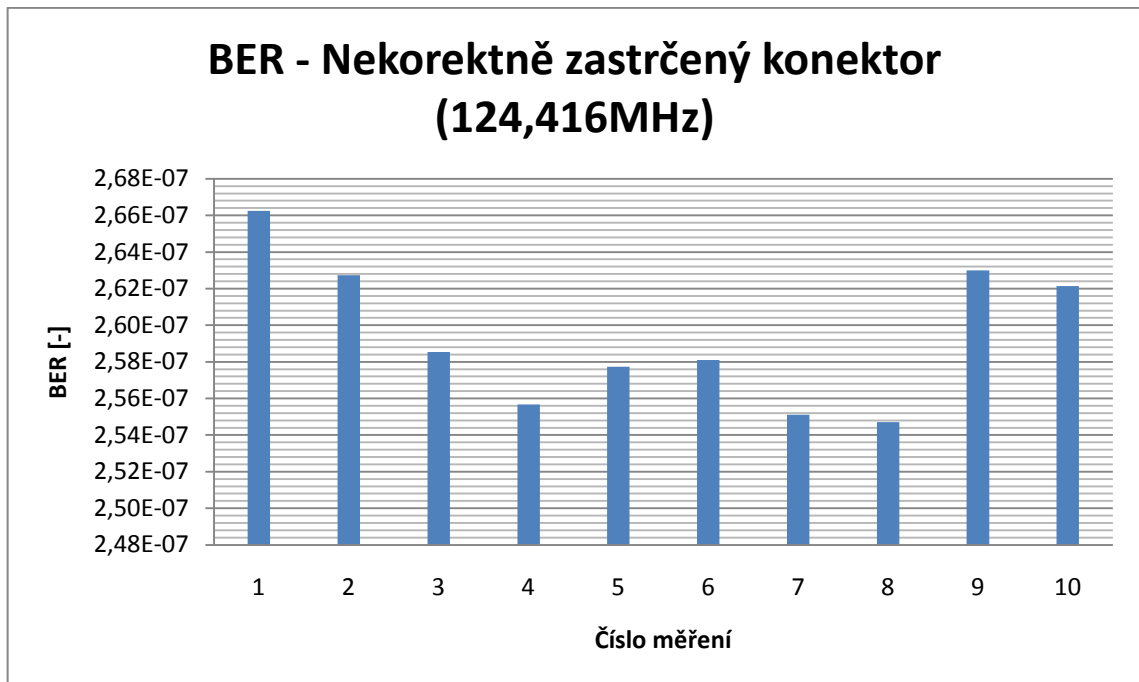


Obr. 22 Nekorektně zastrčený konektor

Kabel bez ohybu - nekorektně zastrčený konektor								
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} synch. [bit]	N_{ERR} min. [bit]	N_{ERR} max. [bit]	N_{ERR} průměr [bit]	N_{ERR} celkem [bit]	BER [-]
124,416	1.	32 125 000 000	0	15	54	33	8 553	2,6624E-07
	2.	32 500 000 000	0	19	51	33	8 539	2,6274E-07
	3.	32 375 000 000	0	19	55	32	8 370	2,5853E-07
	4.	32 750 000 000	0	19	48	32	8 373	2,5566E-07
	5.	32 875 000 000	0	18	51	32	8 473	2,5773E-07
	6.	32 750 000 000	0	18	48	32	8 453	2,5811E-07
	7.	32 500 000 000	0	15	48	32	8 291	2,5511E-07
	8.	32 375 000 000	0	16	47	32	8 246	2,5470E-07
	9.	32 625 000 000	0	18	48	33	8 580	2,6299E-07
	10.	32 375 000 000	0	14	47	33	8 487	2,6215E-07
Min.			0	14			8 246	2,5470E-07
Max.			0		55		8 580	2,6624E-07
Průměr							8 437	2,5940E-07

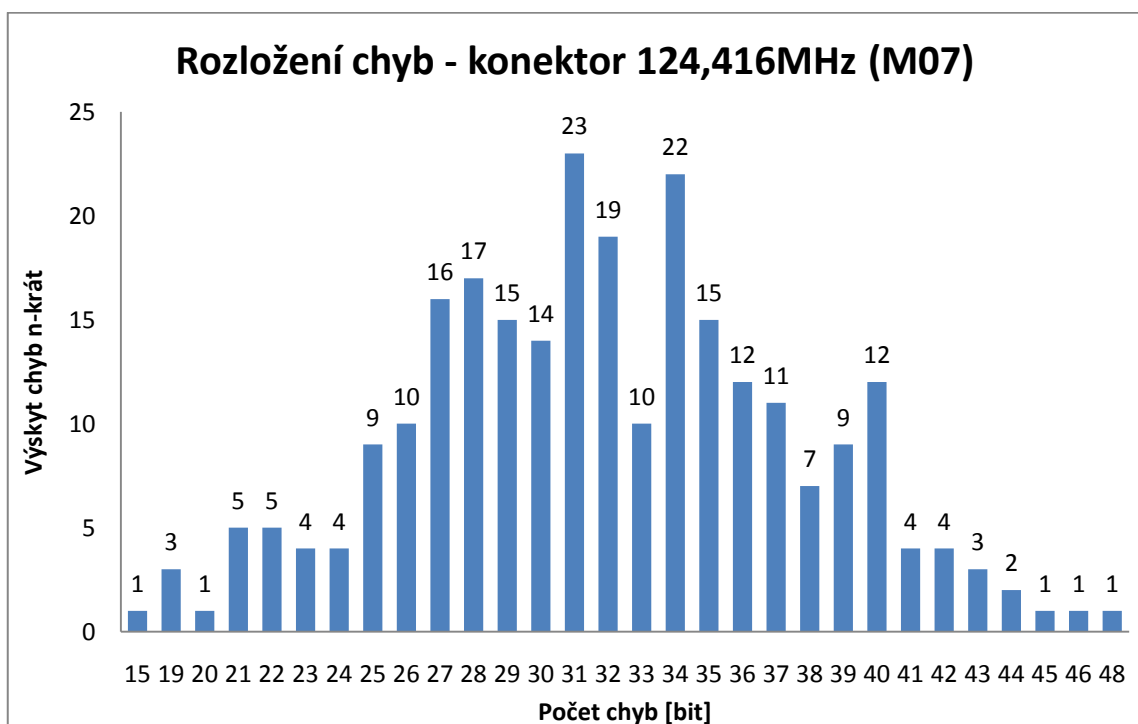
Tab. 8 BER - Nekorektně zastrčený konektor (124,416MHz)


 Obr. 23 N_{ERR} - Nekorektně zastrčený konektor (124,416MHz)



Obr. 24 BER - Nekorektně zastrčený konektor (124,416MHz)

Na obr.25 je na ukázkou znázorněno rozložení chyb při měření č.7 dle tab.8. Na ose X je počet chyb v bitech a na ose Y počet kolikrát se daný počet chyb při daném měření vyskytl (v odeslaných 125 000 000 bitech). Lze vidět, že počet chybných bitů se pohyboval nejčastěji kolem 32 bitů (chybných bitů z 125 000 000 bitů). Rozložení chyb ostatních měření lze nalézt na příloženém CD.



Obr. 25 Rozložení chyb - měření č.7 dle tab.10 (124,416MHz)

8.3.3 Optický kabel s ohybem 10x průměr 7,5 cm

Na obr.26 máme vyfocenou tuto situaci. V tab.9 jsou zpracované naměřené hodnoty pro optický kabel s ohybem. Počet ohybů - závitů na optickém kabelu bylo 10, a to kolem válcového tělesa o průměru $\approx 7,5\text{cm}$. V tab.9 lze vidět celkový počet přenesených bitů (N_{BITS}) v daném měření. Dále pak to, že se v měření neobjevila jediná chyba – jako u kabelu bez ohybu. Lze tedy s pravděpodobností 95% říci, že optický kabel v dané situaci vykazuje chybovost menší, než zvolená měřená hranice $\text{BER} = 10^{-10}$.



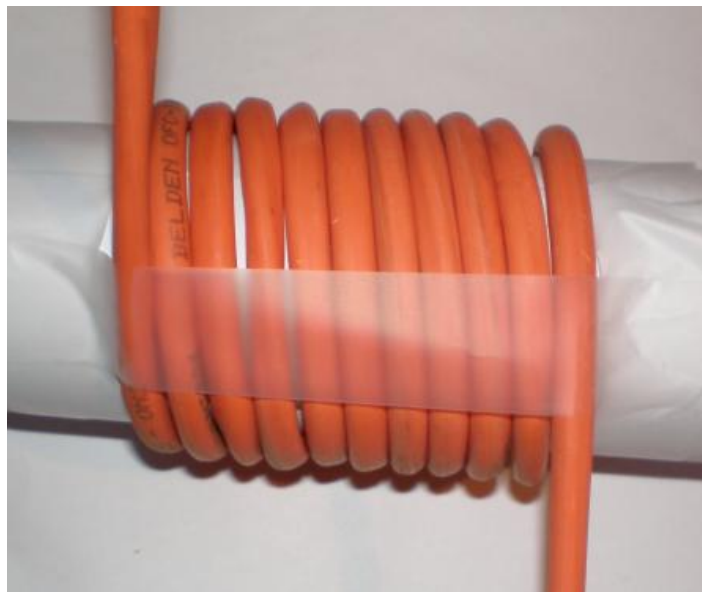
Obr. 26 Optický kabel s ohybem 10x průměr 7,5cm

Kabel s ohybem 10x průměr 7,5cm				
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} [bit]	BER [-]
124,416	1.	30 750 000 000	0	< 1E-10
	2.	31 250 000 000	0	< 1E-10
	3.	30 875 000 000	0	< 1E-10
	4.	31 000 000 000	0	< 1E-10
	5.	30 875 000 000	0	< 1E-10
	6.	30 750 000 000	0	< 1E-10
	7.	31 000 000 000	0	< 1E-10
	8.	31 125 000 000	0	< 1E-10
	9.	31 250 000 000	0	< 1E-10
	10.	31 125 000 000	0	< 1E-10

Tab. 9 BER - Kabel s ohybem 10x průměr 7,5cm (124,416MHz)

8.3.4 Optický kabel s ohybem 10x průměr 4,5 cm

Na obr.27 jsou vyfoceny provedené ohyby - závitů. V tab.10 jsou zpracované naměřené hodnoty pro optický kabel s ohybem. Počet ohybů – závitů na optickém kabelu bylo 10, a to kolem válcového tělesa o průměr $\approx 4,5\text{cm}$. V tab.10 lze vidět, že všech deset měření proběhlo bez výskytu chyby. Jako u optického kabelu bez ohybu, tak i zde můžeme s pravděpodobností 95% říci, že optický kabel v dané situaci vykazuje chybovost menší, než hodnota $\text{BER} = 10^{-10}$.



Obr. 27 Optický kabel s ohybem 10x průměr 4,5cm

Kabel s ohybem 10x průměr 4,5cm				
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} [bit]	BER [-]
124,416	1.	30 750 000 000	0	< 1E-10
	2.	30 625 000 000	0	< 1E-10
	3.	30 875 000 000	0	< 1E-10
	4.	31 625 000 000	0	< 1E-10
	5.	32 375 000 000	0	< 1E-10
	6.	32 250 000 000	0	< 1E-10
	7.	31 625 000 000	0	< 1E-10
	8.	32 375 000 000	0	< 1E-10
	9.	32 125 000 000	0	< 1E-10
	10.	32 500 000 000	0	< 1E-10

Tab. 10 BER - Kabel s ohybem 10x průměr 4,5cm (124,416MHz)

8.3.5 Optický kabel s ohybem 10x průměr 1,5 cm

V tab.11 jsou pak zpracované naměřené hodnoty pro optický kabel s ohybem. Počet ohybů - závitů na optickém kabelu byl 10, a to kolem válcového tělesa o průměru $\approx 1,5\text{cm}$, jak můžeme vidět na obr.28. V tab.11 lze opět vidět celkový počet přenesených bitů (N_{BITS}) a to, že se zde nevyskytovali při měření chyby. Lze tedy s pravděpodobností 95% říci, jako u všech předchozích měření, který byly bez výskytu chyby, že optický kabel v dané situaci vykazuje chybovost menší, než zvolená hodnota $\text{BER} = 10^{-10}$.



Obr. 28 Optický kabel s ohybem 10x průměr 1,5cm

Kabel s ohybem 10x průměr 1,5cm				
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} [bit]	BER [-]
124,416	1.	31 125 000 000	0	< 1E-10
	2.	30 875 000 000	0	< 1E-10
	3.	31 500 000 000	0	< 1E-10
	4.	31 500 000 000	0	< 1E-10
	5.	31 750 000 000	0	< 1E-10
	6.	31 375 000 000	0	< 1E-10
	7.	32 125 000 000	0	< 1E-10
	8.	31 500 000 000	0	< 1E-10
	9.	31 750 000 000	0	< 1E-10
	10.	31 750 000 000	0	< 1E-10

Tab. 11 BER - Kabel s ohybem 10x průměr 1,5cm (124,416MHz)

8.3.6 Vlákno s ohybem 1x průměr 3,1 mm

Na obr.29 je vyfocený provedený ohyb - závit. Zde můžeme v tab.12 vidět výsledky měření optického vlákna s ohybem (závitem) kolem válcového tělesa o průměru $\approx 3,1$ mm. Při měření se zde nevyskytla chyba. Můžeme tedy s pravděpodobností 95% říci, jako u jiných měření bez výskytu chyby, že optický kabel v této situaci vykazuje chybovost menší, než předem zvolená hodnota $BER = 10^{-10}$.



Obr. 29 Optické vlákno s ohybem 1x průměr 3,1mm

Vlákno s ohybem 1x průměr 3,1mm				
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} [bit]	BER [-]
124,416	1.	31 750 000 000	0	< 1E-10
	2.	31 625 000 000	0	< 1E-10
	3.	31 750 000 000	0	< 1E-10
	4.	32 375 000 000	0	< 1E-10
	5.	32 500 000 000	0	< 1E-10
	6.	31 625 000 000	0	< 1E-10
	7.	31 750 000 000	0	< 1E-10
	8.	31 375 000 000	0	< 1E-10
	9.	32 375 000 000	0	< 1E-10
	10.	31 625 000 000	0	< 1E-10

Tab. 12 BER - Vlákno s ohybem 1x průměr 3,1mm (124,416MHz)

8.3.7 Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1 mm

V tab.13 jsou zpracovány naměřené hodnoty pro optické vlákno s ohybem - závitem. Jak můžeme vidět na obr.30 byly provedeny dva závity kolem válcového tělesa o průměru $\approx 3,1$ mm. V tabulce můžeme vidět celkový počet přenesených bitů (N_{BITS}) a počet chyb v daném měření (N_{ERR}).

Jak již bylo zmíněno, tester posílá data o chybovosti do PC vždy po napačítání 125 000 000 bitů. V tab.13 tak můžeme vidět minimální a maximální počet chyb, který se v tomto počtu bitů objevil. Dále pak je v tabulce průměrný počet chyb, které se vyskytovaly při daném měření v jednotlivých 125 000 000 bitech. Můžeme si povšimnout, že přenos (125 000 000 bitů) byl častěji bez výskytu chyby. To lze vidět i na obr.33. V tab.13 jsou vypočítány hodnoty BER pro jednotlivá měření a jejich průměrná hodnota. Hodnota BER je vypočítaná podle vztahu (16).

Počet chyb v jednotlivých měřeních je také graficky znázorněn na obr.31 (dle tab.13). Na obr.32 jsou graficky vyneseny hodnoty BER (dle tab.13).

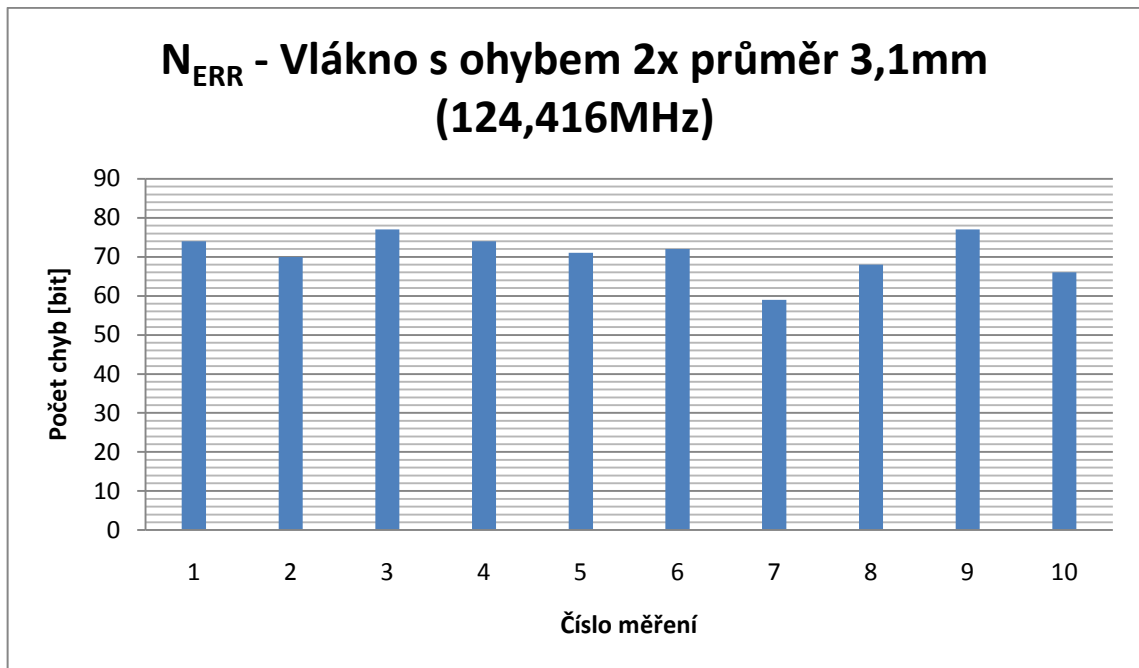
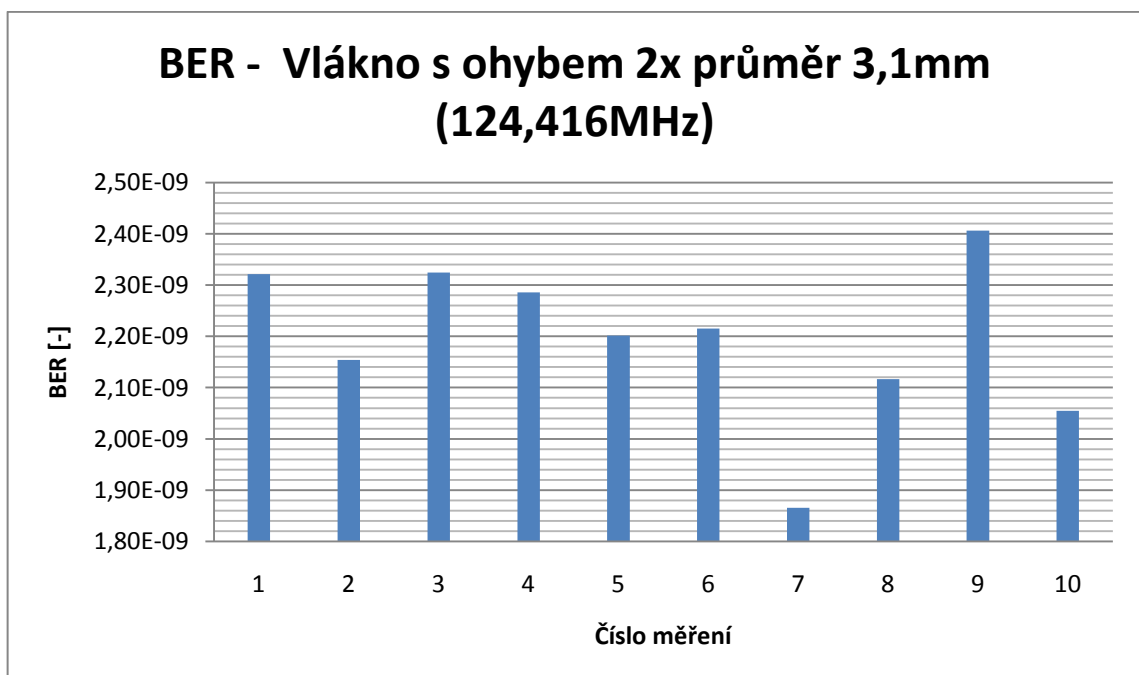
V tab.13 můžeme vidět, že počet chybných bitů v jednotlivých měřeních se pohyboval v průměru kolem hodnoty $N_{ERR} = 71$ bitů (celkem za měření). Chybovost optického vlákna se v dané situaci pohybovala kolem hodnoty $BER = 2,19 \cdot 10^{-9}$.



Obr. 30 Optické vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm

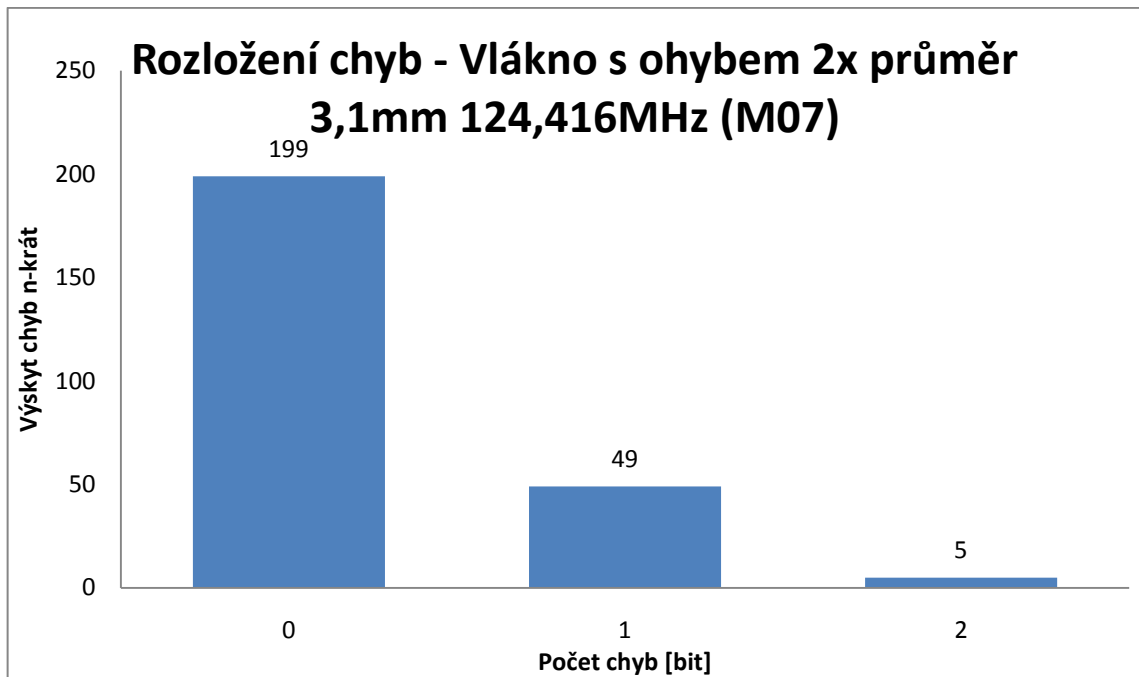
Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm								
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} synch. [bit]	N_{ERR} min. [bit]	N_{ERR} max. [bit]	N_{ERR} průměr [bit]	N_{ERR} celkem [bit]	BER [-]
124,416	1.	31 875 000 000	0	0	3	0	74	2,3216E-09
	2.	32 500 000 000	0	0	2	0	70	2,1538E-09
	3.	33 125 000 000	0	0	3	0	77	2,3245E-09
	4.	32 375 000 000	0	0	2	0	74	2,2857E-09
	5.	32 250 000 000	0	0	2	0	71	2,2016E-09
	6.	32 500 000 000	0	0	2	0	72	2,2154E-09
	7.	31 625 000 000	0	0	2	0	59	1,8656E-09
	8.	32 125 000 000	0	0	2	0	68	2,1167E-09
	9.	32 000 000 000	0	0	3	0	77	2,4063E-09
	10.	32 125 000 000	0	0	2	0	66	2,0545E-09
Min.			0	0			59	1,8656E-09
Max.			0		3		77	2,4063E-09
Průměr							71	2,1946E-09

Tab. 13 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm (124,416MHz)

Obr. 31 N_{ERR} - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm (124,416MHz)

Obr. 32 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm (124,416MHz)

Na obr.33 je na ukázkou znázorněno rozložení chyb při měření č.7 dle tab.13. Na ose X je počet chyb v bitech a na ose Y počet kolikrát se daný počet chyb při daném měření vyskytl (v odeslaných 125 000 000 bitech). Můžeme si všimnout, že zde bylo 199x přenesených 125 000 000 bitů bez chyby. Potom 49x s vyhodnocením jednoho chybného bitu a jen 5x byly vyhodnoceny dva chybné bity. Rozložení chyb ostatních měření lze nalézt na příloženém CD.



Obr. 33 Rozložení chyb - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm 124,416MHz (M07)

8.3.8 Vlákno s ohybem 1x průměr 2,3 mm

Na obr.34 máme vyfocen provedený ohyb – závit kolem válcového tělesa s průměrem $\approx 2,3\text{mm}$. V tab.14 pak můžeme vidět výsledky naměřených dat. Při měření se zde nevyskytla chyba. Může říci, že optické vlákno v dané situaci vykazuje chybovost menší, než zvolená hodnota $\text{BER} = 10^{-10}$, a to s 95% pravděpodobností.



Obr. 34 Optické vlákno s ohybem 1x průměr 2,3mm

Vlákno s ohybem 1x průměr 2,3mm				
F _{DATA} [MHz]	Číslo měření	N _{BITS} [bit]	N _{ERR} [bit]	BER [-]
124,416	1.	31 375 000 000	0	< 1E-10
	2.	33 000 000 000	0	< 1E-10
	3.	32 375 000 000	0	< 1E-10
	4.	32 250 000 000	0	< 1E-10
	5.	32 000 000 000	0	< 1E-10
	6.	32 000 000 000	0	< 1E-10
	7.	31 875 000 000	0	< 1E-10
	8.	32 750 000 000	0	< 1E-10
	9.	33 500 000 000	0	< 1E-10
	10.	32 125 000 000	0	< 1E-10

Tab. 14 BER - Vlákno s ohybem 1x průměr 2,3mm (124,416MHz)

8.3.9 Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3 mm

V tab.15 jsou zpracovány naměřené hodnoty pro optické vlákno s ohybem – závitem. Jak můžeme vidět na obr.35 byly provedeny dva závity kolem válcového tělesa o průměru $\approx 2,3$ mm. V tabulkách lze vidět celkový počet přenesených bitů (N_{BITS}) a počet chyb v daném měření (N_{ERR}).

Jak již bylo zmíněno, tester posílá data o chybovosti do PC vždy po napočítání 125 000 000 bitů. V tab.15 je vypsán minimální a maximální počet chyb, který se v tomto počtu bitů objevil. Dále pak je v tabulce průměrný počet chyb, který se vyskytoval při daném měření v jednotlivých 125 000 000 bitech. V tab.15 jsou vypočítány hodnoty BER pro jednotlivá měření a jejich průměrná hodnota. Hodnota BER je vypočítaná podle vztahu (16).

Počet chyb v jednotlivých měřeních je také graficky znázorněn na obr.36. Vypočtené hodnoty BER jsou graficky vyneseny na obr.37.

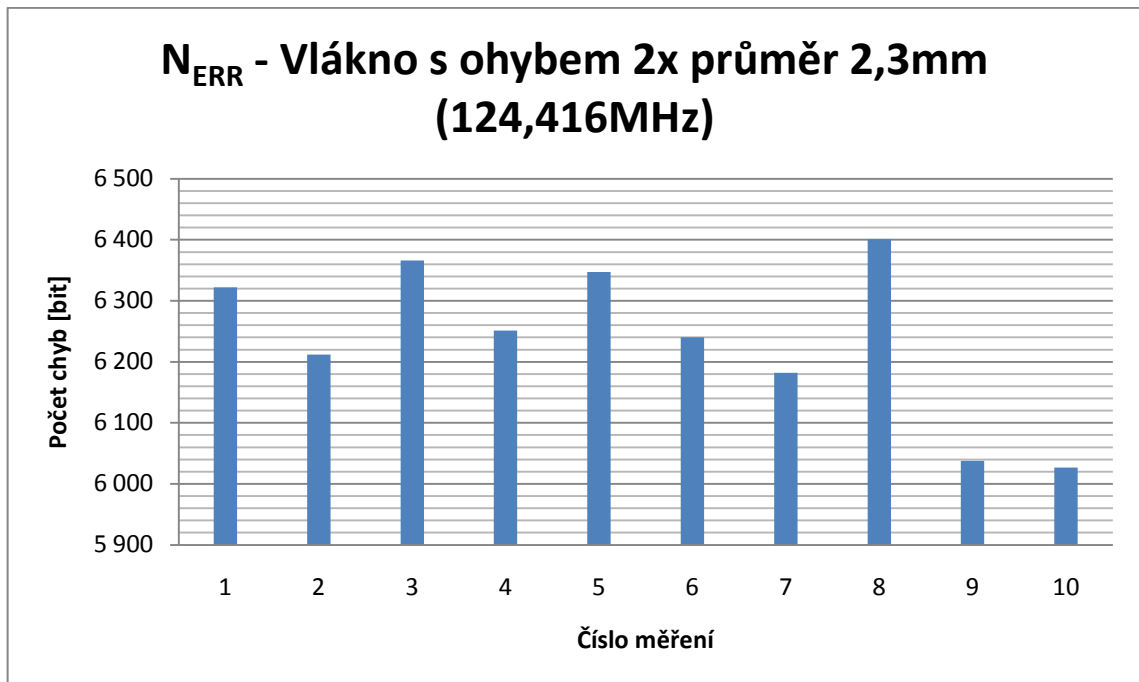
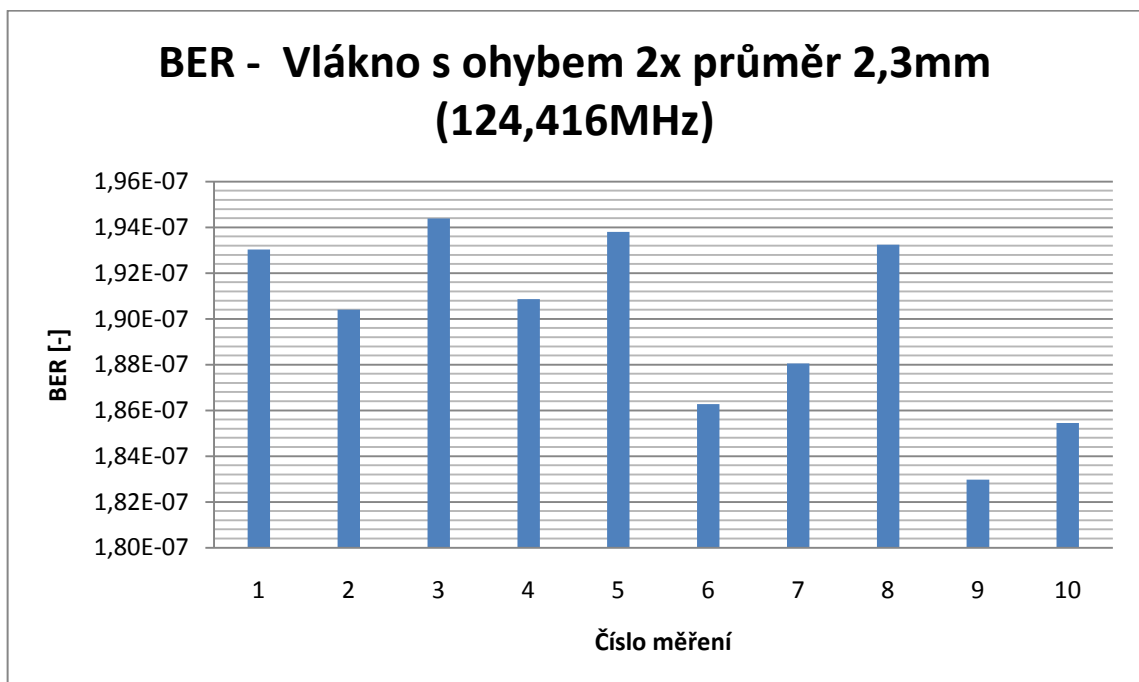
V tab.15 můžeme vidět, že hodnota BER se průměrně pohybovala kolem $\approx 1,9 \cdot 10^{-7}$.



Obr. 35 Optické vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm

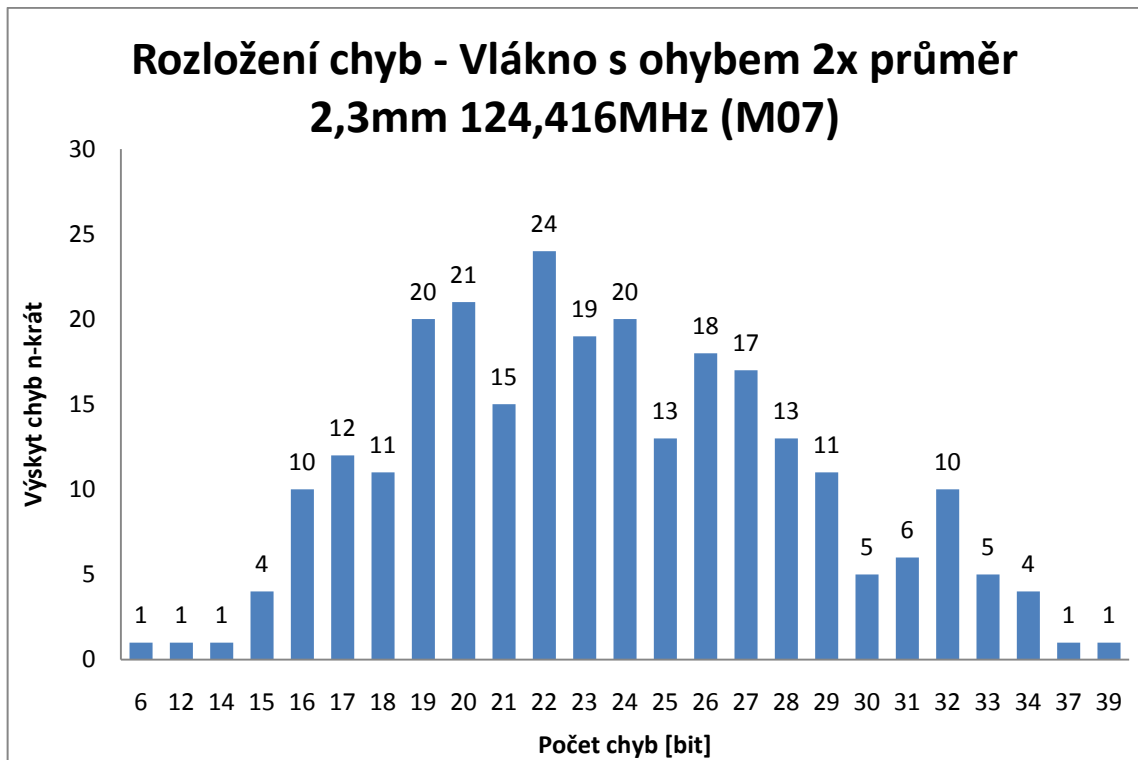
Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm								
F_{DATA} [MHz]	Číslo měření	N_{BITS} [bit]	N_{ERR} synch. [bit]	N_{ERR} min. [bit]	N_{ERR} max. [bit]	N_{ERR} průměr [bit]	N_{ERR} celkem [bit]	BER [-]
124,416	1.	32 750 000 000	0	13	43	24	6 322	1,9304E-07
	2.	32 625 000 000	0	12	42	24	6 212	1,9041E-07
	3.	32 750 000 000	0	10	38	24	6 366	1,9438E-07
	4.	32 750 000 000	0	12	38	24	6 251	1,9087E-07
	5.	32 750 000 000	0	11	41	24	6 347	1,9380E-07
	6.	33 500 000 000	0	11	37	23	6 240	1,8627E-07
	7.	32 875 000 000	0	6	39	24	6 182	1,8805E-07
	8.	33 125 000 000	0	12	40	24	6 401	1,9324E-07
	9.	33 000 000 000	0	12	39	23	6 038	1,8297E-07
	10.	32 500 000 000	0	12	37	23	6 027	1,8545E-07
Min.			0	6			6 027	1,8297E-07
Max.			0		43		6 401	1,9438E-07
Průměr							6 239	1,8985E-07

Tab. 15 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm (124,416MHz)

Obr. 36 N_{ERR} - Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm (124,416MHz)

Obr. 37 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm (124,416MHz)

Na obr.38 jsem na ukázkou vybral rozložení výskytu chyb při měření č.7 dle tab.15. Na ose X je počet chyb v bitech a na ose Y počet kolikrát se daný počet chyb při daném měření vyskytl (v odeslaných 125 000 000 bitech). Můžeme si povšimnout, že se počet chybně přenesených bitů pohyboval kolem 24 bitů, což vyplývá i z tab.15. Rozložení chyb ostatních měření lze nalézt na příloženém CD.



Obr. 38 Rozložení chyb - Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm 124,416MHz (M07)

8.4 Srovnání měření s výskytem chybně přenesených bitů

V tab.16 máme pro srovnání všechna měření, ve kterých se vyskytly nějaké chybné bity při testování optického vlákna. Průměrnou hodnotu BER z těchto měření máme vynesenu pro přehlednost na obr.39. Na obr.40 jsou graficky vyneseny průměrné hodnoty počtu chyb (N_{ERR}).

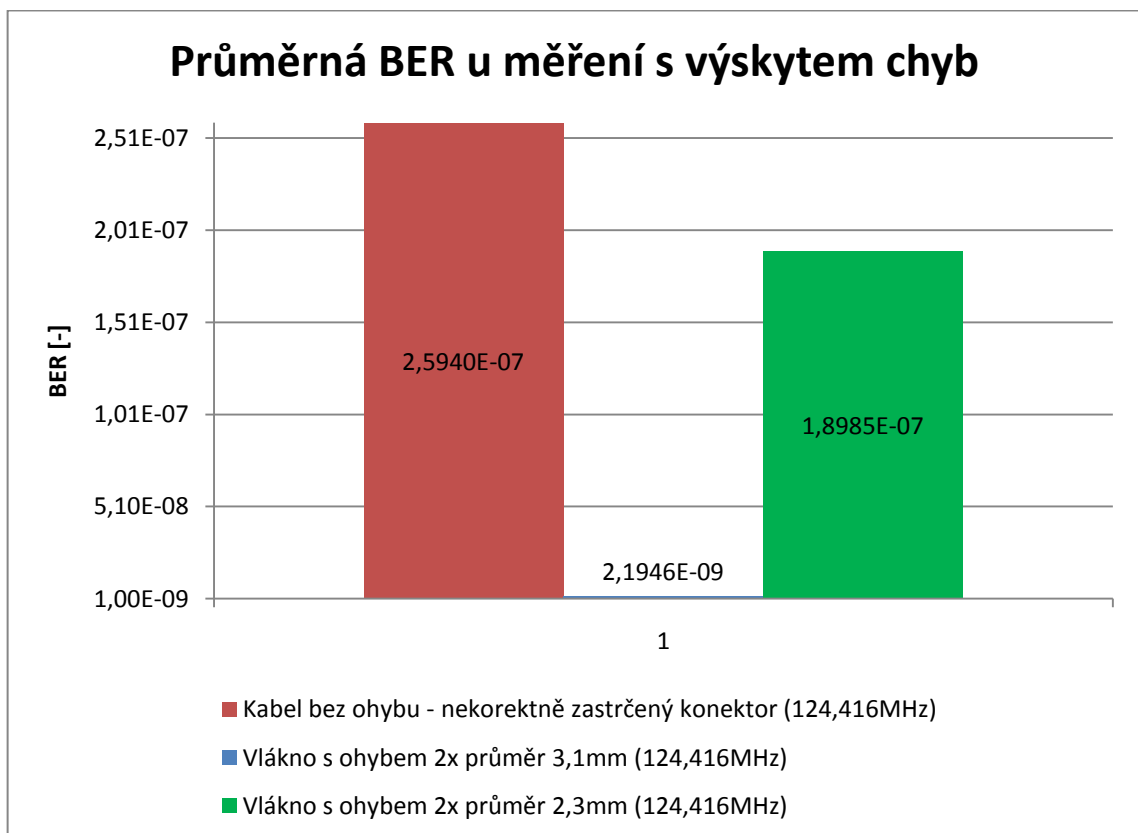
Jak v tab.16, tak na obr.39 a obr.40 si můžeme povšimnout, že největší chybovost byla při měření nekorektně zastrčeného konektoru. Na druhou stranu nejmenší chybovost se vyskytla u měření dvojitého závitu kolem válcového předmětu o průměru $\approx 3,1$ mm (tab.16). Téměř všechny hodnoty N_{ERR} v jednotlivých měřeních oscilují kolem průměrných hodnot, tedy i hodnota BER. Jediná výraznější odchylka BER od průměru byla při měření dvojitého závitu s průměrem $\approx 3,1$ mm u měření číslo 7.

U měření, kde byly provedeny tyto závity: 10x závit o průměru $\approx 7,5$ cm, 10x závit o průměru $\approx 4,5$ cm, 10x závit o průměru $\approx 1,5$ cm, 1x závit o průměru $\approx 3,1$ mm, 1x závit o průměru $\approx 2,3$ mm a dále pak kabel bez ohybu, byly bez výskytu chyby.

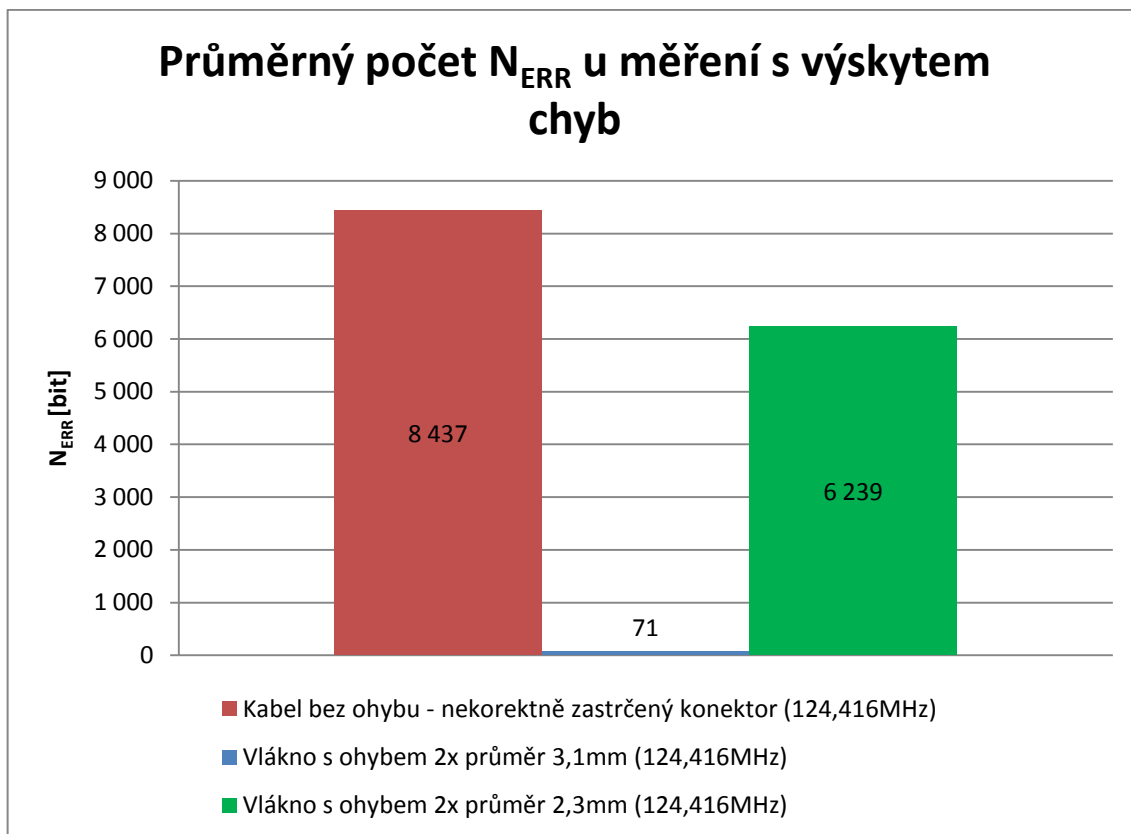
Z naměřených výsledků vyplývá, že při ohybu (závitu) s menším průměrem bude větší chybovost.

		Konektor		2x 3,1mm		2x 2,3mm	
F _{DATA} [MHz]	Číslo měření	N _{ERR} celkem [bit]	BER [-]	N _{ERR} celkem [bit]	BER [-]	N _{ERR} celkem [bit]	BER [-]
124,416	1.	8 553	2,6624E-07	74	2,3216E-09	6 322	1,9304E-07
	2.	8 539	2,6274E-07	70	2,1538E-09	6 212	1,9041E-07
	3.	8 370	2,5853E-07	77	2,3245E-09	6 366	1,9438E-07
	4.	8 373	2,5566E-07	74	2,2857E-09	6 251	1,9087E-07
	5.	8 473	2,5773E-07	71	2,2016E-09	6 347	1,9380E-07
	6.	8 453	2,5811E-07	72	2,2154E-09	6 240	1,8627E-07
	7.	8 291	2,5511E-07	59	1,8656E-09	6 182	1,8805E-07
	8.	8 246	2,5470E-07	68	2,1167E-09	6 401	1,9324E-07
	9.	8 580	2,6299E-07	77	2,4063E-09	6 038	1,8297E-07
	10.	8 487	2,6215E-07	66	2,0545E-09	6 027	1,8545E-07
Min.		8 246	2,5470E-07	59	1,8656E-09	6 027	1,8297E-07
Max.		8 580	2,6624E-07	77	2,4063E-09	6 401	1,9438E-07
Průměr		8 437	2,5940E-07	71	2,1946E-09	6 239	1,8985E-07

Tab. 16 Srovnání měření s výskytem chyb



Obr. 39 Průměrná BER u měření s výskytem chyb

Obr. 40 Průměrný počet N_{ERR} u měření s výskytem chyb

ZÁVĚR

Tato práce si kladla za cíl popis přenosu optickými vlákny a také popis jeho vlastností. V teoretické části je podrobně popsána historie tohoto typu přenosu, jsou naznačeny nezbytné využívané fyzikální zákony a principy, a také popsány nejběžnější typy medií či zařízení používaných v této oblasti. Dále jsou zde popsány výhody a nevýhody takového přenosu oproti jiným současným typům přenosu.

V praktické části byl proveden průzkum trhu, zabývající se zařízeními používanými v této oblasti můžeme nalézt v praktické části této práce. Pokud se podíváme na výsledky průzkumu trhu, můžeme vidět, že náklady na zařízení potřebné k instalaci optického vlákna (optická svářečka a lámačka) není zrovna levnou záležitostí. Je zde ale i možnost zápůjčky těchto zařízení, kde cena vychází kolem 3 000 Kč na jeden den [20]. Není tedy nutností při potřebě jednorázového použití hned zakupovat tyto drahé zařízení. Na trhu je celá řada optických zařízení a kabelů, kde se od jejich parametrů odvíjí cena.

Dále v praktické části byla popsána definice chybovosti a byly zde zhodnoceny výsledky provedeného měření.

Cílem bylo zjistit chybovost tohoto přenosu. Postup byl takový, že nejprve byly vytvořeny příslušné ohyby a následně bylo připojeno vlákno k testeru pomocí SC konektoru. Měření bylo provedeno pro různý počet závitů a závity měly různý poloměr. První sada měření byla provedena s deseti závitů. V této sadě byly závity namotány na třech různých průměrech - $\approx 7,5\text{cm}$; $\approx 4,5\text{cm}$; $\approx 1,5\text{cm}$. Ve druhé sadě bylo provedeno měření s jedním a se dvěma závitů, přičemž závity zde byly namotány pouze na dvou průměrech, a to $\approx 3,1\text{mm}$ a $\approx 2,3\text{mm}$. Dále byla provedena měření bez ohybu kabelu s řádně a chybně zastrčeným konektorem.

Jak vyplývá z výsledků měření, největší chybovost se vyskytla při měření nekorektně zastrčeného konektoru, nejmenší naopak při měření dvou závitů kolem válcového předmětu o průměru $\approx 3,1\text{mm}$. Chybovost se také vyskytla u měření dvojitého závitu o průměru $\approx 2,3\text{mm}$. Ostatní měření byly bez výskytu chyby. Z naměřených výsledků vyplývá, že ohyb (závit) s menším průměrem vykazuje větší chybovost. Z praktického hlediska můžeme tedy říci, že při pokládce optického kabelu je třeba se vyvarovat ohybům s malým poloměrem, neboť zde dochází k podstatnému navýšení chybovosti.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In this work was aim to description the transmission of optic fiber and a description of its properties. In the theoretical part is a detailed description history of this type of transmission, are indicated the necessary physical laws and principles, and also describes the most common types of media or device which are used in this area. It further describes the advantages and disadvantages of such a transfer in comparison with other types of current transmission.

In the practical part was conducted the market research, engaged in devices in this field can be found in the practical part of this work. If we look at the results of market research, we can see that the cost of equipment needed to install optical fiber (optical welder and breaker) is not just an expensive affair. There is also a possibility to lease these facilities, where price rises from around 3000 CZK per day [20]. There is no need to buy these expensive devices when you need just one shot. The market is a whole range of optical devices and cable, where the price depends on the parameters.

Furthermore, in the practical part the necessary error definition is provided, the results of the measurements are evaluated.

The aim was to determine the transmission error. The technique was that first the bends were created and then the fiber was connected to the tester through a SC connector. Measurements were performed for different numbers of windings and the windings had a different radius. The first set of measurements were made with ten windings. In this set of windings have been folded into three different diameters $\approx 7,5\text{cm}$; $\approx 4,5\text{cm}$, $\approx 1,5\text{cm}$. In the second set were made measurements of one and two windings, the windings here were folded of only two averages, namely $\approx 3,1\text{mm}$ and $\approx 2,3\text{mm}$. Further measurements were carried without windings at cable with properly and amiss tucked connector.

As follows from the results of measurements, the largest error was at measuring not properly tucked connector on the contrary, the smallest error was at two turns of around a cylindrical object with a diameter of $\approx 3.1\text{ mm}$. The error rates was also at measurement of double windings of diameter $\approx 2,3\text{ mm}$. Other measurements were free of errors. The measured results show that the bending (windings) with a smaller diameter is a larger occurrence error. From a practical point of view we can say that at laying of optical cable is should be avoided bending with small radius, because there is a substantial increase of error.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOHÁČ, Leoš; LUCKI, Michal. Optické komunikační systémy. Vyd. 1. V Praze : České vysoké učení technické, 2010. 165 s. ISBN 978-80-01-04484-1.
- [2] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 154 s. ISBN 80-7300-184-5.
- [3] KOCOUREK, Petr; NOVÁK, Jiří. Přenos informace. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2004. 241 s. ISBN 8001028925.
- [4] TOŠOVSKÝ, Petr. Tester pro sériový digitální spoj. [s.l.], 2007. 72 s. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Kolouch, CSc.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna : verze 2.1.3 [online]. [s.l.] : VŠB TU Ostrava FEI, 2006 [cit. 2011-02-01]. Dostupné z WWW: [<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>].
- [6] LÁSKO, Jan. *PROBLEMATIKA PŘENOSU OPTICKÉHO PAPERU OPTICKÝM VLÁKNEM* [online]. [s.l.], 2010. 65 s. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. JAN ŠPORIK. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30109>.
- [7] FOJTÍK, Jan. *Studie využití optického přenosu v průmyslu komerční bezpečnosti* [online]. [s.l.], 2009. 57 s. Bakalářská práce. UTB FAI Zlín. Vedoucí práce Ing. Ján Ivanka. Dostupné z WWW: <http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/10951/fojt%c3%adk_2009_bp.pdf?sequence=1>.
- [8] *Pctuning.tyden.cz* [online]. 22.1.2008 [cit. 2011-04-20]. Technologie přenosu dat přes optická vlákna. Dostupné z WWW: <<http://pctuning.tyden.cz/component/content/article/9994?start=3>>.
- [9] LUCKI, Michal. Comtel.cz [online]. 2009 [cit. 2011-03-16]. Mikrostrukturní vlákna a speciální optická vlákna s kvantovou strukturou. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=4870>.
- [10] *Colourtherapyhealing.com* [online]. c2010 [cit. 2011-04-25]. The Electromagnetic Spectrum. Dostupné z WWW: <http://www.colourtherapyhealing.com/colour/electromagnetic_spectrum.php>.

- [11] BOHÁČ, Leoš. Comtel.cz [online]. 2009 [cit. 2011-03-16]. Optické komunikační systémy – 8. přednáška. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=4911>.
- [12] PRAVDA, Ivan. Comtel.cz [online]. 2009 [cit. 2011-03-16]. Optické přenosové prostředky a systémy WDM. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2198>.
- [13] HRAD, Jaromír. Comtel.cz [online]. 2010 [cit. 2011-03-16]. Přenosové cesty. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=5366>.
- [14] BOHÁČ, Leoš. Comtel.cz [online]. 2009 [cit. 2011-03-16]. Optické komunikační systémy - Disperze vláken a její kompenzace. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=4976>.
- [15] *Home.agilent.com* [online]. 2006 [cit. 2011-04-26]. How do I measure Bit Error Rate (BER) to a given confidence level on N490xA/B Serial BERTs?. Dostupné z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=CZ&lc=eng&ckey=1481106&nid=-536902255.0.00&id=1481106>>.
- [16] MÜLLER, Marcus; STEPHENS, Ransom; MCHUGH, Russ. Cp.literature.agilent.comcp.literature.agilent.com [online]. 2007 [cit. 2011-04-13]. Total Jitter Measurement at Low Probability Levels, Using Optimized BERT Scan Method. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-2933EN.pdf>>.
- [17] Thorlabs [online]. c1999-2011 [cit. 2011-05-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/>>.
- [18] KUBÍČEK, Michal; KOLKA, Zdeněk. Radioeng.cz [online]. 2010 [cit. 2011-05-03]. Blind Oversampling Data Recovery with Low Hardware Complexity. Dostupné z WWW: <http://www.radioeng.cz/fulltexts/2010/10_01_074_078.pdf>.
- [19] Wifishop [online]. c2011 [cit. 2011-05-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.wifi-shop.cz>>.
- [20] IPMEDIA : Distributor síťových technologií [online]. c2011 [cit. 2011-05-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.ipmedia.cz/>>.

- [21] A S M spol. s r.o. : DODAVATEL PRO DATOVÉ A TELEKOMUNIKAČNÍ SÍTĚ [online]. c2003-2008 [cit. 2011-05-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.asm.cz>>.
- [22] INTRIPLE : WIMAX-OBCHOD.CZ [online]. c2010 [cit. 2011-05-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.wimaxobchod.cz/>>.
- [23] Notebooky, počítače, LCD televize, netbooky od ab-com.cz [online]. c2011 [cit. 2011-05-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.ab-com.cz>>.
- [24] TRÁVNÍČEK, PAVEL. PMD – POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE A VLIV NA PŘENOS [online]. [s.l.], 2009. 73 s. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc. Dostupné z WWW: <www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15340>.
- [25] WINKLER, ALEŠ. VLIV OPTICKÝCH SPOJU NA ÚTLUM OPTICKÉ TRASY [online]. [s.l.], 2009. 53 s. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc. Dostupné z WWW: <www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18304>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

APD	Lavinová fotodioda, Avalanche Photo Diode
BER	Chybovost bitů přenášených komunikační sítí, Bit Error Rate
CDR	Blok obnovy časování dat, Clock Data Recovery
CWDM	Hrubé vlnové sdružování, Course Wavelength Division Multiplexing
DCM	Jednotka pro úpravu hodinového signálu, Digital Clock Manager
DSF	Vlákno s posunutou disperzí, Dispersion Shifted Fiber
DWDM	Husté vlnové sdružování, Dense Wavelength Division Multiplexing
ETDM	Elektrická multiplexace v časové oblasti, Electric Time Division Multiplexing
FPGA	Druh programovatelných logických obvodů, Field-Programmable Gate Array
GI	Gradientní průběh indexu lomu, Gradient Index
HCPCF	Mikrostrukturní vlákno s dutým jádrem, Hollow Core Photonic Crystal Fiber
IGPCF	Mikrostrukturní vlákno s pevným jádrem, Index Guiding Photonic Crystal Fiber
ISI	Mezisymbolová interference, Inter Symbol Interference
ITU-T	Mezinárodní standardizační odbor pro telekomunikaci, International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization
LASER	Zesílení světla pomocí stimulované emise záření, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Elektroluminiscenční dioda, Electroluminescent diode
LFSR	Posuvný registr se zpětnou vazbou, Linear Feedback Shift Register
MM	Mnohovidové vlákno, Multi Mode
MM-GI	Mnohovidové vlákno s gradientním průběhem indexu lomu, Multi Mode Gradient Index
MM-SI	Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, Multi Mode Step Index
NA	Numerická apertura, Numerical Aperture

NDSF	Konvenční vlákno, Non Dispersion Shifted Fiber
NZ-DSF	Vlákno s nenulovou posunutou disperzí, Non Zero Dispersion Shifted Fiber
OCDM	Optická kódová multiplexace, Optical Code Division Multiplexing
OTDM	Optický princip časové multiplexace, Optical Time Division Multiplexing
PBG	Optický zakázaný pás, Photonic Band Gap
PC	Počítač pro osobní použití, Personal Computer
PCF	Mikrostrukturní vlákno, Photonic Crystal Fiber
PM	Polarizované vlákno, Polarization Maintaining
PRBS	Deterministicky popsatelná posloupnost přibližující se svým průběhem k posloupnosti náhodné, Pseudo-Random Binary Sequence
SI	Skoková změna indexu lomu, Step Index
SM	Jednovidové vlákno, Single Mode
WDM	Vlnové sdružování kanálů, Wavelength Division Multiplexing
XNOR	Logická funkce dvou proměnných vyjadřující jejich schodu, Negative of the exclusive OR

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Elektromagnetické spektrum [10]	13
Obr. 2 Zákon odrazu a lomu [12]	14
Obr. 3 Jev úplného odrazu [12]	15
Obr. 4 Průmět paprsků do roviny kolmé (x-y) na směr šíření v ose z [11]	15
Obr. 5 Navázání paprsků do vlákna v jedné meridionální rovině [1].....	16
Obr. 6 Trajektorie šroubovicového paprsku [1].....	18
Obr. 7 SM vlákno [13].....	21
Obr. 8 MM-SI vlákno [13].....	23
Obr. 9 MM-GI vlákno [13]	23
Obr. 10 Geometrie PCF vlákna [9].....	25
Obr. 11 Princip WDM	27
Obr. 12 Mezisymbolová interference [14].....	31
Obr. 13 Polarizační disperze [6]	32
Obr. 14 Příklad svářečky optických vláken	34
Obr. 15 Příklad univerzální mechanické spojky	34
Obr. 16 Příklad optické spojky SC/SC	35
Obr. 17 Optické konektory [8].....	35
Obr. 18 Útlum AFS50/125Y [17]	43
Obr. 19 Útlum GIF50C [17]	44
Obr. 20 Vzhled ovládacího programu Terminal v1.9b.....	58
Obr. 21 Vzhled okna pro nastavení přenosové rychlosti	61
Obr. 22 Nekorektně zastrčený konektor	64
Obr. 23 N_{ERR} - Nekorektně zastrčený konektor (124,416MHz).....	65
Obr. 24 BER - Nekorektně zastrčený konektor (124,416MHz)	66
Obr. 25 Rozložení chyb - měření č.7 dle tab.10 (124,416MHz)	66
Obr. 26 Optický kabel s ohybem 10x průměr 7,5cm.....	67
Obr. 27 Optický kabel s ohybem 10x průměr 4,5cm.....	68
Obr. 28 Optický kabel s ohybem 10x průměr 1,5cm.....	69
Obr. 29 Optické vlákno s ohybem 1x průměr 3,1mm	70
Obr. 30 Optické vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm	71
Obr. 31 N_{ERR} - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm (124,416MHz).....	72
Obr. 32 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm (124,416MHz)	72

Obr. 33 Rozložení chyb - Vláknó s ohybem 2x průměr 3,1mm 124,416MHz (M07)	73
Obr. 34 Optické vlákno s ohybem 1x průměr 2,3mm	73
Obr. 35 Optické vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm	75
Obr. 36 N_{ERR} - Vláknó s ohybem 2x průměr 2,3mm (124,416MHz).....	76
Obr. 37 BER - Vláknó s ohybem 2x průměr 2,3mm (124,416MHz)	76
Obr. 38 Rozložení chyb - Vláknó s ohybem 2x průměr 2,3mm 124,416MHz (M07)	77
Obr. 39 Průměrná BER u měření s výskytem chyb	78
Obr. 40 Průměrný počet N_{ERR} u měření s výskytem chyb.....	79

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti SM a MM vláken.....	24
Tab. 2 Rozsah nově definovaných optických pásem.....	28
Tab. 3 Porovnání parametrů a cen optických vláken.....	46
Tab. 4 Porovnání parametrů a cen optických konvertorů.....	48
Tab. 5 Porovnání parametrů a cen optických svářeček.....	49
Tab. 6 Nutná doba měření pro $CL = 0,95$	62
Tab. 7 BER - Kabel bez ohybu (124,416MHz).....	63
Tab. 8 BER - Nekorektně zastrčený konektor (124,416MHz).....	65
Tab. 9 BER - Kabel s ohybem 10x průměr 7,5cm (124,416MHz).....	67
Tab. 10 BER - Kabel s ohybem 10x průměr 4,5cm (124,416MHz).....	68
Tab. 11 BER - Kabel s ohybem 10x průměr 1,5cm (124,416MHz).....	69
Tab. 12 BER - Vlákno s ohybem 1x průměr 3,1mm (124,416MHz).....	70
Tab. 13 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 3,1mm (124,416MHz).....	71
Tab. 14 BER - Vlákno s ohybem 1x průměr 2,3mm (124,416MHz).....	74
Tab. 15 BER - Vlákno s ohybem 2x průměr 2,3mm (124,416MHz).....	75
Tab. 16 Srovnání měření s výskytem chyb.....	78

SEZNAM PŘÍLOH

Na přiloženém CD lze nalézt následující přílohy. Součástí jsou i Excel soubory s případnými příslušnými grafy.

- PI Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického kabelu bez ohybu.
- PII Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického kabelu s deseti závity o průměru $\approx 7,5\text{cm}$.
- PIII Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického kabelu s deseti závity o průměru $\approx 4,5\text{cm}$.
- PIV Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického kabelu s deseti závity o průměru $\approx 1,5\text{cm}$.
- PV Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického vlákna s jedním závitem o průměru $\approx 3,1\text{mm}$.
- PVI Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického vlákna s jedním závitem o průměru $\approx 2,3\text{mm}$.
- PVII Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického vlákna s dvojitým závitem o průměru $\approx 3,1\text{mm}$.
- PVIII Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického vlákna s dvojitým závitem o průměru $\approx 2,3\text{mm}$.
- PIX Data získaná z testeru pro měření chybovosti optického kabelu s nekorektně zastrčeným konektorem.
- PX Ovládací program pro PC