

VLOŽIT TITULNÍ LIST

VLOŽIT ORIGINAL ZADÁNÍ

(při odevzdávání více kusů závěrečné práce, obsahuje originál zadání jen jedna z nich, ostatní obsahují pouze jeho okopírovanou kopii)

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou vícekanálových bezkabelových spojů s vyšším dosahem určeným pro komunikaci ve volném atmosférickém prostředí. Je proveden rozbor šíření optického svazku atmosférickým prostředím a popsány různé vlivy, které působí na kvalitu přenášeného signálu.

V práci je provedena simulace duálního optického spoje, kterou jsou zjištěny energetické bilance optických zdrojů pracujících na vlnových délkách v atmosférických oknech v oblasti 850 a 1550nm. Je také zkoumáno rozložení optické intenzity ve vysílací části.

Na závěr práce jsou provedeny měření, která ověřují správnost simulací a také použitých komponent bezdrátového spoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Duální optický bezkabelový spoj, rozložení optické intenzity, Optiwave.

ABSTRACT

This thesis deals with multi-channel wireless links with a higher range designated for free-space communications in an atmospheric media. Propagation of the optical beam in an atmosphere is analysed and various influences affecting the quality of the transmitted signal are described.

The simulation is carried out for dual optical link. Link budget of individual paths working at the wavelengths in the atmospheric windows – 850 nm and 1550nm. It also examined optical intensity distribution of the transmitted beam.

At the end of the work performed measurements and simulations verify the accuracy of the components used in wireless link.

KEYWORDS

Dual optical wireless link, distribution of optical intensity, Optiwave.

PAVLŮ, M. *Modelování vícekanálového optického bezkabelového spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Juraj Poliak.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Modelování vícekanálového optického bezkabelového spoje* samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
1. Úvod	11
2. Optický bezkabelový spoj	12
2.1. Princip činnosti FSO	12
2.2. Výkonová bilance spoje	13
2.3. Útlum svazku způsobený průchodem atmosférou	14
2.3.1. Extinkce optické intenzity čisté atmosféry	15
2.3.2. Fluktuace optické intenzity – turbulence atmosféry	15
2.3.3. Útlumy způsobené aerosoly, deštěm a sněhem	16
2.4. Statistický model	17
3. Lasery	20
3.1. Princip	20
3.1.1. Vlastnosti laserového svazku	21
3.2. Základní dělení laserů	21
3.3. Vznik a popis modů	22
3.4. Koherence	23
3.4.1. Časová koherence	24
3.4.2. Prostorová koherence	24
3.4.3. Koherentní vlastnosti laseru	25
4. Gaussův svazek	26
4.1. Parametry Gaussova svazku	28
4.1.1. Intenzita	28
4.1.2. Výkon	28
4.1.3. Poloměr svazku	29
4.1.4. Divergence svazku	29
4.1.5. Ohnisková hloubka	29
4.1.6. Fáze	29
4.1.7. Vlnoplochy	30
5. Optická vlákna	31
5.1. Typy optických vláken	32

5.1.1.	Mnohomodová optická vlákna (MM).....	33
5.1.2.	Jednomodová optická vlákna (SM)	34
5.1.3.	Plastová optická vlákna (POF)	35
5.2.	Mody v optických vláknech	35
5.3.	Ztráty v optických vláknech	37
5.3.1.	Útlum optických vláken	37
5.3.2.	Disperze optických vláken	38
5.4.	Navázání výkonu mezi vlákny	39
5.4.1.	Trvalé spojení.....	39
5.4.2.	Rozebíratelné spojení	39
5.5.	Konektory.....	40
5.5.1.	Ferule.....	40
5.5.2.	Druhy konektorů.....	41
5.6.	Optické izolátory	41
5.7.	Měření optických vláken.....	42
5.7.1.	OTDR	42
6.	Popis spoje	44
6.1.	Optické zdroje	44
6.2.	Návrh spoje	44
7.	Simulace	47
7.1.	Optisystem	47
7.2.	Základní popis práce s Optiwave	48
7.3.	Simulace energetické bilance v jedné optické větvi (850nm)	50
7.4.	Simulace energetické bilance v obou optických větvích.....	55
7.5.	Zhodnocení simulace a výsledků	58
8.	Experiment	59
8.1.	Experiment v optické větvi 850nm	61
8.1.1.	Rozložení modů (850nm)	61
8.2.	Experiment s kompletním duálním optickým spojem.....	65
9.	Závěr	66
	Literatura	67
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Blokové schéma OBS [6].	12
Obr. 2.2: Grafické znázornění dělení FSO.	12
Obr. 2.3: FSO založené na rozptylu světla v atmosféře [6].	13
Obr. 2.4: Diagram energetické bilance optického spoje [6].	13
Obr. 2.5: Atmosférická okna (ilustrativní obrázek - závisí na složení atmosféry v konkrétním místě, relativní propustnost je uvedena pro šest modelů atmosféry a meteorologickou viditelnost 23 km [6].	15
Obr. 2.6: Závislost útlumu způsobeného vlivem turbulencí na míře turbulencí	16
Obr. 2.7: Znázornění charakteru přijímaného výkonu na spoji s úniky [10].	18
Obr. 2.8: Teoretický tvar hustoty pravděpodobnosti pdf_a (kde M je výkonová rezerva spoje a δ je rezerva spoje směrem k saturaci přijímače) [10].	19
Obr. 2.9: Změřený histogram rozložení útlumů [10].	19
Obr. 3.1: Základní schéma laseru.	20
Obr. 3.2: Princip stimulované emise	20
Obr. 3.3: Princip laseru	21
Obr. 3.4: Funkce tvaru rezonanční čáry optického rezonátoru Fabryova-Perotova typ [17].	22
Obr. 3.5: Plošné rozložení intenzity elektrického pole na zrcadlech s pravoúhlou a kruhovou symetrií (šipky reprezentují vektor intenzity elektrického pole).	23
Obr. 3.6: Princip koherence [5].	23
Obr. 3.7: Časová koherence [5].	24
Obr. 3.8: Prostorová koherence (r je poloměr koherence) [5].	25
Obr. 4.1: Profil Gaussova svazku (I_0 - intenzita záření v ose svazku; Σ - vlnoplocha;	27
Obr. 4.2: Normovaná intenzita svazku v závislosti na p	28
Obr. 4.3: Závislost poloměru svazku W_0 na axiální vzdálenosti z .	29
Obr. 4.4: Fázové zpoždění	30
Obr. 4.5: Poloměr zakřivení vlnoploch Gassova svazku.	30
Obr. 5.1: Optické vlákno s primární a sekundární ochranou.	31
Obr. 5.2: Šíření světla v optickém vláknu typu SI.	31
Obr. 5.3: Průřezy optickými vlákny [16].	33
Obr. 5.4: Šíření paprsků v mnohamodovém vlákně [16].	33
Obr. 5.5: Šíření signálu gradientním vláknem [16].	34
Obr. 5.6: Šíření paprsků v jednomodovém vláknem [16].	34
Obr. 5.7: Struktura příčného pole elektrické intenzity (základní vidy).	35
Obr. 5.8: Skupinové zpoždění jednotlivých modů stepindexového vlákna	36

Obr. 5.9: Závislost měrného útlumu a disperze na vlnové délce [16].....	38
Obr. 5.10: Optické konektory – SC, LC,FC, ST [31].	40
Obr. 5.11: Základní části okonektorovaného optického vlákna [31].	40
Obr. 5.12: Zabroušení ferulí NPC, PC, APC [31].....	41
Obr. 5.13: Optický izolátor založený na Faradayově jevu [1].	42
Obr. 5.14: Obecné schéma OTDR.	42
Obr. 5.15: Ukázka výstupu OTDR na měřené trase 1km.....	43
Obr. 6.1: Propustnost 1 km čisté atmosféry se zvýrazněním vlnových délek komerčně vyráběných.....	44
Obr. 6.1: Blokové schéma duálního optického spoje.....	45
Obr. 6.2: Blokové schéma duálního optického spoje rozšířené optické prvky v trase.	46
Obr. 7.1: Výstupy simulace realizované v Optiwave [33].	47
Obr. 7.2: Uživatelské prostředí programu Optiwave.	48
Obr. 7.3: Uživatelské prostředí programu Optiwave.	49
Obr. 7.4: Okno zobrazující průběh simulace.....	49
Obr. 7.5: Okno zobrazující průběh simulace.....	50
Obr. 7.6: LD LP852-SF30 [30].....	51
Obr. 7.7: WDM 980/1550nm [30]..	52
Obr. 7.8: Blokové zapojení větve s 850nm.	53
Obr. 7.9: Zapojení v programu Optiwave větve s 850nm.	54
Obr. 7.10: Hodnoty výkonu na jednotlivých prvcích zapojení větve s 850nm.	54
Obr. 7.11: Modové rozložení větve s 850nm.	55
Obr. 7.13: Fabry-Perotův laser (1550nm) [30].	55
Obr. 7.14: Parametry Fabry-Perotova laseru [30].	56
Obr. 7.15: Parametry optického izolátoru ve větvi 1550nm [30].....	56
Obr. 7.16: Blokové zapojení duálního optického spoje.	57
Obr. 7.19: Zapojení duálního optického spoje v programu Optiwave.	57
Obr. 7.18: Hodnoty výkonu na jednotlivých prvcích zapojení větve s 1550nm.	58
Obr. 8.1: Duální optický bezkabelový spoj.....	59
Obr. 8.2: Teplotní a proudový kontroler THORLABS	60
Obr. 8.3: Držák LD s chladičem THORLABS LM14S2.	60
Obr. 8.4: Blokové schéma reálného zapojení duálního spoje v jedné větvi (850nm).	61
Obr. 8.5: Měření optické intenzity LD 850nm.....	62
Obr. 8.6: Měření optické intenzity LD 850nm - zesílení.	63
Obr. 8.7: POF optické vlákno v trase duálního optického spoje.....	63
Obr. 8.8: Modové rozložení v POF (t=0s).	64
Obr. 8.9: Modové rozložení v POF (t=5s).	64
Obr. 8.6: Blokové schéma kompletního duálního spoje v jedné větvi.	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Hodnoty parametru q [6].	17
Tab. 3.1: Koherentní délka vzhledem k typu laseru.....	25
Tab. 5.1: Tabulka typických hodnot NA jednotlivých typů optických vláken.....	32
Tab. 7.1 Parametry LD pro vlnovou délku 850nm [30].	51
Tab. 7.2: Parametry optického izolátoru pro vlnovou délku 850nm [32].	52

1. ÚVOD

Počet zařízení, které využívají bezdrátovou komunikaci, se stále zvyšuje. Se vzrůstajícími nároky na rychlost a bezpečnost přenosu dochází k zahlcení rádiových frekvencí a hledají se proto alternativní řešení. Velmi perspektivním se jeví využívání optických bezkabelových spojů (Free Space Optics, FSO), a to nejen pro krátké vzdálenosti (v řádu stovek metrů až jednotek kilometrů), ale také na vzdálenosti řádově nízkých desítek kilometrů.

FSO se především dělí podle jejich dosahu a přenosové rychlosti. Pro krátké a střední vzdálenosti se v současnosti běžně používají přenosové rychlosti 125 Mbit/s Fast Ethernet a 155 Mbit/s dané standardem STM-1, ale objevují se i návrhy spojů s rychlostmi 622 Mbit/s, 1 Gbit/s i více. Pro velké vzdálenosti jsou typické nižší přenosové rychlosti řádově (1-10 Mbit/s). Jako každé zařízení i OBS přináší jisté výhody a nevýhody.

Hlavní výhody OBS oproti rádiovým spojům jsou:

- použití v bezlicenčním pásmu
- rychlá instalace spoje umožňuje využití při krátkodobém požadavku vysokorychlostního datového připojení. (např. sportovní a jiné přenosy z mimoměstských lokalit)
- velké přenosové rychlosti od 1 Mbit/s až 2,5 Gbit/s (někde i 10 Gbit/s)
- vysoká bezpečnost přenášených dat, díky úzkému svazku paprsků lze jen obtížně odposlouchávat (a to pouze v cestě spoje, což je rozpoznatelné). Proto je FSO vhodný pro použití i v oblastech kde je požadováno maximální zabezpečení (bankovníctví, vojenství, atd.)
- pracuje v oblasti neviditelného IR záření, nositelem signálu jsou fotony, které se navzájem neovlivňují, tudíž signál není rušen EMI.
- úplné galvanické oddělení vstupu od výstupu

Hlavní nevýhody optických spojů velkého dosahu jsou:

- vyžaduje přímou viditelnost vysílače a přijímače. Občasné přerušení paprsku, např. prolétajícím ptákem, lze vyřešit vhodným kódováním např.: ARQ které si vyžádá opětovné zaslání ztracených dat
- dostupnost spoje je závislá na stavu počasí (to lze zlepšit použitím hybridního spoje nebo dostatečnou výkonovou rezervou)
- omezený dosah spoje (zatím několik km) → vývoj technologie jde ale kupředu a lze pozorovat i spoje na vzdálenosti několika desítek kilometrů, toho lze také dosáhnout kaskádním řazením skoků spoje [11]

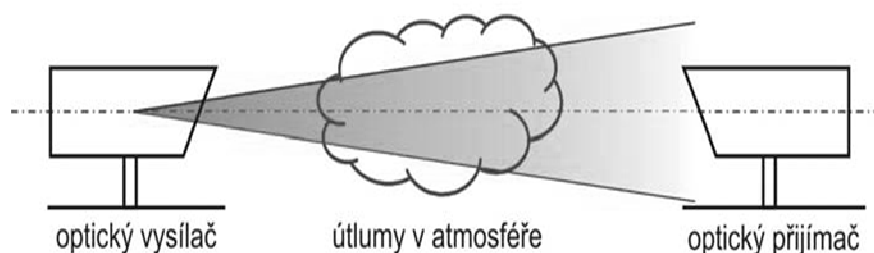
Přenosovým prostředím pro optický svazek přenášející informaci je nejnižší vrstva atmosféry (troposféra), v níž se rušení spoje projevuje nejvíce.

2. OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

Pod názvem optický bezkabelový spoj (FSO) je možné si představit plně duplexní digitální spoj, umožňující širokopásmové komunikační přenosy atmosférou za pomoci elektromagnetického vlnění o vlnové délce, které nejsme schopni vnímat pouhým okem. Vedle datových spojů lze tyto spoje s výhodou použít i pro přenos hlasu či obrazu, což lze využít při jednosměrném analogovém nebo digitálnímu přenosu multimediálních signálů. Je možné konstatovat, že tato technologie v sobě skrývá přenosovou kapacitu optických sítí a jednoduchost s rychlostí instalace bezdrátových spojů.

2.1. Princip činnosti FSO

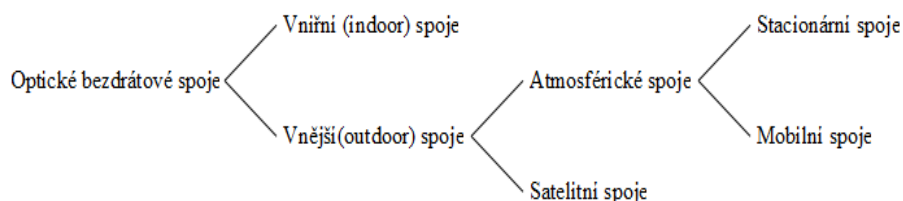
FSO se nejčastěji skládá z modulovaného zdroje záření, optického přenosového prostředí (tzv. kanálu) a přijímacího zařízení, blokové schéma takového zapojení je znázorněno na (obr. 2.1). Pro přenos signálu se používá úzký světelný paprsek (s úhlem rozevření v řádu miliradiánů) – tzv. optický svazek, který se šíří volnou atmosférou.



Obr. 2.1: Blokové schéma OBS [6].

Optický signál je prostřednictvím vysílací přenosové optické soustavy vyslán do volné atmosféry. Na přijímací straně dochází k detekci světelného paprsku, kde se libovolně zesílí a převede se na signál elektrický. Komunikace v obou směrech probíhá identicky a přijímač i vysílač běžně sdílejí jedno zařízení. Pro přenos volnou atmosférou se používají následující vlnové délky: v infračerveném spektru vlnové délky kolem 1550 nm a dále vlnové délky v oblasti 780–850 nm.

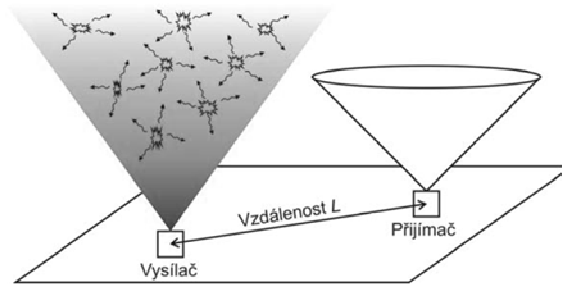
FSO nabízí kapacitu srovnatelnou s optickým kabelem na vzdálenost v řádu kilometrů (na trhu se nabízejí produkty s propustností typicky od 155 Mbit/s až po 10 Gbit/s). Déle je to vysoká bezpečnost a navíc jednoduchá a rychlá instalace. Protože u FSO se předpokládá přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem, nesmí být v ose jejich přímého vzdušného spojení žádná statická překážka. Dosah signálu je omezen na několik kilometrů (od desítek metrů do typicky 4 km až po maximálně 5–7 km). Konkrétní maximální délka spoje závisí na klimatických podmínkách a samozřejmě také na výstupním výkonu laserového systému.



Obr. 2.2: Grafické znázornění dělení FSO.

Pro atmosférické optické spoje se vyskytují dva základní principy šíření optického signálu. První princip využívá přímého šíření optického signálu (spoje směrové), jako na Obr. 2.1. Jeden nebo více svazků se šíří přímým směrem. Atmosférické vlivy zde působí jako nežádoucí (rušivé) jevy, jenž způsobují přídatný útlum šířením a zhoršují přenosové vlastnosti optického spoje.

Jako zdroj optického signálu je možné využít tři typy optických zdrojů. Prvním používaným zdrojem se staly LED diody. Nicméně se od těchto zdrojů upustilo, protože se jejich svazek vyznačuje velkou šířkou spektrální čáry a je velmi ovlivněn atmosférou. Naproti tomu svazky s úzkou spektrální čarou, které jsou v současnosti typickými pro optické spoje a které využívají laserové diody. Posledním optickým zdrojem, používaným zejména pro měřicí zařízení a výzkum, jsou pevnolátkové nebo plynové lasery v kombinaci s vnějším modulátorem [5]. Tyto lasery jsou teoreticky a konstrukčně obtížnější, ale jejich výhodou je možnost použití vyšších vlnových délek, méně ovlivňovaných atmosférou. Nevýhodou se však stává obtížnější modulace přenášeným signálem a jejich několikanásobně vyšší cena.



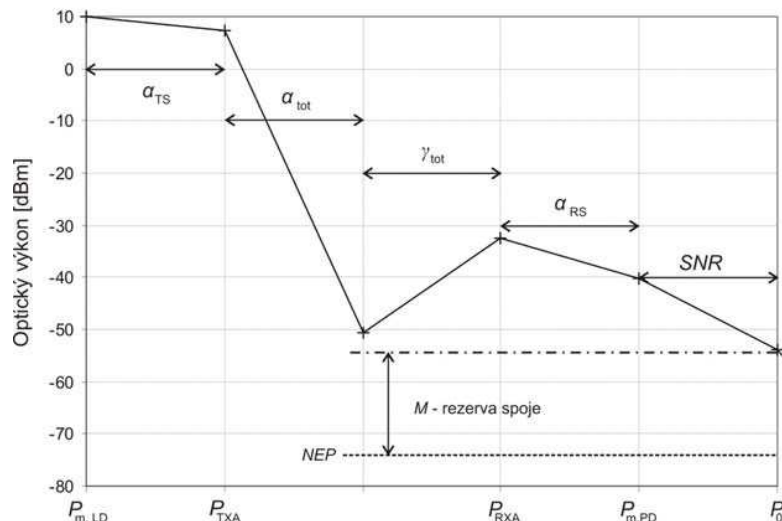
Obr. 2.3: FSO založené na rozptylu světla v atmosféře [6].

Druhým principem komunikace je komunikace založená na rozptylu světla vlivem rozptylu světla v atmosféře (Obr. 2.3). Tohoto principu je využíváno s vlnovými délkami nacházející se v ultrafialové části spektra, které jsou nejvíce ovlivňovány atmosférou.

Jako zdroj UV záření jsou používány UV-LED diody o vlnových délkách od 250 do 280 nm. Tento typ světla je atmosférou značně rozptylován a také tlumen. Následkem toho se v této oblasti spektra méně projevuje rušení okolním a slunečním zářením. Tento způsob komunikace je podrobně popsán v [3].

2.2. Výkonová bilance spoje

Přenos optického bezdrátového spoje je složen ze dvou matematických modelů.



Obr. 2.4: Diagram energetické bilance optického spoje [6].

První je závislý na vysílací (zisk, průměr čočky, výkon, atd.) a přijímací straně (zisk, citlivost) - stacionární model a druhý na okamžitých vlastnostech atmosféry v daném místě spoje, neboli statistický model, který je sestaven z dlouhodobých měření stavu atmosféry v daném místě [12]. Všechny veličiny uváděné ve výkonové bilanční rovnici a digramu jsou brány jako střední hodnoty [9].

Popis diagramu:

$P_{m,LD}$ – střední výkon emitovaný LD, P_{TXA} – střední výkon na výstupu z vysílací hlavičky, P_{RXA} – střední

výkon dopadající na čočku přijímací hlavičky, $P_{m,PD}$ – střední výkon na fotodiodě, P_0 – minimální úroveň výkonu na fotodiodě potřebná pro „bezchybný“ chod spoje, NEP – úroveň vlastního šumu přijímací fotodiody, SNR – požadovaný odstup signál šum odpovídající dané chybovosti spoje BER , α_{TS} – útlum vysílací části, α_{tot} – celkový útlum šířením atmosférickým přenosovým prostředím, γ_{tot} – celkový zisk, α_{RS} – útlum přijímací části.)

Z diagramu uvedeného na Obr. 2.4 a uspořádání spoje vyplývá zápis bilanční rovnice spoje v decibelové míře:

$$P_{m,PD} = P_{m,LD} - \alpha_{TS} - \alpha_{RS} - \alpha_{tot} + \gamma_{RXA},$$

$$\text{kde } \alpha_{tot} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} + \alpha_{al}.$$

Útlum α_{12} je útlum šířením a α_{al} je útlum způsobený nedokonalým zaměřením spoje.

Při návrhu a výpočtu energetické bilance optického bezkabelového spoje je nutné uvažovat všechny útlumy, ke kterým dochází. Pro zjištění jejich hodnot vycházíme z obecné definice útlum α :

$$\alpha = \left| 10 \cdot \log \frac{P_{m,2}}{P_{m,1}} \right|, \quad (2.1)$$

kde výsledný útlum α je dán rozdílem středních hodnot výkonů před $P_{m,1}$ a za daným prvkem $P_{m,2}$. Z této definice můžeme změřit útlumy všech prvků v soustavě, tedy: útlumy čoček, krycích skel, interferenčního filtru i útlum vazeb mezi laserovou diodou a čočkou a fotodiodu a čočkou.

Pokud známe všechny uvedené veličiny, můžeme určit, jaká hodnota výkonu dopadá na přijímací fotodiodu. Pro určení výkonové rezervy spoje pak vycházíme z hodnoty vlastního šumu přijímací fotodiody (NEP). Citlivost přijímače je pak dána výrazem

$$P_0 = NEP + SNR, \quad (2.2)$$

NEP je hodnota závisící na šířce přenášeného pásma B , která je přímo úměrná použité přenosové rychlosti

$$NEP = NEP_1 10 \log B. \quad (2.3)$$

Pro přenosovou rychlost 10Mbit/s je potřebná šířka pásma $B = 10$ MHz a NEP_1 je reálná hodnota úrovně šumu uváděná v katalogovém listu fotodiody.

Výkonová rezerva spoje je důležitým parametrem popisujícím kvalitu navrženého FSO spoje, protože její hodnota udává, o kolik by se mohla zhoršit úroveň přijímaného signálu tak, aby spoj dokázal ještě fungovat s předepsanou chybovostí.

2.3. Útlum svazku způsobený průchodem atmosférou

Popis šíření optického svazku může být obtížným úkolem, a proto je nutné zvolit vhodnou metodu aproximace a specifikovat vlastnosti svazku tak, aby vyhovovala potřebám přesnosti a také zjednodušení výpočtů.

Do průchodu svazku atmosférou zahrnujeme všechny útlumy závisící na délce optického spoje, tedy na vzdálenosti L_{12} udávající vzdálenost mezi vysílací a přijímací hlavicí. Patří sem útlum vlastní atmosféry – α_{atm} a útlum šířením – α_{12} .

Útlum šířením nabývá poměrně vysokých hodnot a jeho hodnota je dána poměrem optických intenzit v ose svazku, tedy přesně v místě přímé spojnice přijímače a vysílače. V praxi je dán především úhlem vyzařovaného svazku a jeho výpočet vychází z tzv. konceptu pomocné délky a z útlumu šířením, udávaným poměrem přijímaného a vysílaného výkonu.

$$\alpha_{geom} = 10 \cdot \log \frac{P_{RXA}}{P_{TXA}} = \alpha_{12} + \gamma_{add} + \gamma_{RXA}, \quad (2.4)$$

Charakteristika atmosférického přenosového prostředí je poměrně složitou a náročnou a proto dochází k používání zjednodušených matematických modelů při jejím popisu. S přihlédnutím ke složení atmosféry a

jevům, které se v ní vyskytují, ji obecně považujeme za nehomogenní a nestacionární a to znamená, že její parametry závisí na konkrétní poloze a čase. Je také nutné si uvědomit, že zmíněné vzájemně souvisí a projevují se zároveň [4].

Mezi hlavní jevy ovlivňující šíření a útlum optického svazku patří:

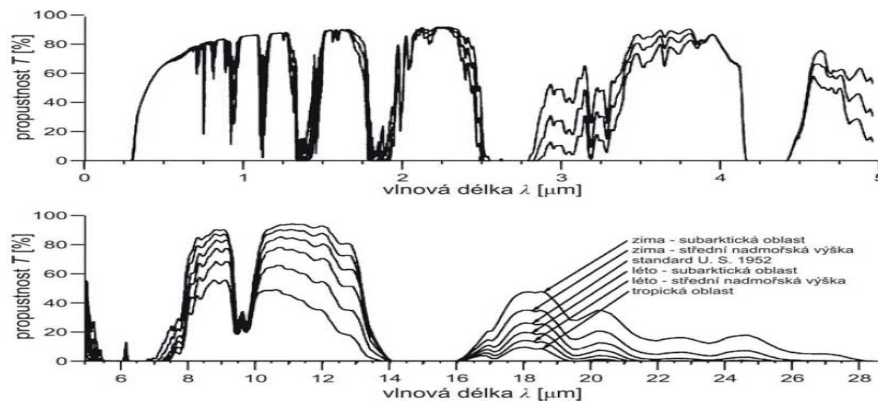
- extinkce optické intenzity vlivem absorpce a rozptylu na molekulách a aerosolech (viz. Obr. 2.5)
- přerušení svazku, například letícím ptákem nebo hmyzem
- fluktuace optické intenzity vlivem deformace tvaru svazku
- fluktuace optické intenzity vlivem působení deště nebo sněhu
- fluktuace optické intenzity vlivem turbulencí – vzdušné víry, vítr, ...

2.3.1. Extinkce optické intenzity čisté atmosféry

Útlum čisté atmosféry vychází z faktu, že atmosféra se skládá atomů a molekul absorbujících některé spektrální složky optického záření. Pro útlum způsobený touto absorpcí můžeme definovat poměr optických intenzit a na základě Bouguerova zákona popsat obecným vztahem

$$T \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) d\lambda \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e^{-\alpha_e(\lambda)L_{12}} d\lambda, \quad (2.5)$$

kde T je spektrálně střední hodnota propustnosti atmosféry, L_{12} je délka trasy a α_e je spektrálně závislý koeficient absorpce atmosféry [8].



Obr. 2.5: Atmosférická okna (ilustrativní obrázek - závisí na složení atmosféry v konkrétním místě, relativní propustnost je uvedena pro šest modelů atmosféry a meteorologickou viditelnost 23 km [6].

Je patrné, že tento popis je v praxi nepoužitelný a proto se vychází z naměřených hodnot spektrální závislosti propustnosti atmosféry. Na Obr. 2.5 je zřejmé, že některé vlnové délky jsou pro komunikaci vhodné a jiné naopak zcela nevhodné. Vhodné vlnové délky se obecně označují jako atmosférická okna, nejpoužívanější jsou v okolí 850nm a 1550nm.

Na základě praktického měření pro útlum čisté a klidné atmosféry předpokládáme zanedbatelnou šířku spektrální čáry a konstantní absorpci atmosféry. Vztah 2.5 se nám pak zjednoduší do tvaru

$$T = e^{-\alpha_e L_{12}}, \quad (2.6)$$

kde koeficient propustnosti T je možné odečíst z Obr. 2.5. Závislost poklesu optické intenzity s rostoucí vzdáleností L_{12} je dána tzv. Bougerovým – Lambertovým – Beerovým zákonem.

2.3.2. Fluktuace optické intenzity – turbulence atmosféry

Pro modelování turbulencí uvažujeme, že atmosféra obsahuje nehomogenní oblasti různých tvarů a velikostí (řádově od milimetrů až po stovky metrů) s různými indexy lomu. Index lomu se mění s polohou v závislosti na teplotě a tlaku. Pro vyhodnocení turbulencí – tedy náhodných procesů se využívá statistických

metod. Veličinou popisující turbulentní atmosféru je strukturální funkce indexu lomu, která je dána vztahem

$$D_n = \left\langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \right\rangle, \quad (2.7)$$

kde D_n je strukturální funkce indexu lomu, n je index lomu v daném bodě (A nebo B) v čase t .

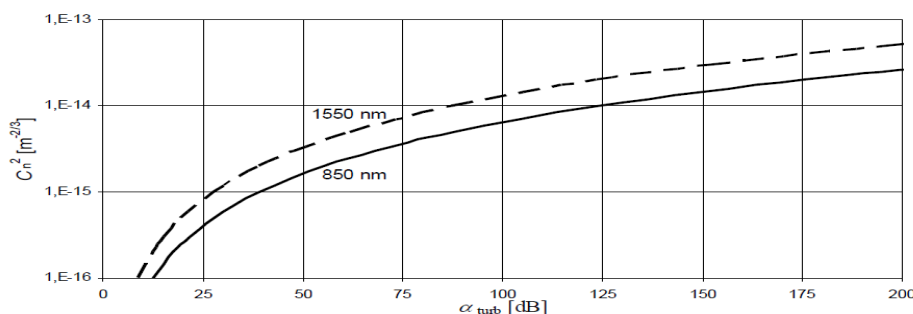
Útlum, odpovídající turbulencím v atmosféře α_{turb} lze za pomoci empirických poznatků vyjádřit jen velmi přibližně na základě modelu slabě turbulentní atmosféry (relativní variance optické intenzity v místě optického přijímače jsou menší než 1).

Pro odhad útlumu vyvolaného pouze turbulencí platí následující přibližný vztah

$$\alpha_{\text{turb}} = \sqrt{1 + K(\sigma_{I,\text{rel}}^2)^{\frac{2}{5}}}, \quad (2.8)$$

$$\sigma_{I,\text{rel}}^2 = KC_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^6 L_{12}^{\frac{11}{6}}, \quad (2.9)$$

kde λ je vlnová délka optické nosné vlny, K je konstanta charakterizující optickou vlnu (1,23 pro rovinnou vlnu a 0,5 pro sférickou vlnu).



Obr. 2.6: Závislost útlumu způsobeného vlivem turbulencí na míře turbulencí a použité vlnové délce (graf uveden pro délku spoje $L_{12} = 30$ km) [6].

Při představě nehomogenity v atmosféře jako koule o rozdílném indexu lomu pak logickým úsudkem můžeme konstatovat, že různé velikosti nehomogenit mají různý vliv na optický svazek. Malé nehomogenity způsobí spíše rozptyl záření, zatímco velké homogenity mohou svazek zcela odklonit.

Vzdušné víry s rozměrem mnohem menším než je průměr optického svazku způsobují lokální fázový posuvu v těchto oblastech a tím dochází k scintilacím a deformaci svazku, který se projevuje tzv. skvrnkovou strukturou. Turbulenci způsobují rychle se měnící změny přijímané optické intenzity (délka trvání řádově jednotky až desítky milisekund) a nejvýrazněji se projevují za jasných dnů působením slunečního záření ohřívajícím zemský povrch [4].

2.3.3. Útlumy způsobené aerosoly, deštěm a sněhem

Přítomnost aerosolů nebo sněžení způsobuje největší útlumy a tím i nejčastější důvod výpadku přijímaného signálu. Pro popis tohoto útlumu vychází taktéž ze vztahu 2.19 a také 2.20. Pro matematické vyjádření útlumu se využívá koeficient extinkce α_e a v praxi používaná veličina udávající meteorologickou viditelnost V_M [14].

Meteorologická viditelnost je z definice vzdálenost, při níž klesne poměr vstupní a výstupní optické intenzity na 5% (tato definice se udává pro vlnovou délku $\lambda = 555$ nm, tedy pro vlnovou délku, na které má lidské oko největší citlivost). Výpočet útlumu dle meteorologické viditelnosti se je vhodný i z důvodu, že tato veličina bývá měřena na mnoha místech světa, například na letištích.

Mezi veličinami V_M a α_e platí vztah:

$$0,05 = e^{\alpha_e V_M}, \quad (2.10)$$

pro koeficient extinkce tedy platí

$$\alpha_e = \frac{3}{V_M}, \quad (2.11)$$

a pro konkrétní vlnovou délku pak může vyjít z empiricky zjištěného vztahu

$$\alpha_e(\lambda) \approx \frac{3}{V_M} \left(\frac{\lambda}{550 \cdot 10^{-9}} \right)^{-q}, \quad (2.12)$$

kde q je parametr rovněž závislý na útlumu a meteorologické viditelnosti a je dán tabulkou Tab. 2.1.

Q		Hodnota viditelnosti	Atmosféra
KIM model	KRUSE model		
1,6	1,6	$V_M > 50$	čistá
1,3	1,3	$6 < V_M < 50$	
$0,16V_M + 0,34$	$0,585V_M^{1/3}$	$1 < V_M < 6$	opar
$V_M - 0,5$		$0,5 < V_M < 1$	střední mlha
0		$V_M < 0,5$	Silná mlha

Tab. 2.1: Hodnoty parametru q [6].

Pro výpočet útlumu potřebujeme koeficient útlumu v decibelové míře odpovídající poklesu optických intenzit dle vztahu

$$\alpha_{\text{čast}} = \left| \frac{1}{L_{12}} 10 \log \frac{I_2}{I_1} \right|, \quad (2.13)$$

Vztah mezi koeficient extinkce α_e [km^{-1}] a $\alpha_{\text{čast}}$ [$\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$] je možné zapsat

$$\alpha_e = 0,23 \alpha_{\text{čast}}. \quad (2.14)$$

Z uvedené tabulky Tab. 2.1 vyplývá, že optický spoj navržený se systémovou rezervou $\Delta M = 15$ dB bude při délce spoje $L_{12} = 30$ km fungovat pouze za předpokladu zcela čisté atmosféry. V případě oparu by bylo nutné, aby rezerva spoje byla vyšší jak 45 dB.

Celkový útlum způsobený průchodem svazku atmosférou α_{atm} je pak dán prostým součtem útlumu vlivem turbulencí a útlumem způsobeným na částicích

$$\alpha_{\text{atm}} = \alpha_{\text{turb}} + \alpha_{\text{čast}}. \quad (2.15)$$

2.4. Statistický model

Přerušení optického svazku se zapříčiněno zcela náhodnými jevy, které mají způsobující úplný výpadek přijímaného signálu, jedná se tedy spíše o statistické zhodnocení stavu přijímaného signálu – tzv. statistický model spoje. Výpadky spoje dělíme v zásadě na krátkodobé a dlouhodobé.

Krátkodobé výpadky mohou být způsobeny například letícím hmyzem nebo ptákem a dalo by se říci, že tyto jevy nejsou většinou podstatné a je jen třeba, tyto výpadky byly rychle rozpoznány a spojení v co nejkratším čase obnoveno.

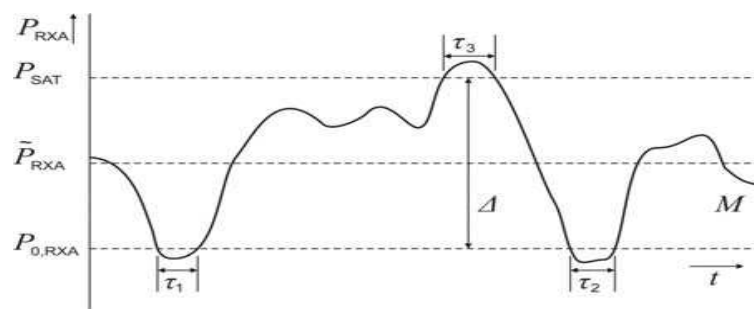
Dlouhodobé výpadky jsou pak většinou způsobeny útlumem atmosféry, nejčastěji mlhou. Zde je již nutné komunikaci přeměřovat na záložní komunikační linku. Jelikož atmosférické jevy působí jinak na optický a rádiový signál, používá se v dnešní době k záložce většinou mikrovlnných spojů.

K ohodnocení spolehlivosti spoje se používá statistický model spoje. Jako hodnotící parametr se určuje hodnota dostupnosti P_{av} respektive hodnota nedostupnosti spoje P_{un} .

$$P_{un} = \frac{T_{un}}{T}$$

$$P_{av} = 1 - P_{un}$$

kde T_{un} je celková doba nedostupnosti spoje, tedy doba během které přijímaný výkon klesl pod prahovou úroveň citlivost přijímače nebo překročí úroveň saturace a T je celková doba měřeného období tedy doby kdy se přijímaný výkon nachází mimo dynamiku spoje Δ .



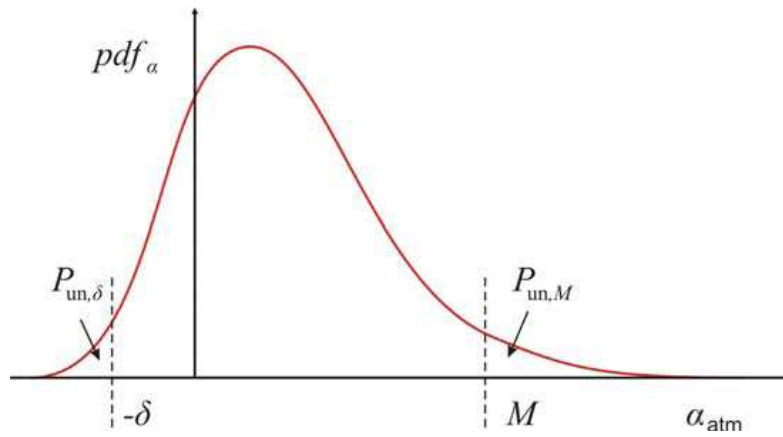
Obr. 2.7: Znárodnění charakteru přijímaného výkonu na spoji s úniky [10].

Celková doba nedostupnosti je pak dle obrázku 2.7 dána:

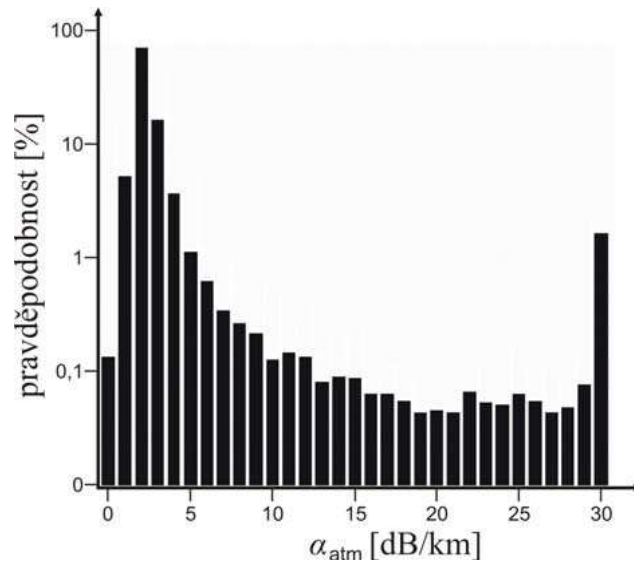
$$T_{un} = \sum_i \tau_i$$

Krátkodobé výpadky spoje přispívají ke zhoršení chybovosti spoje a dlouhodobé k celkové nedostupnosti spoje. Nedostupnost spoje může být deklarována např. dle normy ITU-T G.826, která říká, že se spoj považuje za nedostupný pokud v deseti po sobě jdoucích vteřinách došlo k vysoké chybovosti.

Charakter rozložení hustoty pravděpodobnosti pdf_u náhodného útlumu „ATM“ odpovídá charakteru rozložení hustoty pravděpodobnosti přijímaného výkonu pro krátkodobé i dlouhodobé úniky. Teoretické rozložení těchto úniků je na Obr. 2.8 a změřený histogram náhodných útlumů je na Obr. 2.9.



Obr. 2.8: Teoretický tvar hustoty pravděpodobnosti pdf_α (kde M je výkonová rezerva spoje a δ je rezerva spoje směrem k saturaci přijímače) [10].

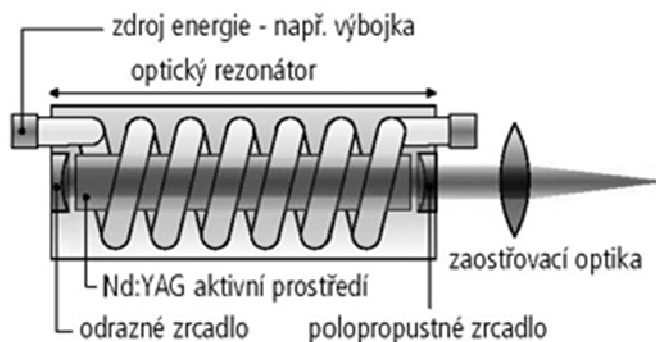


Obr. 2.9: Změřený histogram rozložení útlumů [10].

3. LASERY

Slovo LASER je zkratka pro „zesilování světla stimulovanou emisí záření“ z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laserem se obecně označuje optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření (tedy světlo) pomocí procesu stimulované emise fotonů, který vychází ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky.

Obecné schéma laseru je zobrazeno na Obr. 3.1. Základem laseru je aktivní prostředí, které je jistým způsobem buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením dodáváme do laseru energii, která je potom právě pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. K tomu je zapotřebí ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly.

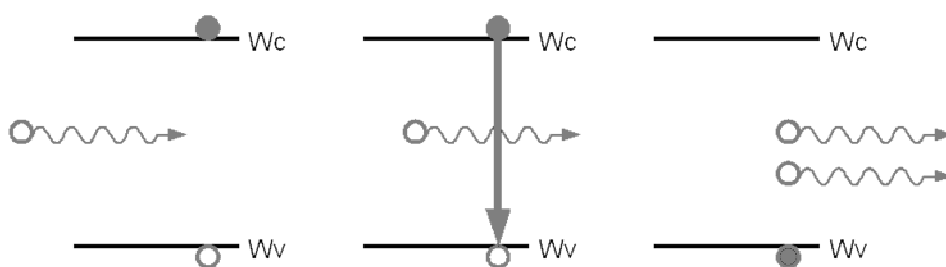


Obr. 3.1: Základní schéma laseru.

3.1. Princip

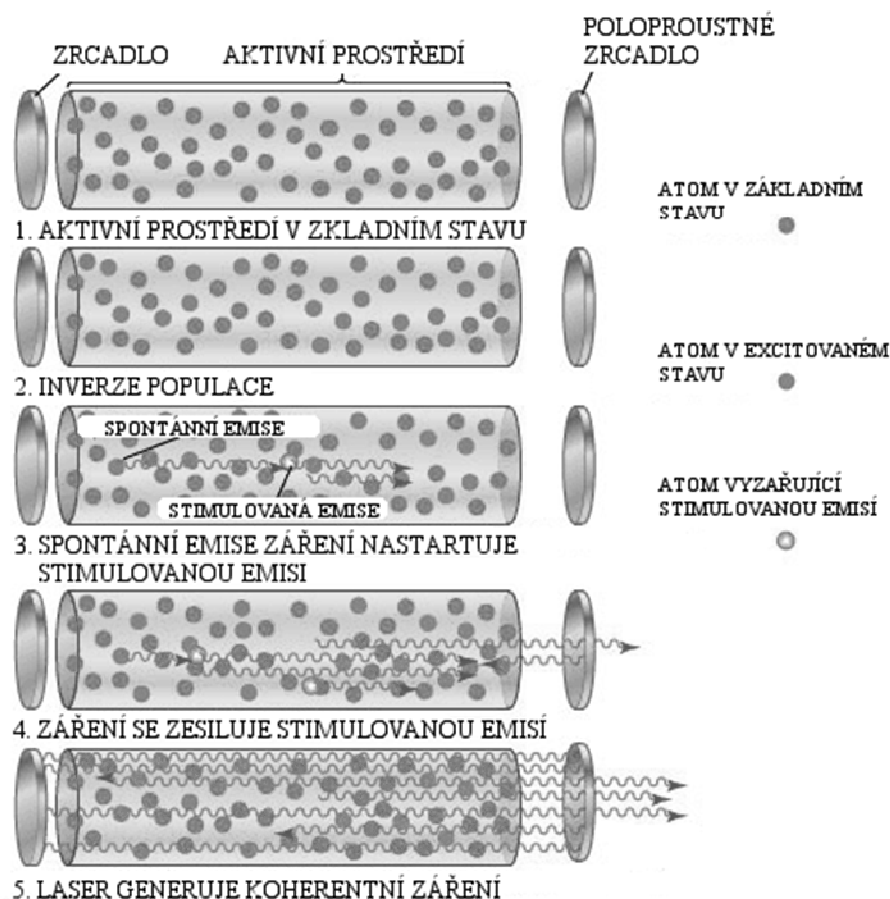
Obecně můžeme říci, že aktivní prostředí vždy obsahuje element, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem je nejčastěji atom, ale nemusí tomu tak být vždy (může to být např. vibrační stav molekuly, chemická vazba apod.). V tuto chvíli je důležité, že při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton (kvantum elektromagnetického záření). Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií – ve stavu termodynamické rovnováhy. Právě díky buzení tento stav porušíme a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina našich elementů ve stavu s vyšší energií (tento stav se nazývá inverze populace).

Teprve v tuto chvíli můžeme energii dodanou aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise, který je zobrazen na obrázku níže. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy nám foton dopadající na excitovaný atom způsobí (stimuluje) jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a při tom dojde k emisi dalšího fotonu (viz. Obr. 3.2).



Obr. 3.2: Princip stimulované emise.

Jak fotony putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet rapidně narůstá a dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů (svazek laseru).



Obr. 3.3: Princip laseru.

3.1.1. Vlastnosti laserového svazku

Důležité je, že při procesu stimulované emise má dopadající a emitovaný foton stejnou energii (frekvenci), stejný směr, polarizaci a fázi. Z toho plynou základní tři vlastnosti laseru, které ho odlišují od jiných zdrojů záření.

Svazek laseru je:

- kolimovaný (tj. nerozsbíhá se)
- monochromatický („jednobarevný“, tj. generované fotony mají stejnou frekvenci resp. vlnovou délku)
- koherentní (generované fotony jsou tzv. ve fázi jak časové tak prostorové)

Nejznámějším opakem laseru je např. klasická žárovka, která generuje záření zcela „chaoticky“ a generuje fotony rozsbíhající se do všech směrů, s různými vlnovými délkami a s náhodnou fází.

Díky těmto vlastnostem se stal laser tak cenným pomocníkem v tolika různých aplikacích. U průmyslových aplikací se využívá zejména možnosti fokusovat svazek laseru do malého bodu a dosáhnout tak vysoké plošné hustoty energie. V jiných aplikacích, jako např. holografie, jsou potřebné hlavně vlastnosti koherence, atd.

3.2. Základní dělení laserů

Lasery lze dělit do skupin dle následujících vlastností:

- **Skupenství aktivního prostředí:** pevná látka, kapalina, plyn, polovodič
- **Vlnová délka:** infračervené, viditelné světlo, ultrafialové, rentgenové
- **Excitace:** optickým zářením, elektrickým polem, chemickou reakcí

- **Počet energetických hladin:** 2, 3 a více
- **Režim práce:** pulzní, kontinuální

3.3. Vznik a popis módů

V případě laserů je součástí rezonátoru aktivní látka, kterou je nutné budít. Požadavkům buzení se plně vyhoví tak, že se z krychle odstraní čtyři „boční“ stěny a ponechají se dvě protilehlé rovnoběžné stěny, jejichž vzdálenost se označí d . Tímto způsobem vznikne uspořádání, kterému se říká otevřený optický rezonátor. Protilehlé stěny rezonátoru jsou zrcadla zabezpečující několikanásobný průchod vlny aktivní látkou (kladná zpětná vazba). K vyvedení optického výkonu z rezonátoru se volí jedno zrcadlo částečně propustné (nejčastěji polopropustné).

Spektrální vlastnosti rezonátoru je možné objasnit teorií Fabryova-Perotova interferometru. Zrcadla rezonátoru mohou být kruhová s poloměru a nebo čtvercová se stranou $2a$. Kromě rovinných zrcadel je možné použít zrcadla s konečnými poloměry křivosti R_1, R_2 .

Při konstrukci otevřeného optického rezonátoru musí být a je splněna nerovnost: $d \gg 2a \gg \lambda$.

Velmi důležité je uvědomit si, že rozměry optického rezonátoru mnohonásobně převyšují vlnovou délku optického záření. Proto dochází k principiální odlišnosti optických a mikrovlnných rezonátorů.

K označení jednotlivých módů se použijí počáteční písmena TEM (transverse electromagnetic) s přidáním indexů m, n, q nebo p, l, q : TEM $_{m,n,q}$; TEM $_{p,l,q}$.

Rozložení pole v takovém rezonátoru je nyní dáno výrazem:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\alpha z} \cos\left(m \frac{\pi x}{2a}\right) \sin\left(m \frac{\pi y}{2a}\right) \sin\left(m \frac{\pi z}{2a}\right). \quad (3.1)$$

a frekvence módů je daná výrazem

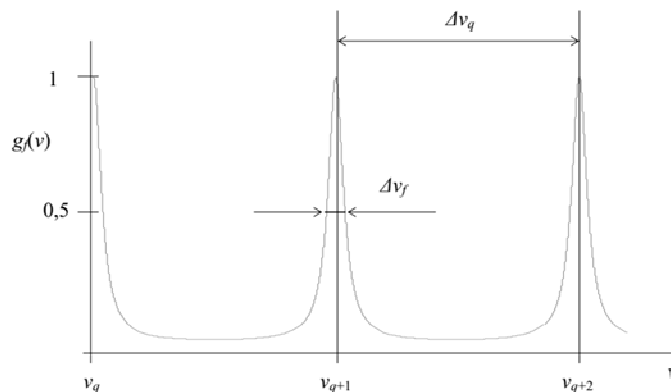
$$\nu_{m,n,q} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2a}\right)^2 + \left(\frac{q}{2a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.2)$$

Pro vlnový vektor k přiřazený libovolné vlně v rezonátoru, platí:

$$\vec{k} = \vec{k}_x + \vec{k}_y + \vec{k}_z. \quad (3.3)$$

Energetické pole v dutině rezonátoru má charakter stojatého vlnění. Vlivem destruktivní a nedestruktivní interference vln, které se odrážejí od stěn, se ustálí elektromagnetické pole tzv. módů (vidů). Módy mohou být tvořeny pouze zářením s takovými vlnovými délkami, že rozměry rezonátoru lze vyjádřit jako celistvý násobek jejich poloviny. Dělí se na podélné, příčné horizontální a příčné vertikální. Podélné módy tvoří základní vlnové spektrum laseru. Příčné módy vymezují vyzářovací charakteristiku laseru a profil emitovaného svazku.

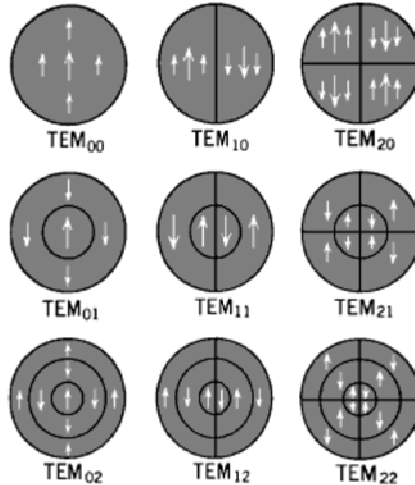
Funkce tvaru rezonanční čáry $g_f(\nu)$ optického rezonátoru pro podélné módy je uvedena na Obr. 3.4. Zatímco podélné módy jsou frekvenčně dobře rozlišitelné, příčné módy mohou splývat a to tím více, čím větší budou ztráty v rezonátoru.



Obr. 3.4: Funkce tvaru rezonanční čáry optického rezonátoru Fabryova-Perotova typ [17].

V případě kruhových zrcadel má pole v rezonátoru charakter Laguerrových-Gaussových svazků. Na zrcadlech rezonátoru vytvářejí tyto svazky určité rozložení intenzity elektrického pole, které je pro vybrané svazky (mody) znázorněno na Obr. 3.5. Modový index q , vztahující se k ose z , není uváděn.

Podobně jako je modový index q roven počtu uzlů stojaté vlny v rezonátoru podél osy z , jsou modové indexy m, n rovny počtu uzlů podél os x, y , což je patrné z obr. 6.5. (V případě kruhových zrcadel se používá válcová soustava souřadnic θ, ϕ, z . Počet uzlů v radiálním směru r je roven p a počet uzlů v azimutálním směru ϕ je roven $2l$.)



Obr. 3.5: Plošné rozložení intenzity elektrického pole na zrcadlech s pravoúhlo a kruhovou symetrií (šipky reprezentují vektor intenzity elektrického pole).

Základní mod je $TEM_{0,0}$, který se nazývá gaussovský, protože intenzita EM pole měřená kolmo k optické ose, má gaussovský průběh.

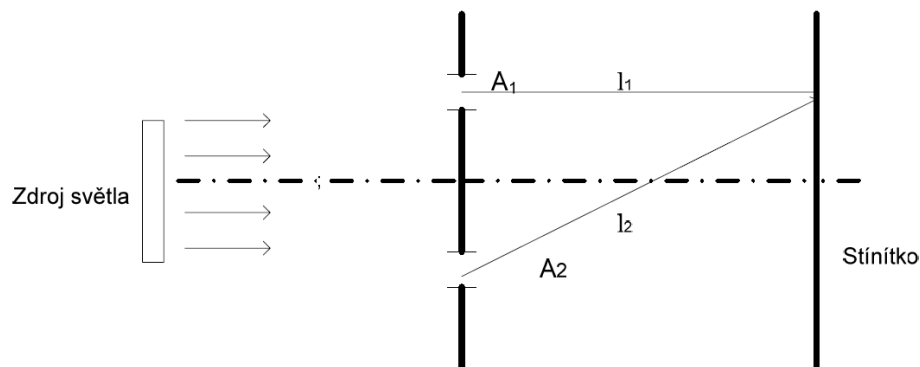
3.4. Koherence

Šíří-li se rovinná, monochromatická optická vlna v homogenním, bezztrátovém prostředí, je v celém prostoru přesně definováno rozložení intenzity a fáze optického pole. Pro objasnění pojmu koherence je využito právě takové vlny, šířící se ve směru osy z (3.6)[4].

$$A(z, t) = A_m \cdot e^{j(\omega t - kz + \varphi)}. \quad (3.4)$$

Pokud máme dvě takové vlny A_1 a A_2 (Obr. 3.6) s amplitudami A_{m1} a A_{m2} , se shodným kmitočtem ω a rozdílnými fázemi φ_1 a φ_2 ($\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$), bude výsledná amplituda vlivem interference těchto dvou vln dána:

$$A^2 = A_1^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos \Delta\varphi + A_2^2. \quad (3.5)$$



Obr. 3.6: Princip koherence [5].

Bude-li se $\Delta\varphi$ měnit náhodně, nevzniknou interferenční minima a maxima, ale budeme pozorovat pouze střední hodnotu amplitudy A , nezávislé na okamžitých fázových poměrech [1].

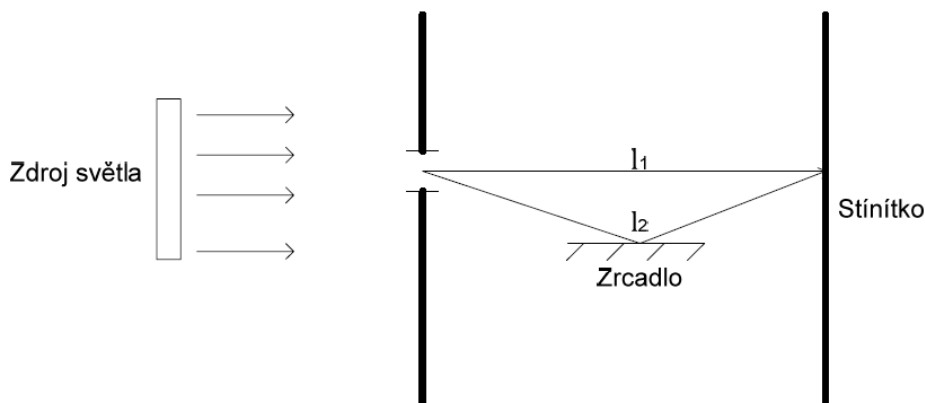
3.4.1. Časová koherence

Je vyjádřena koherentním časem nebo koherentní délkou bodového zdroje světla. Emitované záření je rozděleno na dva stejné svazky (Obr. 3.7), které projdou rozdílnou dráhu, než jsou přivedeny do sledovaného bodu. Je-li rozdíl optických drah větší, než $l_k = c\tau$ bude v místě pozorování docházet k superpozici dvou nezávislých vln. Nedojde k interferenčním jevům, protože jejich fázové rozdíly $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ jsou náhodnou veličinou. Interferenční jevy jsou způsobeny pouze jedinou vlnovou superpozicí. Zdroj bude vykazovat interferenční jevy, pokud bude dráhový rozdíl paprsků:

$$\Delta l = |l_1 - l_2|, \quad (3.6)$$

$$\Delta l \leq l_k = c\tau, \quad (3.7)$$

kde l_k je koherentní délka a τ je koherentní čas.



Obr. 3.7: Časová koherence [5].

Jestliže koherentní čas $\tau \rightarrow$ nekonečno, bude fázový rozdíl vlnění nezávislý na čase a výsledná vlna bude monochromatická [1].

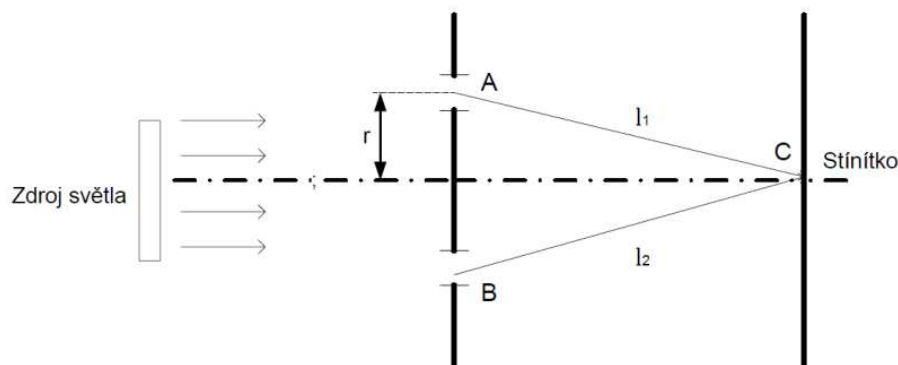
Koherentní délku l_{coh} lze určit pomocí šířky spektrální čáry Δf (2.5)[5]

$$l_{coh} = \frac{c}{\Delta f}, \quad (3.8)$$

kde c je rychlost světla.

3.4.2. Prostorová koherence

Experimentálně bylo zjištěno, že k interferenci dochází pouze v případech, kdy svazky vznikají na dostatečně malých zdrojích. Máme-li dva bodové částečně závislé zdroje – A a B, jejichž dráhy – l_1 a l_2 k bodu C (bod, ve kterém zkoumáme interferenci) jsou stejné, dráhový rozdíl $\Delta l = |l_1 - l_2|$ je roven nule. V takovém případě je k interferenci nutné, aby záření vznikající v bodech vzniku mělo konstantní fázový rozdíl $\Delta\varphi$. Takové zdroje jsou pak prostorově koherentní. Plošný zdroj je prostorově koherentní, pokud všechny dvojice zdrojů mají konstantní rozdíl fáze vlny. Aby došlo k interferenci vzájemně koherentních svazků i mimo oblast s nulovým dráhovým rozdílem záření, je nutné, aby bylo vyhověno i časové podmínce koherence zdroje [1].



Obr. 3.8: Prostorová koherence (r je poloměr koherence) [5].

3.4.3. Koherentní vlastnosti laseru

Záření vystupující z laseru je částečně časově i prostorově koherentní, zachovává ve směru šíření po určitou dobu konstantní fázový rozdíl. Tento stav je dobře viditelný u stopy laseru na stínítku, která je osvětlena na povrchu nerovnoměrně (intenzita osvětlení stínítka se mění bod od bodu), protože dochází k interferencím jednotlivých koherentních paprsků[6].

Koherence laserového svazku bývá vyjádřena pomocí funkce vzájemné koherence $\gamma_{12}(\tau)$ (pro dva svazky z různých zdrojů). Tato veličina je komplexní, její modul leží v intervalu hodnot $\langle 0; 1 \rangle$. Pro plně koherentní záření nabývá $|\gamma_{12}(\tau)| = 1$. Pro případ, že je $|\gamma_{12}(\tau)| = 0$, je záření úplně nekoherentní. V praxi nabývá parametr $|\gamma_{12}(\tau)|$ pro jednododové plynové lasery hodnoty blízké jedné [6].

Je-li svazek rozdělen na dva s různou optickou dráhou, kde rozdíl těchto drah bude Δl a oba svazky budou poté interferovat, zavádí se veličina $\gamma_{11}(\tau)$:

$$\gamma_{11}(\tau) = \frac{\Delta l}{c}, \quad (3.6)$$

Koherence laserového záření je závislá na jeho vidové struktuře, protože při větším počtu modů dojde ke zvětšení spektrální šířky svazku. V Tab. 3.1 jsou uvedeny koherentní délky pro některé lasery.

Laser	Typická koherentní délka [m]
He-Ne jednofrekvenční	1km až 65km
He-Ne vícevidový	0,1 - 0,2
Ar vícevidový	$2 \cdot 10^{-2}$
Nd:YAG	10^{-2}
Nd:sklo	$2 \cdot 10^{-4}$
GaAs	10^{-3}
rubín: pro celý puls	$2 \cdot 10^{-2}$
rubín: pro jednotlivé špičky uvnitř pulsu	30

Tab. 3.1: Koherentní délka vzhledem k typu laseru.

4. GAUSSŮV SVAZEK

Z důvodu vlnové povahy světla není možné, aby byla energie soustředěna pouze do vymezeného prostoru. Nicméně ve velmi hrubém přiblížení je možné uvažovat soustředění energie do velmi úzkého svazku (paprsku). Není ovšem reálné předpokládat, že se paprsek šíří volným prostorem bez úhlové divergence. Úhlovou divergencí nazýváme jev, kdy se paprsek rozbíhá, roste jeho tloušťka (zvětšuje se jeho stopa).

Světlo je emitováno v kvantech energie. Při detekci světla se tato kvanta zaznamenávají. Světlo lze tedy definovat jako elektromagnetické vlnění detekované v energetických kvantech, proto se mluví o dualismu světla.

Za určitých podmínek lze šíření světelné vlny aproximovat šířením tzv. Gaussových svazků. Aproximace světelné vlny Gaussovými svazky je však možná pouze v případě tzv. paraxiálních vln. Paraxiálními vlnami jsou takové vlny, jejichž normály vlnoploch svírají se směrem šíření vlny velmi malý úhel.

Elektromagnetické vlnění vyzařované laserem má v rovině kolmé na směr šíření obvykle Gaussovo rozložení velikosti optické intenzity (v optické ose je intenzita vlny maximální, následně velikost intenzity radiálně klesá v souladu s Gaussovou funkcí).

Světelné vlny se principiálně mohou šířit dvěma způsoby. Prvním případem je rovinná vlna, druhým je sférická vlna. Normály rovinné vlny jsou paralelní k sobě navzájem a k hlavnímu směru šíření. Sférická vlna se šíří z jediného bodu, takže také normály vlnoploch vycházejí pouze z jediného bodu.

Základem vlnové optiky je Helmholtzova rovnice [1], která má několik možných úprav.

Pro vakuum má Helmholtzova rovnice tvar:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A - j2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0, \quad (4.1)$$

kde A značí intenzitu vlnění, z je souřadnice podélné osy (směr šíření vlny) a k je vlnové číslo.

Jedním z možných řešení paraxiální Helmholtzovy rovnice je Gaussov vlnový svazek. Výkon Gaussova svazku je soustředěn na střed úzkého kužele. Rozložení intenzity v příčné rovině je dáno kruhově symetrickou Gaussovou funkcí, která má osu shodnou s osou svazku.

Ve směru šíření má Gaussov svazek minimální šířku v tzv. krčku. Na obě strany od krčku se Gaussov svazek postupně rozšiřuje. Vlnoplochy jsou v krčku rovinné, postupně se zakřívují.

Z vlnové rovnice jsme schopni určit minimální úhlovou divergenci normál k vlnoploše pro danou šířku svazku. Normály pak vytvářejí úzký kužel v prostoru.

V dalších úvahách budeme předpokládat, že Gaussova vlna je modulovaná proměnnou funkcí polohy, nazývanou komplexní obálka nebo komplexní amplituda $A(r)$. Pro komplexní amplitudu platí [1]:

$$U(r) = A(r) \exp(-jkz), \quad (4.2)$$

kde z je souřadnice podélné osy ve směru šíření vlny a k je vlnové číslo.

Za předpokladu, že obálku lze lokálně považovat za rovinnou vlnu, jejíž normála k vlnoploše má směr paraxiálního paprsku, lze řešením rovnice (4.1) dospět ke vztahu [1]:

$$A(r) = \frac{A_1}{z} \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}\right), \quad (4.3)$$

kde A_1 je konstanta, z je souřadnice podélné osy ve směru šíření vlny a k je vlnové číslo.

Komplexní obálka vyhovuje paraxiální Helmholtzově rovnici i pro posunutí o konstantu ϵ , pokud je tato konstanta čistě imaginární ($\epsilon = -jz_0$, kde reálná hodnota z_0 představuje tzv. Rayleighovu vzdálenost). Potom lze komplexní obálku Gaussova svazku přepsat do tvaru [1]:

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2q(z)}\right), \quad (4.4)$$

kde $q(z) = z + jz_0$, A_1 je konstanta, z je souřadnice podélné osy ve směru šíření vlny a k je vlnové číslo.

Přepíšeme-li komplexní funkci $1/q(z) = 1/(z + jz_0)$ do složkového tvaru (součet reálné a imaginární složky), získáme rovnici ve tvaru [1]:

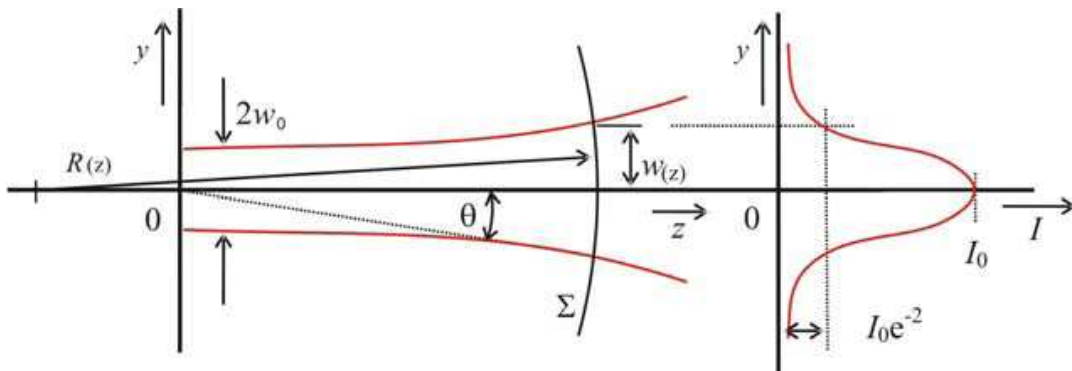
$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi W^2(z)}, \quad (4.5)$$

kde $W(z)$ je poloměr svazku, $R(z)$ je poloměr křivosti vlnoplochy a λ je vlnová délka.

Dosazením rovnice (4.4) a vhodnými úpravami lze vyjádřit komplexní amplitudu Gaussova svazku ve tvaru [1]:

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{W^2(z)}\right) \exp\left(-jkz - jk \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + j\varepsilon(z)\right), \quad (4.6)$$

kde $A_0 = A_1/jz_0$, $W(z)$ je poloměr svazku, $R(z)$ je poloměr křivosti vlnoplochy a W_0 je poloměr maximálního zúžení svazku (tzv. krčku).



Obr. 4.1: Profil Gaussova svazku (I_0 - intenzita záření v ose svazku; Σ - vlnoplocha; $w(z)$ - pološířka svazku; $R(z)$ - poloměr křivosti; θ - úhel divergence).

Určujícími parametry svazku jsou - jeho poloměr $W(z)$, poloměr křivosti vlnoplochy $R(z)$, funkce $\varepsilon(z)$ a poloměr maximálního zúžení svazku W_0 . Rovnice těchto parametrů můžeme vyjádřit následovně [1]:

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.7)$$

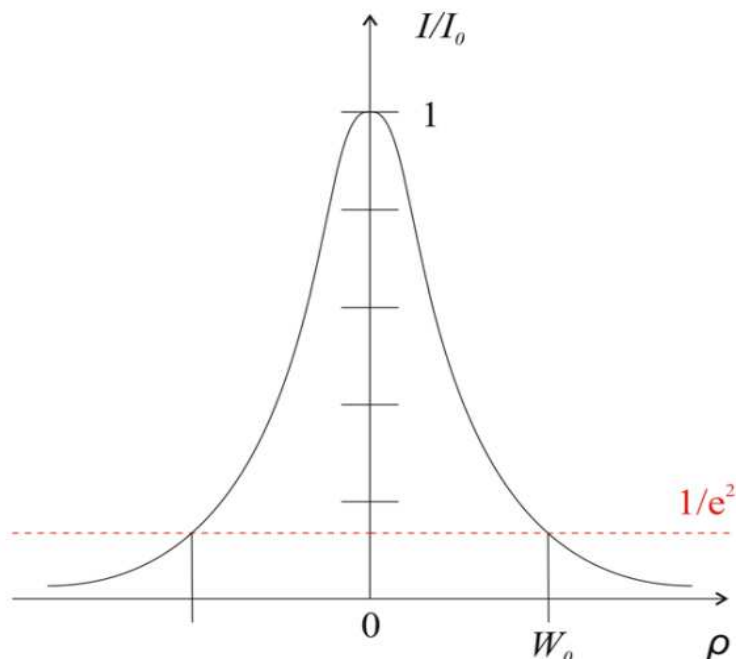
$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right], \quad (4.8)$$

$$\varepsilon(z) = \arctg \frac{z}{z_0}, \quad (4.9)$$

$$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.10)$$

4.1. Parametry Gaussova svazku

4.1.1. Intenzita



Obr. 4.2: Normovaná intenzita svazku v závislosti na ρ

Intenzita je funkce axiální vzdálenosti z a radiální vzdálenosti $p = (x^2 + y^2)^{1/2}$ [1]:

$$I(p, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp\left(-\frac{2p^2}{W^2(z)}\right), \quad (4.11)$$

kde $A_0 = A_1 / jz_0$, $W(z)$ je poloměr svazku, W_0 je poloměr maximálního zúžení svazku a $I_0 = |A_0|^2$. Vztah pro intenzitu lze odvodit také z rovnice přenášeného výkonu P jako [1]:

$$I(p, z) = \frac{2P}{\pi W^2(z)} \exp\left(-\frac{2p^2}{W^2(z)}\right), \quad (4.12)$$

kde $W(z)$ je poloměr svazku a $p = (x^2 + y^2)^{1/2}$ je radiální vzdálenost.

4.1.2. Výkon

Celkový výkon přenášený svazkem spočítáme jako integrál součinu intenzity vlny a plochy příčného řezu svazku. Po úpravách [1]:

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2), \quad (3.13)$$

kde W_0 je poloměr maximálního zúžení svazku, $I_0 = |A_0|^2$ a $A_0 = A_1 / jz_0$.

4.1.3. Poloměr svazku

Je definován jako poloměr příčného průřezu, jímž se šíří 86% celkového výkonu přenášeného svazkem [1]:

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.14)$$

kde W_0 je poloměr maximálního zúžení svazku, z je souřadnice podélné osy ve směru šíření vlny a z_0 je Rayleighova vzdálenost.

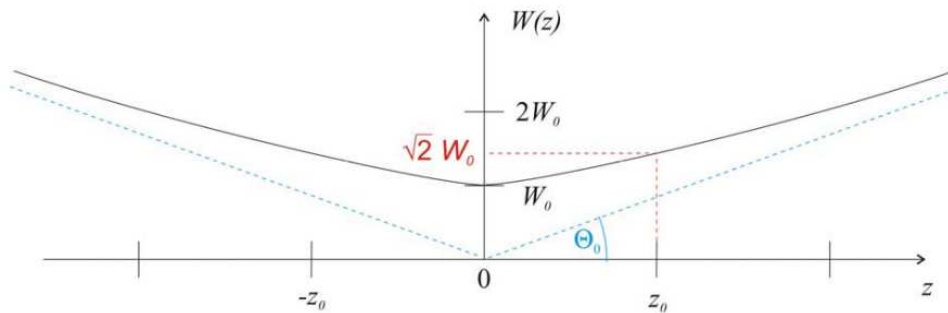
4.1.4. Divergence svazku.

Jde o kužel s vrcholovým úhlem 2Θ , v němž se šíří 86% celkového výkonu. Vzniká v místě, kde poloměr svazku roste téměř lineárně s rostoucím z . Úhel Θ nazýváme divergenčním úhlem [1]:

$$\Theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0}, \quad (4.15)$$

kde W_0 je poloměr maximálního zúžení svazku a λ je vlnová délka.

4.1.5. Ohnisková hloubka



Obr. 4.3: Závislost poloměru svazku W_0 na axiální vzdálenosti z .

Je axiální vzdálenost v místě, v němž je poloměr svazku roven nebo menší $\sqrt{2}W_0$ [1]:

$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda}, \quad (4.16)$$

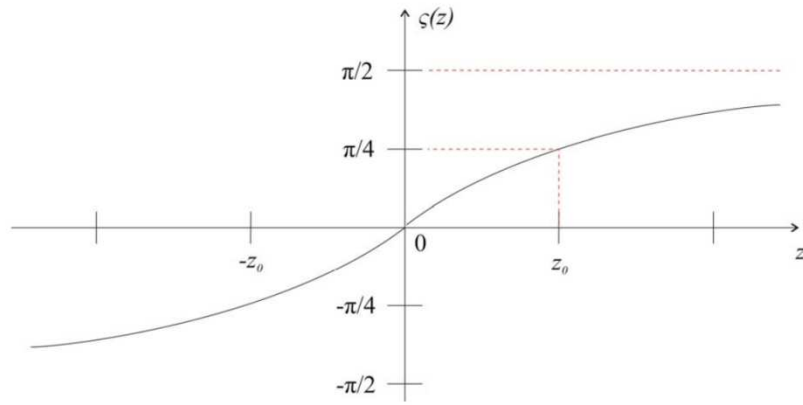
kde W_0 je poloměr maximálního zúžení svazku a λ je vlnová délka.

4.1.6. Fáze

Vztah pro fázi získáme úpravou rovnice pro komplexní amplitudu Gaussova svazku. Fázi rovinné vlny zde bude představovat člen kz a fázové zpoždění člen $\zeta(z)$ [1]:

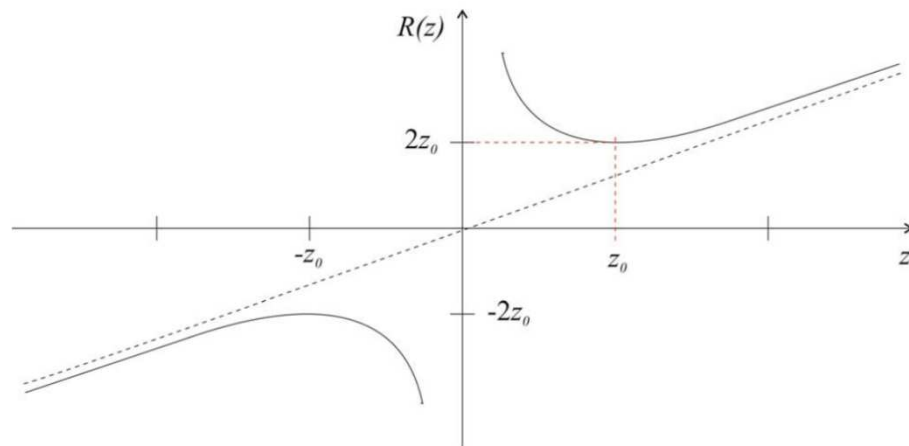
$$\Phi(0, z) = kz - \zeta(z) + \frac{kp^2}{2R(z)}, \quad (4.17)$$

kde $R(z)$ je poloměr křivosti vlnoplochy, $p = (x^2 + y^2)^{1/2}$ je radiální vzdálenost a k vlnové číslo.



Obr. 4.4: Fázové zpoždění

4.1.7. Vlnoplochy



Obr. 4.5: Poloměr zakřivení vlnoploch Gassova svazku.

Poloměr křivosti vlnoplochy podél osy svazku popsán rovnicí [1]:

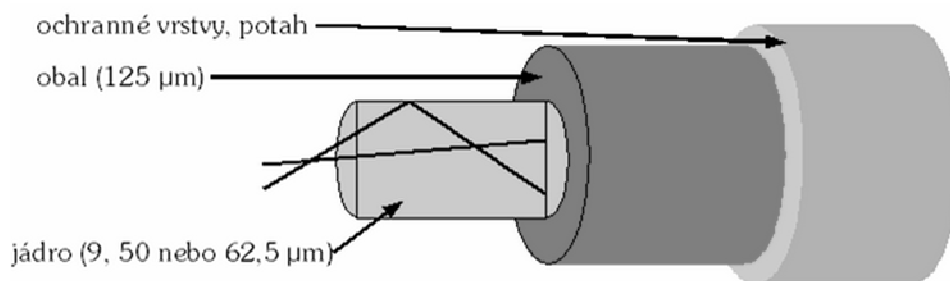
$$z + \frac{p^2}{2R} = q\lambda + \frac{\zeta\lambda}{2\pi}, \quad (4.18)$$

kde $R = R(z)$ je poloměr křivosti vlnoploch, $\zeta = \zeta(z)$ je fázové zpoždění, $p = (x^2 + y^2)^{1/2}$ je radiální vzdálenost, λ je vlnová délka a q je dáno vztahem (5).

5. OPTICKÁ VLÁKNA

Optické vlákno je možné si představit jako „světelný vlnovod“, skládající se z optického jádra a pláště. Optické jádro je velmi malé, lze si ho představit jako kruh malých rozměrů. Jeho velikost je 9 μm pro jednomodová vlákna a 50 μm v EU nebo 62,5 μm v USA pro jádra mnohomodová. Velikost pláště u obou typů vláken je vždy 125 μm. Vlákno je velmi citlivé na mechanické namáhání a při špatném zacházení může docházet k nenávratnému poškození. Optické vlákno je možné ohýbat pouze do určitého poloměru, aniž by byl přenos ovlivněn. Výjimkou jsou vlákna podle doporučení ITU-T G.652.D (odolná vůči ohybům) a ITU-T G.657 (necitlivá na ohyby). Například s vlákny doporučení ITU-T G.657.B3 můžeme zacházet podobně jako s UTP kabely. Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod zhotovený z nízkoztrátového materiálu (nejčastěji z taveného křemenného skla vysoké chemické čistoty) s malým útlumem. Jako příměsi pro stanovení indexu lomu se používají prvky, jakými jsou například fosfor, germanium, bor a fluor. Jádro vlnovodu má nepatrně vyšší hodnotu indexu lomu než jeho plášť, což zajišťuje šíření záření podél osy vlákna. Optická vlákna se mezi sebou spojují pomocí optických spojek či svařením [7][8].

Kromě výše zmíněných optických vláken konstruovaných na bázi křemíku existují i vlákna plastová (POF – Plastic Optic Fiber). Tyto vlákna se používají v automobilovém průmyslu například pro osvětlení kontrolky. V dnešní době se podařilo snížit útlum ze 100 dB/km na hodnotu řádově 10 dB/km.

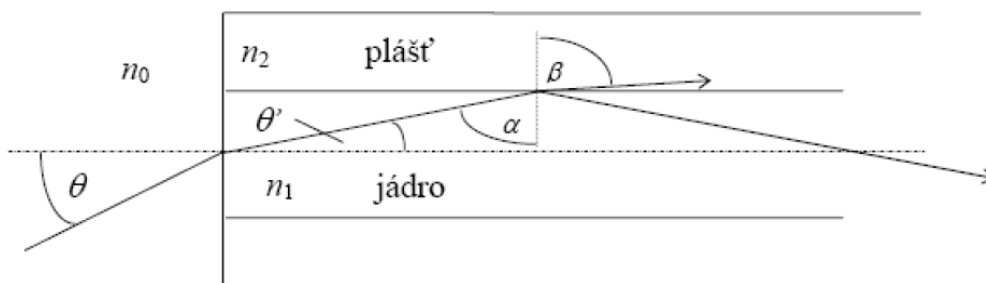


Obr. 5.1: Optické vlákno s primární a sekundární ochranou.

Pro rozhraní vzduch/jádro platí Snellův zákon:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{n_1}{n_0}, \quad (5.1)$$

kde n_0 – index lomu vzduchu, n_1 – index lomu jádra, θ – úhel dopadu světla na čelo vlákna, θ' – úhel lomu světla v jádru, viz obr. 5.1.



Obr. 5.2: Šíření světla v optickém vláknu typu SI.

A podobně pro rozhraní jádro/plášť platí:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5.2)$$

kde n_1 – index lomu jádra, n_2 – index lomu pláště, α – úhel dopadu světla na rozhraní jádro/plášť, β – úhel lomu světla v plášti.

Podmínkou efektivního šíření světla ve vlákně je vznik totálního odrazu na rozhraní jádro/plášť. Předně musí být splněna nerovnost: $n_1 > n_2$. Nejmenší úhel dopadu na rozhraní jádro/plášť, při kterém dochází k totálnímu odrazu, označme α_{\max} . Pak $\beta = \pi/2$ a $\sin \beta = 1$ a nastává totální odraz.

$$\sin \alpha_{\max} = \cos \theta'_{\max} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (5.3)$$

$$\sin \theta'_{\max} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta'_{\max}}, \quad (5.4)$$

$$\sin \theta_{\max} = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{1 - \cos^2 \theta'_{\max}} = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \approx (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx (2n\Delta)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.5)$$

kde $\Delta = n_1 - n_2$ je rozdíl v indexech lomu jádra a pláště, přičemž $n_1 \approx n_2$; $\Delta \ll 1$; Φ_{\max} je tzv. aperturní (příjmový) úhel vlákna.

Typ vlákna	GI	MM	SM
NA	0,3	0,3	0,055

Tab. 5.1: Tabulka typických hodnot NA jednotlivých typů optických vláken.

kde MM jsou mnohomodová vlákna se skokovou změnou indexu lomu, GI mnohomodová vlákna s postupnou změnou indexu lomu a SM jednomodová vlákna.

Podle průběhu indexu lomu jádra a pláště a podle průměru jádra dochází k různým způsobům šíření optického signálu (vznik tzv. vidů) vláknem.

Veličina $\sin \Phi_{\max}$ se definuje jako numerická apertura (NA) optického vlákna a je mírou schopnosti vlákna přijmout optický výkon. Pro různé typy vláken viz Tab. 5.1.

5.1. Typy optických vláken

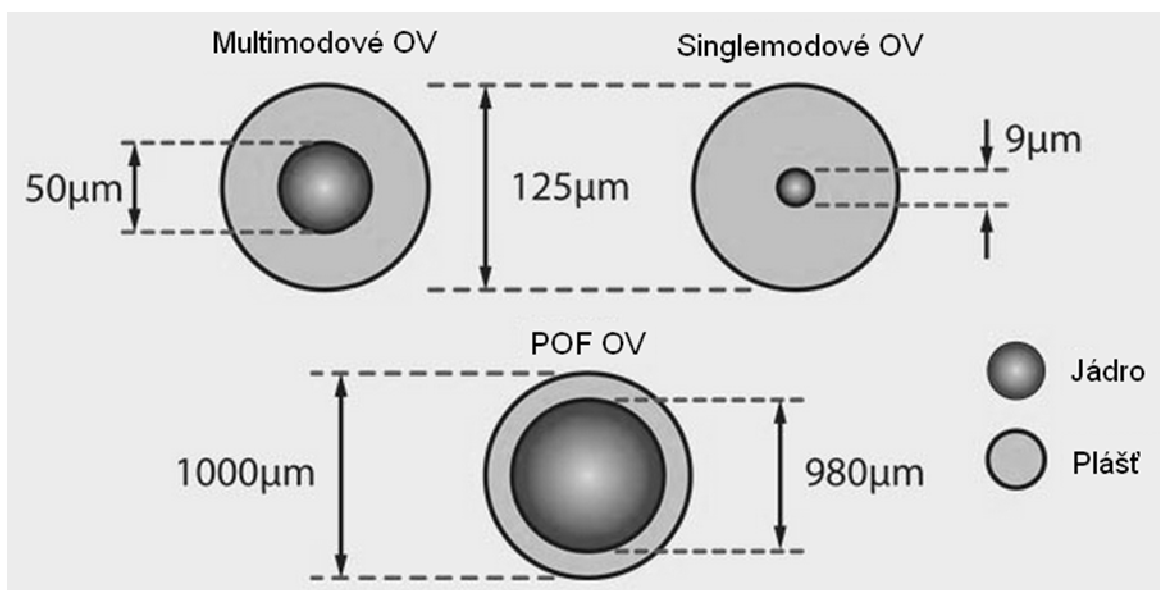
Podle geometrických relací jádra a pláště se vlákna dělí na jednomodová, mnohomodová gradientní a stepindexová a plastová vlákna.

Podmínka nepřekročení kritického úhlu při šíření záření optickým vláknovým vlnovodem není jedinou podmínkou pro vedení světla ve vláknech. Tuto podmínku je nutno doplnit ještě podmínkou fázové koincidence vlnoploch záření tvořených axiálními posunutými paprsky. Tato fázová podmínka vede k vyjádření tzv. disperzní rovnice vlnovodu, jejíž řešení vymezuje konečný počet vln, které se mohou pro dané geometrické uspořádání a daný kmitočet studovanou vlnovodnou strukturou samostatně šířit. Disperzní rovnice určuje tvary elektrických a magnetických polí těchto vln i jejich fázové a grupové rychlosti. Určuje tak jednoznačně tzv. modovou strukturu vlnovodu. Ze znalosti způsobu šíření jednotlivých modů vlnovodem lze odvodit chování vlnovodu při přenosu signálů, a zejména šířku přenosového pásma vlnovodu. Počet modů, které se vlnovodem mohou šířit je úměrný čtverci normovaného kmitočtu V označovaného též jako charakteristický parametr vlákna:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} (NA), \quad (5.6)$$

kde a je poloměr jádra a λ_0 je vlnová délka ve vakuu. Pro $V \gg 1$ je:

$$M \approx \frac{V^2}{2} \text{ (pro SI)} \quad M \approx \frac{V^2}{4} \text{ (pro)} \quad (5.7)$$



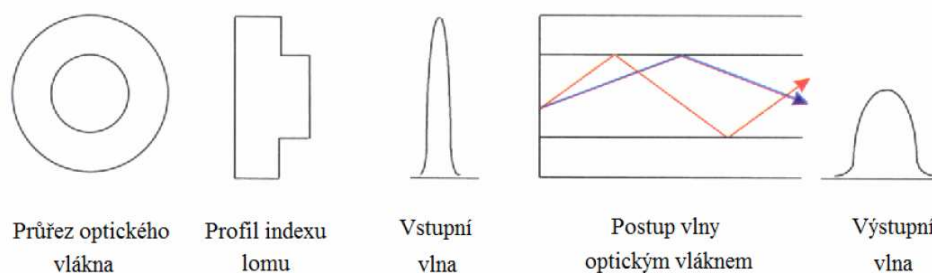
Obr. 5.3: Průřezy optickými vlákny [16].

Z modové teorie optických vláken plyne také podmínka jednomodovosti. Pro OV typu SI se jednomodovost zabezpečí při $V < 2,405$. Lze pak odvodit podmínku pro průměr jádra:

$$2a < 0,38 \frac{\lambda_0}{(NA)}. \quad (5.8)$$

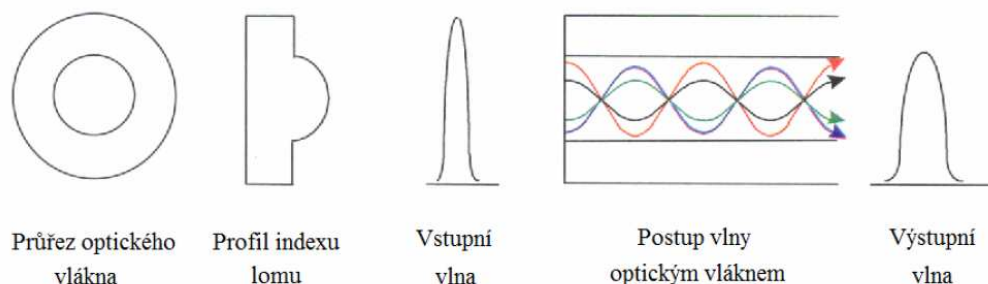
5.1.1. Mnohomodová optická vlákna (MM)

Vývojově nejstarší optická vlákna jsou svými vlastnostmi nevhodná pro použití v moderních sensorových aplikacích. Jejich charakteristikou je velký průměr jádra vlákna přesahující 50 μm. Velký průměr jádra umožňuje poměrně snadné navázání optického svazku do vlákna, viz obr. 3.4. Nevýhodou je přítomnost velkého počtu modů pole, mezi kterými se přelévá elektromagnetická energie přenášená ve vlákne. Charakter rozložení a vzájemná vazba mezi mody je závislá především na mechanických vlivech na vlákno, jako je ohýbání, kroucení nebo napínání vlákna. Tyto vlivy způsobují náhodné fluktuace intenzity svazku vystupujícího z MM vláken. Dalším důležitým aspektem je nemožnost zachování polarizačního stavu přenášeného optického signálu, což je způsobeno výše uvedeným mnohomodovým charakterem šíření. Tyto důvody zároveň vylučují použití fázové modulace. Proto tyto vlákna nelze přímo použít v polarimetrických senzorech a polarizační modulace musí být převedena na modulaci intenzitní. Její použití je ovšem také problematické z důvodu negativně působících mechanických vlivů.



Obr. 5.4: Šíření paprsků v mnohamodovém vlákně [16].

Gradientní (GI) s postupnou změnou indexu lomu umožňují šíření více modům, avšak toto rozložení indexu lomu umožňuje rychlejší šíření modům neležícím v ose vůči modům v ose vlákna, proto u těchto vláken dochází ke značné redukci disperze při zachování NA, viz obr. 3.5.

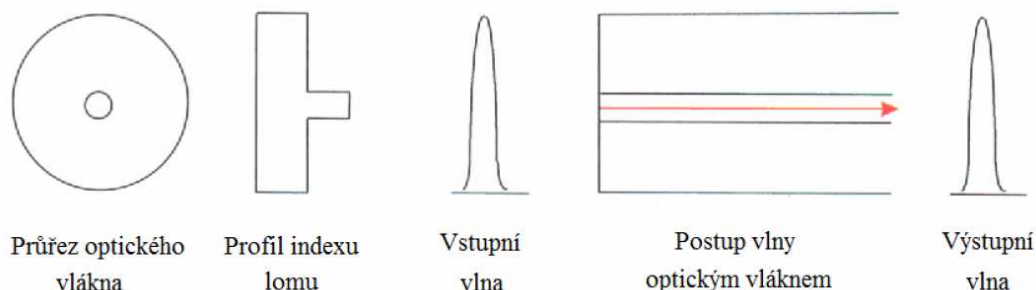


Obr. 5.5: Šíření signálu gradientním vláknem [16].

5.1.2. Jednomodová optická vlákna (SM)

V současnosti jsou široce využívána SM optická vlákna, viz obr. 3.6. Světelná vlna se v SM vláknech šíří podél osově umístěného jádra s malým průměrem (typicky 4 μm). Jednomodový charakter šíření potlačuje vliv vnějších mechanických vlivů na přenos, protože nedochází k mezimodovým vazbám. To usnadňuje přenos intenzitně modulovaných optických signálů. Vzhledem k jednomodovému režimu lze snadno přenášet i fázově modulované signály, jichž se využívá v interferometrických vláknových senzorech. Principiálně je dále možné zachovávat i polarizaci vedené optické vlny, což je velmi významné v případě polarimetrických senzorů. V reálném SM vlákně je ale zachování stavu polarizace problematické. Negativně se projevují odchylky od ideálního kruhového průřezu jádra vlákna a také přítomnost latentního mechanického napětí vzniklého při výrobě vlákna. Tyto skutečnosti vedou ke vzniku vlastního lineárního dvojlomu vlákna. Ten způsobuje fázový posuv ortogonálních složek vedené vlny a vlna mění svoji polarizaci na obecně eliptickou. K vzniku přídavného lineárního dvojlomu v SM vlákně dochází i při působení vnějších mechanických (ohyb, tlak) a teplotních vlivů. Je nutno zmínit i vliv optovláknových konektorů na polarizační změny přenášeného signálu. Z důvodu mechanického ovlivnění vlákna při konektorování dochází také ke vzniku lineárního dvojlomu. Změnám stavu polarizace vedené vlny nelze u SM vláken snadno zabránit.

Speciálním případem SM vláken jsou vlákna PM. Jsou charakterizována silným vlastním lineárním dvojlomem. Lineární dvojlom je ve vláknech vytvořen eliptickou profilací jádra nebo vyvoláním silné anizotropie prostřednictvím zavedení mechanického napětí. Silný lineární dvojlom způsobuje vzájemnou nezávislost vedených ortogonálních vidů. Při vedení vlny je tak potlačena mezimodová vazba a polarizační složky se neovlivňují a šíří se nezávisle. Fázový posuv ortogonálních složek vlny na vstupu vlákna je ale vlivem anizotropie pozměněn a polarizace není pro obecný případ zachována. Zachování polarizace je zajištěno pouze pro speciální případ, kdy je polarizace vedené vlny rovnoběžná s rychlou nebo pomalou optickou osou vlákna. PM vlákna proto nejsou vhodné pro přenos vln s libovolně orientovanou rovinou polarizace.



Obr. 5.6: Šíření paprsků v jednomodovém vlákně [16].

5.1.3. Plastová optická vlákna (POF)

POF je optické vlákno, které je zhotoveno z polymerního materiálu. Většinou se jako hlavní materiál pro jádro používá PMMA (akryl) a jako materiál pro obložení jádra se volí polymery fluoru. Nicméně od konce století se na trzích objevují POF s mnohem větším výkonem založené na perfluorových polymerech. I když se křemenná vlákna používají ve velkém pro infrastruktury, POF jsou někdy nazývána jako „spotřební“ optická vlákna [1].

Vlastnosti POF:

- POF používané pro přenos mají mnohem větší průměr oproti ostatním vláknům
- optické vlastnosti POF souvisí samozřejmě s vlastnostmi samotných plastů. PMMA a polystyren se používají jako materiál pro jádro vlákna s indexy lomu 1,49 a 1,59 a vnější obal se vyrábí ze silikonové pryskyřice s indexem lomu 1,46. Je patrné, že mezi jádrem a pláštěm je zaveden poměrně velký rozdíl indexů lomu. POF mají také vysokou numerickou aperturu
- POF jsou velmi silná a je velmi náročné je ohnout
- instalace je extrémně jednoduchá

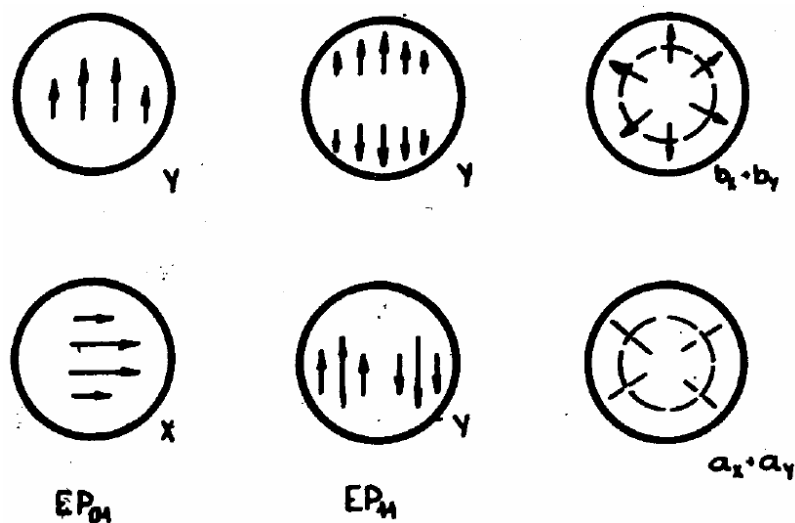
5.2. Mody v optických vláknech

Pro přenos signálu jsou nejdůležitější pouze vidy vlny jádra. Mezní úhel φ_a , při kterém se vstupující paprsek bude do vlákna šířit jako jádrová vlna je základní veličinou, jež je potřebná pro navázání zářivé energie do vlákna. Její velikost se udává formou numerické apertury (NA).

Prostorová vlna je charakteristická spojitém spektrem modů při šíření vláknem. Na vedení energie vláknem se podílí pouze nepatrná část její amplitudy, která zůstává ve vlákně vlivem částečných odrazů na rozhraní jádro-obal a obal-plášť. Z tohoto důvodu vyplývá, že většina energie je vyzářena do okolí. Exponenciální pole vznikající při úplném odrazu na rozhraní materiálů (n_1, n_2) je příčinou útlumu vlny obalu. Naprostá většina modů této vlny má rozdílnou konstantu šíření než je konstanta šíření modů vlny jádra a dochází tak k disperznímu zkreslení. Může vznikat nesprávným buzením, nebo transformací modů jádra na nehomogenitách. Vlny jádra se šíří pomocí několikanásobného úplného odrazu.

Pro vícenásobný odraz ve dvou na sebe kolmých směrech se vychází z páskového vlnovodu. Z důvodu kruhové symetrie není možné hovořit o dominantní polarizaci tvořících vln. Proto je možné modové rozložení popsat pomocí tvaru rozložení příčné složky intenzity elektrického pole. Z rovnic vlastních hodnot je možné stanovit podmínku pro radiální chod paprsku jádrem a pro spirálový chod paprsku. Mod se tedy označí EP_{lm} a je lineární kombinací modů HE a EH.

Vzorec (V) je řešením rovnice vlastních vln vidového diagramu. Pro nízká $V=f(\omega, A)$ se vláknem šíří pouze základní mod EP_{01} . Čím menší je průměr jádra, tím je větší kmitočtová oblast jednomodovosti vlákna.



Obr. 5.7: Struktura příčného pole elektrické intenzity (základní vidy).

Z Obr. 5.7 vyplývá, že je možné u některých modů, šířících se v optickém vlákně, je možné jednoduchým způsobem definovat směr polarizace. Tyto mody se označují jako mody lineárně polarizované (LP_{m,n}) a mohou vznikat superpozicí dvou a více základních modů EP_{1m}.

Z modového diagramu vyplývá, že libovolně vybuzený mod s daným kmitočtem, jenž se mění v určitém rozsahu, vykazuje jistou závislost rychlosti šíření právě na kmitočtu. Změnu fáze záření daného modu při průchodu optickým vláknem o délce l je možné vyjádřit jako:

$$\Delta\varphi = \beta \cdot l = \frac{\omega}{v_f} l, \quad (5.9)$$

a také časové zpoždění vlny získané při průchodu optickým vláknem:

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{\omega}. \quad (5.10)$$

Časové zpoždění nemusí být vždy konstantní s kmitočtem. Právě z tohoto důvodu vzniká fázové zkreslení, které je obzvláště nežádoucí v impulsním režimu. Takto vzniklé zkreslení, tedy závislostí skupinového zpoždění každého modu na frekvenci, se označuje jako vlnododová disperze.

Skupinová disperze:

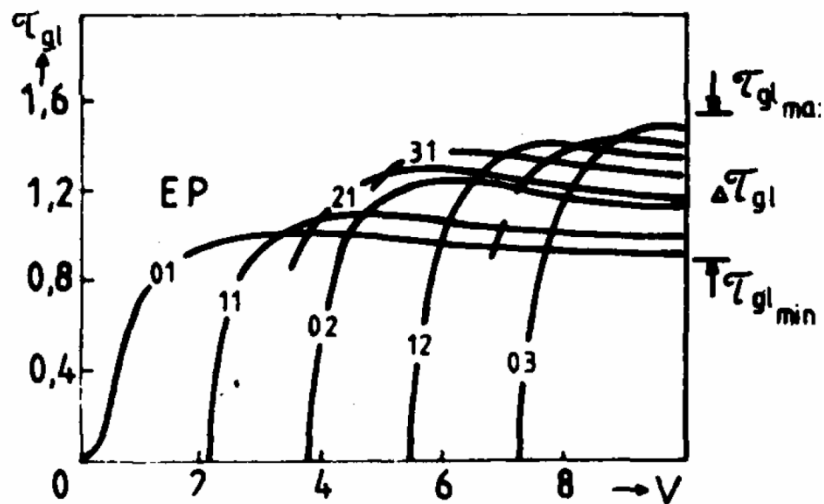
$$\tau_d = \frac{d\Delta\varphi}{d\omega} = l \cdot \frac{d\beta}{d\omega}. \quad (5.11)$$

Vzorcem „nahore“ je shrnuto chování vlákna pro skupinu vln blízkých kmitočtu. Pokud je τ_d v daném rozsahu konstantní, nedochází k fázovému zkreslení. Skupinové zpoždění vztáhnuté na jednotku délky optického vlákna je pak možné vyjádřit:

$$\tau_{GL} = \frac{\tau_d}{l} = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (5.12)$$

Anebo také pomocí veličin B a V :

$$\tau_{GL} = \frac{1}{c} \cdot \left[n_2 + (n_1 - n_2) \frac{d(VB)}{dV} \right]. \quad (5.13)$$



Obr. 5.8: Skupinové zpoždění jednotlivých modů stepindexového vlákna

V pásmu jednomodovosti je možné najít oblast, kde je zkreslení skupinovým zpožděním minimální. V pásmu mnohamodovosti se u stepindexového vlákna vyskytuje diference mezi nejpomalejším a nejrychlejším modem při shodném kmitočtu. Tento rozdíl se dá charakterizovat modovou disperzí vlákna:

$$\Delta\tau_{GL} = \frac{1}{c} \cdot (n_1 - n_2). \quad (5.14)$$

U vztahu (5.14) se vychází z předpokladu, že OV se může šířit pouze omezený počet módů. Vyšší mody se vláknem šíří s vyšším úhlem dopadu na rozhraní. Avšak tento úhel je omezen hodnotou mezního úhlu dopadu Φ_M . Celkový počet vedených módů N_V , který je součtem módů tunelujících N_T a módů jádra je pro danou frekvenci záření dán:

$$N_V = N_T + N_j, N_j = \frac{v^2}{2}, \quad (5.15)$$

$$N_T = \frac{v^2}{2tg^2\theta_M}, v = a \frac{2\pi n_1}{\lambda_0} \sin\theta_M. \quad (5.16)$$

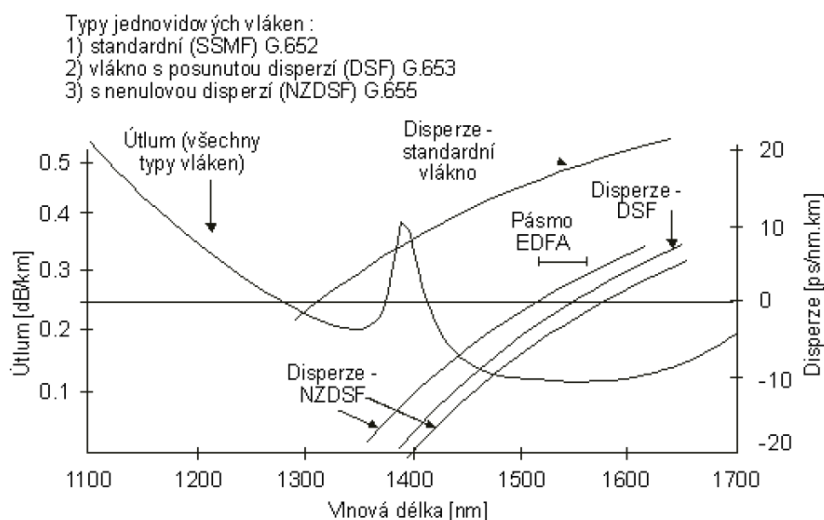
5.3. Ztráty v optických vláknech

Obecně by se daly ztráty (útlum) v optických vláknech rozdělit na vnitřní a vnější anebo do těchto čtyř kategorií:

- **Ohybové ztráty** - ztráty způsobné ohybem jsou způsobeny porušením podmínky totálního dorazu, tzn., že paprsek dopadá pod větším úhlem na rozhraní dvou indexů a láme se do pláště.
 - další jev, který se ohybových ztrát účastní je fotoelastický jev - je zajímavý tím, že index lomu není konstantní, ale je ovlivněn tlakem, vzniká na vnitřní straně ohybu vlákna a tím pak na vnější straně vyvozuje tahové napětí- dochází ke změně indexu lomu v jádře, pláště a změně mezního úhlu šíření světla ve vlákně.
- **Rozptylové ztráty**- dány výrobou a vzniká na nečistotách a výkyvech krystalické mřížky.
- **Absorpční ztráty** - tyto ztráty přeměňují elektromagnetickou energii na tepelnou energii, jsou zapříčiněny jednak absorpcí paprsku při průchodu vláknem způsobenou přechody na atomární úrovni v ultrafialové a viditelné oblasti. Stejně tak záchvěvy na molekulární úrovni v oblasti infračervené (v POF pro příklad C-H molekuly).
- **Disperzní ztráty** – rozptylové jevy (modové), které znehodnocují vlastnosti optických vláken.

5.3.1. Útlum optických vláken

Významným faktorem je útlum, který optické vlákno vytváří vůči přenášenému světlu, a který se projevuje zmenšováním intenzity světla - důsledkem je to, že po určité vzdálenosti je nutné světelný paprsek regenerovat, neboli zesílit jej. V sedmdesátých letech, kdy se optické kabely začaly používat pro přenosy na větší vzdálenosti, dosahoval útlum optických vláken hodnoty až 20 dB na kilometr. Dnes se vyrábí i nízkoutlumová vlákna s útlumem o hodnotách 0,2 až 0,3 dB/km.



Obr. 5.9: Závislost měrného útlumu a disperze na vlnové délce [16].

Technologie výroby vláken se neustále zlepšuje a tak se podařilo dosáhnout extrémně nízkých hodnot útlumu. Z Obr. 5.9 je vidět jeho obvyklý spektrální průběh pro kvalitní jednomodová vlákna používaná v telekomunikacích. Absolutní minimum je v oblasti 1550 nm a má hodnotu přibližně 0,2 dB/km. Toto absolutní minimum útlumu je ze strany kratších vlnových délek omezeno Rayleighovým rozptylem a ze strany větších vlnových délek infračervenou absorpcí. Křivka na Obr. 5.9 tedy zachycuje útlum vlákna, vyčištěného ode všech absorbujících příměsí a představuje limit. V okolí 1400 nm je pás zvýšeného útlumu, který je způsobován absorpcí světla na O-H iontech, přítomných ve vlákne. Proto je třeba vlákna chránit různými ochranami před kontaktem s vodou a před zvýšenou vlhkostí, aby do vláken nedifundovalo více O-H iontů a útlum se tak nezhoršil. Absorpční pás odděluje od absolutního minima útlumu jedno lokální minimum, situované kolem 1310 nm. Této oblasti se říká přenosové okno, další přenosové okno je v oblasti absolutního minima útlumu.

5.3.2. Disperze optických vláken

Spolu s útlumem je disperze další důležitou vlastností optických vláken z hlediska telekomunikací. Optické vlákno je disperzní prostředí, tzn., má různé vlastnosti pro různé vlnové délky a vidy optického záření. Vyšleme-li na vstup vlákna světelný impuls, tento impuls se obecně rozloží do mnoha vidů a každý vid má ještě nenulovou spektrální šířku - skládá se z několika složek o různé vlnové délce. Různé vidy mají různé rychlosti šíření vláknem, což je tzv. vidová disperze, ale i různé spektrální složky téhož vidu se šíří různou rychlostí a tomuto jevu se říká disperze chromatická. Definuje se jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky na začátku a na konci vlákna.

Rozlišujeme 4 základní druhy disperze:

- **Materiálová disperze** - Vzniká z kmitočtové závislosti indexu lomu, která vyvolává kmitočtovou závislost skupinové a fázové rychlosti šíření vlny, z něhož je OV vyrobeno, materiálová disperze vidu kombinuje s disperzí vlnovodovou.
- **Vlnovodová disperze** - Způsobena změnami geometrie vidu a tím i změnami podélné skupinové a fázové rychlosti šíření při změně kmitočtu, vlnovodná disperze způsobuje rovněž rozšiřování impulsů přenášených OV. Příčinou je, že konstanta šíření je pro každý vid různá → mění se jeho kmitočet, což má za následek změnu rychlosti šíření, výsledný účinek materiálové a vlnovodové disperze bývá označován jako disperze chromatická.
- **Chromatická disperze** - Způsobena nelineární kmitočtovou závislostí skupinové rychlosti šíření vidu v OV → šířka pásma světlovou je tedy nepřímě úměrná šířce pásma zdroje záření → volí takový pracovní kmitočet, že chromatická disperze je ve středu přenášeného pásma nulová
zkreslení přenášeného signálu způsobené chromatickou disperzí lze zmenšit zúžením kmitočtového spektra, pokud je šířící se energie rozdělena do více vidů, přidává se ke chromatické disperzi ještě disperze vidová

- **Modová disperze** - Tato disperze je způsobena rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů. Vidová disperze je hlavním činitelem, který omezuje šířku přenášeného pásma u mnohamodových OV s homogenním jádrem, u těchto OV lze vysvětlit disperzi pomocí názorné metody geometrické optiky → čím je úhel mezi trajektorií paprsku a osou OV větší, tím je delší jeho dráha mezi vstupem a výstupem a jeho podélná rychlost ve směru osy menší.

z tohoto důvodu se tzv. vyšší vidy, které jsou blíže svému meznímu kmitočtu, šíří pomaleji než mody tzv. nižší. Pak ve vzdálenosti od počátku světlovodu bude mezi jednotlivými vidy časový rozestup daný rozdílem jejich skupinových zpoždění, vliv vidové disperze můžeme redukovat zmenšením počtu vidů účastnících se přenosu, vhodnou volbou konstrukčních parametrů optického světlovodu – v mezním případě až na jeden vid snížení modové disperze je tedy vyrovnání skupinových rychlostí šíření jednotlivých vidů vhodným uspořádáním vlnovodné struktury

5.4. Navázání výkonu mezi vlákny

Důležitou součástí optických vláken jsou spojovací a vazební součástky, které zprostředkovávají vzájemné propojení vláken mezi sebou a také jejich připojení k různým částem optického spoje.

Spojovacími součástkami označujeme prostředky pro spojování a připojování optických vláken. Vazební součástky slouží k zajištění přenosu optického signálu mezi dvěma nebo více součástkami, popřípadě obvod pro přenos a zpracování optické informace. Podle konstrukčního provedení rozdělujeme spojovací součástky:

- **Trvalé** - zajišťující nepřetržitě spojené optických vláken.
- **Rozebíratelné** - umožňující jejich opakované spojení a rozpojení.

Pro návrh optických spojovacích součástí je základním kritériem zejména zajištění dokonale radiální a axiální přesnosti a minimálních mezer mezi spojovanými částmi vláken. Dále je nutná výborná jakost povrchů spojovaných součástí. Přípravě konců vláken musí být věnována zvláštní pozornost. U vláken musí být koncové plochy rovné a čisté (leštěné beze stop poškrábání).

5.4.1. Trvalé spojení

Do skupiny nerozebíratelných spojení optických vláken je možné zařadit tyto metody:

- **Tavné svařování** - tavné svařování je založeno na principu permanentního spojení materiálu obou spojovaných optických vláken. Toto spojení patří mezi nejkvalitnější a vyznačuje se malým vloženým útlumem od 0,01 až do 0,05dB. Tento druh spojování je velmi drahý na pořizovací náklady.
- **Lepení** - vlákna spojit pomocí speciálního lepidla, které má podobný index lomu jako vlákno. Spojení realizujeme, buď spojením vláken dohromady, nebo přilepením vláken k podkladu. Slepované spoje jsou citlivé na změny teploty. V ideálních případech jsou ztráty menší než 0,1dB [3] [14]
- **Pevných metalických spojek** - mechanické optické spojky patří mezi nerozebíratelné spojení → některé typy spoju lze sice rozpojit, ale nejsou určeny pro opakovatelné spojování. Díky jednoduchosti tohoto spojení se montáž počítá v desítkách sekund. Podmínkou dobrého mechanického spoje je velmi přesná geometrie vláken, přesné lomy a čistota. Útlum se pohybuje od 0,1 do 0,3dB a ztráty odrazem jsou cca 45 až 55dB[14].

Existují 2 druhy mechanických spoju:

- V-drážka - je v současnosti nejpoužívanější a slouží jako náhrada svárů.
- Kalibrovaná kapilára.

5.4.2. Rozebíratelné spojení

Rozebíratelné spojení optických vláken se provádí pomocí optických konektorů. Určeny jsou výhradně pro často rozpojovaná spojení dvou nebo více vláken. U současných konektorů se hodnota vloženého útlumu pohybuje kolem 0,15 až 1,5dB. Útlum zpětného odrazu se pohybuje okolo 14 až 75dB. Při výrobě konektoru požadujeme, aby ferule byla co nejpřesnější a to právě z důvodu vzniku zpětného odrazu. Nejčastěji používanými konektory jsou FC, SC, SC, LC.



Obr. 5.10: Optické konektory – SC, LC,FC, ST [31].

5.5. Konektory

Kompletní složení optického konektoru je zobrazeno na Obr. 5.11. Celý konektor se tvoří několika dílčími částmi, přičemž nejdůležitější částí je ferule. Mezi hlavní materiály pro výrobu ferulí patří keramika, kov a kompozitní plast [1][7].



Obr. 5.11: Základní části okonektorovaného optického vlákna [31].

5.5.1. Ferule

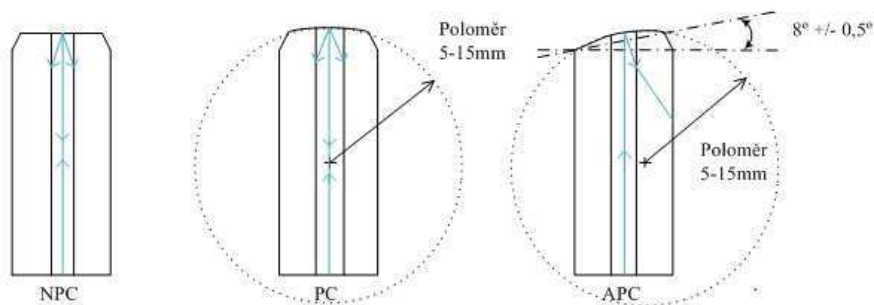
Nejdůležitější částí konektoru je ferule, která realizuje přímé navázání optického výkonu mezi spojkami. Proto jsou na ně kladeny vysoké nároky. Zejména na její přesnost. Vláknem se do ferule zasouvá a lepí pomocí speciálního epoxidového lepidla. Ferule se do požadovaného tvaru vybrousí buď ručně anebo pomocí speciálních leštících hlav a jemných abrazivních filmů.

Původním materiálem používaným pro výrobu ferulí byl kov, který postupem času nahrazovali keramické materiály. V budoucnu budou keramické materiály nejspíše nahrazeny kompozitními plasty.

Druhy ferulí:

- **Aluminiová ferule** - křehký materiál, obtížné leštění, velká tepelná rozržitost
- **Zirkoniová ferule** - často používaný materiál, 4x větší pevnost než hliník, velmi dobré leštění, malé rozměry zrna keramiky a malé opotřebení otěrem.
- **Plastová ferule** - nejlevnější druh, snadné leštění, ale větší útlum a nižší životnost.
- **Kompozitní ferule** - nejlepší ferule, nejpřesnější, nejdražší, malé vložení ztráty.
- **ARCAP (nerezový materiál) ferule** - levná, snadné leštění, malé opotřebení otěrem, vysoká životnost [5]

Broušení předních ploch ferulí má velký vliv na hodnotu zpětného odrazu záření tj. největší hodnota útlumu odrazu v absolutní hodnotě. Typy zabroušení ferulí jsou znázorněny na Obr. 5.12.



Obr. 5.12: Zabroušení ferulí NPC, PC, APC [31].

Typy zabroušení ferulí jsou:

- **úhlově sférické zabroušení (APC - Angled Physical Contact)** - má poloměr zakřivení 5-15mm pod úhlem 8 stupňů, tento typ patří k nejlepším, ale i nejdražším variantám, útlum odrazu se pohybuje okolo 65dB.
- **sféricky zabroušená (PC - Physical Contact)** - o poloměru 5-15mm a útlumem odrazu 35dB.
- **kolmě zabroušená ferule (NPC - Non Physical Contact)** - má útlum odrazu 14dB [4].

5.5.2. Druhy konektorů

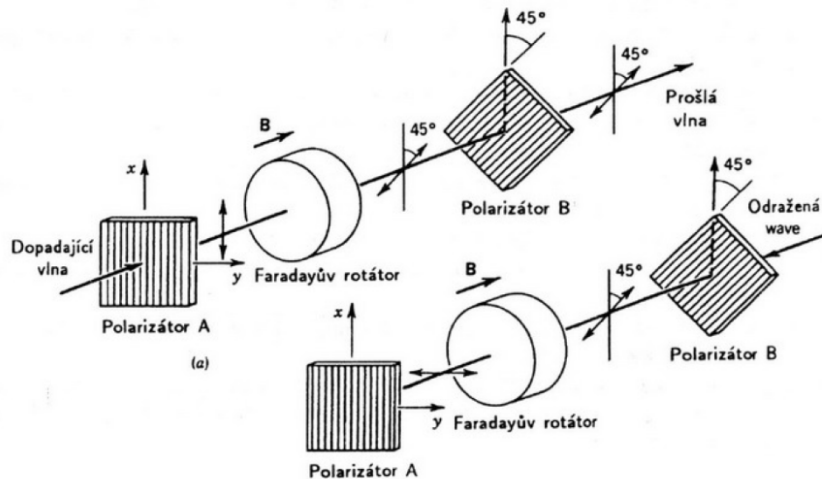
Celkově je asi 12 různých typů optických konektorů. Nejčastěji používané typy konektorů jsou zobrazeny na Obr. 5.10. U současných konektorů jsou 2 různé průměry ferulí. Klasický průměr 2,5mm využívají všechny dříve navržené konektory tj. FC, SC. Miniaturizované konektory (např. LC) mají feruli o průměru 1,25mm.

- **FC konektor** - optický konektor FC je určený pro spojení MM a SM vláken, vyrábí se ve šroubovacím provedení, používá standardní feruli o průměru 2,5mm vyrobenou ze stříkaného plastu nebo nerez kovu, spolehlivou polohu ferule zaručuje válcové tělo konektoru s perem, dodávají se také s ferulemi typu APC
- **LC konektor** - optický konektor určený pro SM vlákna s malou 1,25mm ferulí, tělo konektoru je vyrobeno z plastu a využívá mechanickou fixaci podobnou RJ konektoru s jazýčkem, vzhledem ke svým malým rozměrům je předurčen pro aplikace s nároky na malou plochu a velký počet spojení.
- **SC konektor** - optický konektor určený pro jednomodová vlákna, náhrada za starší konektor ST, je vyroben z plastu a po mechanické stránce využívá systém „zasuň a vysuň“
- **ST konektor** - optický konektor určený pro spojení MM a SM vláken, patří k velmi rozšířeným typům konektorů a setkáváme se s nimi hlavně v LAN rozvodech, používá se standardní průměr ferule 2,5mm, k mechanickému zajištění využívá bajonetový princip. Tělo bývá z plastu i z keramiky [1]

5.6. Optické izolátory

Optický izolátor je zařízení propouštějící světlo pouze v jednom směru. Využívají se k zabránění zpětného dopadu odraženého světla do zdroje. Tato zpětná vazba však může mít škodlivý vliv na činnost některých světelných zdrojů (polovodičové lasery).

Soustava je sestavena z polarizačního děliče paprsků, za kterým se nachází čtvrtvlnná destička, působící jako izolátor. Světlo šířící se směrem dopředu je polarizováno děličem paprsků a fázová destička následně mění jeho polarizaci na kruhovou. Po odrazu od zrcadla, za fázovou destičkou, se smysl kruhové polarizace mění na opačný, takže po opětovném průchodu fázovou destičkou neprojde děličem paprsků. Tímto typem izolátoru můžeme utlumit zpětnou vlnu až o 30dB, ale pouze v úzké oblasti vlnových délek.



Obr. 5.13: Optický izolátor založený na Faradayově jevu [1].

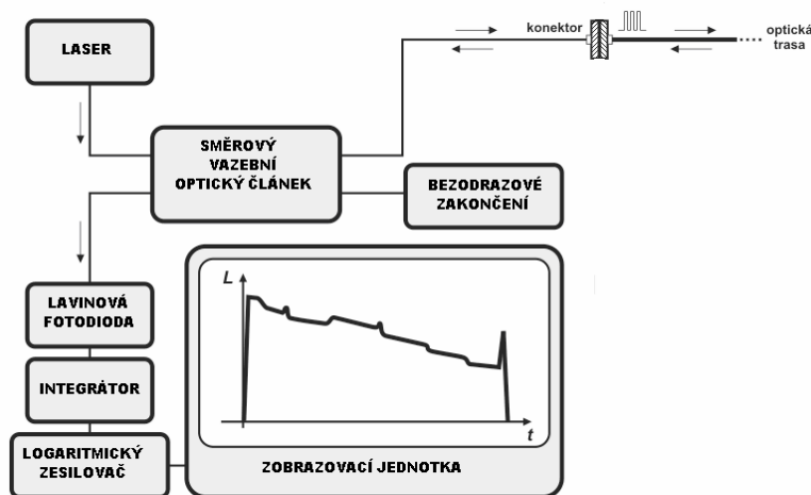
Jako optický izolátor funguje rovněž polarizační rotátor využívající Faradayova jevu.

5.7. Měření optických vláken

Při měření optických vláken je nejdůležitějším parametrem útlum, který nabírá signál při průchodu optickou trasou. Tento útlum je možné předem určit z parametrů jednotlivých komponent tvořících celou trasu a dodržováním všech pokynů při instalaci není důvod tyto teoretické předpoklady nesplnit. Nicméně na trase může dojít během instalace, nebo i po ní, k nežádoucím vlivům zvyšující celkový útlum. Tyto vlivy se kvalifikují jako závady a poruchy.

5.7.1. OTDR

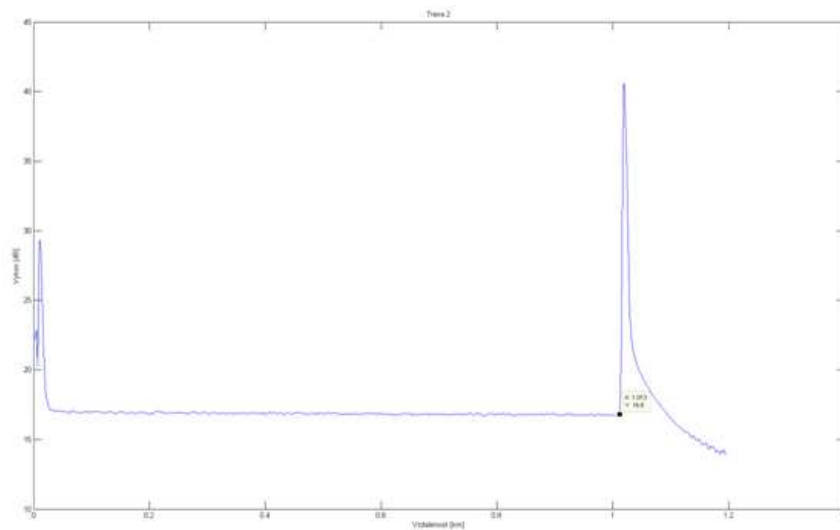
Základní útlum je možné na konci trasy naměřit optickými měřiči, ale tato hodnota stanoví pouze celkový útlum a neřekne nic o místech, kde dochází k útlumům. Proto se při zjišťování parametrů optických tras využívá reflektometrie. V tomto případě se jedná o optickou reflektometrii OTDR (Time-Domain Reflectometry).



Obr. 5.14: Obecné schéma OTDR.

Princip činnosti OTDR spočívá ve vygenerování pulsu a jeho postupu optickým vláknem. Pokud pulz narazí na nehomogenitu (porucha, konec vlákna) v trase, dojde na tomto rozhraní k vytvoření odrazu. Odraz putuje zpět, tedy opačným směrem, než původní pulz. V reflektometru se tento pulz vyhodnotí a dále zpracuje. Zařízení počítá s časem, který uplynul od vyslání pulzu po přijetí jeho odrazu a následně určí vzdálenost a útlum dané nehomogenity. Některá zařízení, vybavená analýzou událostí, jsou schopna přímo určit ze všesměrového

rozptylu, o jaký typ nehomogenity se jedná.



Obr. 5.15: Ukázka výstupu OTDR na měřené trase 1 km.

Na Obr. 5.15 je zřetelně vidět, jakým způsobem je možné pomocí OTDR detekovat nehomogenity na trase, způsobené Raylingovým rozptylem – ostré špičky na počátku a konci měřené trasy, které odpovídají odrazům na rozhraních konektorů.

Optický pulz je vyslán z laseru do zkoumaného optického spoje pomocí vazebního optického členu (dělič optického svazku). Zpětně odražené nebo rozptýlené záření se vrací trasou zpět a přes vazební člen je detekováno lavinovou fotodiódou. Následně je signál veden do integrátoru, kde je z důvodu velmi nízké úrovně signálu (-45 až -60dB) velmi zatížen šumem. Proto je nutné provést průměrování, aby se z daného signálu dal separovat užitečný signál.

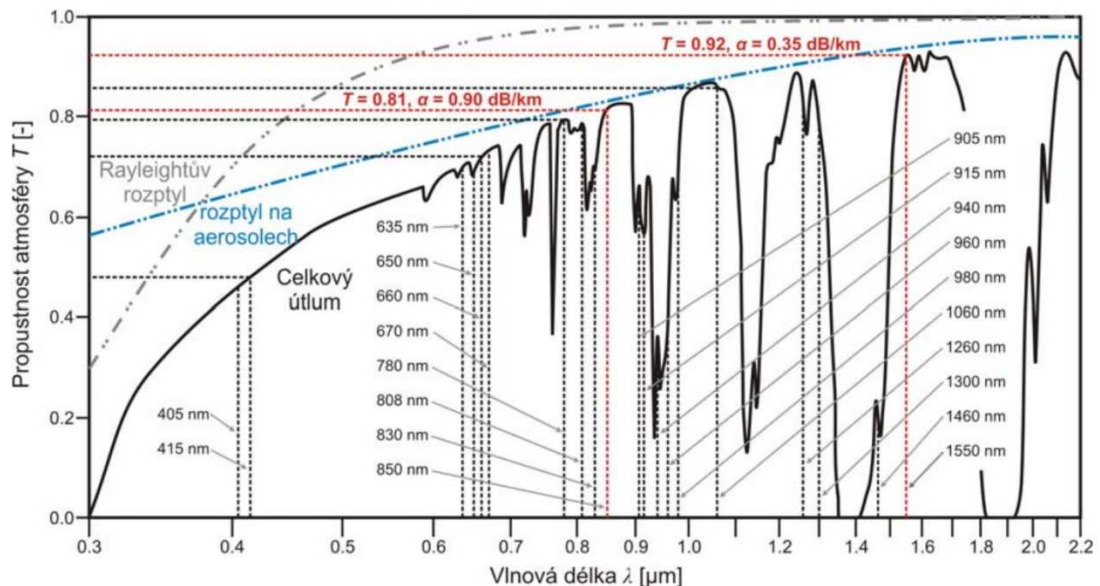
6. POPIS SPOJE

V teoretické části byl optický bezkabelový spoj popsán pouze teoreticky a to matematicky stacionárně a statisticky. Nicméně při návrhu FSO a následné realizaci, je nutné k dané problematice přistoupit v několika bodech:

1. **Volba vhodných optických prvků** – laserová dioda, optická vlákna, spojky, izolátory, WDM, čočka vysílače, přijímací fotodioda
2. **Analyzovat a vyhodnotit útlumy vznikající průchodem optickou soustavou** – výkonové ztráty zapříčiněné průchodem optickými prvky, útlumové jevy spojené s průchodem přes atmosféru
3. **Volba vhodných laserových diod** – limitní parametry, práce na vlnových délkách 850 nm a 1550 nm
4. **Prozkoumat rozložení optické intenzity v místě apertury** – přijímací a vysílací část
5. **Návrh a realizace spoje pro praktické měření** – ověření výsledků získaných teoretickým výpočtem a simulacemi ve vhodném programu

6.1. Optické zdroje

Jako optický zdroj je možné použít polovodičová optické zdroje, např. LED diody a laserové diody, popř. jiné typy laserů (Fabry-Perot, VCSEL). V současnosti jsou nejpoužívanějším optickým zdrojem laserové diody. Důvodem je požadavek na velký dosah, který u LED diod není tak vysoký, jako u LD kvůli nižšímu dosahovanému výkonu.



Obr. 6.1: Propustnost 1 km čisté atmosféry se zvýrazněním vlnových délek komerčně vyráběných laserových diod [6].

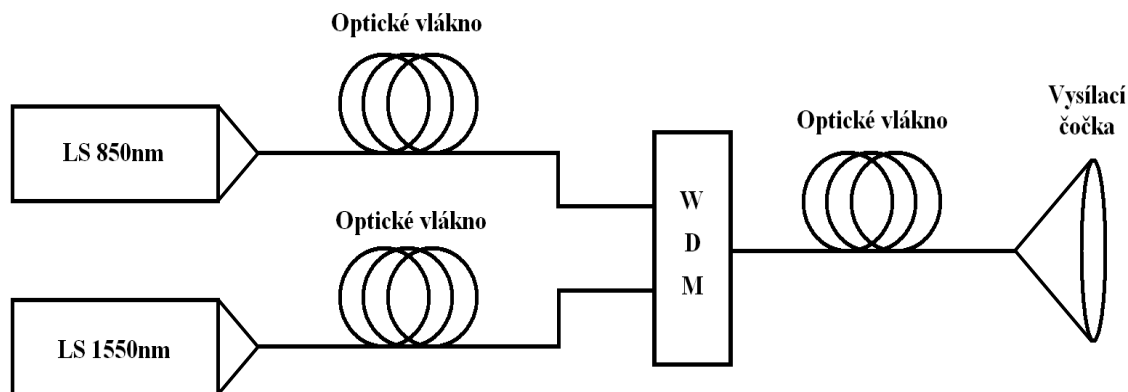
Velmi důležitým pro FSO je nalezení vhodné vlnové délky, která bude co nejméně ovlivňována útlumy a turbulencemi atmosféry. Od toho záměru se však odvíjí další požadavky (dostupnost, cena, limitní parametry, atd.).

V grafu na Obr. 6.1 jsou patrná dvě nejpoužívanější atmosférická okna v okolí 850 a 1550 nm. Zaměříme-li se na šířku spektrální čáry použitého optického zdroje vidíme, že rozložení optické intenzity u LED diody s šířkou spektrální čáry (řádadesítek nm) může zasahovat i do oblastí s vysokým útlumem způsobeným rozptylem na molekulách plynů obsažených v atmosféře. Těchto vlnových délek je však nutné se vyvarovat i při použití laserových diod s úzkou spektrální čarou (řádu jednotek nm), neboť se jejich centrální vlnová délka může v jistém

6.2. Návrh spoje

Návrh spoje je vytvořen na základě teoretických poznatků a požadavků pro duální spoj. Návrh a simulace však budou probíhat pouze pro vysílací stranu a to z důvodu již sestrojené přijímací části.

Nejdůležitější částí na vysílací straně je volba světelných zdrojů, pracujících v požadovaných oknech s vlnovými délkami 850nm a 1550nm. Dalším prvkem jsou optická vlákna, kterými bude možné optický signál vést k vysílací soustavě. Aby bylo možné sledovat intenzitu optického výkonu na výstupu pouze s jedním módem, je nutné použít jednomodová optická vlákna. Standardně se pro vlnové délky pod 1300nm používají multimodová vlákna, nicméně v tomto případě nutné dodržet podmínku jednomodovosti a to s přihlédnutím k výkonovým ztrátám. Výkonové ztráty by však neměly dle experimentálního měření přesáhnout hodnotu 1dB.



Obr. 6.2: Blokové schéma duálního optického spoje.

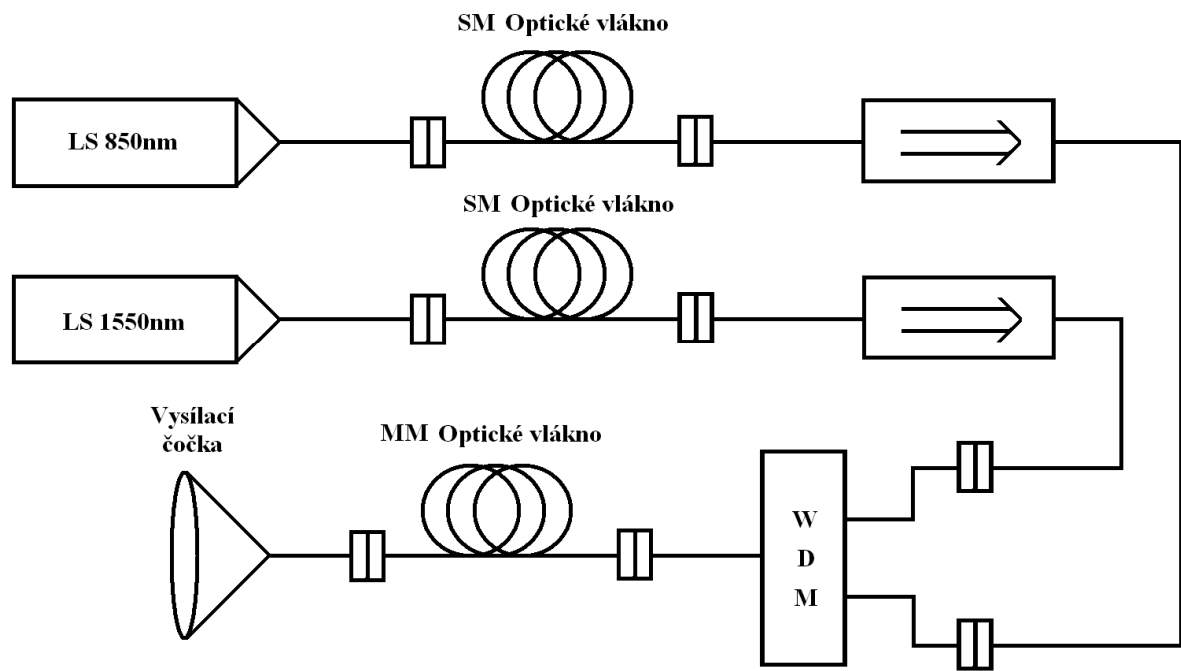
Dalším prvkem následujícím v optické trase zařízení, které je schopné přenášet shodně oba optické signály o rozdílných vlnových délkách. Nabízí se použití dvou pasivních optických prvků slučujících optický signál a to prvky coupler a WDM. Oba tyto prvky plní stejnou funkci, nicméně konstrukčně se jedná o prvky naprosto odlišné. Coupler je pasivním představitelem směrové odbočnice. Zatímco WDM je vlnový multiplex, sloužící k rozdělení nebo sloučení více vlnových délek. Proto je nutné se důkladně zaměřit na to, jaký z těchto prvků bude použit. Použití coupleru s těmito vlnovými délkami je problematické, protože coupler s vlnovými délkami 850/1550 se vyrábí jako multimodový a nežádoucím způsobem by ovlivňoval optický signál z hlediska navýšení počtu módů v místě, kde tento jev není plně žádoucí. Nehledě na zvýšenou hodnotu útlumu, jenž nastává použitím tohoto prvku. V ideálním případě neklesá hodnota vložného útlumu IL pod 3,5dB. Proto je vhodnější použití WDM.

Za WDM je možné použít MM optické vlákna a to proto, že v tomto místě je nutné přenášet obě vlnové délky současně a bez dalších nežádoucích útlumů. Dalším jevem u MM optických vláken je vybudování dalších módů, které jsou v tomto případě už zcela žádoucí a to kvůli svým vlastnostem při průchodu atmosférou a následné detekci na přijímací straně.

Následně je možné už vyslání optického signálu skrz vysílací optiku atmosférou směrem k přijímači.

Blokové schéma na Obr. 6.1 je pouze přibližné. Celé toto schéma je nutné ještě rozšířit o další prvky. Zcela nezanedbatelnou součástí propojování všech optických cest jsou optické konektory, které jsou nedílnou součástí všech spojení a díky kterým je navázání optického signálu mezi vlákny spolehlivé a s minimálními útlumy.

Dalším prvkem, který je v optických trasách velmi užitečný, je optický izolátor. Optický izolátor brání zpětnému průchodu odraženého optického výkonu. Tyto odrazy negativně působí na světelné zdroje a proto je žádoucí je do jednotlivých zapojení vkládat.



Obr. 6.3: Blokové schéma duálního optického spoje rozšířené optické prvky v trase.

Takto doplněné blokové schéma (Obr. 6.2) už odpovídá reálnému zapojení vysílací soustavy. Přidanými optickými prvky a spojkami je zapojení kompletní a je možné provést simulovat.

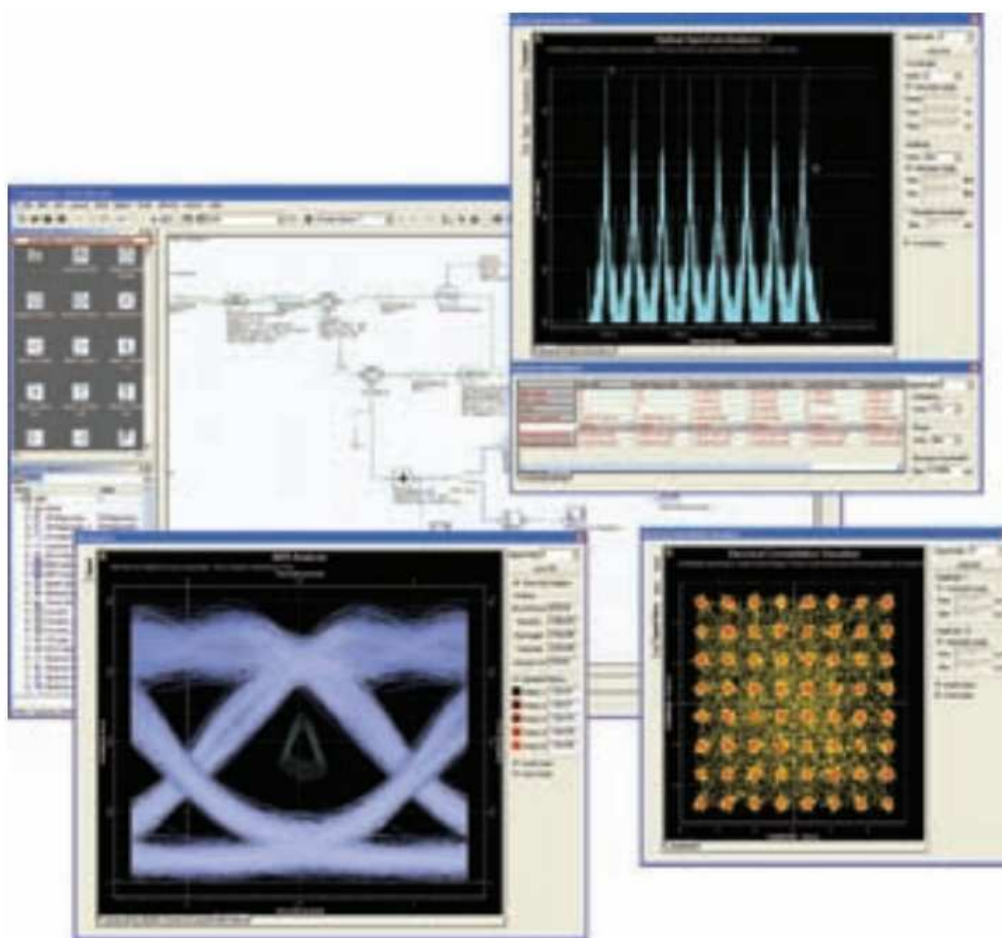
7. SIMULACE

Vývoj simulačních programů je zaznamenán od 60-tých let a probíhal především na technických univerzitách ve Velké Británii, Francii, USA a Kanadě. S postupem času se vývoj přesunul z univerzit do firem, které tento vývoj mohly urychlit a financovat.

Současné univerzální simulační programy již mají velice podobnou ustálenou strukturu, protože musí zajišťovat určité funkce. Většina těchto programů je založena na využívání sekvenčně-modulárních metod, a přestože jsou některé operace u různých programů řešeny jinak, mají mnoho společných rysů.

7.1. Optisystem

Důkladným rozбором a shrnutím všech informací o několika simulačních programech a také s přihlédnutím k možnosti realizace daného zapojení s pomocí VSB v Ostravě padla volba na simulační program Optisystem. Simulační sada Optisystem se po důkladném uvážení projevila jako nejvhodnější pro potřeby v oblasti simulace a ověřování všech parametrů duálního bezkabelového spoje.



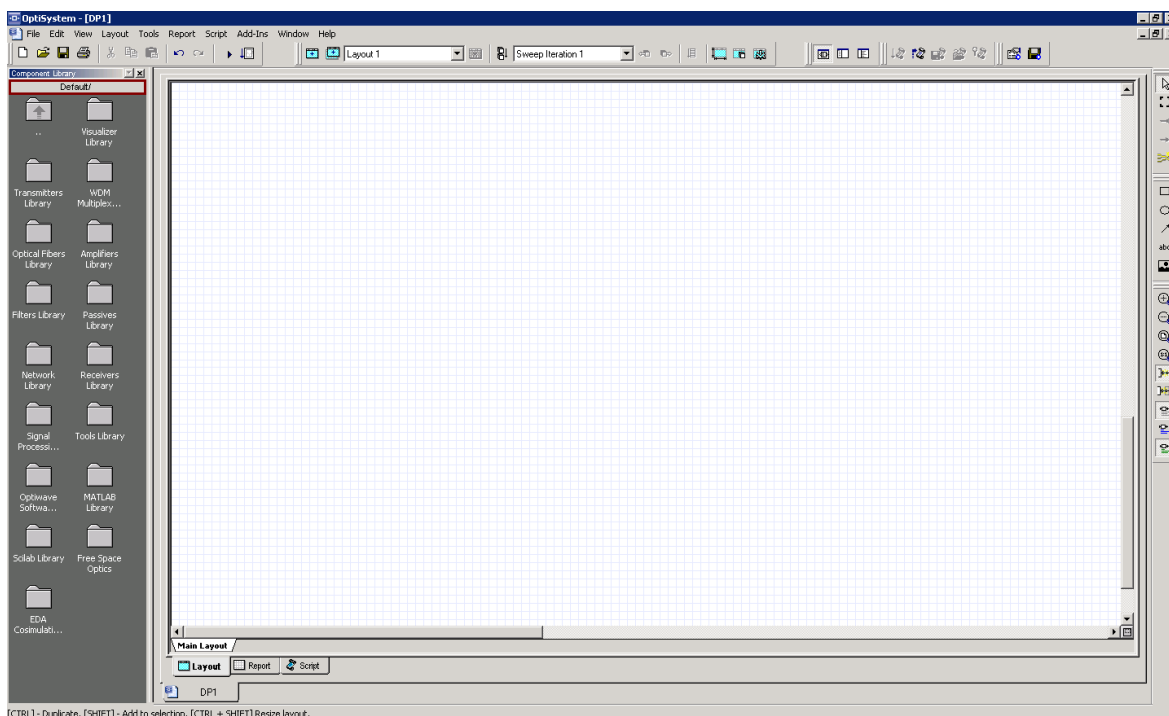
Obr. 7.1: Výstupy simulace realizované v Optiwave [33].

OptiSystem minimalizuje časové požadavky a snižuje náklady související s projektem optických systémů, linek a komponent. OptiSystem je inovativní, rychle se vyvíjející, a výkonný softwarový nástroj pro návrhy, které umožňují uživatelům plánovat, ověřovat a simulovat téměř každý typ optického spoje, nebo v dané přenosové vrstvě. Široké spektrum optických sítí LAN, SAN, MAN až po ultra-dlouhé vzdálenosti. Nabízí přenosovou vrstvu optických komunikačních systémů, konstrukci a plánování libovolných částí na úrovni systému, a vizuálně prezentuje scénáře a analýzy.

7.2. Základní popis práce s Optiwave

Optiwave je jako simulační nástroj velmi podobný ostatním simulačním programům. Nicméně pokrývá poměrně širokou oblast sdělovací techniky a je tak jedním z nejkompaktnějších software.

Po spuštění programu se objeví uživatelské prostředí s dominantní pracovní plochou. Ve vrchní liště je standardní nabídka pro ovládání funkcí programu, které přímo nesouvisí se simulacemi. Po levé straně se nachází okno s názvem *Component Library*, ve kterém je možné najít všechny komponenty pro tvorbu komunikačních kanálů a optických tras. Široká nabídka jednotlivých prvků nabízí úplné pokrytí na jakékoliv zapojení. Na pravé straně je možné najít ikony, které slouží pro práci v pracovním okně. Jedná se především o prvky zvětšení, zmenšení, označení, komentování, atd.

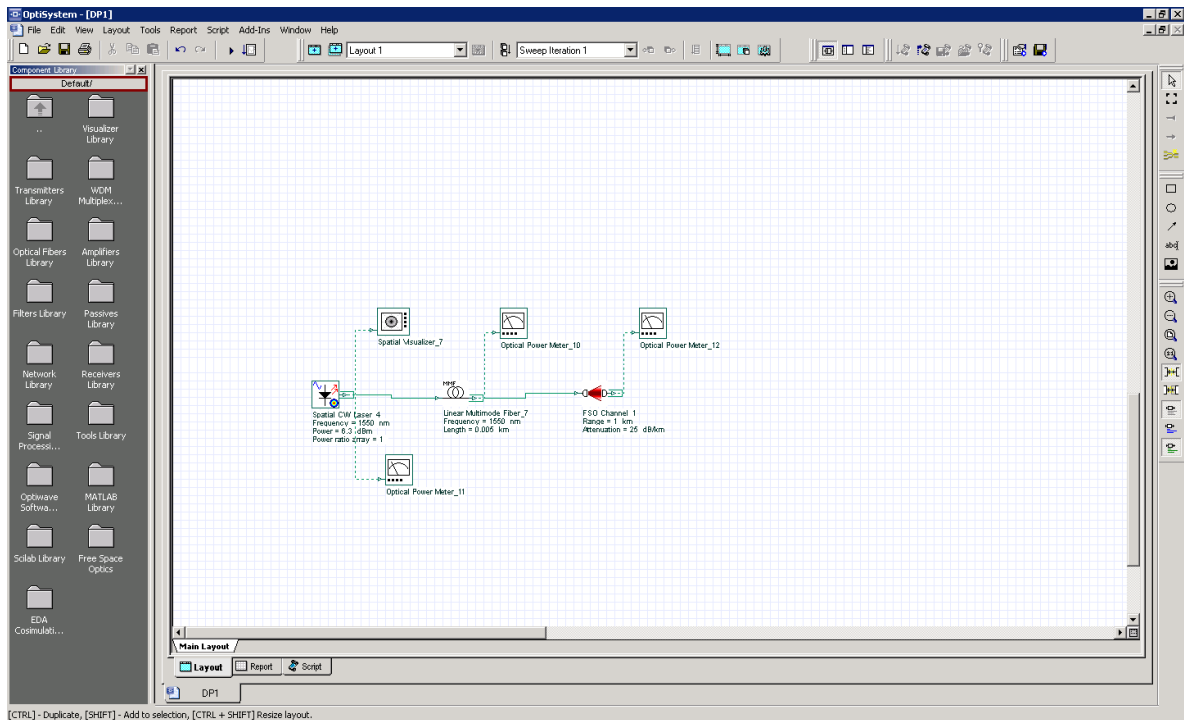


Obr. 7.2: Uživatelské prostředí programu Optiwave.

Při tvorbě zapojení se postupuje zcela jednoduchým způsobem:

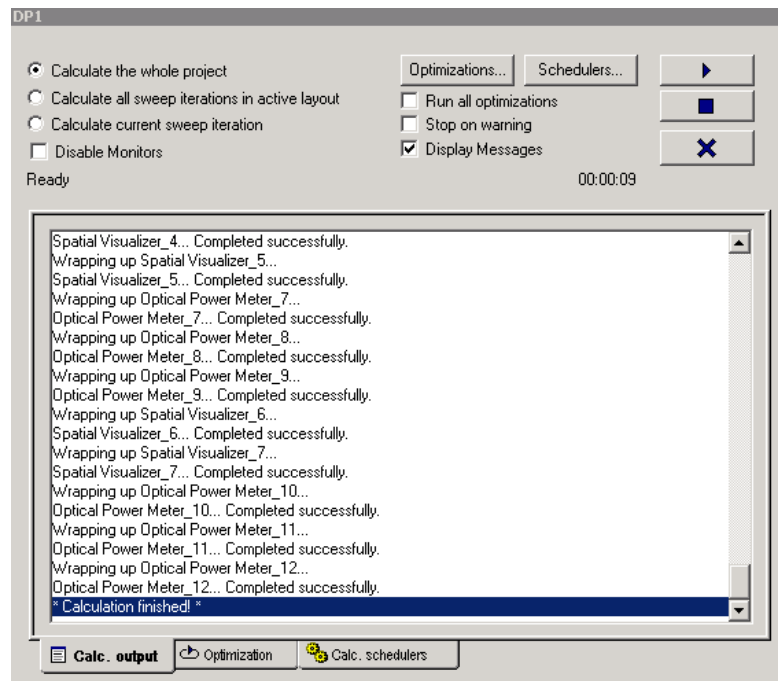
- Výběr komponenty z nabídky.
- Přesun z okna *Component Library* na pracovní plochu.
- Nastavení katalogových (libovolných) hodnot každé komponenty.
- Přehledné uspořádání zapojení.
- Propojení dílčích částí do jednotného celku.
- Spuštění výpočtu.
- Kontrola výsledků simulace s měřením.

Ukázka zapojení, kterou je možné sestavit podle instrukcí výše, je uvedena na Obr. 7.3. Jednotlivé komponenty je žádoucí sestavovat podle určitých pravidel. Ve složitějších zapojeních totiž dochází k vytvoření nepřehledných a velmi obtížně dohledatelných spojení, která nepříznivým způsobem ovlivňují celé zapojení. Na vině je většinou programový nástroj, který se vytváří spojení mezi nejbližšími komponentami, což není vždy nejvhodnější.



Obr. 7.3: Uživatelské prostředí programu Optiwave.

U takto vytvořeného zapojení doplníme parametry jednotlivých komponent a je možné provádět simulaci. Simulace je spuštěna tlačítkem **RUN** (šipka v horní liště).



Obr. 7.4: Okno zobrazující průběh simulace.

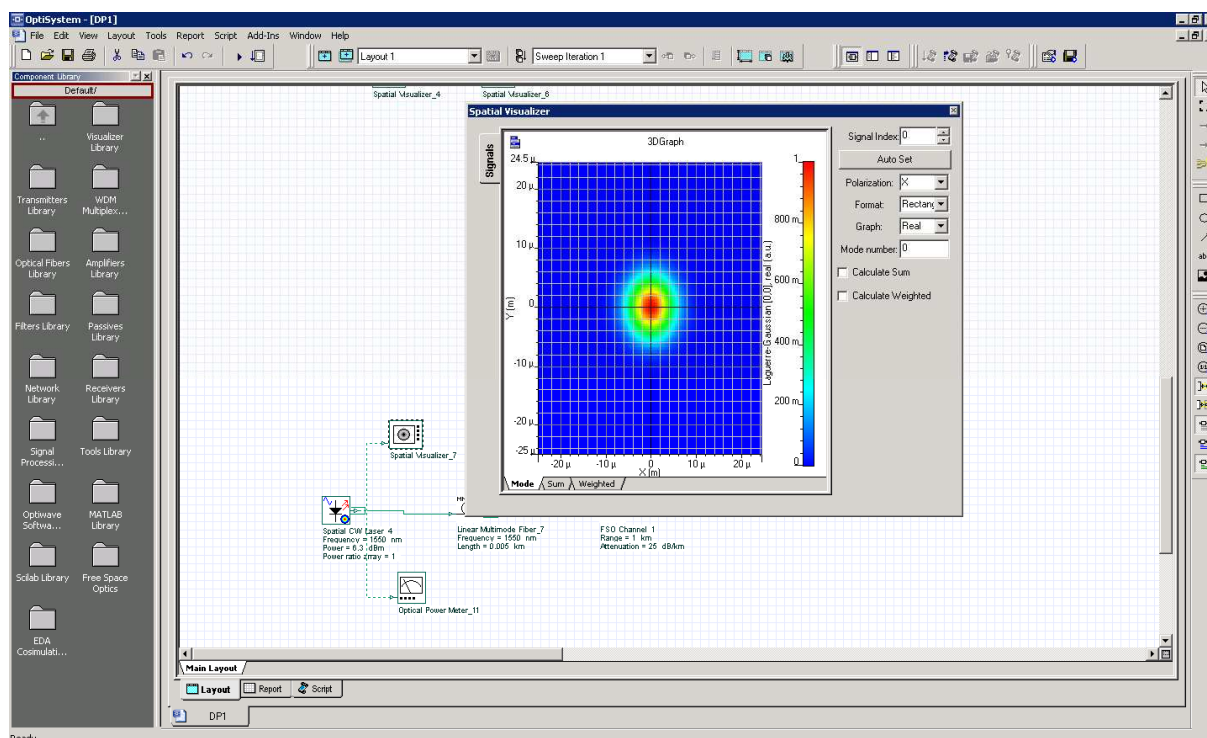
Po stisku tohoto tlačítka však okamžitě nedojde k samotné simulaci, ale spustí se okno (Obr. 7.4) s možností výběru typu simulace.

V tomto okně je také možné vytvářet optimalizace daných zapojení. Pro reálná zapojení optických spojů je však možné optimalizovat pouze výstupní výkony laserů. Ostatní komponenty jsou pevně stanoveny výrobci.

Po spuštění simulace program počítá jednotlivé parametry, které jsou definovány měřicími bloky a u kterých je předem dáno, co každý tento blok měří. V zapojení na Obr 7.4 jsou uvedeny bloky pro měření

výkonových úrovních a také rozložení optické intenzity. Nicméně měřících bloků nabízí Optiwave velké množství a je možné měřit jakýkoliv parametr.

Výpočet je charakterizován vypsáním prvku v textovém poli simulačního okna. Po dokončení simulace se objeví nápis ukončující celý proces – *Calculation finished*. Následně je možné si u jednotlivých měřících bloků prohlédnout výsledky.



Obr. 7.5: Okno zobrazující průběh simulace.

Na Obr. 7.5 je vidět výsledek po dokončení simulace. Konkrétně se jedná o zobrazení optické intenzity FP laseru s vlnovou délkou 1550nm. Velmi zřetelně je vidět, že laser bude navazován do SM optického vlákna a šířit se bude pouze jeden mod. Tento fakt je potvrzen i rozměry odpovídajícími SM optickému vláknu, tedy průměr jádra rovnající se 9μm.

7.3. Simulace energetické bilance v jedné optické větvi (850nm)

Základní princip funkce simulací programu Optiwave byl objasněn v předchozí kapitole a proto je nyní možné začít s konkrétním návrhem reálného spoje. Před samotnou simulací je však nutné znát jednotlivé komponenty, ze kterých se daný duální spoj bude skládat, aby bylo možné provádět adekvátní simulace. Jde především o zjištění katalogových hodnot jednotlivých prvků v zapojení. Hlavními hledanými parametry jsou:

- Parametry optického zdroje signálu – vlnová délka a výkon
- Optická vlákna – délka a útlum.
- Izolátor – vlnová délka, vložný a zpětný útlum.
- WDM – vlnová délka a útlum.
- Vysílací čočka – celkové parametry.

Zdroj optického signálu bude použit laserová dioda (LD) s optickým pigtailem. Přesněji se jedná o LD LP852-SF30 (Obr. 7.6) a všechny technické specifikace jsou uvedeny na Obr. 7.7.



Obr. 7.6: LD LP852-SF30 [30].

LP852-SF30	
LD Reverse Voltage (Max)	2 V
PD Reverse Voltage (Max)	20 V
Optical Output Power	30.0 mW (Typ.) 40.0 mW (Max)
Operating Temperature	0 to 50 °C
Storage Temperature	-10 to 65 °C
Pin Code	9A
Fiber	SM800-5.6-125
Connector	FC/PC

LP852-SF30			
	Min	Typical	Max
Wavelength	847 nm	852 nm	857 nm
Threshold Current*	-	20 mA	50 mA
Slope Efficiency*	0.15 W/A	0.29 W/A	-
Operating Current @ $P_O = 30 \text{ mW}^*$	-	115 mA	160 mA
Operating Voltage @ $P_O = 30 \text{ mW}^*$	-	1.9 V	2.2 V
Monitor Current @ $P_O = 30 \text{ mW}^*$	0.10 mA	0.15 mA	1.0 mA

*Temperature = 25 °C

Tab. 7.1 Parametry LD pro vlnovou délku 850nm [30].

Odlišností od zavedených zvyklostí navazování výkonu tohoto optického zdroje s touto vlnovou délkou do SM vlákna, což je popsáno v kapitole 6.2. U tohoto typu laserové diody však není přesně definována velikost výstupního výkonu. Je dáno rozmezí výkonu, ve kterých je možné tuto LD provozovat. Aby k takovému řízení mohlo dojít, existují dva způsoby a to:

- Nastavování velikosti proudu na ampérmetru přes ochranný odpor.
- Řízení pomocí proudového a teplotního kontroleru.

Těmito způsoby je možné nastavení hodnoty výstupního výkonu v rozmezí pracovního okna laserové diody. Díky poměrně širokému oknu byla zvolena hodnota výstupního výkonu $P_{LD}=+10\text{dBm}$.

Dalším prvkem v optické trase jsou optické vlákna (podrobněji popsána v kapitole 5), které jsou definována jako SM/MM a jejichž parametry je délka a s ní spojený útlum (dB/km). Použitá konektory pro typ SM OV jsou:

- FC/PC
- FC/APC

Tato vlákna jsou délky 1m a propojení je realizováno přes FC spojky. Problém by mohl nastat při spojení ferulí typu PC a APC, který by vnášel do zapojení poměrně nezanedbatelný útlum. Proto je důležité dodržet

správnost propojení těchto optických vláken. Použitá OV jsou výrobky THORLABS P3-980A-FC-1 a P1-SMF28E-FC-1, 9/125 μ m. U těchto vláken je udáváný útlum na vlnové délce 980nm, nicméně je možné tuto informaci brát jako relevantní a využít ji pro vlnovou délku 850nm. Velikost útlumu je 3dB/km. Pro vlnovou délku 1550 je to 0,3dB/km.

MM je OV vlákno typu 62,5/125 s gradientním indexem lomu M31L01. Typickou hodnotou útlumu MM vlákna je 2,6dB/km.

Pro omezení zpětného odrazu se používá izolátor. Izolátory jsou dvojího druhu a to singlemodové a multimodové. Ve větvi pro 850nm je použit *Terbium Gallium Garnet Based Polarization Independent 850/980/1060 Optical Isolator*. Parametry jsou uvedeny v Tab. 7.2.

OI Series TGG based PI Isolator		Min	Typical	Max	Unit
Operation Wavelength	850	840		860	nm
	980	970		990	
	1060	1050		1070	
Insertion Loss ¹			0.8	1.2	dB
Wavelength Dependent Loss				0.2	dB
Isolation	850	22	27		dB
	980/1060	25	30		
Polarization Dependent Loss			0.1	0.2	dB
Polarization Mode Dispersion				0.2	ps
Return Loss		50			dB
Optical Power Handling			300		mW
Storage Temperature		-10		60	°C
Fiber Type		See order information			
Package Dimension	Standard 850	(L)61x(W)34x(H)33			mm
	Standard 980/1060	(L)83x(W)34x(H)33			
	Mini Size 980/1060	(L)61x(W)34x(H)33			

Tab. 7.2: Parametry optického izolátoru pro vlnovou délku 850nm [32].

Prvkem, který je pouze pro simulaci na vlnové délce 850nm redundantní, je WDM. Nicméně i tento prvek je nutné uvažovat, protože je nezbytnou součástí celého zapojení a plní hlavní funkci a to průchod optických signálů s různými vlnovými délkami a velmi nízkým útlumem. Tato vlastnost je však vykoupena složitostí výroby a s ní spojenými vyššími pořizovacími náklady. Vláknové provedení WD202A je na Obr.7.7.



Obr. 7.7: WDM 980/1550nm [30].

ITEM #	WD202A2	WD202A	WD202B	WD202C	WD202D
Operating Wavelength	660/1310 nm	980/1550 nm	1310/1550 nm	1480/1550 nm	1600/1960 nm
Insertion Loss (Max)*	0.5 dB	0.55 dB	0.5 dB	0.95 dB	0.80 dB
Isolation (Min)	19 dB		16 dB	10 dB	15 dB
Polarization-Dependent Loss	<0.1 dB			<0.3 dB	<0.2 dB
Wavelength Bandwidth	±40.0 nm @ 1310 nm	±10.0 nm	±20.0 nm	±5.0 nm	±20.0 nm
Directivity	36 dB		50 dB		45 dB
CW Power (Max)	300 mW				300 mW**
Operating Temperature	0 to 60 °C	-40 to 85 °C			-40 to 75 °C
Storage Temperature					-40 to 75 °C
Fiber Type	SMF-28e+	Flexcore 1060		SMF-28e+	SMF-DS
Fiber Lead Length					1 m
Jacket	Ø900 µm Loose Tubing				None

*Insertion loss will change depending on connector type (specified without connectors)

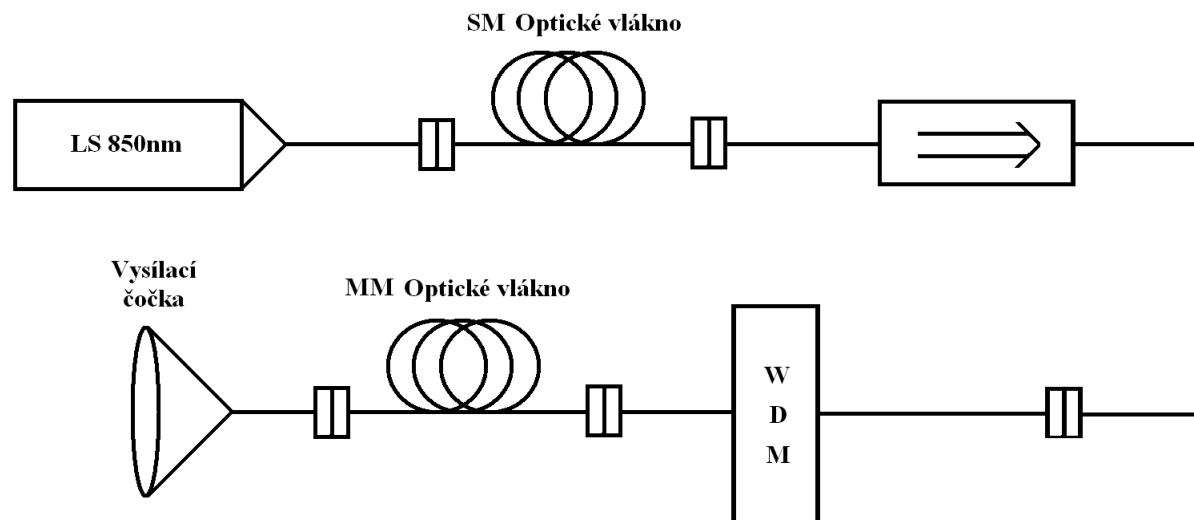
**WD202D can be used with higher powers under certain operating conditions.

Tab. 7.3: Parametry WDM 980/1550nm [30]..

Specifikace a parametry jsou uvedeny v Tab. 7.3. Tento typ WDM není primárně určen pro vlnovou délku 850nm. Nicméně tento fakt je eliminován zvětšeným výkonem signálu, který pokryje výkonové ztráty vlivem průchodu přes tento optický prvek.

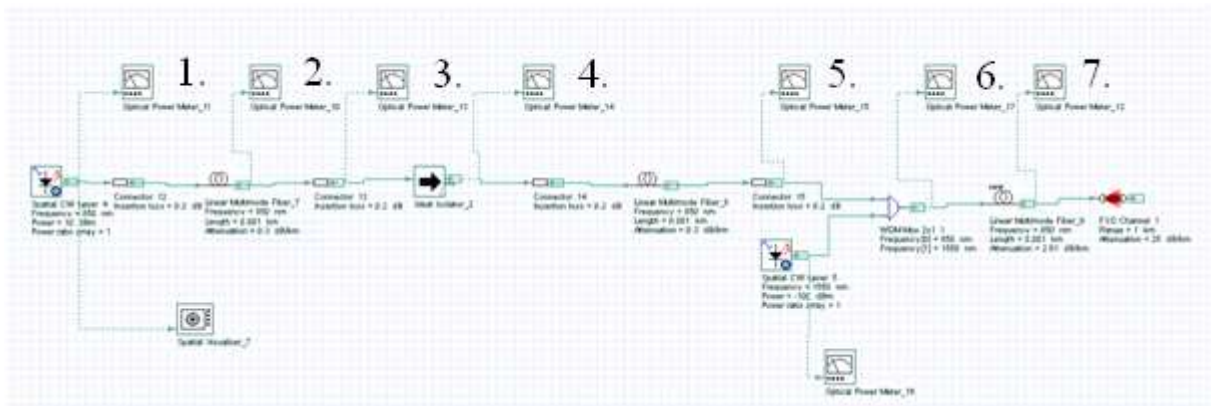
Pokud se zaměříme na vysílací čočku, naprosto se neliší od standardních, které se již používají v duálních spojích. Proto není v této práci hlouběji zkoumána.

Když už jsou známy všechny parametry všech komponent zapojení, je možné sestavit náhradní model a započít simulace. Blokové schéma je na Obr. 7.8.

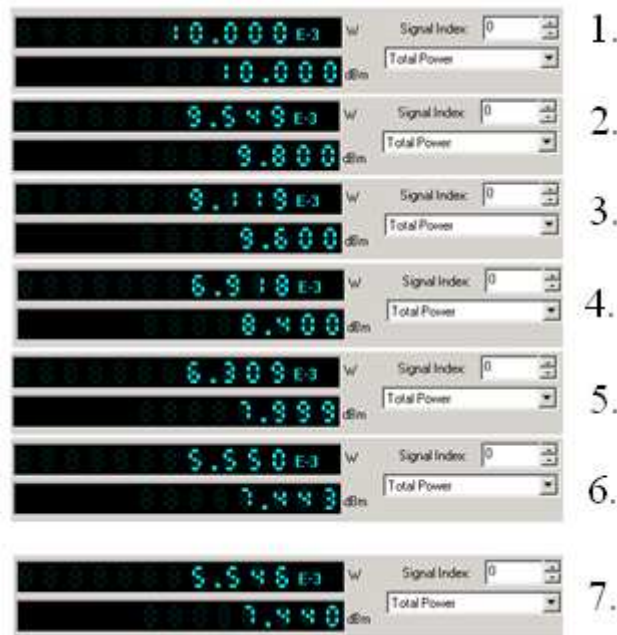


Obr. 7.8: Blokové zapojení větve s 850nm.

V tomto blokovém schématu uvedena pouze dvě optické vlákna, což v reálném zapojení s takto malým množstvím optických vláken nepůjde. Nehledě na rozdílné typy konektorů. Nicméně se bude jednat o minimální změny a tyto změny budou hlavně útlumové a to v rozpětí několika málo desetín dB.



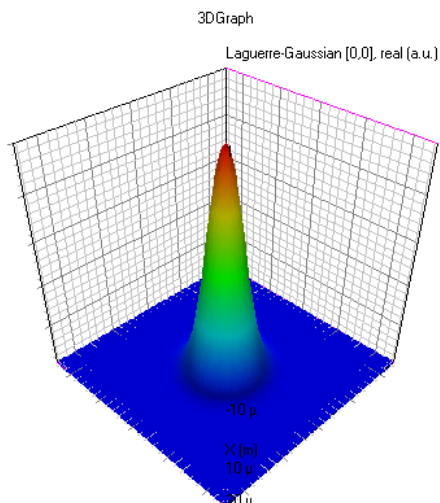
Obr. 7.9: Zapojení v programu Optiwave větve s 850nm.



Obr. 7.10: Hodnoty výkonu na jednotlivých prvcích zapojení větve s 850nm.

Na Obr. 7.9 je zapojení připravené k simulaci energetické bilance (850nm). Podle všech katalogových listů byly nastaveny hodnoty jednotlivých komponent a spuštěna simulace. Výsledky simulace, tedy velikosti výkonových bilancí, jsou uvedeny na Obr. 7.12. Z výsledků simulace je zřejmé, že program počítá s přesně definovanými hodnotami jednotlivých komponent a výsledky jsou proto zcela totožné s výsledky, které je možné dopočítat pouze pomocí katalogových listů. Hodnoty jsou uváděny chronologicky zleva doprava a nahoru a dolů.

I když se jednalo pouze o simulaci jedné větve (850nm), muselo být zapojení doplněno o další zdroj optického signálu na vstupu WDM, který vyžaduje dva aktivní vstupy. Hodnota však byla nastavena na minimální hodnotu a nedochází tak k nežádoucímu ovlivňování zkoumané větve.



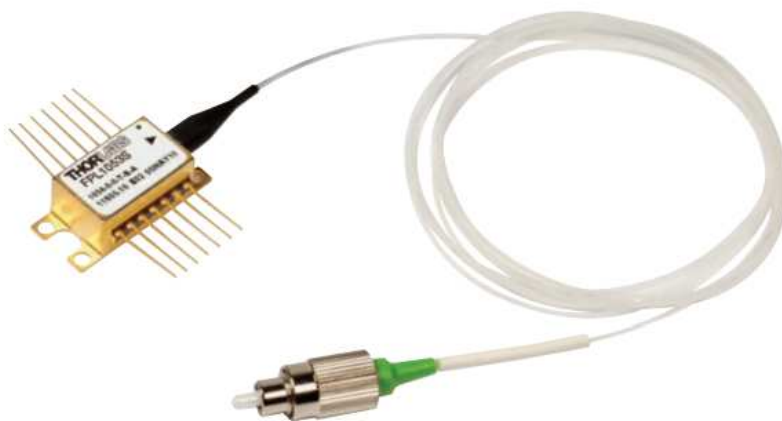
Obr. 7.11: Modové rozložení větve s 850nm.

Na Obr. 7.11 je zobrazeno rozložení optické intenzity na výstupu SM optického vlákna. U MM optického vlákna bohužel nejde sledovat rozložení optické intenzity na výstupu z vlákna směřujícího na vysílací čočku.

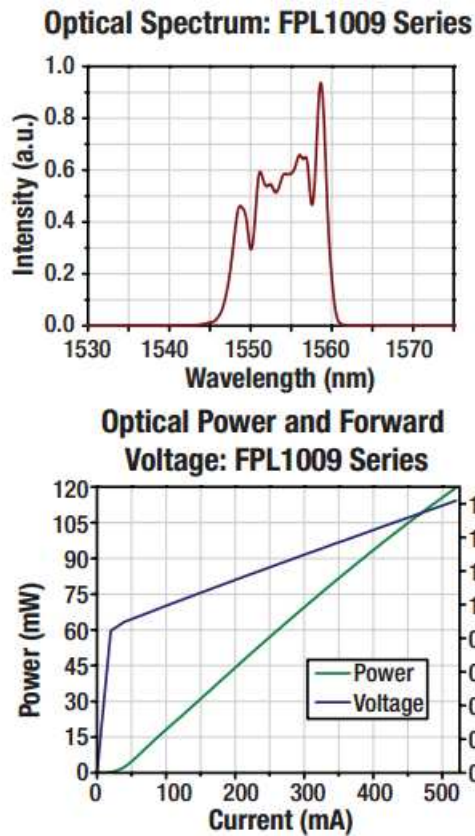
7.4. Simulace energetické bilance v obou optických větvích

Simulace obou optických větví bude probíhat podobně jako simulace v předchozím případě, tedy simulace pouze jedné optické větve. Nutností je opět zjištění všech parametrů každého prvku v zapojení. Většina prvků je však shodná a popis je popis jednodušší.

Jako zdroj optického signálu pro větev 1550nm byl použit Fabry-Perotův laser – FPL1053S (Obr. 7.15) v tzv. butterfly package. Výhody tohoto laseru v tomto uspořádání jsou vyšší hodnota výstupního výkonu a také užší spektrální čára. Dále je tu možnost proudové a teplotní kontroly.



Obr. 7.12: Fabry-Perotův laser (1550nm) [30].



Obr. 7.13: Parametry Fabry-Perotova laseru [30].

Dále je nutné ještě uvést parametry optického izolátoru. Tento izolátor je IO-H-1550FC a vyznačuje se polovičním útlumem oproti izolátoru na vlnové délce 850nm, což je dáno rozdílnými disperzemi na jednotlivých vlnových délkách.

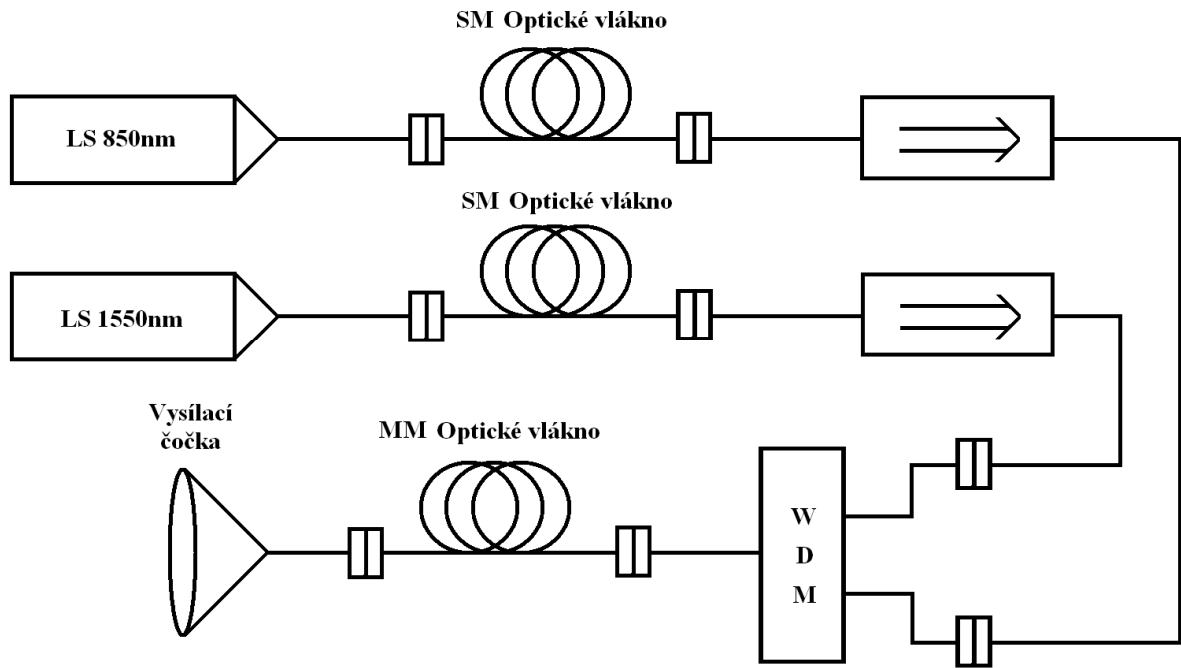
Specifications

- **Wavelength:** 1550 ± 20 nm
- **Power:** 0.3 W CW
- **Isolation:*** 35 – 40 dB
- **Insertion Loss:** 0.3 – 0.7 dB
- **PDL:** ≤0.10 dB
- **Return Loss:** >55 dB
- **Fiber:** SMF-28e+

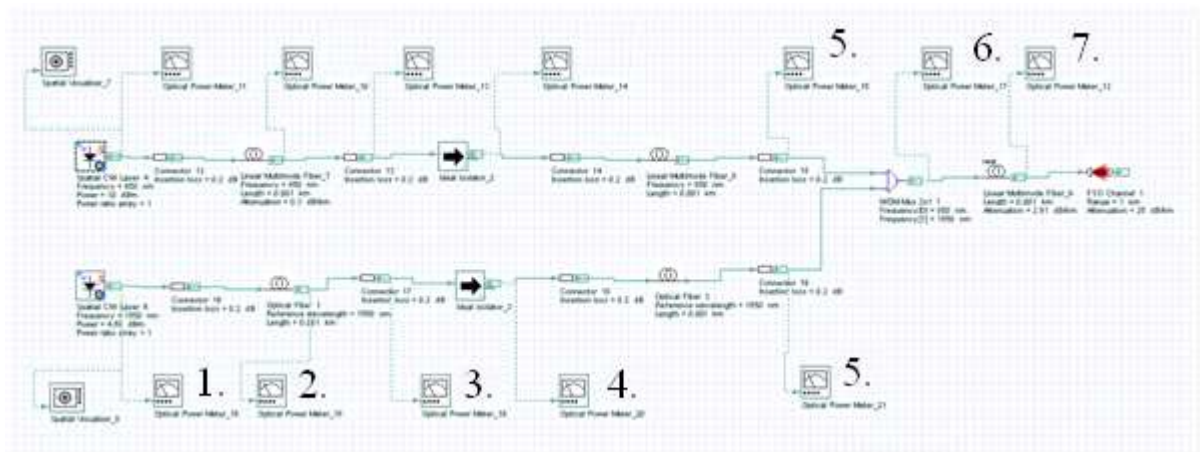
*Isolation is both wavelength and temperature dependent (not for use in pulsed laser applications)

Obr. 7.14: Parametry optického izolátoru ve větvi 1550nm [30].

Protože jsou už známy všechny prvky, které budou tvořit výsledný duální optický spoj, je možné začít doplňovat větev 850nm o větev s prvky pro 1550nm.

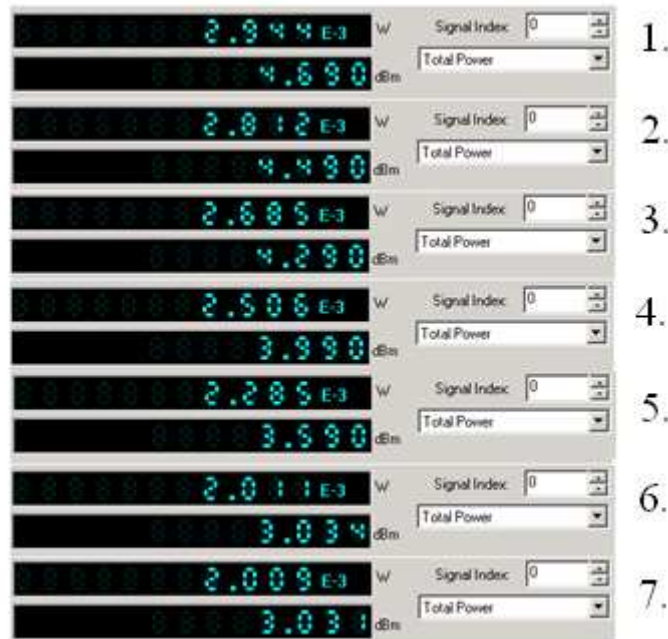


Obr. 7.15: Blokové zapojení duálního optického spoje.



Obr. 7.16: Zapojení duálního optického spoje v programu Optiwave.

Duální optický spoj funguje tak, že oba zdroje optického signálu vyzářují v určitých intervalech a to vždy tak, aby aktivní byl pouze jeden ze zdrojů. Proto je nutné provádět energetickou bilanci pro každou větev zvlášť a to zejména v jejich společné části, tedy za prvkem WDM.



Obr. 7.17: Hodnoty výkonu na jednotlivých prvcích zapojení větve s 1550nm.

Z výsledků je opět možné vidět, že pokud se srovnají katalogové hodnoty jednotlivých prvků, všechny simulované hodnoty naprosto přesně odpovídají.

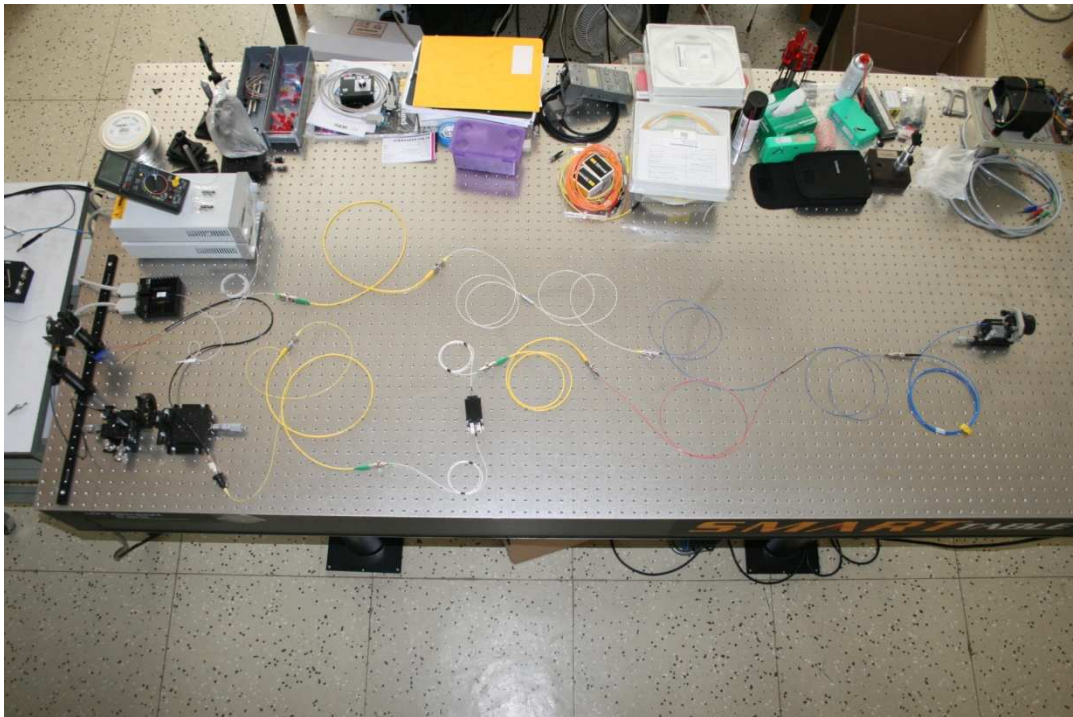
7.5. Zhodnocení simulace a výsledků

Program Optiwave je schopný vytvořit energetickou bilanci na základě zadaných vstupních parametrů a také je schopný zobrazit rozložení optické intenzity v kterémkoliv místě optické trasy. Dalšími funkcemi je možné měnit polarizace optických zdrojů, zkoumat vliv difrakce, atd. Negativním jevem je problematické, až skoro nemožné zkoumání rozložení optické intenzity u MM optických vláken. Jedinou možností je nasimulovat výsledky v jiné části programové sady Optisystem. Nicméně v tomto modulu je nutné znát naprosto detailně většinu všech optických prvků a ne vždy je možné dané parametry zjistit. Dalším problémem je obtížná, až skoro nemožná konverze do modulu Optiwave.

Problematikou rozložení optické intenzity v MM optických vláknech a jejímu zobrazení je plánováno se věnovat v navazující disertační práci.

8. EXPERIMENT

V této části diplomové práce bude sestaven reálný model zapojení a budou ověřeny všechny jeho parametry a ověřena funkčnost celého zapojení. Náznak toho, jak bude tento duální spoj vypadat, byl ukázán v předchozí kapitole. Zde byly rozebrány i jednotlivé technické parametry všech prvků, které je nutné uvažovat při použití. Následně provedené by měly být velmi přesným stavem, který by se měl objevit i při reálném měření.



Obr. 8.1: Duální optický bezkabelový spoj.

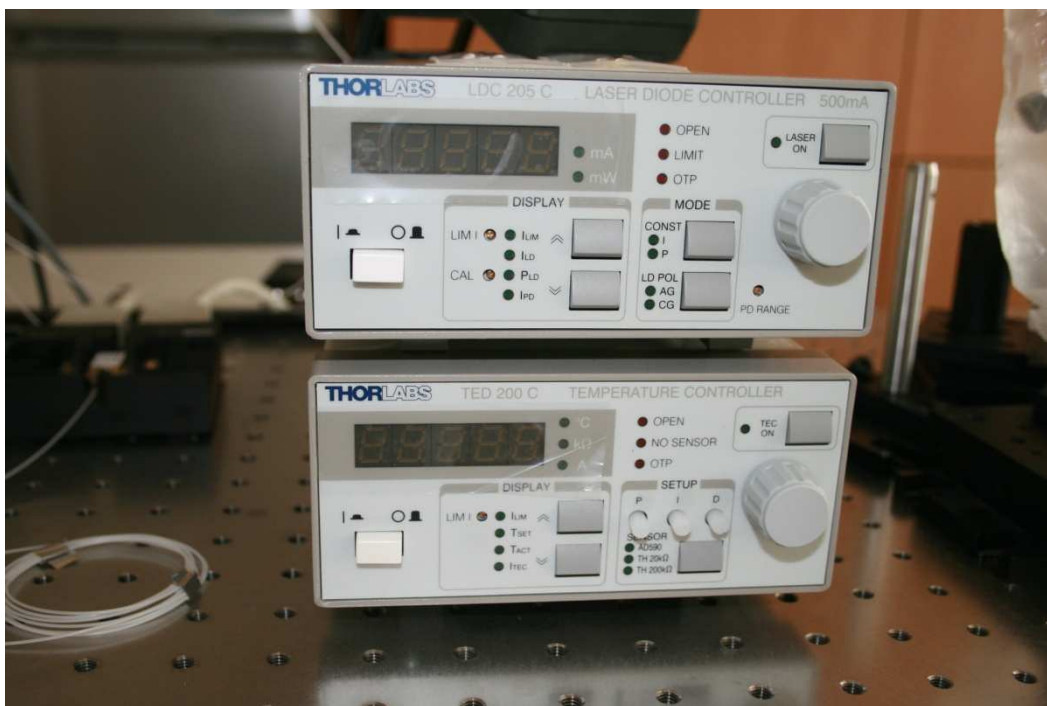
Na Obr. 8.1 je skutečné zapojení FSO. Toto zapojení je teoreticky realizováno jako simulační schémata v kapitole 7. Zatímco v simulacích není nutné zabývat řízením výkonu LD, konektorovým spojením nebo měřením optické intenzity v libovolném místě zapojení, v reálném prostředí je tento problém zcela běžný. To je vidět právě už při prvním pohledu na skutečné zapojení.

Na počátku optické trasy jsou LD, ale jejich výkon je sledován a regulován pomocí teplotního a proudového kontroléru a také zcela běžným způsobem a to řízením velikosti proudu LD přes ochranný odpor. Dále jsou viditelné různé barvy (modrá, zelená) konektorů optických vláken a pigtailů optických prvků. To ukazuje na typ spojení, tedy typ ferulí použitých na optickém vlákne. Protože každá spojka má jiné vlastnosti, nesmí docházet k tomu, aby v jednom spojení byly použity odlišné typy spojek.

Jak je uvedeno výše, při použití Fabry-Perotova laseru v konfiguraci butterfly package, je nutné použít kontrolery pro stabilizaci:

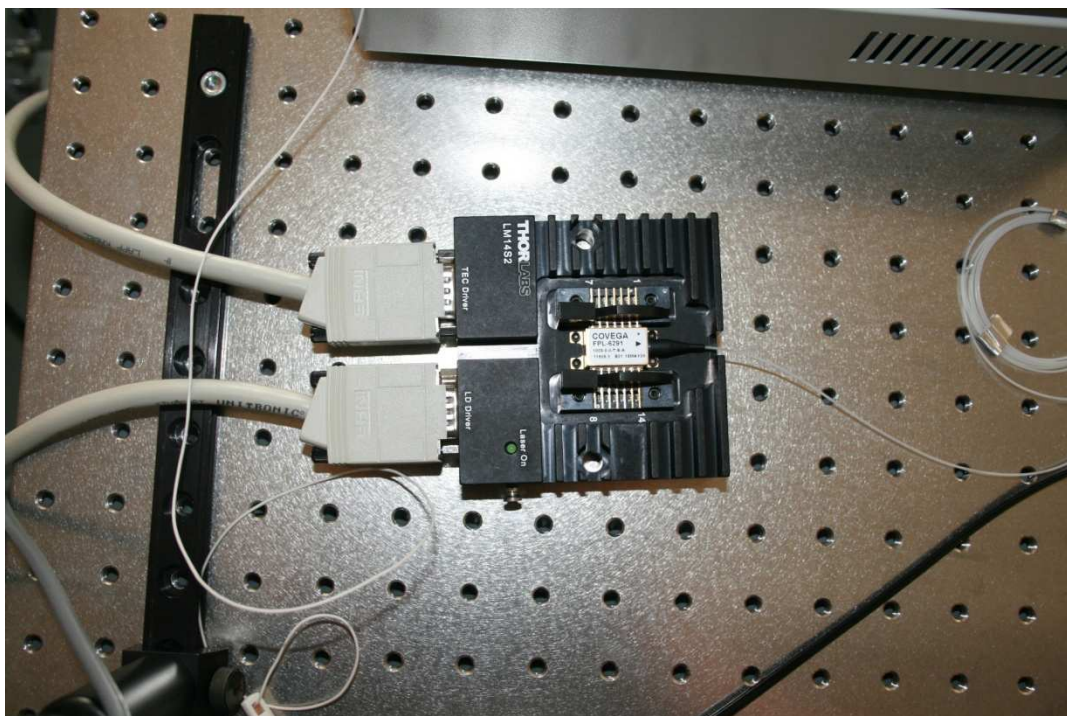
- **Teplotní stabilizátory** – sada ochranných funkcí a chybových ukazatelů, které chrání připojené laserové diody a chladiče před poškozením.
- **Proudové stabilizátory** – stabilizace výstupního výkonu laseru, nastavení plného proudového rozsahu, potlačení šumu a potlačení přechodových jevů (většinou vždy s teplotním stabilizátorem).

Pro řízení LD pracující na vlnové délce 1550nm byly použity stabilizátory THORLABS TED200C - teplotní a LDC205C – proudový (Obr. 8.2).



Obr. 8.2: Teplotní a proudový kontroler THORLABS

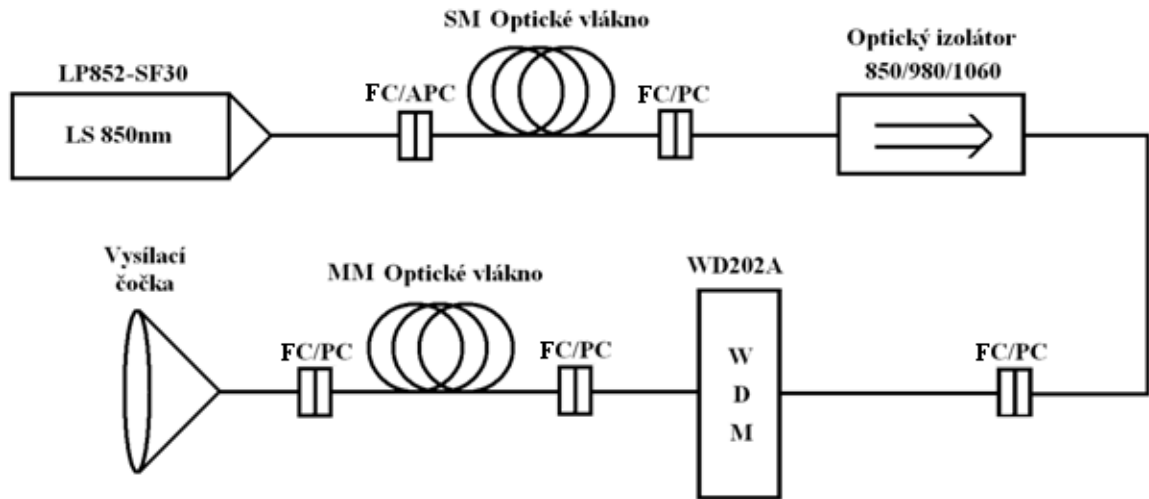
Komunikace kontrolerů a LD je realizována po 9pinové sériové lince se standardním konektorem. Tento konektor však u LD není. Řešením je použití universálního 14pinového držáku THORLABS LM14S2, jehož horní plocha zároveň slouží i jako chladič Obr. 8.3.



Obr. 8.3: Držák LD s chladičem THORLABS LM14S2.

8.1. Experiment v optické větvi 850nm

Fyzické zapojení se neliší od simulačního modelu. Jediným rozdílem je doplnění typů spojení. V tomto případě se nebylo nutné uvažovat jiné zapojení, než bylo použito pro simulace. Na Obr. 8.4 je blokově zobrazeno blokové zapojení a na Obr. 8.5 je skutečné zapojení ve výzkumné laboratoři na VUT.



Obr. 8.4: Blokové schéma reálného zapojení duálního spoje v jedné větvi (850nm).

V zapojení byla proměřována energetická bilance v místech:

- Za výstupem z LD.
- Před optickým izolátorem.
- Před a za WDM.

Změřené hodnoty výkonu v zadaných bodech:

- $P_{LD}=10\text{dBm}$
- $P_{\rightarrow Iz}=9,72\text{dBm}$
- $P_{\rightarrow WDM}=7,18\text{dBm}$
- $P_{WDM\rightarrow}=6,79\text{dBm}$

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledky jsou odlišné od hodnot výkonů, které byly jištěny simulacemi. Tento jev lze přisoudit reálným podmínkám, tedy spojení OV, ohyby OV, špatně očištěné konektory. Není možné zde uvažovat příliš velký vliv absorpce a rozptylu. Nicméně ani jeden z těchto vlivů neměl takový vliv na útlum optického signálu ve větvi pro 850nm. Nejvyšší hodnota útlumu nastala na optickém izolátoru. Příčinou, proč je na tomto izolátoru útlum přibližně 2dB (katalog udává max.1.2dB), je možný nesoulad polarizací. Kontrolní měření potvrdilo tento fakt vyššího útlumu. Vyšší hodnoty útlumu jsou také na WDM. V tomto případě je ale tento útlum způsoben použitelnými vlnovými délkami WDM, kde se k vlnové délce 850nm nejvíce blíží vlnová délka 980nm.

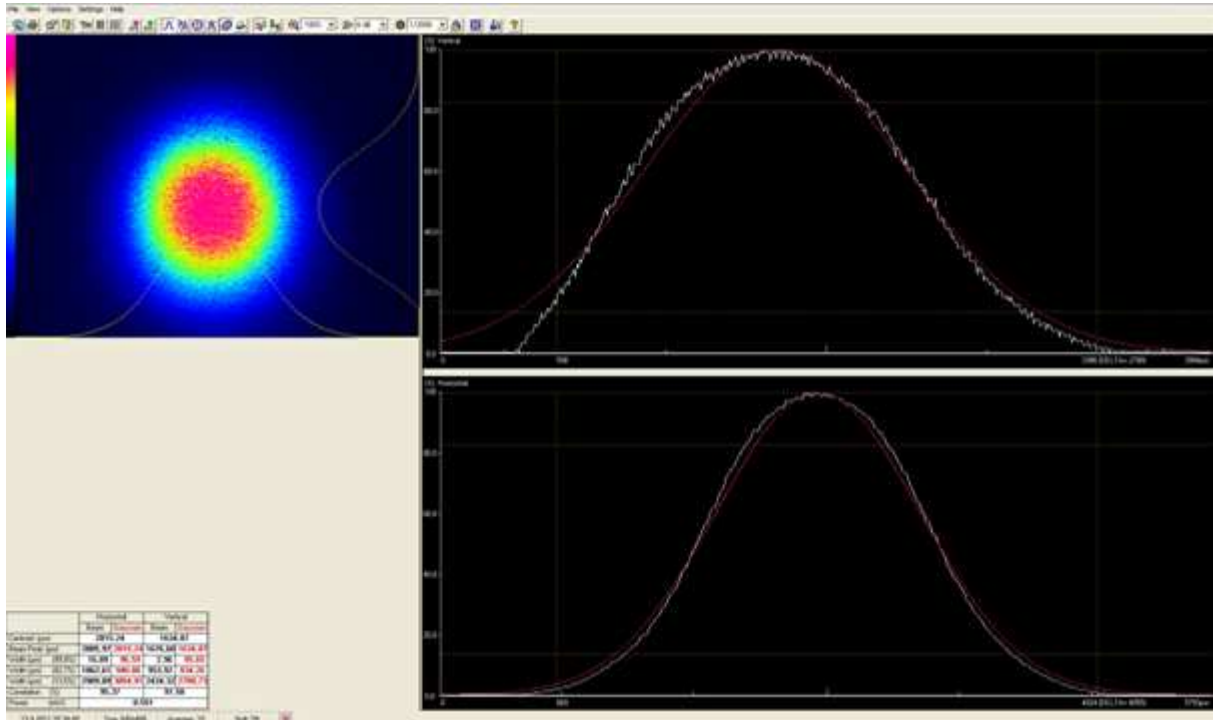
8.1.1. Rozložení modů (850nm)

Z hlediska průchodu volnou atmosférou a zkoumáním jejího vlivu na směřovaný optický paprsek je nutné zabývat se i modovým rozložením, ve kterém se bude ukrývat přenášená informace. V těchto aplikacích je vyšší počet modů velmi výhodnou vlastností a to proto, že signál je možné přenášet v jedné trase více cestami (právě mody). Je tedy zřejmé, že čím více nezávislých cest je, tím bezpečněji je možné danou informaci přenášet bez ohledu na okamžitý stav atmosféry.

Více modů je možné ve vláknech vybudit pomocí přechodu SM do MM optických vláken anebo dnes stále častěji využívaných POF. V těchto vláknech dochází vlivem fázových posunutí a zpoždění k nepravidelnému rozložení optické intenzity, tedy ke vzniku vyššího počtu modů. U plastových vláken je ale velmi důležitá délka. S délkou roste útlum a u POF je až 100dB/km.

Pro měření optické intenzity a vyhodnocení je nutné mít fotodetektor (PIN fotodioda) a vyhodnocovací a zobrazovací program. Obě tyto části jsou součástí výzkumné optické laboratoře VUT a proto bylo možné provádět měření. Nicméně fotodetektor nemůže měřit jiné vlnové délky, než vlnovou délku 850nm. Pokud se zaměříme na program, jedná se zobrazovací aplikaci, která je schopné provádět zobrazení měřeného optického signálu v reálném čase. Výstupní data se zobrazí ve směru dopadajícího signálu na detektor a je možné zobrazit jeho velikost v řezu v jakémkoliv místě v ose x a y.

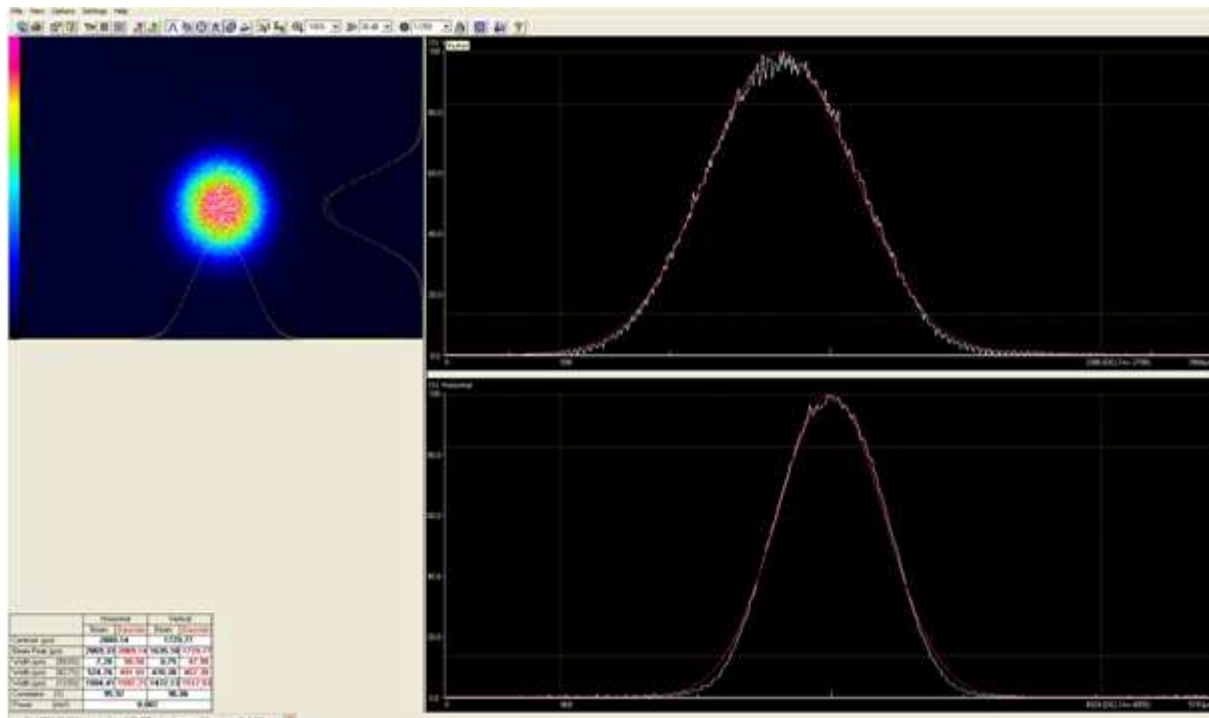
Na Obr. 7.14 je možné vidět rozložení optické intenzity na LD 850nm. Proto bylo provedeno i srovnání s reálným měřením. Výsledek je uveden na Obr. 8.5.



Obr. 8.5: Měření optické intenzity LD 850nm.

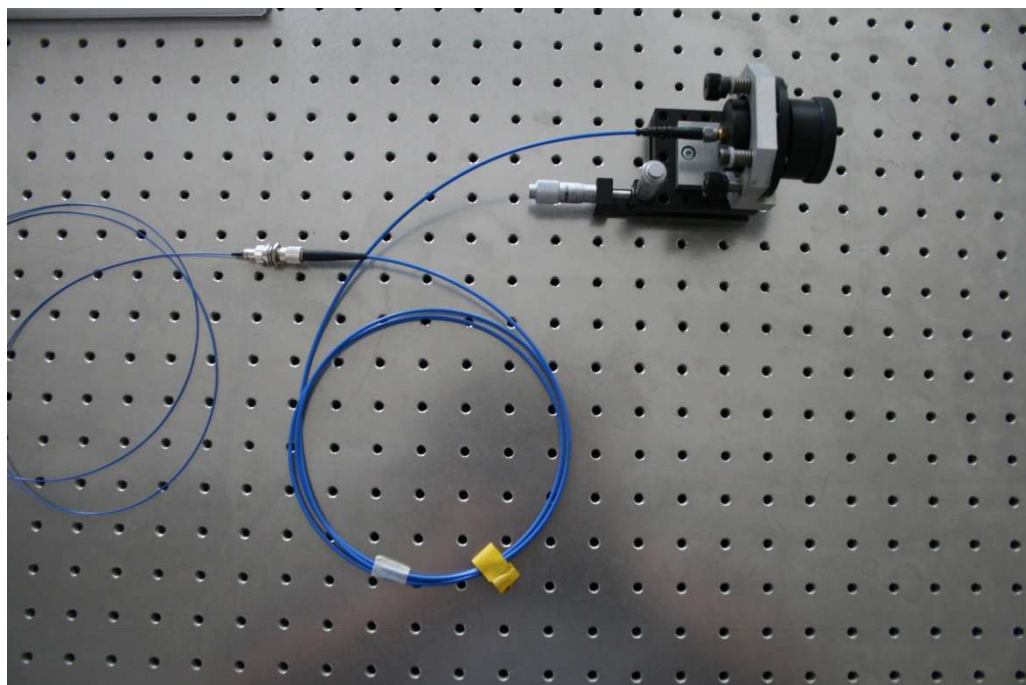
Z výsledků měření je zřejmé rozložení typické pro SM vlákna, tedy přítomnost pouze jednoho dominantního modu. Pokud tedy tento výsledek porovnáme se zdrojem simulovaným v Optiwave, je zcela nepochybné, že výsledky jsou totožné.

Tento simulační program však nabízí i řadu dalších funkcí, díky kterým je možné výstupní signálům pozorovat s možností ovlivnit jeho parametry, např. zesílení (8.6).



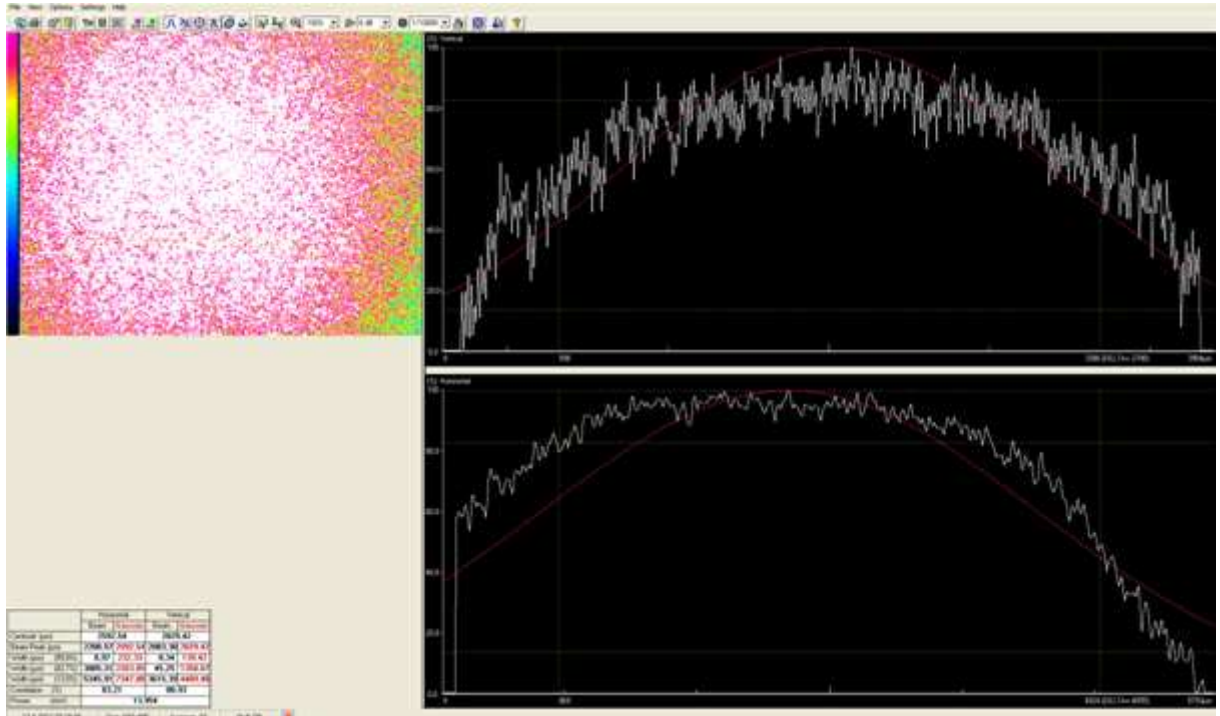
Obr. 8.6: Měření optické intenzity LD 850nm - zesílení.

U SM optických vláken s pouze jedním příčně se šířícím moden je situace tímto stavem velice zjednodušená. Zajímavější situace však nastane, pokud se budeme zabývat modovým rozložením MM optických vláken, nebo POF. Vzhledem k tomu, že je žádoucí vyšší počet modů, je pro experiment zvoleno plastové vlákno.

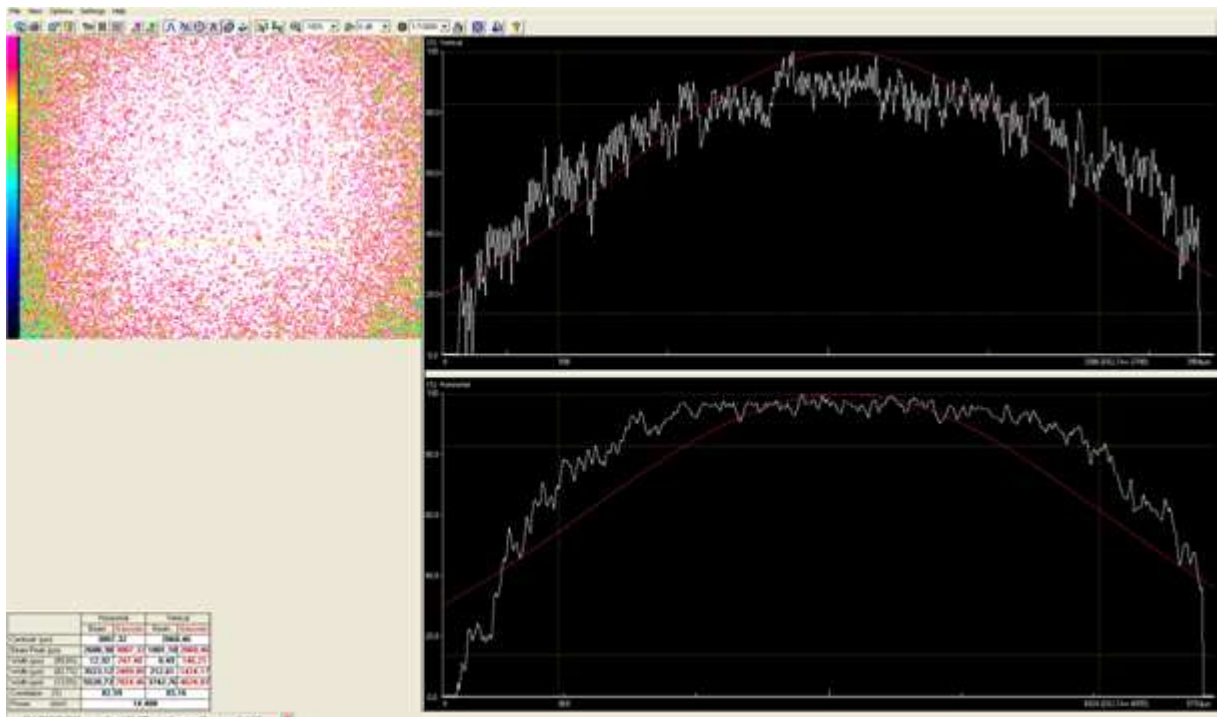


Obr. 8.7: POF optické vlákno v trase duálního optického spoje.

Plastové optické vlákno je vloženo mezi WDM a vysílací čočku. Na výstupu z POF by se měl při měření objevit velký počet modů, způsobený vícecestným šířením signálu.



Obr. 8.8: Modové rozložení v POF ($t=0s$).



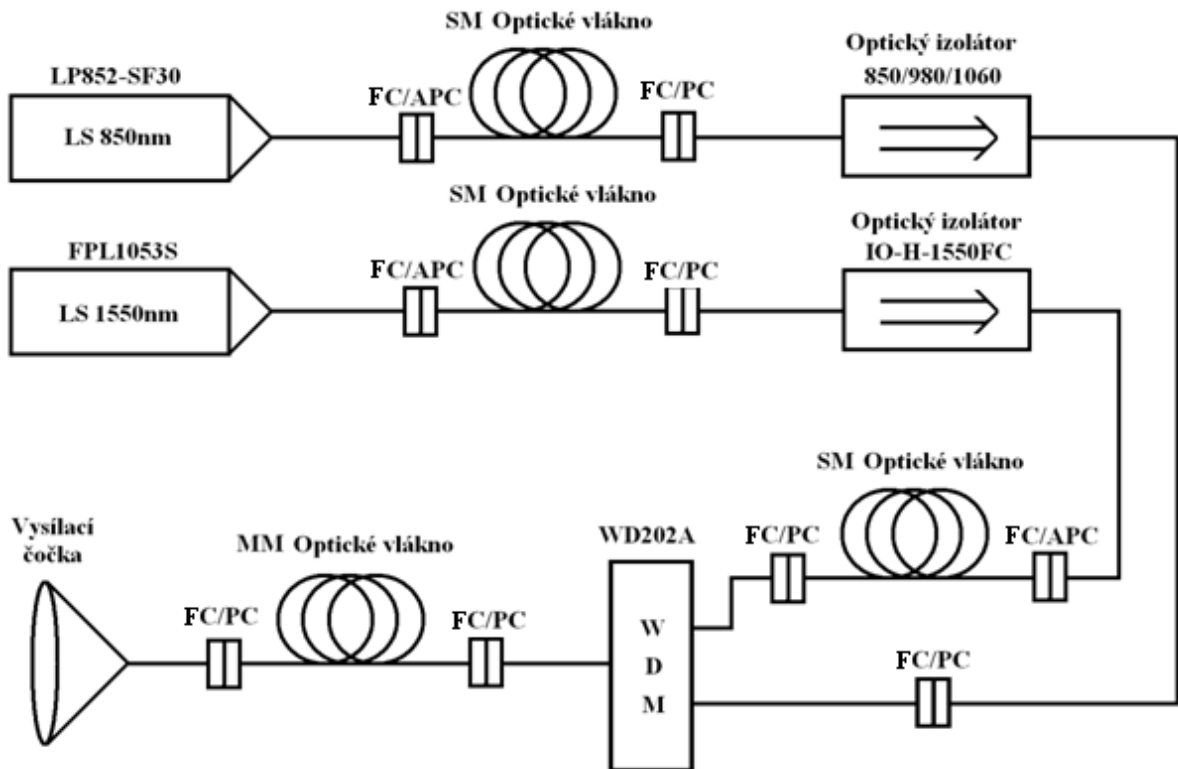
Obr. 8.9: Modové rozložení v POF ($t=5s$).

Obr. 8.8 a Obr. 8.9 je zobrazena optická na výstupu POF. Z výsledků je jasně vidět, že je přítomné velké množství modů, které bylo očekáváno a požadováno. Při měření však byla zjištěna jiná vlastnost, které se projevila jako nepravidelné blikání. V tomto stavu nedocházelo k ustálení ani při pominutí okolních vlivů a naprosté stabilitě prostředí.

Vysvětlení tohoto jevu je však složitějším problémem, který není možné podrobněji popsat v této práci. Možným vysvětlením by mohlo být přelévání energie mezi jednotlivými mody, vliv polarizace nebo částicová povaha světla

8.2. Experiment s kompletním duálním optickým spojem

Kompletní duálního optického spoje je rozšířená optické větve na 850nm o větev s 1550nm. Blokové schéma zapojení je na Obr. 8.5.



Obr. 8.10: Blokové schéma kompletního duálního spoje v jedné větvi.

Toto zapojení se od simulovaného liší v použití dalšího OV, které bylo nutné použít z důvodu rozdílných konektorů mezi optickým izolátorem a WDM.

V zapojení byla proměřována energetická bilance v místech:

- Za výstupem z LD.
- Za optickým izolátorem.
- Za WDM.

Změřené hodnoty výkonu v zadaných bodech:

- $P_{LD}=4,69\text{dBm}$
- $P_{\rightarrow Iz}=3,6\text{dBm}$
- $P_{WDM\rightarrow}=3,3\text{dBm}$

Naměřené hodnoty se v tomto případě mnohem přesněji blíží simulovaným a to z několika důvodů:

- Výskyt chyb na trase byl minimalizován.
- Všechny optické komponenty odpovídaly technickým specifikacím
- Všechny prvky byly pro vlnovou délku 1550nm.

9. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá širší problematikou týkající se vícekanálových bezdrátových optických spojů pro kratší vzdálenosti. Při takovémto přenosu je vyzařovaný optický signál vystaven vlivům působení atmosféry, a to jak stacionárními, tak i statistickými.

Dosavadní práce se zabývali vysíláním a přijímáním optického signálu v atmosférických oknech 850 a 1550nm odděleně. V této práci je dokázáno, že vysílání obou optických signálů ze dvou různých zdrojů může probíhat jednou cestou. Na přijímací straně je následně možná detekce obou signálů pouze jednou fotodiodou.

Proto vyzkoušení tohoto přístupu byly simulovány energetické bilance obou větví tvořících duální spoj. Použité komponenty jsou podrobeny rozboru pro ověření správnosti v tomto zapojení. Následně jsou za pomoci simulačního prostředí Optiwave vypočítány úbytky v jednotlivých místech vysílací soustavy. Sledovaným parametrem bylo i sledování rozložení optické intenzity v různých místech zapojení. Nicméně docházelo k limitování simulačním programem, který nebyl schopen dopočítat rozložení optické intenzity v MM optickém vlákně.

Závěrečným experimentálním měřením byla ověřena správnost postupu při řešení této problematiky a také správnost použitého simulačního programu Optiwave. Na rozdíl od simulací bylo možné změřit rozložení optické intenzity, tedy zobrazení modů, na výstupu z MM optického vlákna. Pro zvýšení počtu modů bylo ale měřeno na optickém vlákně POF.

Při měření na POF optickém vlákně byla zjištěna jistá nehomogenita v rozložení optické intenzity na jeho výstupu. Docházelo zde k poměrně náhodným a rychlým změnám výsledného rozložení. Na popsání tohoto jevu by však bylo nutné hlouběji nastudování problematiky polarizace a fyzikální podstaty, která s největší pravděpodobností tento stav způsobuje.

LITERATURA

- [1] SALEH, B.E.A., TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics*. New York: John Wiley, 1991, ISBN 0-471-83965-5 1991
- [2] KOMRSKA, Jiří. *Vlnová optika: část difrakce světla* [online]. 2008 [cit. 2008-03-17]. Dostupný z WWW: <<http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Difrakce/KapD01.pdf>>
- [3] WILFERT, Otakar. *Fotonika a optické komunikace: přednášky*. Skripta VUT v Brně. Brno: MJ Servis, 2007. ISBN: 978-80-214-3537-7
- [4] WILFERT, O. *Optoelektronika*. UREL, VUT v Brně, Brno: UREL FEKT VUT v Brně, 2002. ISBN: 80-214-2264-5
- [5] POLANSKÝ, D. *Koherence laserového svazku v turbulentní atmosféře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 68s. Vedoucí semestrální práce Ing. Lucie Dordová, PhD.
- [6] KŘIVÁK, P. *Optické bezkabelové spoje s velkým dosahem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 112 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [7] DOLEČEK, J. *Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-1845.
- [8] WILFERT, O. *Optické bezkabelové spoje*. Brno, 2004. 84s., 8 s. příloh. Habilitační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky.
- [9] WILFERT, O., KOLKA, Z., HLAVÁČ, D., BIOLKOVÁ, V. Statistický model optického směrového spoje. In: *Sborník příspěvků celostátní konference Optické komunikace O.K. 2001*. TECH-MARKET Praha, listopad 2001, s. 71-75.
- [10] WILFERT, O., KOLKA, Z. Statistical model of free-space optical data link. In: *Proc. Of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550*. Denver: SPIE, 2004, p. 203-213.
- [11] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha: MATFYZPRESS Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6.
- [12] DOLEČEK, J. *Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-1845.
- [13] WILFERT, O. *Optické bezkabelové spoje*. Brno, 2004. 84s., 8 s. příloh. Habilitační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky.

- [14] KOLKA,Z.: Monitoring of optical directional link. In: Proc. of the 9th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 99, TU Brno 1999, pp. 82-85.
- [15] WILFERT,O.-BIOLKOVÁ,V.-KOLKA,Z.: Vybudování dvou vysokorychlostních komunikačních mostů pomocí laserových směrových spojů v rámci metropolitní akademické počítačové sítě v Brně. Závěrečná zpráva k řešení grantového projektu č.0244/1998 Fondu rozvoje VŠ. UREL FEI, Brno, prosinec 1998.
- [16] PAVLŮ, M. Potlačení mechanických vlivů při přenosu optickým vláknem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 44 s. Vedoucí semestrálního projektu: Ing. Petr Drexler, Ph.D.
- [17] WILFERT,O.-KOLKA,Z.-BIOLKOVÁ,V.: Optical directional links for transmission of information. In: Proc. of the 9th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 99, Brno, 1999, pp. I-1 – I 11.
- [18] HLAVÁČ, D., WILFERT, O. Availability of free-space link. In: Sborník příspěvků conference Elektrotechnika a informatika 2002. ZCU Plzeň, 2002, s. 83 – 168.
- [19] WILFERT, O., KOLKA, Z., HLAVÁČ, D., BIOLKOVÁ, V. Statistický model optického směrového spoje. In: Sborník příspěvků celostátní konference Optické komunikace O.K. 2001. TECH-MARKET Praha, listopad 2001, s. 71-75.
- [20] [KŘIVÁK, P. Gain of FSO-Link Receiver. In 16th Internacional Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2006. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2006, s. 274 - 277, ISBN 80-227-2388-6.
- [21] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Additional Gain Calculation for the Free-Space Optical Link Transceiver. In Proceedings of the 12th conference Student EEICT 2006 volume 4. Brno: Brno University of Technology, 2006, s. 281 - 285, ISBN 80-214-3163-6
- [22] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Power Equivalent Gaussian Beam for Terrestrial Optical Wireless Link Power Budget. In Junior Scientist Conference 2006. Vienna, Austria: Vienna University of Technology, 2006, s. 39 - 40, ISBN 3-902463-05-8
- [23] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Modeling of Gaussian Beam for Terrestrial Optical Wireless Link. In 2006 Northern Optics Conference Proceedings. Bergen, Norway: University of Oslo, UNIK, 2006, s. 79 - 81, ISBN 1-4244-0435-5
- [24] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Long Range Free Space Optical Link. In 17th Internacional Conference RADIOELEKTRONIKA 2007. Brno, Czech Republic, Department of Radio Electronic Brno University of Technology, 2007, s. 625 - 629, ISBN 978-80-214-3390.
- [25] GRAEME, J. Photodiode Amplifiers. USA: McGraw-Hill, 1996. 254 pages. ISBN 0-07-024247-X.

- [26] AVIV, D.G. Laser Space Communications. Londom: Artech House, 2006. 196 pages. ISBN 978-1-59693-028-5.
- [27] WILFERT, O., Fotonika a optické komunikace, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007, ISBN 978-80-214-3537-7.
- [28] KIM, I. I., MITCHELL, M., KOREVAAR, E. Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm, Proc. SPIE Optical Wireless Communications II, Vol. 3850, p. 49-62, (1999).
- [29] WILFERT, O., KOLKA, Z. Statistical model of free-space optical data link. In: Proc. Of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550. Denver: SPIE, 2004, p. 203-213.
- [30] THORLABS, <http://www.thorlabs.com> (citováno 25.4.2012)
- [31] OPTOKON, <http://www.optokon.com> (citováno 25.4.2012)
- [32] AGILTRON, <http://www.agiltron.com> (citováno 25.4.2012)
- [33] Optiwave, <http://www.optiwave.com> (citováno 25.4.2012)

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A_{avg}	faktor průměrování na přijímací čočce
α_{12}	útlum šířením
α_{al}	útlum zaměřením spoje
α_{atm}	útlum průchodem atmosférou
$\alpha_{\text{část}}$	útlum rozptylem na částicích v atmosféře
α_e	koeficient extinkce atmosféry
α_{geom}	geometrický útlum
α_{WT}	útlum krycím skle vysílače
α_{WR}	útlum krycím skle přijímače
α_{IF}	útlum interferenčního filtru
$\alpha_{\text{LD,TXA}}$	útlum vazby LD – vysílací čočka
α_{RS}	útlum na přijímací soustavě
α_{RXA}	útlum na přijímací čočce
α_{tot}	celkový útlum šířením atmosférou
α_{turb}	útlum turbulencí
α_{TS}	útlum na vysílací soustavě
α_{TXA}	útlum na vysílací čočce
$\alpha_{1,\text{atm}}$	útlum průchodem atmosférou
β_{02}	Rytovova variance
B_m	šířka pásma propustnosti
c	rychlost světla ve vakuu
C_n^2	strukturní parametr indexu lomu
Δ	dynamika spoje
ΔO	velikost podélné otvorové vady čočky
$\Delta\lambda$	šířka spektrální čáry
D_{ekv}	průměr energeticky ekvivalentního svazku na TXA
D_n	strukturní funkce indexu lomu

$D_{O,C}$	průměr spotu čočky s otvorovou vadou při dopadu rovnoběžného svazku
D_{PD}	průměr aktivní plochy fotodiody DRXA průměr přijímací apertury
D_{SPOT}	průměr spotu v rovině aktivní plochy fotodiody
D_{TXA}	průměr vysílací apertury
$D\alpha(\alpha_i)$	distribuční funkce překročení útlumu α_i
φ	počet dopadajících fotonů na aktivní oblast fotodiody
$f(P)$	hustota pravděpodobnosti detekce optického výkonu
f_{RXA}	ohnisková vzdálenost čočky přijímače
f_{TXA}	ohnisková vzdálenost čočky vysílače
$F(P)$	pravděpodobnost detekce optického výkonu
Φ_{TX}	divergence vysílaného svazku
G_{PD}	vnitřní zisk fotodiody
γ_{POS}	zisk na přijímací čočce
γ_{tot}	celkový zisk na přijímací čočce
γ_{add}	dodatečný zisk na přijímací čočce
h	Planckova konstanta
$p(n)$	pravděpodobnost detekce n nezávislých fotonů
P_{av}	pravděpodobnost dostupnosti spoje
P_B	výkon záření pozadí
P_{BN}	fotonový šum záření pozadí
P_{DCN}	šum fotodiody způsobený temným proudem
$p_{df\alpha}$	hustota pravděpodobnosti náhodného útlumu α
$p_{df\tau}$	hustota pravděpodobnosti náhodného útlumu τ
P_{kruh}	výkon ve svazku s kruhovou symetrií
P_{QN}	fotonový šum signálu
$P_{LD,max}$	hodnota maximálního výkonu laserové diody
P_{RXA}	optický výkon dopadající na přijímací čočku
$P^{m,LD}$	střední hodnota výkonu emitovaného laserovou diodou

$P^{m,PD}$	střední hodnota výkonu dopadajícího na fotodetektor
T	čas
T	propustnost atmosféry
T	celková doba měřeného období
T_i	délka intervalu průměrování
$T(\lambda)$	spektrální propustnosti atmosféry
T_{un}	doba nedostupnosti spoje
T_K	termodynamická teplota
τ_i	doba úniku