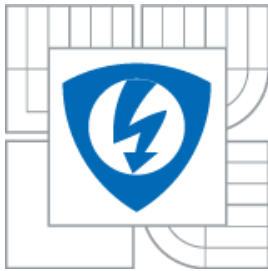




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Technologie CWDM pro optické bezkabelové spoje

CWDM technology for optical wireless links

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

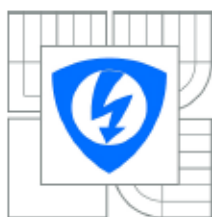
BC. VÍTĚZSLAV KUMPÁN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

PROF. ING. OTAKAR WILFERT, CSC.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Vítězslav Kumpén
Ročník: 2

ID: 115213
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Technologie CWDM pro optické bezkabelové spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s funkcí optického vlnově děleného multiplexu (WDM) a prostudujte dvě základní používané technologie CWDM a DWDM. Pozornost věnujte aplikacím těchto technologií jak v optovláknové, tak v bezvláknové komunikaci.

Navrhněte testovací spoj pro studium vlivu atmosféry na útlum v pásmech 850 nm a 1550 nm. Do vysílače zařaďte technologii CWDM, aby bylo možno jedním svazkem testovat atmosférické působení na dvou vlnových délkách (850 nm a 1550 nm). Vytvořte model umožňující výkonové i spektrální ohodnocení spoje.

Proveďte základní měření pro ověření funkce navrženého testovacího spoje. K simulaci mlhy a turbulence atmosféry použijte speciální přípravky, které jsou na UREL k dispozici.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DERICKSON, D. Fiber optic. Test and measurement. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.

[2] SALEH, B. E. A. Fundamentals of photonics. New York: Wiley, 1991.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem testovacího spoje pro studium vlivu atmosféry na optický svazek v pásmech 830 nm a 1550 nm. Ve vysílací části testovacího spoje jsou zařazeny prvky technologie optických vláken včetně vlnově děleného multiplexu (WDM). V přijímací části spoje jsou použity měřicí přístroje pro měření výkonu, snímání spektra a kontroly polarizace. Výstupem této práce je návrh měřicího řetězce pro studium vlivu atmosféry na optický bezkabelový spoj a ověření jeho funkce.

KLÍČOVÁ SLOVA

WDM, laser, atmosférické prostředí, optika

ABSTRACT

In this work an optical wireless test link for studying of atmospheric phenomena in the optical bands of 830 nm and 1550 nm is described. The WDM technology involving technology of optical fibers is included into transmitter of the link. The measuring devices for measuring power, spectrum and polarization control are included into receiver of the link. The outcomes of this work are both measuring chain design and verification of its functionality.

KEYWORDS

WDM, laser, atmospheric environment, optics

KUMPÁN, V. *Technologie CWDM pro optické bezkabelové spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 82 s., 5 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Technologie CWDM pro optické bezkabelové spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu 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 svého semestrálního projektu prof. Ing. Otakaru Wilfertovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum realizovaný v rámci této diplomové práce byl finančně podpořen projektem CZ.1.07/2.3.00/20.0007 **Wireless Communication Teams** operačního programu **Vzdělávání pro konkurenceschopnost**.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Finanční podpora byla poskytnuta Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Tento příspěvek vzniknul za podpory projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0007 WICOMT, financovaného z operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

OBSAH

| | |
|---|-------------|
| Seznam obrázků | x |
| Seznam tabulek | xiii |
| Úvod | 1 |
| 1 Rozbor problematiky | 2 |
| 1.1 Optický vláknový spoj | 3 |
| 1.1.1 Ztráty v optických vláknech | 4 |
| 1.2 Šíření optického signálu volným prostorem | 5 |
| 1.2.1 Molekulární absorpční útlum..... | 7 |
| 1.2.2 Útlum molekulárním rozptylem..... | 7 |
| 1.2.3 Absorpční útlum a rozptyl aerosolu..... | 8 |
| 1.3 Přijímací čočka | 9 |
| 1.4 Zdroje optického záření | 10 |
| 1.5 Detekce optického záření..... | 11 |
| 1.6 Multiplexy pro použití v optických vláknových spojích | 13 |
| 1.6.1 Realizace WDM..... | 14 |
| 1.6.2 Technologie WWDM | 15 |
| 1.6.3 Technologie DWDM | 15 |
| 1.6.4 Technologie CWDM..... | 16 |
| 1.6.5 Kvalita multiplexních přenosů..... | 17 |
| 1.7 Výkonové hodnocení optického spoje | 19 |
| 1.8 Spektrální hodnocení optického spoje | 20 |
| 1.8.1 Detektory ve spektrometrech | 21 |
| 1.9 Hodnocení polarizace vlny optického spoje | 21 |
| 1.9.1 Stokesovy parametry a Poincarého sféra | 23 |
| 1.10 Vlnová délka | 25 |
| 2 MĚŘICÍ SOUSTAVA | 27 |
| 2.1 Zkoumaný problém..... | 27 |
| 2.2 Měřicí soustava | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3 | Měřič výkonu..... | 28 |
| 2.4 | Měření polarizace | 29 |
| 2.4.1 | Měření 4 Stokesových parametrů | 30 |
| 2.4.2 | Metoda využívající rotující $\lambda/4$ destičky..... | 30 |
| 2.5 | Dělič svazku..... | 31 |
| 2.5.1 | Polopropustné zrcadlo..... | 32 |
| 2.6 | Infračervený Fourierův optický spektrální analyzátor | 34 |
| 2.7 | Laserové diody..... | 36 |
| 3 | Způsob měření a zobrazení Výsledků | 38 |
| 3.1.1 | Měřicí pracoviště | 38 |
| 3.1.2 | Měření výkonu | 44 |
| 3.1.3 | Měření spektra | 46 |
| 3.1.4 | Měření polarizace | 48 |
| 3.2 | Testovací měření vlivu mlhy na optický svazek..... | 51 |
| 4 | Závěr | 60 |
| | Literatura | 61 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 63 |
| | Seznam příloh | 64 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Blokové schéma testovacího spoje..... | 2 |
| Obrázek 2 Složení zemské atmosféry. [6] | 5 |
| Obrázek 3 a.)Příklad rozložení optické intenzity v ohnisku přijímací čočky, převzato z [8] b.) Princip fokusace sférické čočky do ohniska F | 10 |
| Obrázek 4 Optický přenos s využitím multiplexu. | 13 |
| Obrázek 5 Rozložení kanálů WDM v oblasti 850 nm. | 15 |
| Obrázek 6 Kanály DWDM v oblasti 1550 nm podle normy ITU-T G. 694.1..... | 16 |
| Obrázek 7 Kanály CWDM s definovaným odstupem dle ITU-T G.694.2..... | 17 |
| Obrázek 8 Měření optického výkonu [11] | 19 |
| Obrázek 9 Blokové schéma obecného optického spektrálního analyzátoru..... | 20 |
| Obrázek 10 Průchod světla čočkou a Brewsterův úhel..... | 22 |
| Obrázek 11 Principiální funkce lineárního absorpčního filtru, převzato z [18] | 23 |
| Obrázek 12 Poincarého sféra a možnosti určení stavu polarizace optické vlny [22] | 25 |
| Obrázek 13 Princip Comptonova rozptylu | 26 |
| Obrázek 14 Blokové schéma zapojení měřicího řetězce pro současné měření výkonu, spektra a polarizace..... | 28 |
| Obrázek 15 Použitý měřič výkonu Ophir Vega..... | 28 |
| Obrázek 16 Teoretický průběh optického výkonu při kruhové polarizaci světla. | 29 |
| Obrázek 17 Blokové schéma určení změny polarizace pomocí lineárního polarizátoru. | 29 |
| Obrázek 18 Blokové schéma měřicí části pro současné určení 4 Stokesových parametrů. | 30 |
| Obrázek 19 Princip měření polarizace světla pomocí rotující $\lambda/4$ destičky. | 31 |
| Obrázek 20 Nepolarizační hranol k dělení vstupního paprsku. | 32 |
| Obrázek 21 Účinnost přenosu světla hranolem v závislosti na vlnové délce (S – polarization označuje lineární polarizaci v horizontálním směru, P-polarization označuje lineární polarizaci ve vertikálním směru). Převzato z [14]. | 32 |
| Obrázek 22 Přenos polopropustného zrcadla natočeného pod úhlem 45° k ose kolmé na osu šíření vlny závislosti na vlnové délce. Převzato ze [14]..... | 33 |
| Obrázek 23 Odraz polopropustného zrcadla natočeného pod úhlem 45° k ose kolmé na osu šíření vlny závislosti na vlnové délce. Převzato ze [14]..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 24 Polarizační vlastnosti použitých polopropustných zrcadel – průběh Stokesových parametrů před a po vložení polopropustného zrcadla. | 33 |
| Obrázek 25 Způsob použití polopropustných zrcadel pro rozdělení svazku do tří směrů. | 34 |
| Obrázek 26 Principiální uspořádání Michelsonova interferometru. | 35 |
| Obrázek 27 Vzdálenost výstupu WDM od přijímací čočky. | 37 |
| Obrázek 28 Fyzické zapojení měřicího pracoviště. | 38 |
| Obrázek 29 Současné zobrazení měřeného spektra a výkonu na PC. Měření je prováděno na vlnové délce 830 nm. | 39 |
| Obrázek 30 Grafický výstup programu TXP5000 (polarimetr). Grafy sestupně shora představují průběh Stokesových parametrů, azimut a elipticitu a stupeň polarizaci DOP. Všechny parametry jsou zobrazeny v závislosti na čase pro vlnovou délku 850 nm. | 40 |
| Obrázek 31 Vysílací část měřicího pracoviště. | 41 |
| Obrázek 32 Měřená atmosféra v omezeném prostoru. | 43 |
| Obrázek 33 Celkový pohled na měřicí řetězec. | 43 |
| Obrázek 34 Průběh výkonu v různých částech fotonického spoje v závislosti na čase na vlnové délce 1550 nm. | 44 |
| Obrázek 35 Průběh výkonu v různých částech fotonického spoje v závislosti na čase na vlnové délce 830 nm. Modrá křivka představuje optický výkon zjištěný na výstupu laseru s pigtailem. Červená křivka udává výkon změřený po připojení izolátoru k laseru. Optický výkon zaznamenaný po připojení WDM je zobrazen zelenou křivkou. | 45 |
| Obrázek 36 Výkonová bilance spoje pro různé vlnové délky a čistou atmosféru. | 46 |
| Obrázek 37 Zachycené spektrum měřeného laseru o vlnové délce 830 nm při využití kontinuálního režimu snímání. | 47 |
| Obrázek 38 Zachycené spektrum měřeného svazku o vlnové délce 1550 nm při kontinuálním režimu snímání. | 47 |
| Obrázek 39 Graf Stokesových parametrů na výstupu WDM pro vlnovou délku 1550 nm. | 48 |
| Obrázek 40 Graf Stokesových parametrů na výstupu WDM pro vlnovou délku 830 nm. | 49 |
| Obrázek 41 Výstupní polarizace za WDM. (Vlákna izolátoru a výstupní pigtail laseru je polarizaci nezachovávající, WDM polarizaci zachovává. V čase je zachycen průběh Stokesových parametrů.) | 50 |
| Obrázek 42 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 52) v Poincarého sféře. ... | 50 |
| Obrázek 43 Průběh Stokesových paramerů pro $\lambda = 830$ nm a čistou atmosféru. | 52 |
| Obrázek 44 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 41) v Poincarého sféře. ... | 53 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 45 Průběh Stokesových parametrů při maximálním dosaženém výkonu pro $\lambda = 830$ nm a zamlženou atmosféru. | 54 |
| Obrázek 46 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 43) v Poincarého sféře. ... | 54 |
| Obrázek 47 Průběh Stokesových parametrů pro $\lambda = 830$ nm a výkon na měřiči omezený na $20\mu\text{W}$ - zamlženou atmosféru (stejná hodnota jako je výkon pro $\lambda = 1550$ nm). | 55 |
| Obrázek 48 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 45) v Poincarého sféře. ... | 55 |
| Obrázek 49 Polarizační elipsa svazku pro čistou atmosféru a $\lambda=830$ nm. | 56 |
| Obrázek 50 Polarizační elipsa pro zamlženou atmosféru a $\lambda=830$ nm. | 56 |
| Obrázek 51 Průběh Stokesových parametrů pro $\lambda = 1550$ nm a čistou atmosféru. | 56 |
| Obrázek 52 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 47) v Poincarého sféře. ... | 57 |
| Obrázek 53 Průběh Stokesových parametrů a výkonu pro $\lambda = 1550$ nm a zamlženou atmosféru. | 57 |
| Obrázek 54 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 49) v Poincarého sféře. ... | 58 |
| Obrázek 55 Polarizační elipsa svazku pro čistou atmosféru a $\lambda = 1550$ nm. | 58 |
| Obrázek 56 Polarizační elipsa svazku pro zamlženou atmosféru a $\lambda = 1550$ nm. | 58 |
| Obrázek 57 Polarizační elipsa pro čistou atmosféru a $\lambda = 1550$ nm. Elipsa zohledňuje vliv polarizačního polopropustného zrcadla (otočení o 90°). | 59 |
| Obrázek 58 Polarizační elipsa pro atmosféru s mlhou a $\lambda = 1550$ nm. Elipsa zohledňuje vliv polarizačního polopropustného zrcadla (otočení o 90°). | 59 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|---|
| Tabulka 1 Koeficient q pro vzorec (11)..... | 9 |
|---|---|

ÚVOD

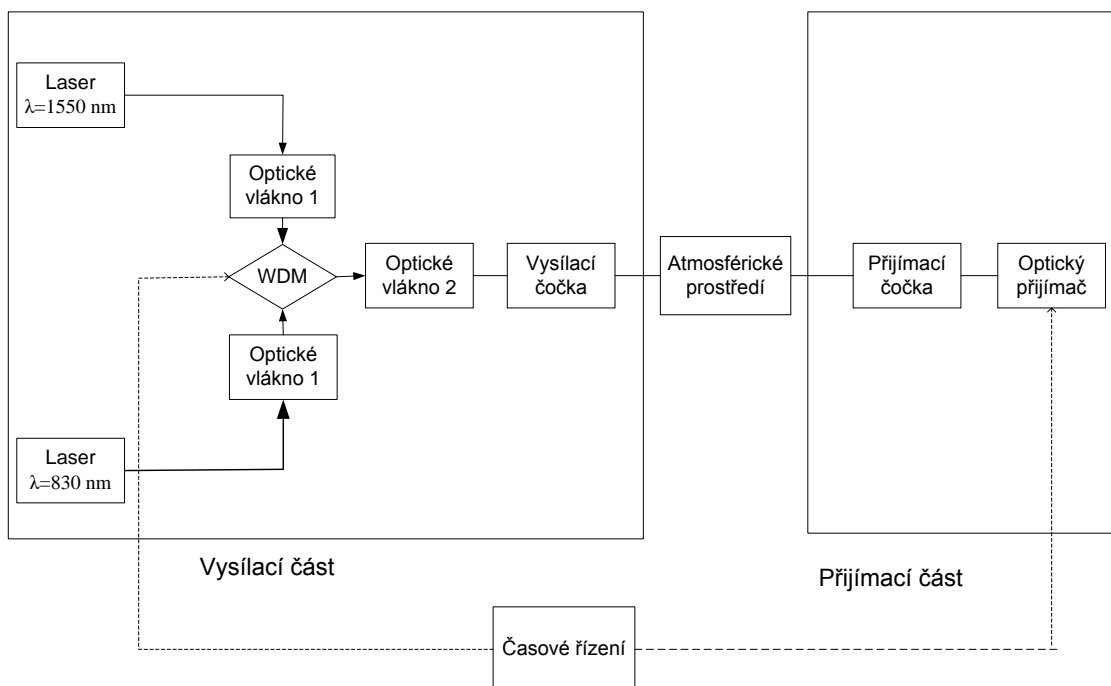
V současné době dochází ke stále většímu rozmachu přenosu informace bez použití datových kabelů nebo vlnovodů. S rozvojem datových služeb (internet, mobilní síť) vysílaných volně do zemské atmosféry se počet nevyužitých frekvenčních pásem neustále zmenšuje. Tento problém je možné řešit více způsoby. Jedním z nich je použití nových technologií na již používaných frekvenčních pásmech a tím zvýšení množství informace, které dokážeme přenést (např. OFDM). Další možností je vysílat na frekvencích, které se doposud nepoužívají. Do této oblasti patří terahertzové frekvence a také frekvence elektromagnetického vlnění, kdy už mluvíme o světle.

Řešením přenosu informace pomocí světla se zabýval už A. G. Bell v roce 1880. Již on se musel zabývat působením atmosféry na světlo. Photofon považoval za svůj největší vynález, ale praktického využití se dostalo jeho telefonu, který vysílal pomocí elektrických signálů vedených po měděném drátě. Měděný drát nebo jiné přenosové médium vyrobené člověkem je mnohem snazší popsat a předvídat jeho vlastnosti. Naproti tomu atmosféra je pro svoji nehomogenitu a nepředvídatelnost náročně simulovatelná. Po vynálezu laseru, dostatečně kvalitního optického zdroje, se jedním z největších problémů optického spoje bez použití vláken stalo právě prostředí.

Tato práce se zabývá stručným rozbořem problematiky laserového paprsku v prostředí troposféry. V teoretické části je rozebrána problematika jednotlivých bloků vysílače a přijímače pro měření atmosféry a jejich útlumové vlastnosti. Také jsou zde popsány možné technologie vlnově děleného multiplexu a principy měření optického výkonu a spektra. V druhé části, která se zabývá vlastním měřením, je nastíněna realizace vysílače a především realizace měřicí soustavy. Na závěr je provedeno měření simulovaných atmosférických jevů a zhodnocen testovací spoj.

1 ROZBOR PROBLEMATIKY

Cílem této práce je navrhnout testovací spoj pro studium vlivu atmosféry na laserový paprsek. Vysílací část je složena ze dvou laserů o vlnových délkách 830 nm a 1550 nm, izolátorů, optického vlákna a WDM multiplexoru. Díky tomuto uspořádání a použití WDM technologie můžeme jedním svazkem testovat atmosférické působení na dvou vlnových délkách. Oblast atmosféry je přesně definovaná a ohraničená v laboratoři a její vlastnosti jsou ovlivnitelné, například použitím generátoru mlhy. Za toto atmosférické prostředí navážeme přijímací část, na kterou dopadá laserový paprsek již ovlivněný prostředím. Pro naši potřebu je přijímací část složena z měřičů výkonu, kontroly polarizace a spektrálního analyzátoru. Jednotlivé části testovacího spoje s jejich nejdůležitějšími technickými parametry jsou popsány v této práci.



Obrázek 1 Blokové schéma testovacího spoje.

1.1 Optický vláknový spoj

Vysílací část je realizována především pomocí laserů a optických vláken. V této kapitole jsou rozebrány základní vlastnosti a řešení v oblasti optických vláken.

Optické vlákno je skleněné nebo plastové tenké vlákno, ve kterém je přenášen signál ve formě světla. Princip optického vlákna je možné popsat pomocí rovnice odrazu světla na rozhraní dvou prostředí o různé hustotě – Snellův zákon [3]:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (1)$$

Dopadne-li světelný signál vstupující do optického vlákna pod úhlem větším než je mezní úhel, dojde k tzv. totálnímu odrazu. Tento úhel svírá paprsek s osou vlákna. Při totálním odrazu se vlnění do prostředí dva vůbec nedostane a odráží se zpět do prostředí jedna. V případě optického vlákna je tento paprsek omezen ze všech stran prostředím dva, tudíž se šíří pouze prostředím jedna v podélném směru. Výraz pro mezní úhel je [3]:

$$\varphi_m = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2)$$

| | |
|-------------|--------------------------|
| φ_m | mezní úhel |
| n_2 | opticky hustší prostředí |
| n_1 | opticky řidší prostředí |

Optické vlákno je nejčastěji válečkový dielektrický vlnovod, skládající se ze tří částí:

- jádro (core) – jde o nejdůležitější prvek vlákna určený pro přenos dat. Průměr jádra je závislý na typu kabelu, ale obvyklé hodnoty jsou 9,5 a 62,5 μm . Index lomu jádra bývá 1,48 μm . [4]
- obal jádra (cladding) – spolu s jádrem vytváří podmínky pro totální odraz a šíření vlny vláknem. Jádro a obal mají průměr 125 μm . Index lomu se pohybuje okolo hodnoty 1,46 μm [4]
- primární a sekundární ochrana tvořená lakem a plastickými hmotami zvyšující průměr vlákna 900 μm . [4]

Přechod indexu lomu mezi jádrem a pláštěm může být buď skokový, nebo postupný. Při skokové změně indexu lomu jsou optické paprsky vedeny vlnovodem pomocí skokové změny indexu lomu na rozhraní materiálů. U postupné (gradientní) změny se index lomu zvětšuje s rostoucí vzdáleností od středu vlákna. Tato vlákna jsou tvořena velkým množstvím vrstev, které se liší svými indexy lomu. [3]

Dále můžeme optická vlákna rozdělit na jednovidová nebo mnohovidová podle počtu elektromagnetických vln (vidů), které se mohou v optickém vlákně šířit. [3]

V našem zapojení jsou použita jednovidová i mnohovidová vlákna. Jednovidová vlákna jsou připojena za lasery (Optické vlákno 1) a přivedena na vstup WDM multiplexoru. Mnohovidové gradientní vlákno je připojeno za WDM multiplexor (Optické vlákno 2) a svým výstupem svítí do atmosféry. Použitá optická vlákna zachovávají polarizaci. Tato vlákna nemají kruhovou symetrii, jako polarizaci nezachovávající vlákna, ale jejich průřez je eliptický. Tímto jsou odstraněny odchylky od válcové geometrie a nedochází ke změnám polarizovaného záření.

1.1.1 Ztráty v optických vláknech

Útlum výkonu optického vlákna se skládá z několika složek. Mezi ně řadíme:

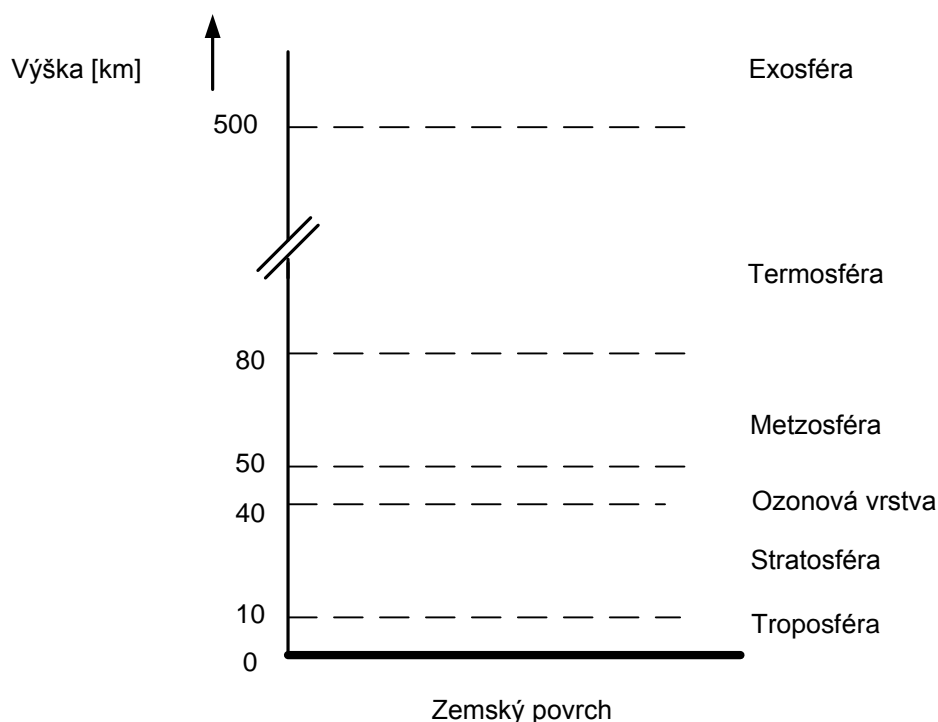
- Materiálová absorpce, která představuje ztráty, souvisí s materiálovým složením vlákna. Tato absorpce zvyšuje ztráty v optickém vlákně díky transformaci optického signálu na teplo. Materiálovou absorpcí můžeme dále rozdělit na vlastní a nevlastní. Vlastní absorpce je způsobena interakcí se základními stavebními prvky optického vlákna. Nevlastní absorpce je způsobena interakcí procházejícího světla s nečistotami optického vlákna. [5]
- Materiálový rozptyl, který můžeme rozdělit na dva druhy. Lineární rozptyl má za důsledek lineární přechod části optického výkonu obsaženého v jednom vidu do vidu nového. Nelineární rozptyl je způsoben interakcí procházejícího světla s molekulami materiálu vlákna. [5]
- Ztráty při ohybech vznikají z důvodu zákona zachování energie. Část vidu, který se nachází na vnější straně ohybu optického vlákna, by se musela šířit větší rychlostí, než je rychlost světla v daném materiálu. Vzhledem k tomu, že toto není možné, je část energie ztracena vyzářením z vlákna ven. [5]
- Ztráty při spojování a na konektorech. Tyto ztráty můžeme charakterizovat vložným útlumem a útlumem odrazu. Vložný útlum je především ovlivněn nedokonalostí mechanických součástí konektorů a špatnou přípravou konce vlákna. Útlum odrazu vzniká při dopadu optického paprsku na rozhraní dvou dielektrik s různými indexy lomu.[5]

1.2 Šíření optického signálu volným prostorem

Zemská atmosféra je složena z několika vrstev viz obrázek 2. Nejnižší vrstva se nazývá troposféra a její výška dosahuje asi 10 km nad zemský povrch. Právě v této vrstvě budeme pracovat. V troposféře vzniká velké množství jevů, které jsou nestacionární a nehomogenní. Tyto jevy mají velký vliv na přenos optickými spoji. Mezi náhodné jevy patří mlha, oblaka, sněžení, déšť, bouřky, větry a větrné víry. Optický svazek, který prochází takovým prostředím, pak podléhá náhodným energetickým i tvarovým změnám, což vede k náhodné změně přijímaného signálu. [7]

Mezi nejvýznamnější jevy, které podstatně ovlivňují činnost optických spojů, patří:

- absorpce a rozptyl světla na molekulách plynu a aerosolech
- fluktuace optické intenzity vlivem turbulence atmosféry, deště, sněhu
- fluktuace optické intenzity vlivem deformace optického svazku
- záření pozadí
- výskyt ptáků a cizích těles v ovzduší. [7]



Obrázek 2 Složení zemské atmosféry. [6]

Vlivem teplotního gradientu nebo mechanického působení se lokální teplota a tlak mění v prostoru a čase. Tato změna způsobuje, že index lomu atmosférického prostředí má náhodnou funkci závislou na prostoru a čase. Útlum optické intenzity v atmosférickém prostředí je možné stanovit pomocí koeficientu útlumu šíření.[7]

Útlum šíření nabývá vysokých hodnot a jeho hodnota je dána poměrem intenzit na ose svazku v místě přijímače a vysílače. V praxi je dán především úhlem vyzařovaného svazku, který získáme s využitím pomocné délky a poměru vyslaného a přijatého výkonu. Vyjdeme-li z předpokladu shodné velikosti vysílací a přijímací čočky a stejného rozložení optické intenzity, pak je útlum šíření dán vztahem:

$$\alpha_{12} = 10 \cdot \log \frac{I_T}{I_R} = 20 \cdot \log \frac{l_0}{l_0 + l_{1,2}} \quad (3)$$

kde I_T ...optická intenzita na ose svazku v místě vysílače

I_R ...optická intenzita na ose svazku v místě přijímače

l_0 ...pomocná délka

$l_{1,2}$...vzdálenost mezi optickými hlavicemi spoje.[7]

Pomocnou délku l_0 můžeme vyjádřit ze znalosti úhlové šířky svazku θ a průměru vysílací optické soustavy D_{vys} :

$$l_0 \approx \frac{D_{vys}}{\theta} \quad (4)$$

Atmosférické prostředí můžeme také popsat pomocí koeficientu propustnosti, který je dán vztahem:

$$T = e^{-\alpha_e \cdot l_{1,2}} \quad (5)$$

kde α_e je spektrálně závislý koeficient absorpce atmosféry

$l_{1,2}$ je vzdálenost mezi optickými hlavicemi spoje.[8]

Většina atmosférických spojů pracuje na vlnových délkách 850 nm nebo 1550 nm. V rámci běžného provozu vzhledem k lidskému zraku lze u optické vlnové délky 1550 nm použít 50 krát více energie než u vlnových délek okolo 850 nm. To umožňuje přenos signálu na mnohem větší vzdálenost nebo lepší schopnost pracovat i při špatném počasí. [7]

1.2.1 Molekulární absorpční útlum

Molekulární absorpční útlum závisí na interakci mezi zářením a atomy a molekulami obsaženými v přenosovém médiu (N₂, O₂, H₂, H₂O, CO₂, O₃, Ar atd.). Koeficient absorpce závisí na typu molekul plynu a na jejich koncentraci. Spektrální rozdíly v absorpčním koeficientu definují spektrum absorpce. Povaha tohoto spektra závisí na energetických hladinách atomů a rotaci molekul. S rostoucí teplotou a tlakem se rozsah frekvencí, na kterých dochází k absorpci. Molekulární absorpce je selektivní problém, jehož spektrální prostupnost atmosférou závisí na průchozích a neprůchozích oknech ve spektru. Jedno z průchozích spektrálních oken je právě v rozsahu vlnových délek $\lambda=400-1900$ nm.

K útlumu molekulární absorpcí dochází, pokud je splněna tato podmínka:

$$\nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (6)$$

kde:

- ν_0 je ovlivněná frekvence,
- h je Planckova konstanta,
- e_i a e_f jsou energetické hladiny uvažovaných molekul. [23]

1.2.2 Útlum molekulárním rozptylem

Rozptyl na molekulách plynu (Rayleigh scattering) přispívá k celkovému útlumu elektromagnetického záření. Tento rozptyl je způsoben interakcí světla s částicemi, jejichž velikost je menší než vlnová délka vysílaného světla. [23]

Výraz pro koeficient molekulárního rozptylu je následující:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right) \quad (7)$$

kde:

- $\beta_m(\lambda)$ je koeficient molekulárního rozptylu,
- λ je vlnová délka,
- ρ je molekulární hustota,
- δ je depolarizační faktor vzduchu ($\approx 0,03$),
- $n(\lambda)$ je koeficient odrazu atmosféry. [23]

Ze znalosti molekulárního složení atmosféry můžeme využít zjednodušený vztah:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4} \quad (8)$$

$$A = 1,09 \cdot 10^{-3} \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \quad (9)$$

kde:

- P je atmosférický tlak a $P_0=1013\text{mbar}$,
- T je teplota atmosféry a $T_0=273,15\text{ K}$. [23]

Číselná hodnota útlumu molekulárním rozptylem v oblasti infračerveného světla dosahuje velmi malých hodnot. Mnohem významnější je Rayleigho rozptyl a z něj vycházející útlum v oblasti ultrafialového a viditelného spektra záření. Modrá barva nebe je způsobena tímto typem rozptylu.[23]

1.2.3 Absorpční útlum a rozptyl aerosolu

Aerosoly jsou jemné pevné nebo tekuté částice v atmosféře s velmi malou rychlostí pádu způsobené gravitací. Jejich velikost leží především mezi 10^{-2} až $100\ \mu\text{m}$. Mlha, kouř a prach jsou příklady aerosolů. [23]

Vlivy aerosolů na podmínky v atmosféře jsou závislé na jejich chemickém složení, velikosti a koncentraci. V oblasti moří a oceánů jsou aerosoly primárně tvořeny kapkami vody (pěna, mlha, mrholení, déšť), solnými krystaly a rozdílnými částicemi kontinentálního původu. Typ a koncentrace částic z kontinentů závisí na vzdálenosti od nejbližší pevniny a charakteru pobřeží. Absorpční útlum můžeme vyjádřit:

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_a \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n_2 \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad (10)$$

kde:

- $\alpha_n(\lambda)$ v km^{-1} představuje absorpční útlum,
- λ v μm představuje vlnovou délku,
- $dN(r)/dr$ v cm^{-1} je rozdělení velikosti částic na jednotku objemu,
- r v cm představuje průměr částic,
- n_2 je imaginární část indexu lomu n způsobené aerosolem,
- $Q_a(2\pi r/\lambda, n)$ je střední hodnota absorpce pro daný typ aerosolu. [23]

Index lomu světla n závisí na chemickém složení materiálu a vlnové délce světla. Může být popsán jako $n=n_1+n_2$ kde n_1 popisuje rozptylové vlastnosti částice a n_2 udává absorpční vlastnosti stejné částice. Imaginární část indexu lomu n_2 dosahuje velmi malých hodnot pro vlnové délky viditelného a blízkého infračerveného záření. Proto můžeme n_2 ve výpočtech pro tyto vlnové délky zanedbat. Pro vlnové délky vzdálenějšího infračerveného záření s tímto koeficientem musíme počítat. [23]

Útlum způsobený rozptylem na aerosolech můžeme určit ze vztahu podle I.I. Kima. Jedná se o široce používaný vzorec mezi útlumem optického signálu a dohledností:

$$\alpha_0 = \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550}\right)^{-q} [m^{-1}] \quad (11)$$

kde:

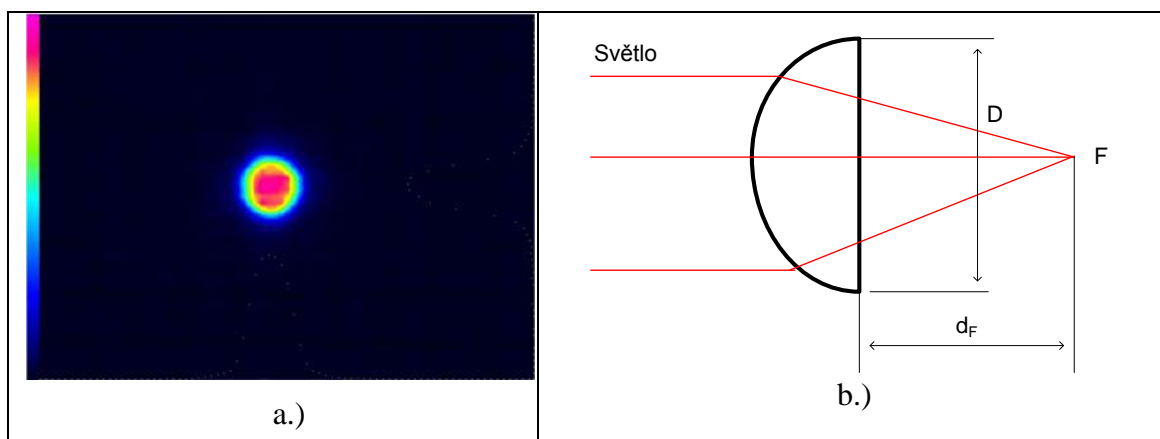
- α_0 je měrný útlum v m^{-1} ,
- V je dohlednost v m ,
- λ_{nm} je vlnová délka v nm ,
- q závisí na aktuální dohlednosti V . [23]

| | | |
|------|----------------|---|
| $q=$ | 1,6 | pro $V > 50 \text{ km}$ |
| | 1,3 | pro $6 \text{ km} > V < 50 \text{ km}$ |
| | $0,16V + 0,34$ | pro $1 \text{ km} > V < 6 \text{ km}$ |
| | $V-0,5$ | pro $0,5 \text{ km} > V < 1 \text{ km}$ |
| | 0 | pro $V < 0,5 \text{ km}$ |

Tabulka 1 Koefficient q pro vzorec (11).

1.3 Přijímací čočka

Čočky jsou jedním z nejdůležitějších zařízení v optice. Hlavním účelem čočky je manipulace se světelnou vlnou. Přijímací čočka slouží k fokusaci dopadajícího optického svazku do ohniska čočky a do detekčního prvku. V této oblasti se s výhodou používají tzv. sférické čočky.[8] Jednoduchá čočka je tvořena dvěma kulovými plochami. Spojnice středů křivosti těchto kulových ploch tvoří optickou osu čočky. Povrch čočky může být konvexní (vyboulený ven), konkávní (vyklenutá dovnitř) nebo rovinný. Kombinací těchto ploch můžeme vytvořit čočku s kladnou nebo zápornou lámavostí.[9]. Pro naše potřeby je vhodná čočka plankonvexní, která má jednu stranu vyboulenou a druhou plocho. Pomocí ní soustředíme světlo do jednoho místa – ohniska F , kde jej můžeme dále zpracovávat a měřit. Čočka sloužící našim účelům musí mít dostatečný průměr D a musíme vědět, jaká je její ohnisková d_F . [9]



Obrázek 3 a.)Příklad rozložení optické intenzity v ohnisku přijímací čočky, převzato z [8]
 b.) Princip fokusace sférické čočky do ohniska F .

Zisk přijímací čočky γ_R je dán poměrem vysílaného a přijímaného výkonu. Z tohoto předpokladu vychází vztah (12) kde je D_T průměr vysílací čočky a D_R průměr přijímací čočky:

$$\gamma_r = 20 \cdot \log \frac{D_R}{D_T} \quad (12)$$

1.4 Zdroje optického záření

Jako zdroje světla jsou v našem zapojení využívány lasery. V této kapitole se zabýváme především základními veličinami, kterými popisujeme laserové záření. Použití konkrétního zdroje optického záření je především závislé na užití výsledné optické vlny. Optické zdroje jsou z tohoto důvodu specifikovány několika parametry.

Spektrum generovaného záření je definováno zejména závislostí spektrální hustoty optického výkonu $P(\lambda)$ na vlnové délce záření. Jedná se o soubor vlnových délek, na kterých laser vyzařuje. K tomuto parametru a jeho grafickému průběhu se také vztahuje veličina šířka spektrální čáry $\Delta\lambda$ a střední vlnová délka λ_0 . [10]

Optický výkon zdroje je označován P . Udává celkovou vyzářenou energii zdroje na jednotku plochy. Okamžitý výkon zdroje můžeme určit z intenzity světla ze vztahu:

$$P = \int I dS \quad (13)$$

kde dS je element plochy kolmé na směr šíření světla.

Střední výkon zdroje P v čase t (pro periodický průběh $P(t)$ se volí $t=1/f_0$) a je dán integrálem:

$$P(t) = \frac{1}{t} \int_0^t P(t) dt \quad (14)$$

Směrová charakteristika optického zdroje je dána závislostí zdroje na směrovém úhlu vlnového vektoru záření. Udává ji průběh normované hustoty plošného výkonu zdroje na kulové ploše jednotkového poloměru se středem v geometrickém středu plochy zdroje. Znáznorňuje se jako závislost normované intenzity světla na směrových úhlech vzhledem k ose měření vedené ze středu zdroje. Vzhledem k rozměrům zdroje a velikosti poloměru měřicí kulové plochy rozlišujeme směrovou charakteristiku blízkého a vzdáleného pole.

Charakteristika blízkého pole vystihuje nehomogenity rozložení intenzity záření na ploše zdroje. Charakteristika vzdáleného pole lépe popisuje směrové vlastnosti emise energie. Analýzou obou těchto charakteristik pak lze nejlépe popsat prostorovou koherentnost zdroje záření. [10]

Modulovatelnost zdroje popisuje schopnost zdroje v jistých mezích ovládat intenzitu, amplitudu, fázi nebo kmitočet výstupního záření změnou některé budící veličiny. [10]

1.5 Detekce optického záření

V přijímací části testovacího spoje je nutné zachytit a vyhodnotit přijaté záření. K tomuto účelu slouží detektory optického záření, které jsou popsány níže. Pro detekci optického záření se používají polovodičové detektory. Především se jedná o polovodičové diody, zejména o fotodiody PIN a lavinové fotodiody APD. Tyto detektory musí splňovat následující požadavky:

- vysokou citlivost v pásmu vysílání světelných zdrojů (850 nm až 1550 nm)
- musí zaručit dostatečnou šířku přenášeného kmitočtového pásma
- rychlou časovou odezvu
- malý vlastní šum
- minimální rozměry, současně vhodné pro připojení na optické vlákno
- necitlivost na teplotní změny, změny napájecího napětí a podobně. [1]

Fotodiody PIN jsou velmi rozšířené detektory záření, které mají vysoký kvantový výtěžek (60-80%) a rychlou odezvu. Na vlnových délkách, kde je možné použít jak křemíkové tak germaniové diody, je výhodné dát přednost křemíkovým diodám, neboť jsou teplotně méně závislé.[1]

Lavinové diody jsou v telekomunikační praxi používány z důvodů dosažení větší citlivosti v porovnání s PIN diodami. Jestliže PIN diody jsou založeny na optické excitaci volných nosičů náboje a rekombinančních procesech, nastává v případě lavinových diod proces multiplikace volných nosičů náboje na základě ionizaci v silném elektrickém poli. [1]

Nevýhodou lavinových diod je komplikovanější výroba, jsou také dražší, vyžadují předpětí a proces multiplikace současně zvýší úroveň napětí šumu. Úroveň napětí šumu určuje minimální hodnotu detekovaného optického výkonu dopadajícího záření. Tento optický výkon P_{NEP} je definován jako výkon dopadajícího záření, který vytváří na detektoru stejnou efektivní hodnotu napětí, jako je napětí šumu.

$$P_{NEP} = \frac{P_D \cdot U_\xi}{\sqrt{\Delta f} U_f} \quad (15)$$

kde U_ξ je hodnota napětí šumu

U_f je efektivní hodnota fotonapětí

Δf je šířka pásma zesilovače

P_D je dopadající optický výkon záření na plochu detektoru. [1]

Dalším důležitým parametrem je kvantová účinnost. Ta je definována jako část dopadajícího toku fotonů, která je absorbována v polovodiči a vytváří nosiče proudu, jež jsou sbírány podél přechodu p-n. Velikost proudu (fotoproudu), jež vzniká pohlcením světelného záření o středním výkonu P (tomu odpovídá množství dopadajících fotonů $P/h\nu$), je dána výrazem

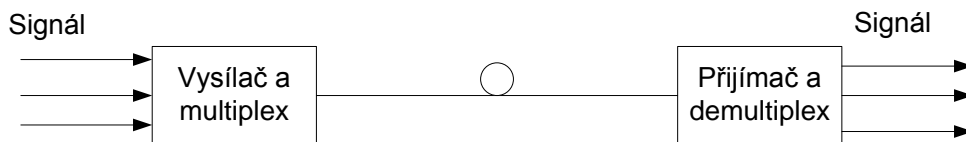
$$I = \eta \frac{q}{h\nu} \cdot P \quad (16)$$

kde η je kvantová účinnost, h je Planckova konstanta a q je náboj elektronu. [1]

1.6 Multiplexy pro použití v optických vláknových spojích

Použití multiplexů a demultiplexů v testovacím spoji umožní, aby se jedním svazkem testovala atmosféra na dvou vlnových délkách. V tomto případě se jedná o vlnově dělený multiplex s případným použitím také časového multiplexu. Více jsou multiplexy a jejich technická realizace popsány níže.

Multiplexem se rozumí současný přenos (sloučení) více než jednoho signálu jednou komunikační trasou a jejich opětovné oddělení na přijímací straně. [2] Princip optického multiplexního přenosu je naznačen na obrázku 5.



Obrázek 4 Optický přenos s využitím multiplexu.

Pro multiplex (vícenásobný přenos) existuje řada způsobů:

- frekvenční multiplex – v tomto případě se jednotlivé signály přenáší do vyšších kmitočtových pásem, kde se vytváří tzv. skupiny. Tyto skupiny se modulují na optický signál vznikající v laseru nebo luminiscenční diodě. Celý multiplexní systém zůstává v oblasti elektronických obvodů a možnosti takto vzniklého vícenásobného přenosu jsou omezeny parametry zdrojů světelného záření. [2]
- časový multiplex - každému danému signálu je přidělen časový interval, po jeho dobu trvání je na straně vysílače připojen vysílač a na přijímací straně je připojen přijímač pro daný signál. [2]
- elektronický multiplex – po optickém vlákně (pouze jednom) se přenáší signál vícestavový (nikoliv pouze binární). Tím stoupne přenosová rychlost m - krát, kde m je počet stavů. [2]
- prostorový multiplex – využívá ke své činnosti více optických vláken pro přenos různých signálů. [2]
- vlnový multiplex (WDM) – ke své činnosti využívá možnost vyzařování různých zdrojů světla o různých vlnových délkách v jednom svazku. Na jednotlivé vlnové délky jsou modulovány jednotlivé informační zdroje. [2]

- hybridní multiplex – pod tímto názvem si můžeme představit sloučení vlnového multiplexu s elektronickým multiplexem. [2]

1.6.1 Realizace WDM

Multiplexory a demultiplexory (vlnově dělené multiplexy – WDM) jsou jednoduchá pasivní zařízení. Jejich cílem je sloučit několik optických signálů do jednoho výsledného optického signálu. Slučování a dělení optických signálů lze provádět třemi způsoby. Použitím soustavy dielektrických filtrů, uspořádáním vlnovodů do mřížky (AWG) a Braggovou mřížkou. Vytvoření vlnově děleného multiplexoru je jednodušší, než vytvoření demultiplexoru. Demultiplexory musí mít velmi malou velikost kanálových přeslechů a nesmí být citlivý na velikost polarizace. [21]

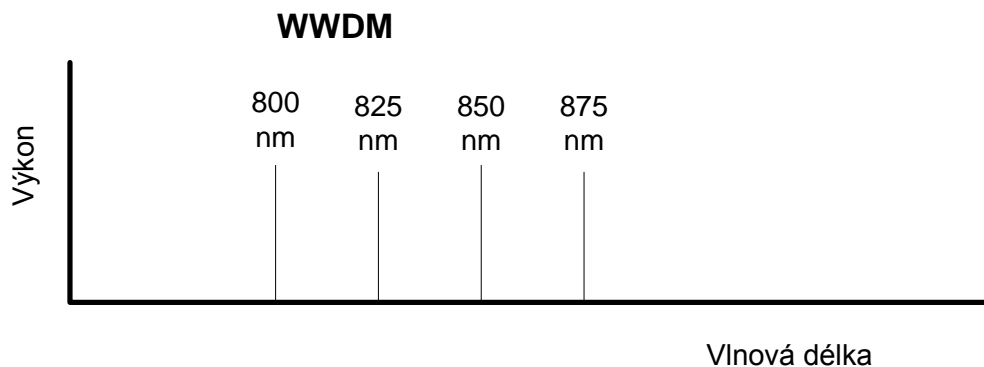
Soustava dielektrických filtrů v demultiplexoru využívá postupného dělení signálu na jednotlivé vlnové délky. Světelný signál dopadne na první filtr. Na tomto filtru se oddělí jedna nebo více vlnových délek, ty se pak dělí dalšími filtry a dopadají na optický přijímač. Zbylé signály jsou obdobně odraženy na další filtr. Takto postupně dojde k oddělení všech signálů. Dielektrické filtry je možné realizovat čtyřmi způsoby. Jedná se o Fabry-Perotův filtr, Mach-Zehnderův filtr, Michelsonův filtr s vláknovou mřížkou a akusticko-optický filtr. [21]

Při použití uspořádání vlnovodů do mřížky (AWG) v demultiplexoru je na vlákno navařena hvězdicová odbočnice, která rozděluje vstupní signál do vlnovodů. Počet větví určuje počet kanálů. Větve jsou velikostí podobné původnímu vláknu. Vstupní signál se rovnoměrně rozdělí do jednotlivých vlnovodů (větví). Jejich délky jsou přesně určeny tak, aby signály z nich vystupující interferovaly. Větve jsou vedeny vedle sebe v soustředných obloucích, aby došlo k posunu fází procházejícího signálu. Výhodou této technologie je realizace velkého množství kanálů a malé ztráty. [21]

V případě Braggovy mřížky se jedná o difrakční mřížku, která odráží vstupní signál z jednoho vlákna do několika výstupních vláken za pomoci optické čočky. Na tuto čočku již dopadají oddělené vlnové délky jednotlivých kanálů. Další možností, jak vytvořit Braggovu mřížku, je vytvoření periodických a plynulých změn indexu lomu vlákna. Ze vstupujícího signálu se pak odrazí vlnová délka, na kterou je mřížka naladěna. [21]

1.6.2 Technologie WWDM

WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), tzv. široký vlnový multiplex, ve většině případů používá čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm (vícevidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300 a 1310 nm (vícevidová nebo jednovidová optická vlákna). Technologie WWDM je nejvíce používána pro přenos Gigabitového a 10 Gigabitového Ethernetu. Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typický odstup 25 nm. [1]



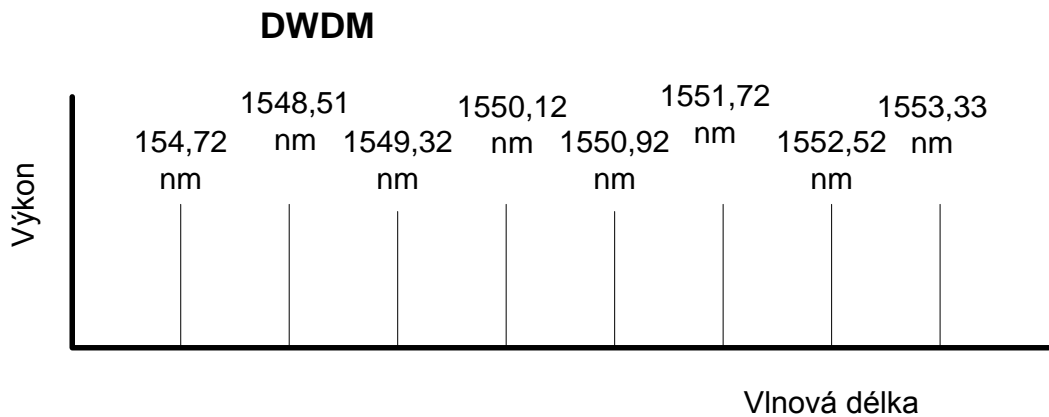
Obrázek 5 Rozložení kanálů WWDM v oblasti 850 nm.

1.6.3 Technologie DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) je tzv. hustý vlnový multiplex. Tento multiplex umí do jednoho vlákna implementovat desítky vlnových délek díky minimálnímu odstupu mezi jednotlivými kanály. Pro toto řešení se využívá jednovidových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Také je nutné zajistit dostatečnou kmitočtovou stabilitu a extrémně úzkou spektrální čáru. Stabilitu laseru zajišťujeme buď zvenčí (injekční synchronizací, fázovým závěsem), pomocí rozproštěné zpětné vazby, nebo braggovských zrcadel. Protože selektivita optických filtrů je v nejlepším případě 10 THz, rozčlenění kanálů se musí provádět na mezifrekvenci pomocí elektronických filtrů. V přijímači proto musí být implementovaný směšovač a místní oscilátor ve formě kmitočtově stabilizovaného vysoce koherentního zdroje světla. [1]

Doporučení ITU-T G. 694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“ specifikuje jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz), (S, C a L pásmo). Doporučení ITU-T G.694.1 počítá s odstupem jednotlivých kanálů v rozsahu 100 GHz se začátkem na 186,00THz (odstup přibližně 0,8 nm) nebo s dvojnásobným počtem kanálů s odstupem 50 GHz (cca 0,4 nm). U přenosů DWDM se požadavek na odstup signál/šum zvyšuje s rostoucí přenosovou rychlostí. [1]

Pro kvalitu přenosu je důležitá malá odchylka skutečné vlnové délky kanálu od předepsané. Mluvíme o odchylce o více než 0,2 nm odstupu nosných signálů. Pro dostup nosných 100 GHz z toho plyne požadavek, že skutečná vlnová délka musí mít toleranci ± 20 GHz (odpovídá $\pm 0,16$ nm). Šířka pásma optického signálu přenášeného v jednom kanálu je závislá na šířce pásma původního signálu a může být zhoršena (rozšířena) nevhodnou modulační technikou. [1]



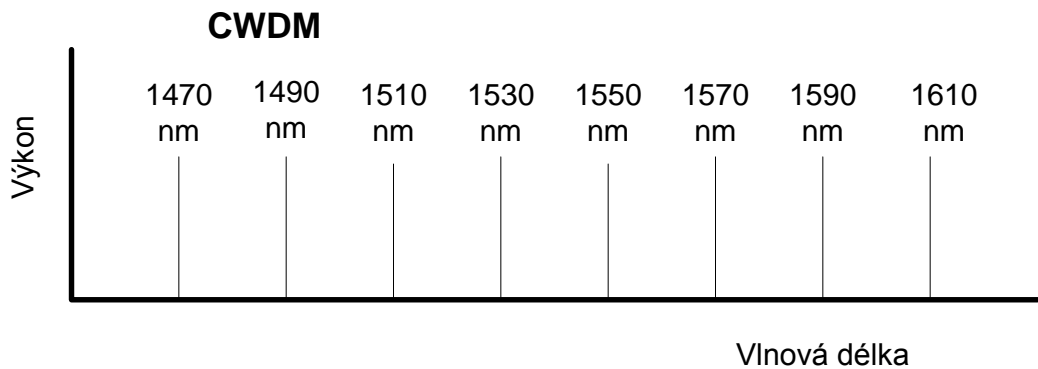
Obrázek 6 Kanály DWDM v oblasti 1550 nm podle normy ITU-T G. 694.1.

1.6.4 Technologie CWDM

Tato technologie umožňuje přenos několika signálů paralelně po jednom vlákně. Pasivní CWDM je vyřešen bez nutnosti využívat elektrickou energii. Odděluje vlnové délky pomocí pasivních optických komponentů, jako jsou pásmové filtry a hranoly. [1]

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) tento „hrubý“ vlnový multiplex vznikl jako levnější varianta DWDM. Technologie CWDM využívá na rozdíl od DWDM větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály. V doporučení ITU-T G.671 bylo specifikováno, že CWDM by mělo mít odstup mezi jednotlivými kanály menší než 50 nm a 8 nm pro vlnovou délku 1550 nm. [1]

Podle doporučení ITU-T G-694.2 – „Spectral grids for WDM application: CWDM wavelnegth grid.“ z roku 2002 je tento standart definován tak, aby bylo možné jako zdroje záření použít laserové diody bez nároku na chlazení při dostatečné velikosti odstupu vlnových délek. Jednotlivé vlnové délky byly zvoleny s přihlédnutím na kompatibilitu s nejčastěji použitými vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm. Při využití všech vlnových délek technologie CWDM je k dispozici 18 kanálů. [1]



Obrázek 7 Kanály CWDM s definovaným odstupem dle ITU-T G.694.2.

Tato ITU norma byla vytvořena pro standardizování CWDM pro přenos optickým vláknem. Dříve se jednalo o současné vysílání na vlnových délkách 1550 nm a 1310 nm. Hlavním znakem současné ITU normy je, že na trase nejsou rozmístěny optické zesilovače. Tudíž je tato technologie vhodná pro sítě rozsahu WAN o velikosti 60 km a datovém přenosu z 2,5 Gbit/s.

Nejjednodušší realizací CWDM technologie je použití optického splitteru. Jedná se o zařízení, které slouží k rozdělení optického výkonu do více optických vláken, nebo naopak sloučení signálů z více vláken od jednoho optického vlákna. Jádrem takového řešení je vláknová odbočnice, která provádí pasivní rozdělení optického signálu do více směrů. Typicky se jedná o jeden vstup a dva výstupu (dva vstupy, jeden výstup). Poměr odbočnice může být různý, typicky se používá poměr dělení 50:50, 30:70 a 70:30. Optická odbočnice není závislá na protokolu a normách o přenášených rychlostech. Jedinou její nevýhodou je zeslabení optického signálu. Toto zeslabení nemusí být v obou větvích stejné, ale řídí se podle poměru rozdělení výkonu do větví. [20]

1.6.5 Kvalita multiplexních přenosů

Optické nosné vlny, odpovídající jednotlivým kanálům, lze rozmístit poměrně rovnoměrně v celém pásmu propustnosti prostředí, kterým se šíří. Rozmístění musíme provést s ohledem na útlum a disperzi prostředí, na dostupnost zdrojů světla pro příslušné vlnové délky a na selektivitu optických filtrů. [1]

Současné technické možnosti umožňují realizaci cca 40 vlnových přenosových zařízení. Rozestup kanálu je určen:

- šířkou spektra emitovaného světla $\Delta\lambda$, pokud jsou jako zdroje použity luminiscenční diody,

- přesností a stálostí střední hodnoty vlnové délky emitovaného světla $\lambda_{stř}$ při použití laserových diod,
- vlnovou selektivitou optických filtrů v multiplexoru a demultiplexoru.[1]

Pro přenos více kanálů v jednom prostředí můžeme definovat odstup kanálů, jako rozdíl dvou blízkých vlnových délek optického záření

$$\Delta\lambda = \lambda_{j+1} - \lambda_j \quad [-] \quad (17)$$

Hodnota $\Delta\lambda$ je závislá na použitých zdrojích záření a na konstrukci optických multiplexů a demultiplexů. [1]

Dalším důležitým parametrem multiplexorů a demultiplexorů je jejich vložný útlum. Pomocí vložného útlumu popisujeme ztráty, které zákonitě vzniknou při průchodu optického signálu prvkem multiplexoru a demultiplexoru. Vložný útlum můžeme popsat matematickým vztahem:

$$a_j = 10 \log \frac{P_{\lambda_{jvst}}}{P_{\lambda_{jvýst}}} \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

kde $P_{\lambda_{jvst}}$ představuje výkon optického záření vstupujícího do multiplexoru nebo demultiplexoru a $P_{\lambda_{jvýst}}$ představuje výkon optického záření po průchodu multiplexorem nebo demultiplexorem. [1]

Ze vztahu (18) můžeme vypočítat hodnotu vloženého útlumu, která bude pro každou vlnovou délku jiná. Optický multiplexor nebo demultiplexor je pak hodnocen pomocí maximální hodnoty vloženého útlumu pro zkoumaný systém. [1]

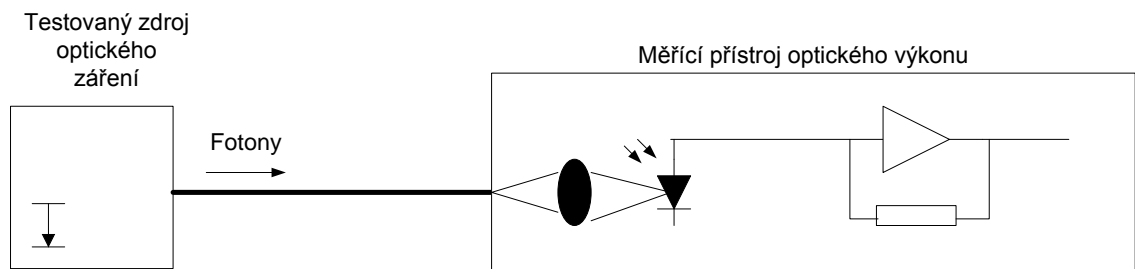
Dalším parametrem, určeným k hodnocení vlnově děleného multiplexu, je útlum přeslechu. Můžeme jej vyjádřit pomocí poměru výkonů:

$$a_{ji} = 10 \log \frac{P_{\lambda_{jvst}}}{P_{\lambda_i} \cdot \lambda_{ivýst}} \quad [\text{dB}] \quad (19)$$

kde $P_{\lambda_{jvst}}$ je výkon záření vstupujícího do systému na vlnové délce λ_j a $P_{\lambda_i} \cdot \lambda_{ivýst}$ je výkon záření na vlnové délce λ_i na výstupu pro vlnovou délku λ_i .

1.7 Výkonové hodnocení optického spoje

Pro hodnocení optického svazku v přijímači je jedním z klíčových parametrů hodnota výkonu a případná změna této hodnoty v čase. Výkonové měření slouží k základnímu hodnocení ve všech oblastech optiky. Na obrázku níže je blokové schéma jednoduchého výkonového měřiče.



Obrázek 8 Měření optického výkonu [11]

Světlo z optického zdroje je pomocí čočky soustředěno na polovodičový fotodetektor. Fotodetektor konvertuje optický výkon na úměrně velký elektrický proud. Účinnost přeměny mezi vstupním optickým výkonem a výstupním proudem na fotodetektoru se označuje jako odezva a je měřena v jednotce A/W . [11]

Odezva detektoru pro měření optického výkonu musí být správně kalibrována. Bohužel, všechny fotodetektory mají odezvu jako funkci vlnové délky. Znalost vlnové délky je nutná pro získání správných hodnot optického výkonu. Naštěstí existují fotodetektory s odezvou, která je relativně nezávislá na vlnové délce v rozsahu vlnových délek používaných na přenos optického signálu. Další možností, jak tento problém odstranit je použití termodetektoru, který měří teplotní změnu vyvolanou optickým svazkem. Jejich použití mimo přesně definované laboratorní podmínky je ale problematické (nestálá teplota a povětrnostní podmínky). [11]

Fotodetektory jsou schopné měřit optický výkon v rozsahu -110 dBm až $+10$ dBm. Horní hranice snímaného výkonu je dána saturací fotodiody, která způsobí pokles odezvy. Pro měření vyšších výkonů je nutné použít kalibrovaný optický zeslabovač. Pro měření nízkých hodnot optického výkonu je nutné omezit vliv přírodního světla nebo jiných zdrojů záření, které mohou vysílat na měřených vlnových délkách a ovlivnit tak měření.

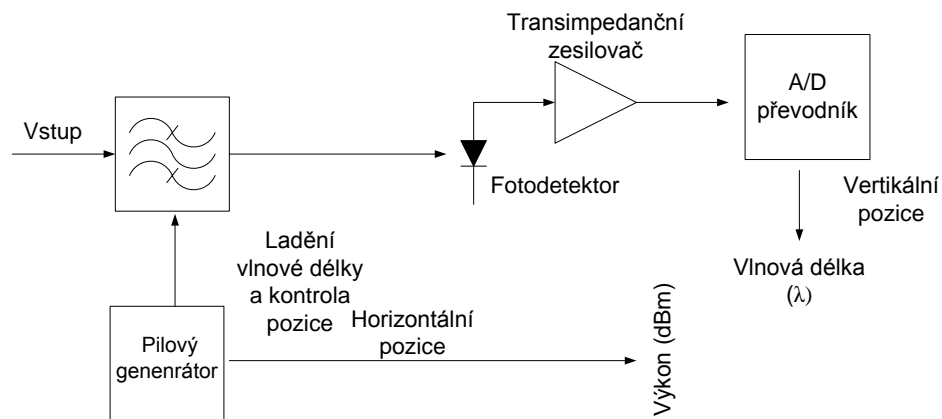
Hodnoty optického výkonu P v dBm získáme vztáhnutím naměřeného výkonu k jednotkovému výkonu, viz vztah (13)

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_W}{1 \text{ mW}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

Použití různého typu diody může ovlivnit naměřené výsledky. Jednotlivé typy fotodiod mají pro stejnou vlnovou délku jinou odezvu. Germaniová dioda je doporučena při měření spektrálně úzkého svazku a vlnová délka je přesně známa. Splnění této podmínky je především důležité na vlnových délkách okolo 1550 nm. V okolí této vlnové délky produkuje germaniová dioda 1% chyby, pokud uvažujeme vlnovou délku nepřesně o 1 nm. [11]

1.8 Spektrální hodnocení optického spoje

Spolu s hodnotou výkonu na přijímací straně nás také zajímá spektrum přijatého paprsku. Měření optického spektra je v podstatě analýza optického výkonu v závislosti na vlnové délce. Spektrum světelného zdroje je důležitým parametrem v optických komunikacích. Blokové schéma obecného spektrálního analyzátoru je zobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 9 Blokové schéma obecného optického spektrálního analyzátoru

Vstupující světlo projde přes laditelný optický filtr, který oddělí jednotlivé spektrální složky. Fotodetektor poté převede optický signál na elektrický proud v poměru k indikovanému elektrickému výkonu. [11]

Proud z fotodetektoru je převeden na napětí pomocí transimpedančního zesilovače. Toto napětí je následně vzorkováno v A/D převodníku. Všechny ostatní úpravy, jako například korekce signálu, jsou prováděny v digitální oblasti. Signál je poté přenesen do zobrazovače jako funkce osy x a osy y. [11]

Pilový generátor rozhoduje o horizontální pozici signálu. Pilový generátor taktéž ladí optický filtr tak, že centrální vlnová délka je vhodně zobrazena na horizontální ose. Výsledkem je křivka závislosti vlnové délky na výkonu. [11]

1.8.1 Detektory ve spektrometrech

Funkcí fotodetektoru je převod vybraného světla na elektrickou energii. Tento převod je nutný pro pozdější zpracování signálu a jeho zobrazení nebo uložení. Fotonásobiče jsou často použity na vlnových délkách kratších než 1 μm ve velmi citlivých detektorech. Ke správné činnosti fotodetektoru je nutná znalost rozsahu vlnových délek, na kterých chceme provádět měření. Šířka pásma zesilovače, který je zařazen za fotodetektozem, je hlavním faktorem, který ovlivňuje citlivost a dobu cyklu spektrálního analyzátoru.

1.9 Hodnocení polarizace vlny optického spoje

Kontrola polarizace v přijímací části je důležitá pro získání celkového obrazu o přijatém svazku. V nepolarizované vlně elektrické pole \mathbf{E} vibruje v rovině kolmé na směr šíření a nevykazuje žádné specifické směrové nebo rotační chování. To znamená, že tento vektor může svírat libovolný úhel se směrem šíření. Paprsek je polarizován, pokud vektor elektrického pole svírá se směrem šíření jeden úhel, který se v čase nemění. Pak můžeme mluvit o lineární polarizaci. Některé látky mají schopnost stáčet rovinu polarizace. Pak můžeme mluvit o eliptické nebo kruhové polarizaci. [12]

Typ polarizace můžeme nejlépe popsat jako sumu dvou lineárně polarizovaných vln. [12]

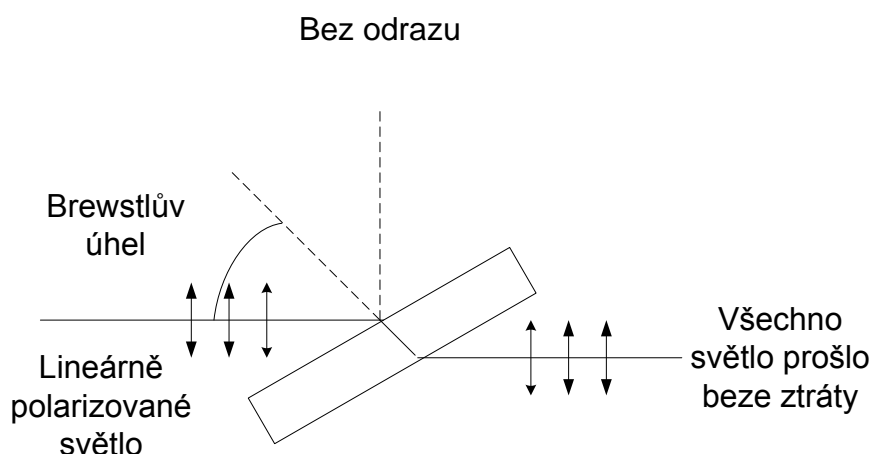
$$E_x = A_x \cos(\omega t) \quad a \quad E_y = A_y \cos(\omega t + \varphi) \quad (21)$$

Dvě vlny mají stejnou frekvenci a jejich vektor \mathbf{E} je kolmý na směr šíření. A_x a A_y představují amplitudy. Obecný případ představuje eliptickou polarizaci světla, kdy kmity mění jak velikost, tak směr s časem. Špička vektoru opíše elipsu během jedné periody vlny. Pro úhel $\varphi = \mu/2$ a $A_x = A_y$ špička vektoru opíše kruh a o světelné vlně můžeme říct, že je kruhově polarizována. Pokud je $\varphi = 0$, jedná se o lineární polarizaci vlny. Pokud se fáze φ mění náhodně v závislosti na čase, označujeme takové světlo jako nepolarizované. Částečně polarizované světlo obsahuje zlomky polarizovaného světla a zbytek není polarizován. [12]

Pokud nepolarizované světlo dopadne na rozhraní jakéhokoliv vhodného materiálu, odražené a lomené světlo je částečně lineárně polarizované. Pod určitým úhlem dopadu, který nazýváme polarizační nebo Brewsterův úhel, je odražené světlo lineárně polarizované v pravém úhlu k rovině dopadu. Brewsterův zákon ukazuje, že vhodný polarizační úhel odraženého paprsku získáme ze vzorce:

$$n = \tan i \quad (22)$$

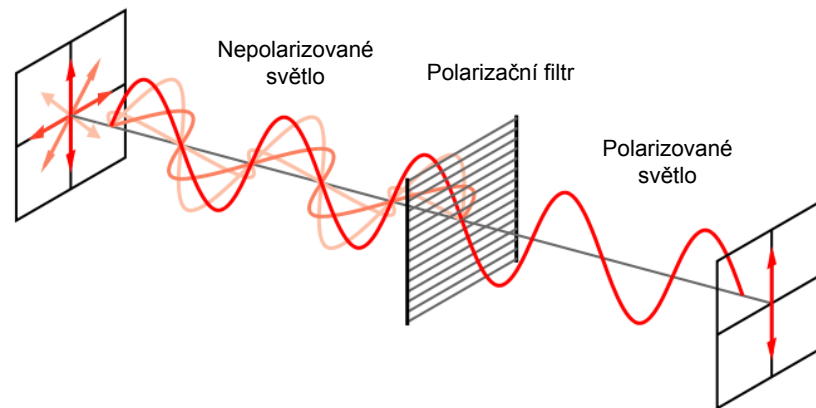
kde i je úhel dopadu a n je index lomu prostředí. Tento případ je zobrazen na obrázku 11, na kterém polarizované světlo kompletně projde prostředím. Tohoto jevu se často využívá v laserových aplikacích. Toto řešení lineární polarizace bývá označováno jako Brewsterovo okno. [12]



Obrázek 10 Průchod světla čočkou a Brewsterův úhel

Další možností, jak získat polarizované světlo z neznámého nepolarizovaného světla je použití polarizátorů. Polarizátory jsou skupinou zařízení, která jsou založena na fyzikálních úkazech, jako je dvojlom, absorpce, odraz, nebo rozptyl. [12]

Některé krystaly mají schopnost absorbovat jednu ze dvou rovin polarizovaného světla, zatímco druhou rovinu propouštějí beze ztrát. Příkladem takového krystalu je turmalín. Většina běžně používaných lineárních polarizátorů je založena na tomto principu. Tyto filtry, polaroidy, jsou zhotoveny ze dvou vrstev průhledného materiálu, mezi kterými je látka s dlouhými molekulami (herapatit). Při výrobě jsou tyto molekuly srovnány do struktury, kdy jsou osy molekul rovnoběžné. Další zajímavý úkaz nastává, pokud světlo dopadá na opticky aktivní látku, jako je terpentýn neb roztok cukru. Rovina polarizace se poté začne stáčet a my získáme kruhově polarizované světlo. [12]



Obrázek 11 Principiální funkce lineárního absorpčního filtru, převzato z [18]

1.9.1 Stokesovy parametry a Poincarého sféra

Stokesovy parametry a jejich zobrazení v Poincarého sféře slouží ke snadnému zobrazení stupně a charakteru polarizace. Polarizovanou vlnu můžeme popsat pomocí tří parametrů. Jde o parametry amplitudy elektrické intenzity a_x a a_y a z nich získaný fázový rozdíl $\delta = a_y - a_x$. Jako náhradu těchto tří parametrů, získaných z amplitudy elektrické intenzity, můžeme použít Stokesovy parametry. Tyto parametry jsou definovány [22]:

$$S_0 = (a_x^2 + a_y^2) \quad (23)$$

$$S_1 = (a_x^2 - a_y^2) \quad (24)$$

$$S_2 = (2a_x a_y \cos(\delta)) \quad (25)$$

$$S_3 = (2a_x a_y \sin(\delta)) \quad (26)$$

Z těchto rovnic můžeme jeden parametr vyjádřit pomocí ostatních, protože se jedná o 4 rovnice se třemi neznámými. Například S_0 :

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (27)$$

Ze Stokesových parametrů můžeme vyjádřit stupeň polarizace vlny - DOP :

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (28)$$

Stupeň polarizace vlny *DOP* má rozpětí hodnot nula až jedna. Je možné jej také vyjádřit v procentech. Pokud je $DOP=100\%$, mluvíme o zcela polarizované vlně. $DOP=0\%$ značí zcela nepolarizovanou vlnu. [22]

Parametr S_0 vychází z optické intenzity vlny. Parametr S_1 specifikuje rozdíl intenzit ve směru os x a y lineárně polarizované vlny. S_2 je vztažen k lineárně polarizované vlně pod úhlem $+45^\circ$ a -45° a jejich vztahem k ose x . Parametr S_3 určuje směr otáčení vlny a udává rozdíl mezi pravotočivou a levotočivou polarizovanou vlnou. [22]

Celková intenzita optické vlny I pro nás často není směrodatná, a proto zavedeme normované Stokesovy parametry. Pro stanovení normovaných Stokesových parametrů uvažujeme parametr $S_0=1$. S tímto předpokladem jsou převodní vztahy na normované Stokesovy parametry následující [22]:

$$s_0 = 1 \quad (29)$$

$$s_1 = \frac{S_1}{S_0} = \frac{(a_x^2 - a_y^2)}{(a_x^2 + a_y^2)} \quad (30)$$

$$s_2 = \frac{S_2}{S_0} = \frac{(2a_x a_y \cos(\delta))}{(a_x^2 + a_y^2)} \quad (31)$$

$$s_3 = \frac{S_3}{S_0} = \frac{(2a_x a_y \sin(\delta))}{(a_x^2 + a_y^2)} \quad (32)$$

Další možností, jak vyjádřit Stokesovy parametry je využití parametru s_0 a úhlů χ a ψ . Rovnice pro jejich vyjádření [22]:

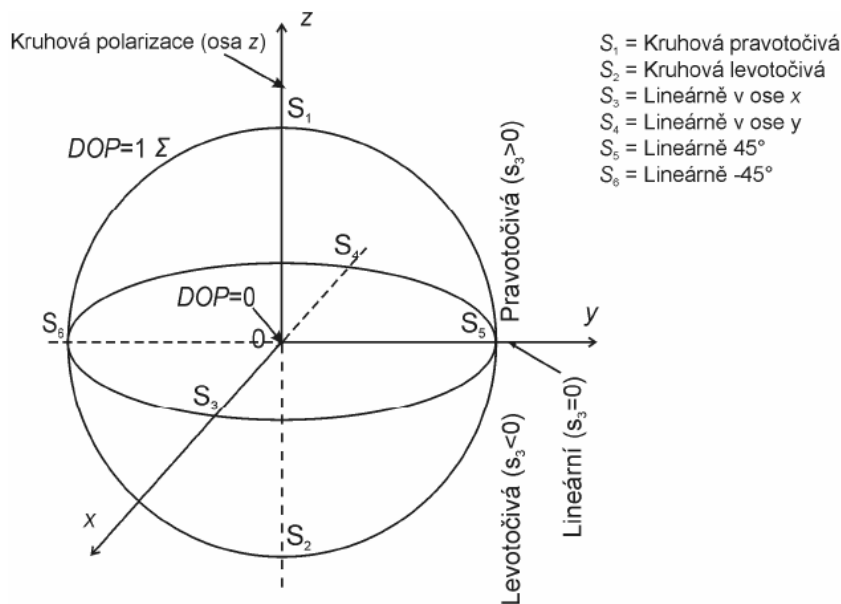
$$s_1 = s_0 \cos(2\chi) \cos(2\psi) \quad (33)$$

$$s_2 = s_0 \cos(2\chi) \sin(2\psi) \quad (34)$$

$$s_3 = s_0 \sin(2\chi) \quad (35)$$

Výše uvedené rovnice jsou parametrickým vyjádřením kulové plochy Σ v kartézské soustavě souřadnic. Kulové plocha se nazývá Poincarého sféra. Z bodu definovaného Stokesovy parametry do Poincarého sféry lze určit stupeň polarizace i její charakter. Pokud bod $S=[s_1, s_2, s_3]$ leží na plášti Poincarého sféry je intenzita nepolarizované části nulová a stupeň polarizace $DOP = 100\%$. V tomto případě se jedná o úplně polarizovanou vlnu. Jestliže se bod S nachází uvnitř Poincarého sféry, nejedná se o úplně polarizovanou vlnu a je nutné zabývat se stavem polarizace. Při $s_3=0$ bod S leží na ose xy a vlna je lineárně polarizovaná. Bod S ležící na ose z značí čistě kruhově polarizovanou vlnu. V horní části polokoule, kde $z>0$ mluvíme o pravotočivé polarizaci.

V dolní části polokoule se jedná o polarizaci levotočivou. Na obrázku 12 je zobrazena Poincarého sféra a některé příklady polarizačních stavů. [22]



Obrázek 12 Poincarého sféra a možnosti určení stavu polarizace optické vlny [22]

1.10 Vlnová délka

Vlnová délka slouží k popisu vlnění. Udává vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají ve fázi. Můžeme ji matematicky vyjádřit:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} [m] \quad (36)$$

kde T je perioda, f je frekvence a v je fázová rychlost vlnění.

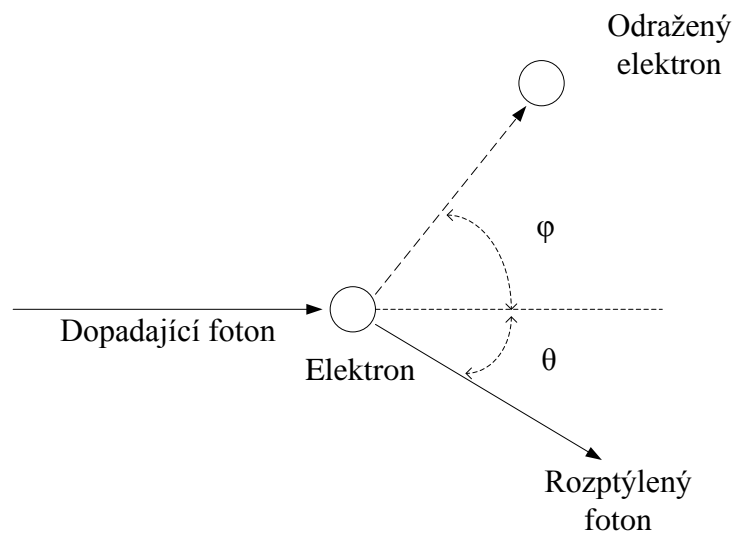
Kvantový popis elektromagnetického záření předpokládá, že fotony mají vlastnosti částic. Z tohoto předpokladu vyplývá možnost interakce mezi fotonem a jinou částicí, například elektronem. Při této interakci dojde k předání energie mezi fotonem a elektronem. Elektron získá energii a dá se do pohybu ve směru způsobeném fotonem. Foton se odchýlí od své původní dráhy a část své energie ztratí. Rozptýlený foton s nižší energií má větší vlnovou délku než původní foton. Tento jev převládá u energií záření (100keV až 10 MeV) s látkami s malým atomovým číslem. Dalšími interakcemi foton ztrácí energii a může zaniknout fotoelektrickým jevem. Popsaný jev se nazývá Comptonův rozptyl. Tento jev můžeme popsat rovnicí:

$$\lambda_s - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad (37)$$

kde:

- λ_s a λ_i jsou vlnové délky rozptýleného a dopadajícího fotonu,
- h je Planckova konstanta,
- m_0 je klidová hmotnost částice, se kterou foton interaguje,
- c je rychlost světla,
- θ je rozptylový úhel.[25]

Nová vlnová délka je tím větší, čím menší je klidová hmotnost rozptylující částice. Ale i pro lehkou částici, jakou je elektron, je nová vlnová délka malá ve srovnání s vlnovou délkou viditelného záření. Proto je téměř nemožné pozorovat Comptonův jev v oblasti viditelného záření. Pro menší vlnové délky (0,1 až 0,01 nm) je možné posuv vlnové délky bez problémů měřit. [25]



Obrázek 13 Princip Comptonova rozptylu

2 MĚŘICÍ SOUSTAVA

2.1 Zkoumaný problém

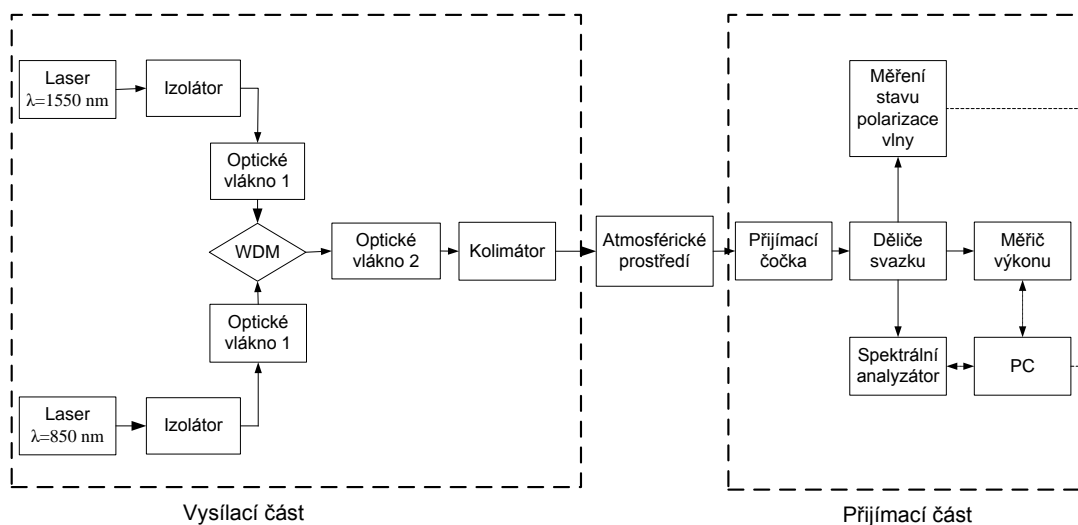
Vysílací část našeho zařízení, složená z laseru, optických vláken a pasivního WDM, bude na svém výstupu svítit do atmosféry. Předpokládáme, že atmosférické prostředí procházející paprsek ovlivní. Může jít o změny polarizace, posun ve spektru nebo dojde k útlumu vlivem šíření. K prozkoumání těchto změn jsme sestavili měřicí řetězec, který slouží k získání komplexní informace o vystupujícím optickém paprsku. Cílem našeho měření je získat informaci o výkonu, spektru a polarizaci laserového paprsku v závislosti na čase.

2.2 Měřicí soustava

Pro měření výše uvedeného problému jsme vytvořili měřicí řetězec pro současné zjištění výkonu, spektra a polarizace přijímaného světelného záření. Jako vysílače použijeme lasery LP80-SF30 a LPSC - 1550- FC. Tyto lasery střídavě vysílají přes výstupní vlákno a pasivní WDM do atmosférického prostředí. Obě vlnové délky jsou vysílány ze stejného místa se stejnou rozbíhavostí do atmosférického prostředí. Mezi výstup vlákna a WDM je zařazen optický izolátor, který slouží jako ochrana laserů před poškozením od odraženého paprsku ve zpětném směru. Atmosférické prostředí budeme po čas měření měnit. Měření bude prováděno v laboratoři, tudíž neovlivněnou laboratorní atmosféru považujeme za homogenní a čistou.

Dělič svazku slouží k rozdělení paprsku do dvou měřících přístrojů – do měřiče výkonu, optického spektrálního analyzátoru a polarimetru. Podmínkou správné činnosti děliče svazku je časová stálost jeho parametrů. Vliv na procházející paprsek se nesmí v čase měnit. K tomuto účelu použijeme na vlnové délce 830 nm hranolový dělič svazku popsáný v kapitole 2.5. Na vlnové délce 1550 nm použijeme systém tvořený dvěma polopropustnými zrcadly, která jsou popsána v kapitole 2.5.1.

Měřič optického výkonu a optický spektrální analyzátor jsou popsány v kapitolách 2.3 a 2.5. Oba tyto přístroje jsou zapojeny do stejného PC, kde je měření synchronizováno s vnitřními hodinami počítače. Stejně tak je to u měřiče polarizace Thorlabs PAX 5710. Princip činnosti tohoto přístroje je popsán v kapitole 2.4.2. Ze záznamu naměřených hodnot pak zjistíme pro konkrétní čas přesné spektrum optického signálu, výkon a polarizaci dopadající optické vlny. Blokové schéma tohoto teatovacího pracoviště je zobrazeno na obrázku 14.



Obrázek 14 Blokové schéma zapojení měřicího řetězce pro současné měření výkonu, spektra a polarizace.

2.3 Měřič výkonu

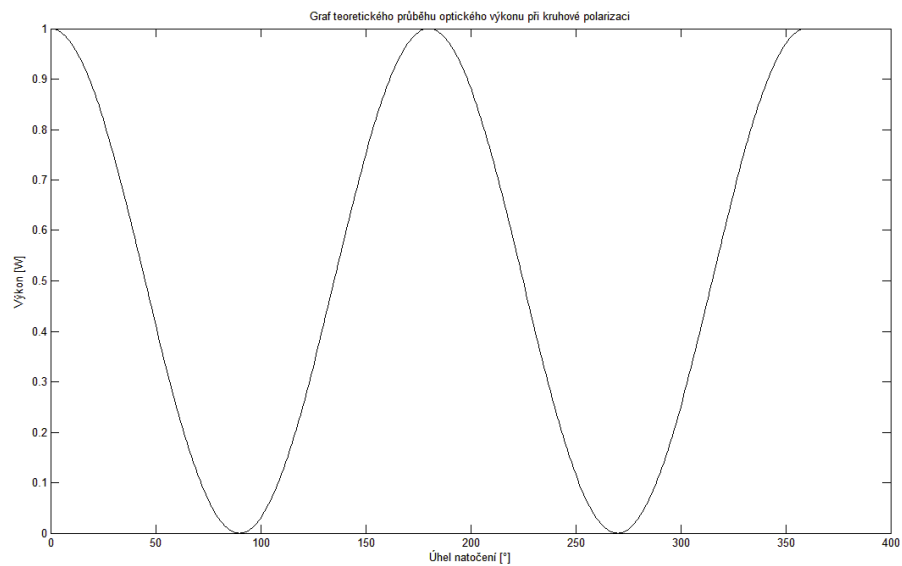
Jako měřicí přístroj na zjištění výkonu použijeme přístroj Ophir VEGA s fotodiodovým senzorem PD300. Tento senzor používá detektor silikonového typu. Sensory tohoto typu mají díky své vysoké citlivosti nízký výstupní proud, pokud nejsou osvětleny. Měřicí přístroj Ophir Vega jsme připojili přes rozhraní USB 2.0 k PC a ovládali jsme jej přes program StarLab 2.40. Program StarLab 2.40 podporuje Component Object Technology od firmy Microsoft a je možné využít vyčítání hodnot přímo do programu Matlab.



Obrázek 15 Použitý měřič výkonu Ophir Vega.

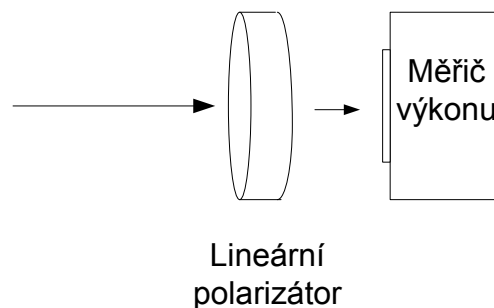
2.4 Měření polarizace

K měření polarizace můžeme použít několik metod. Nejjednodušší metoda využívá lineárního polarizátoru a měřiče výkonu. Osa propustnosti lineárního polarizátoru se nastaví tak, aby na měřič výkonu dopadal maximální optický výkon. Při změně úhlu natočení polarizovaného světla dojde k poklesu výkonu. Tato metoda není příliš přesná a nezískáme pomocí ní informace o směru otáčení polarizovaného světla. Získáme informaci pouze o tom, že došlo ke změně.



Obrázek 16 Teoretický průběh optického výkonu při kruhové polarizaci světla.

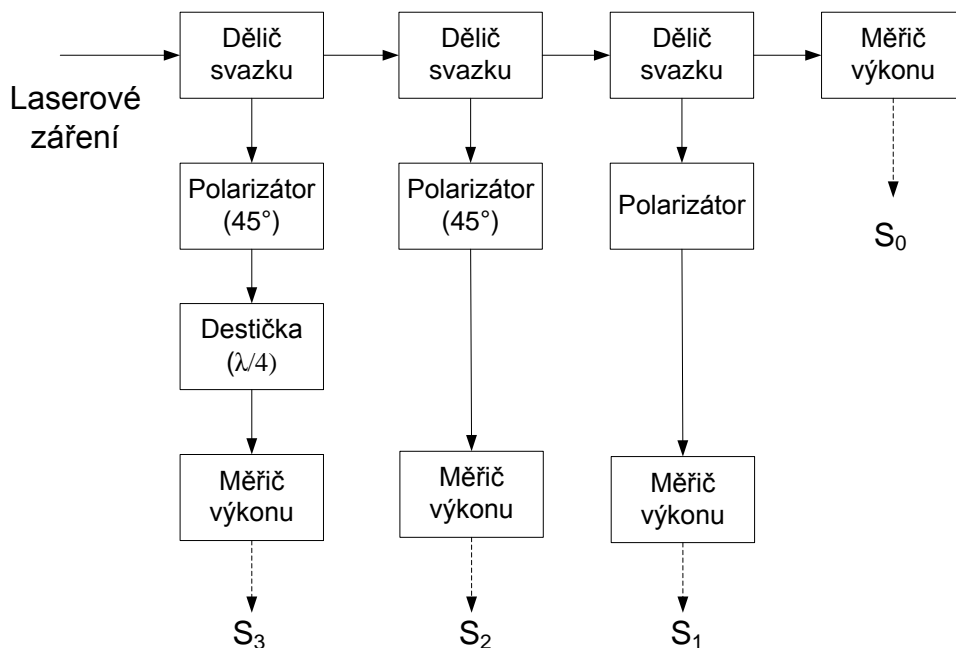
Průběh výkonu má podobu funkce \cos^2 , což koresponduje s principiální funkcí lineárního polarizátoru, popsaného v kapitole 1.9. Reálný průběh nebude dosahovat úplného minima nebo maxima, protože lineární polarizátor při maximálním propustnosti mírně tlumí a při minimální propustnosti část světla propustí.



Obrázek 17 Blokové schéma určení změny polarizace pomocí lineárního polarizátoru.

2.4.1 Měření 4 Stokesových parametrů

Přesnější informace o polarizaci získáme pomocí měření Stokesových parametrů. Současné měření parametrů je možné pomocí 3 děličů svazků. Dělicí poměr těchto děličů nemusí být nutně 5:5, ale je výhodnější poměr 1:9 nebo 2:8. Tak získáme dostatečně velký výkon i za posledním děličem. Zjištěné hodnoty výkonu na jednotlivých větcích je nutné vynásobit potřebným koeficientem, který určuje, jak velká část výkonu je přivedena do měřené cesty. Například do cesty měření koeficientu S_3 při dělicím poměru 1:9 je přivedeno 10 % celkového výkonu, do cesty S_2 9 % celkového výkonu atd. Podrobněji jsou Stokesovy parametry a jejich význam popsány v kapitole 1.9.1.

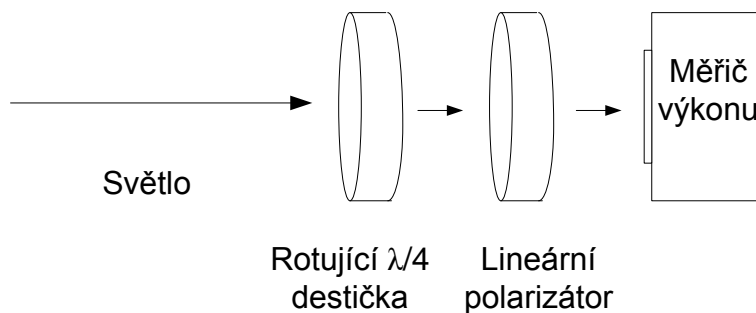


Obrázek 18 Blokové schéma měřicí části pro současné určení 4 Stokesových parametrů.

2.4.2 Metoda využívající rotující $\lambda/4$ destičky

Existují různé metody, jak měřit polarizaci. Metodu pro měření polarizace pomocí 4 detektorů jsme popsali výše. Podobnou techniku využívá měřič polarizace IPM5300. Přístroj dokáže měřit polarizaci s rychlostí 1MS/s. Na přístroji je umístěna technologie měření pomocí rotující $\lambda/4$ destičky. [24]

Technologie rotující $\lambda/4$ destičky je implementována v optickém senzoru PAX57xxx a skládá se z rotující $\lambda/4$ destičky, lineárního polarizátoru a fotodiody. Vlnová destička transformuje vstupní polarizaci. Lineární filtr přenáší pouze tu část světla, která je rovnoběžná s osou převodu. Fotodioda slouží jako měřič výkonu. [24]



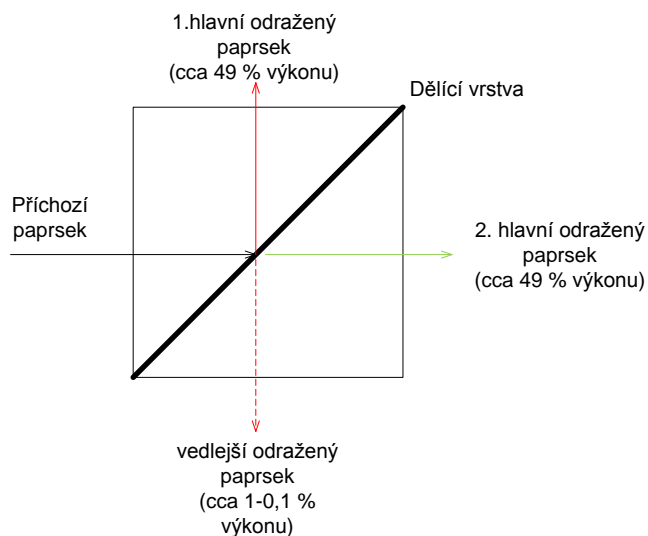
Obrázek 19 Princip měření polarizace světla mopoví rotující $\lambda/4$ destičky.

Příchozí polarizované světlo je změněno pomocí rotující vlnové destičky a nová odpovídající polarizace závisí na úhlu $\lambda/4$ destičky. Takže pokud je vstupní světlo lineárně polarizováno a čtvrtvlnná destička je srovnána s rychlou osou světla, výsledné světlo projde nezměněno. Po pootočení destičky o 45° je světlo rotováno doprava. Další 45° nám dá opět lineární polarizaci, destička je srovnána s pomalou osou světla. Další otočení na 135° rotuje výsledné světlo doleva a 180° má za výsledek původní polarizaci světla. [24]

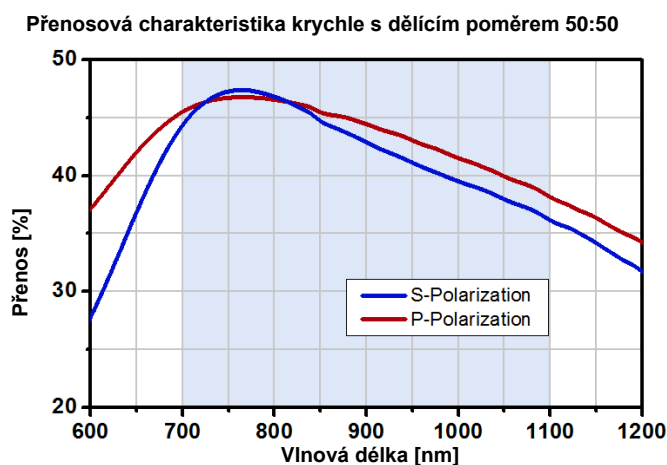
Lineární polarizátor transformuje polarizační modulaci na amplitudovou modulaci. Detektor dodává proud, který je proporcionálně úměrný přijatému optickému výkonu a druhé mocnině intenzity elektrického pole. Proud fotodiodou se skládá ze tří částí. Z DC části, z části s frekvencí dvojnásobnou než je frekvence otáčení $\lambda/4$ destičky a části s frekvencí rovnou čtyřnásobku frekvence otáčení $\lambda/4$ destičky s fázovým posuvem. Celkový změřený sinusový proud je analyzován pomocí Fourierovy transformace. Jsou z něj získány amplitudy a fáze všech tří původních proudů. Všechny ostatní frekvence mají teoreticky nulovou amplitudu. Parametry polarizace (azimut, eliptičnost, *DOP* a Stokesovy parametry) jsou dopočítány z amplitudy A_0 , A_2 a A_4 a fází φ_2 a φ_4 . [24]

2.5 Dělič svazku

Krychlový dělič svazku má poměr dělení výkonu 50:50. Dělicí poměr není závislý na dopadající polarizaci světla. Světlo vycházející z děliče svazku taktéž není polarizováno. Dělič svazku je složen ze dvou trojúhelníkových hranolů, které jsou slepeny polyesterovým lepidlem. Tloušťka vrstvy je nastavena tak, aby pro určitý rozsah vlnových délek 50% světelného svazku prošlo a 50% svazku se odrazilo.[14]



Obrázek 20 Nepolarizační hranol k dělení vstupního paprsku.

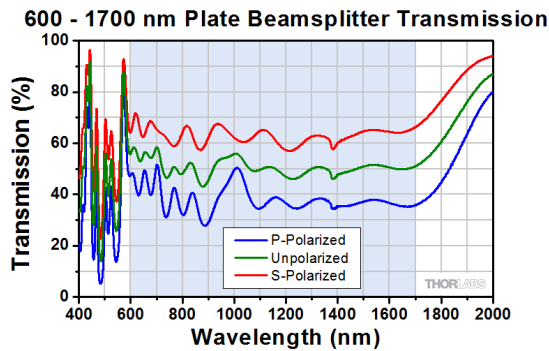


Obrázek 21 Účinnost přenosu světla hranolem v závislosti na vlnové délce (S – polarization označuje lineární polarizaci v horizontálním směru, P-polarization označuje lineární polarizaci ve vertikálním směru). Převzato z [14].

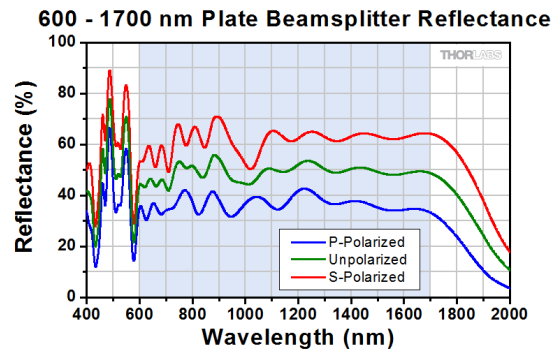
Na obrázku 21 můžeme vidět, že přenos dělicího hranolu je výhodný vždy jen pro malý rozsah vlnových délek. Pro jiné vlnové délky je nutné použít hranol s jinou přenosovou charakteristikou.

2.5.1 Polopropustné zrcadlo

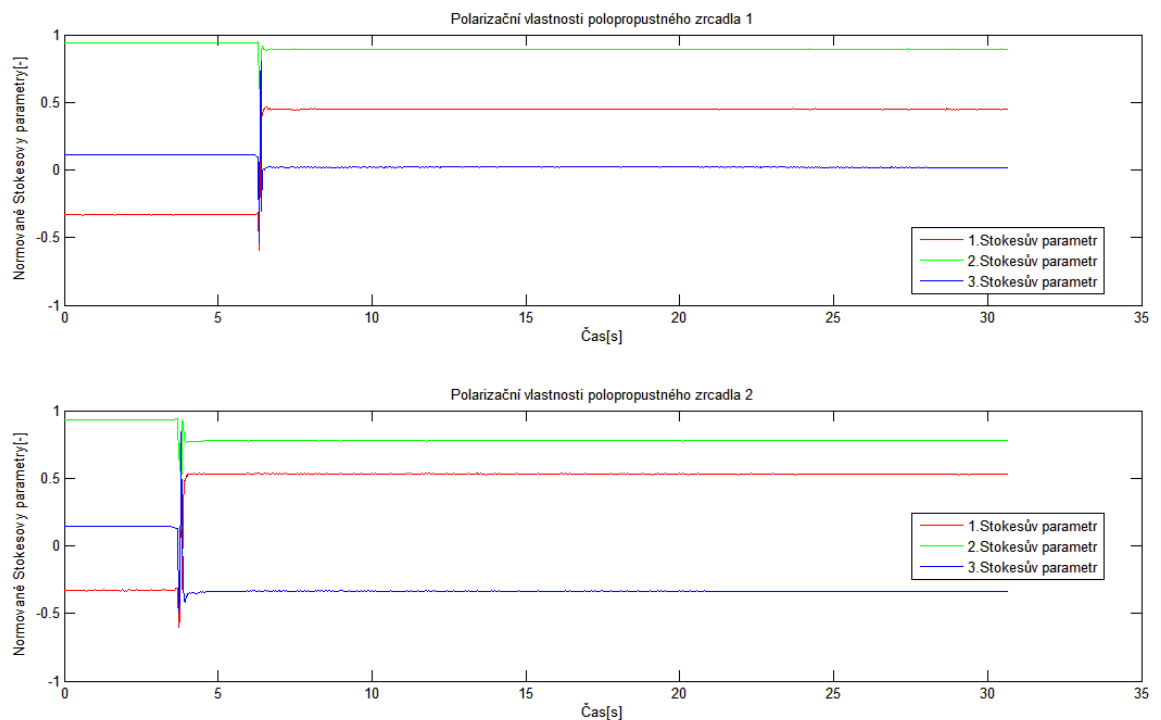
Polopropustné zrcadlo je složeno z destičky skla, na které je napařena vrstva stříbra nebo hliníku. Pokud takovéto zrcadlo postavíme pod úhlem 45° do cesty laserovému svazku, část světla se odrazí a část světla projde. Tato zrcadla mají konstantní útlum pro rozsah vlnových délek okolo 1550 nm. Použité děliče svazku otáčejí polarizaci světla. [14]



Obrázek 22 Přenos polopropustného zrcadla natočeného pod úhlem 45° k ose kolmé na osu šíření vlny závislosti na vlnové délce. Převzato ze [14].

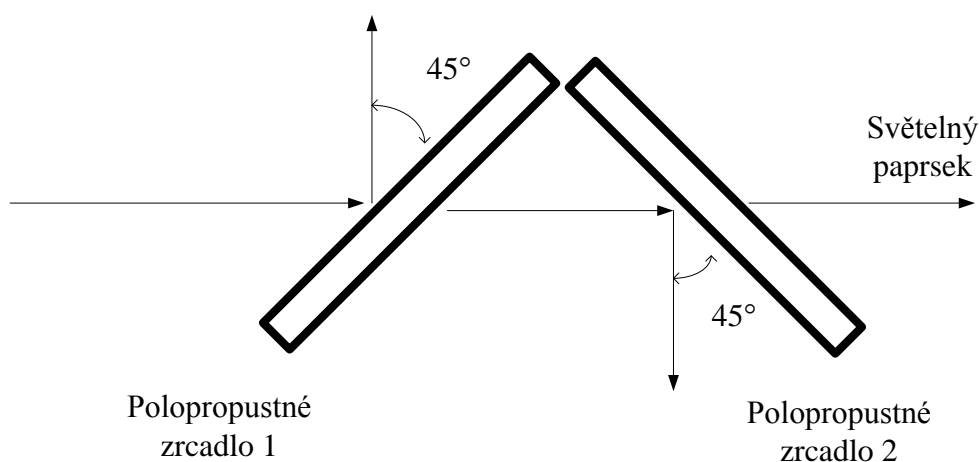


Obrázek 23 Odraz polopropustného zrcadla natočeného pod úhlem 45° k ose kolmé na osu šíření vlny závislosti na vlnové délce. Převzato ze [14].



Obrázek 24 Polarizační vlastnosti použitých polopropustných zrcadel – průběh Stokesových parametrů před a po vložení polopropustného zrcadla.

Vhodně sestavená polopropustná zrcadla můžeme použít pro dělení svazku do tří směrů. Polarizace na jejich výstupech zůstane konstantní, avšak pootočená o 90° oproti vstupní polarizaci. Princip použití polopropustných zrcadel je zobrazen na obrázku 25.



Obrázek 25 Způsob použití polopropustných zrcadel pro rozdělení svazku do tří směrů.

2.6 Infračervený Fourierův optický spektrální analyzátor

Pro zjišťování spektra přijatého světla budeme využívat model MIR 8025 od firmy Newport. Jedná se o Fourierův spektrální analyzátor. Tento typ spektrometrů je dražší než konvenční typy spektrometrů, které využívají monochromátory. Měření jednoho optického spektra je rychlejší pomocí takového analyzátoru, protože informace o všech frekvencích se shromažďují současně. To umožní získání více vzorků, což vede ke zlepšení citlivosti.[12]

Základem IR Fourierova spektrálního analyzátoru je Michelsenův interferometr. Výstupem interferometru je autokorelační funkce vstupního optického signálu, označovaná jako interferogram. Jakmile je interferogram vytvořen, je potřeba jej převést do zobrazení spektra. Tento proces přeměny probíhá přes algoritmus rychlé Fourierovy transformace. Objevitelé této metody jsou J. W. Cooley a J. W. Tukey. Tento objev učinili v roce 1965. Spolu s nárůstem výpočetního výkonu počítačů a jejich klesající cenou se tato metoda stala stále častější. [17]

Důležitým parametrem výpočtu je počet kroků. Přístrojové nedokonalosti a základní skenovací omezení je nutné kompenzovat fázovou korekcí a násilným útlumem vzdálených částí interferogramu. Tyto optické a elektronické nedokonalosti mohou vést k chybným měřením v důsledku různého časového nebo fázového zpoždění různých spektrálních složek. Násilný útlum vzdálených částí interferogramu se používá ke korekci spektrálního úniku. V důsledku zkrácení optického spektra vzniknou uměle vytvořené vlastnosti pozorovaného spektra. Tyto optické analyzátoři mají vysoké rozlišení, protože spektrální rozlišení je dáno změnou optické dráhy při pohybu zrcadla v Michelsonově interferometru. [17]

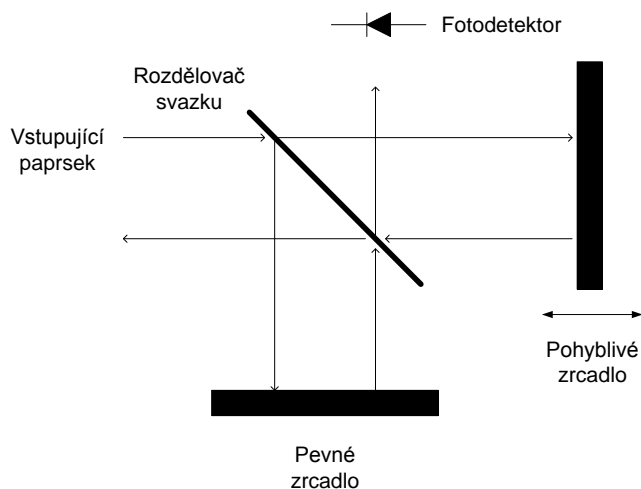
$$v_{min} = \frac{1}{\Delta l_{max}} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (38)$$

Kde v_{min} je rozlišení a Δl_{max} označuje změnu optické dráhy při pohybu zrcadla.

Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je důležitou součástí Fourierova spektrálního analyzátoru. Bez Michelsonova interferometru by nebylo možné realizovat laditelný spektrální analyzátor. Tento interferometer vytváří na fotodetektoru interferenční obrazec mezi signálem a jeho zpožděnou verzí. Vstupní optický signál dopadá na planparalelní destičku (rozdělovač svazku), kde se odráží a láme. V tomto místě je signál rozdělen na dva svazky. Svazek, který je odražen, dopadá na pevné zrcadlo. Od tohoto zrcadla se odráží a dopadá zpět na planparalelní destičku. Na planparalelní destičce se toto světlo znova láme a prochází do detektoru. Lomené paprsky dopadají kolmo na pohyblivé zrcadlo. Od pohyblivého zrcadla se odrazí a jsou směřovány do fotodetektoru. Pokud jsou obě zrcadla stejně vzdálená od planparalelní destičky, jsou i dráhy obou paprsků stejné. Pokud dojde k posunu jednoho zrcadla, vznikne dráhový rozdíl paprsků. V závislosti na velikosti dráhového rozdílu pak vzniknou minima a maxima v interferogramu. [12]

Výsledný průběh z Michelsonova interferometru je autokorelační funkcí vstupního signálu a je označován jako interferogram. Optické spektrální analyzátoři s Michelsonovým interferometrem provádějí přímé měření koherentní délky. Pokud je perioda průchodů nulou v interferogramu přesně změřena porovnáním k normalizované vlnové délce, vlnová délka neznámého signálu může být určena s velkou přesností. Přístroje založené na této metodě dosahují velké přesnosti. Vlnová délka 1550 nm může být touto metodou měřena s přesností 0,0015 nm. [12]



Obrázek 26 Principiální uspořádání Michelsonova interferometru.

2.7 Laserové diody

Laserová dioda je založena na zesilování světla pomocí stimulované emise záření. Laserové diody se svojí konstrukcí příliš neliší od uspořádání luminiscenční diody vyzařující z hrany, musí však více splňovat některé požadavky, které umožňují emisi koherentního záření. [1]

Laserová dioda se skládá ze dvou částí:

- zesilovače světelné vlny
- zpětnovazebního rezonátoru

Pro praktické aplikace, bývá rezonátor polopropustný pouze z jedné strany, aby bylo dosaženo dobré směrovosti záření. Konstrukce laserové diody ovlivní charakter energetické bilance záření, spektrální závislosti a závislosti na teplotě. [1]

Spektrální charakteristika má velmi ostré maximum v okolí vlnové délky λ_m , na kterou je naladěn rezonátor. Intenzita záření ale nepřísluší jen jedné vlnové délce (není dosažena absolutní monochromaticnost), ale je spojitě rozdělena v určitém intervalu vlnových délek. Optický výkon vzrůstá se vzrůstajícím budícím proudem. Se vzrůstající teplotou dochází k posunu spektrální charakteristiky k vyšším vlnovým délkám. [1]

Generované záření laserových diod pokrývá široké spektrum vlnových délek, které se používá v optické komunikaci (830 nm až 1550 nm). Typická šířka pásma je 5 nm s optickým výkonem 10 mW. Úzce směrová vyzařovací charakteristika umožňuje účinné navázání vyzařovaného výkonu do optického vlákna. Účinnost vazby optického zdroje do vlákna je možné vyjádřit:

$$\eta = \frac{P_{\text{vlákna}}}{P_{\text{diody}}} = T \frac{A_{\text{vlákna}}}{A_{\text{diody}}} \quad (39)$$

kde $P_{\text{vlákna}}$, P_{diody} je výkon přenesený do vlákna, výkon diody

$A_{\text{vlákna}}$, A_{diody} je vstupní plocha vlákna, výstupní plocha diody

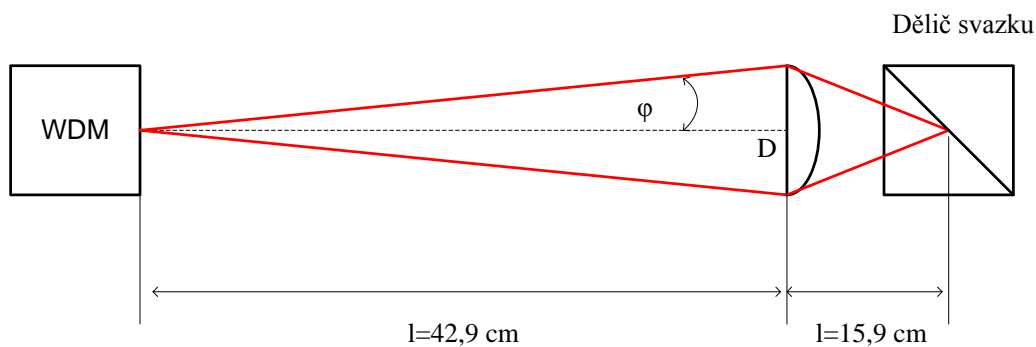
T světelná propustnost prostředí. [1]

Pro ověření funkčnosti naší měřící metody budeme používat jako zdroj optického záření lasery LP832-SF30 a LPSC - 1550- FC. Jedná se o polovodičové lasery, které vysílají na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm. Oba tyto lasery vysílají do jednovidového optického vlákna, které je po 1 m zakončeno konektorem („pigtail“). Konce těchto vláken jsou zalomeny pod úhlem 8° aby minimalizovaly zpětný odraz a tím i kolísání výkonu optické vlny. Obě tato vlákna mají průměr 0,9 mm. Maximální výstupní výkon LP830 je 20 mW, u LPSC – 1550-FC je to 50 mW. [14]

Vzhledem k tomu, že námi měřený úsek atmosféry, který můžeme ovlivňovat má, pouze 50 cm, využijeme rozbíhavosti svazku na výstupu WDM. Měřením jsme zjistili, že rozbíhavost svazku vůči středové ose je $\varphi=4^\circ$. Úhel svírá osa svazku a kraj čočky. Jednoduchým výpočtem určíme vzdálenost, do které je nutné umístit čočku, která bude soustřeďovat měřený svazek na dělič. Vzdálenost mezi čočkou o průměru $D=60$ mm a výstupem WDM je :

$$l = \frac{D/2}{\tan \varphi} = \frac{3}{\tan(4)} = 42,9 \text{ [cm]} \quad (40)$$

Protože je naším cílem získat co nejvíce informací o měřené atmosféře, nesnažíme se kolimovat svazek do úzkého paprsku. Naopak se snažíme o široký svazek, který simuluje chování reálného bezkabelového optického spoje v atmosféře. Tak získáme více informací o působení atmosférického prostředí na svazek. V ohnisku přijímací čočky je umístěn dělič svazku, který dále rozdělí optický svazek do měřicích přístrojů.



Obrázek 27 Vzdálenost výstupu WDM od přijímací čočky.

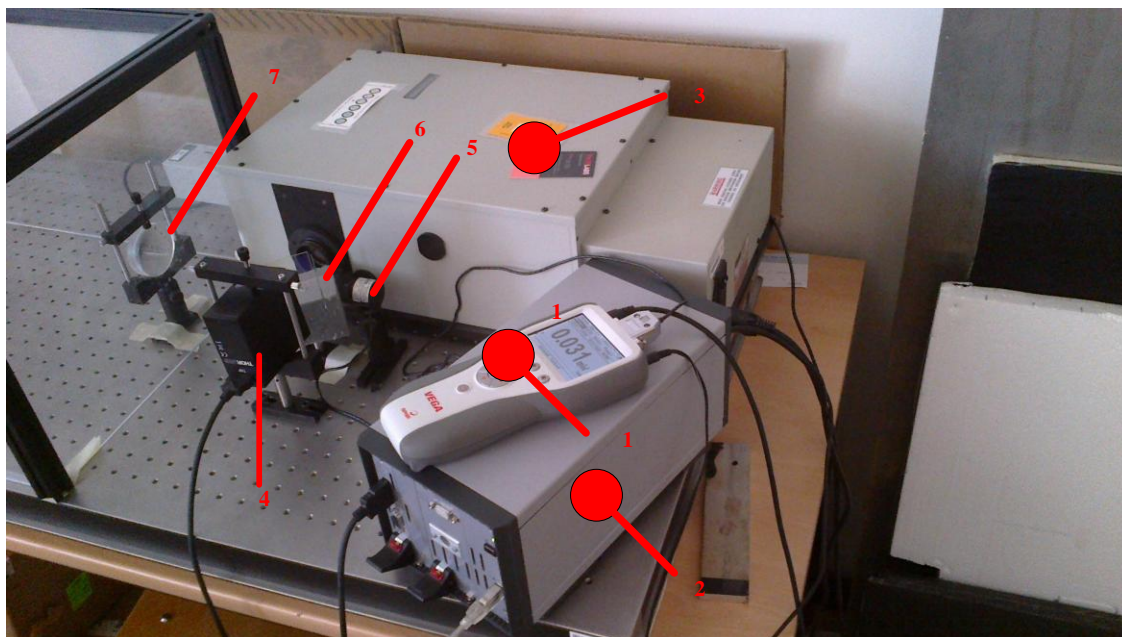
3 ZPŮSOB MĚŘENÍ A ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ

K vyhodnocení dat, získaných při měření, použijeme PC s nainstalovanými programy. Program StaLab 2.40 použijeme k ovládání měřicího přístroje Ophir Vega a program Mirmat8025 1.0 k získávání dat ze spektrálního analyzátoru Oriol MIR 8025. Pro ovládání polarimetru použijeme software TXP5000 2.9. Všechny tyto tři přístroje umožňují ukládání dat do textových souborů pro pozdější zpracování.

3.1.1 Měřicí pracoviště

Na obrázku 28 je zobrazeno uspořádání přijímací část měřicího řetězce. Je sestavena z těchto částí:

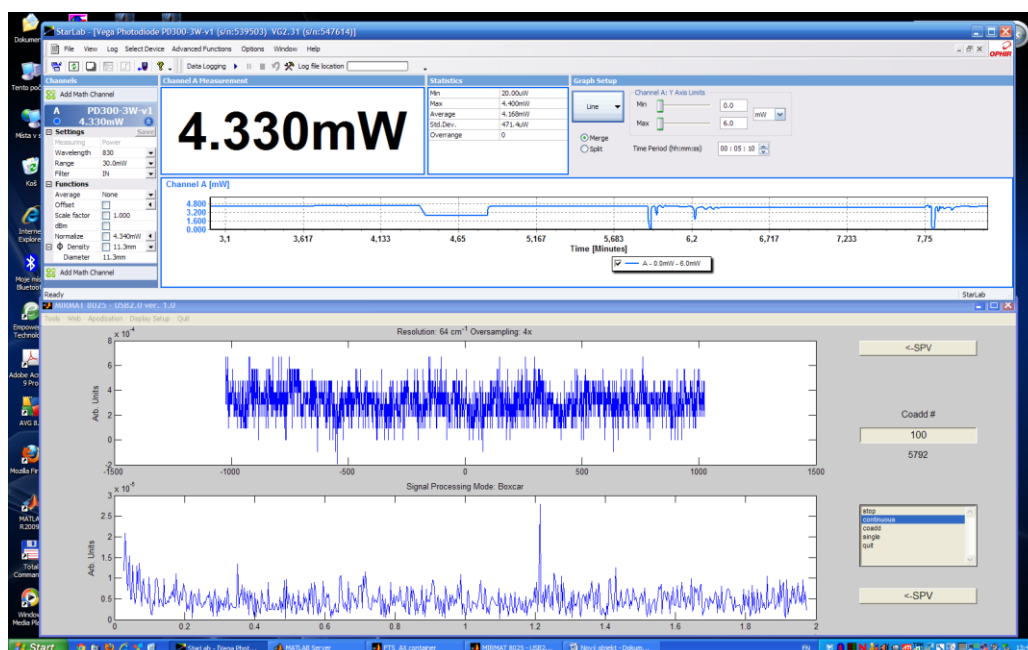
1. - měřič výkonu Ophir Vega,
- 2 - polarimetr Thorlabs PAX5700,
- 3 - spektrální analyzátor Oriol MIR 8025,
- 4 - senzor polarimetru IR 3,
- 5 - senzor PD 300 měřiče výkonu Ophir Vega,
- 6 - dělič svazku složený ze dvou polopropustných zrcadel,
- 7 - přijímací čočka $D = 60\text{mm}$, $F=15,9\text{ mm}$.



Obrázek 28 Fyzické zapojení měřicího pracoviště

Na obrázku 28 je zobrazeno zapojení pracoviště pro měření na vlnové délce $\lambda=1550$ nm. Na dělič svazku jsou použita dvě polopropustná zrcadla popsaná v kapitole 2.5.1. (Dělič svazku ve tvaru krychle popsaný v kapitole 2.5 má na vlnové $\lambda=1550$ nm délce velký útlum a je vhodný jen pro vlnovou délku $\lambda=830$ nm.) Pro každou vlnovou délku musíme tedy použít jiný dělič svazku. Tento problém by bylo možné odstranit použitím velmi tenkého polopropustného zrcadla, tzv. pellicle beamsplitter.

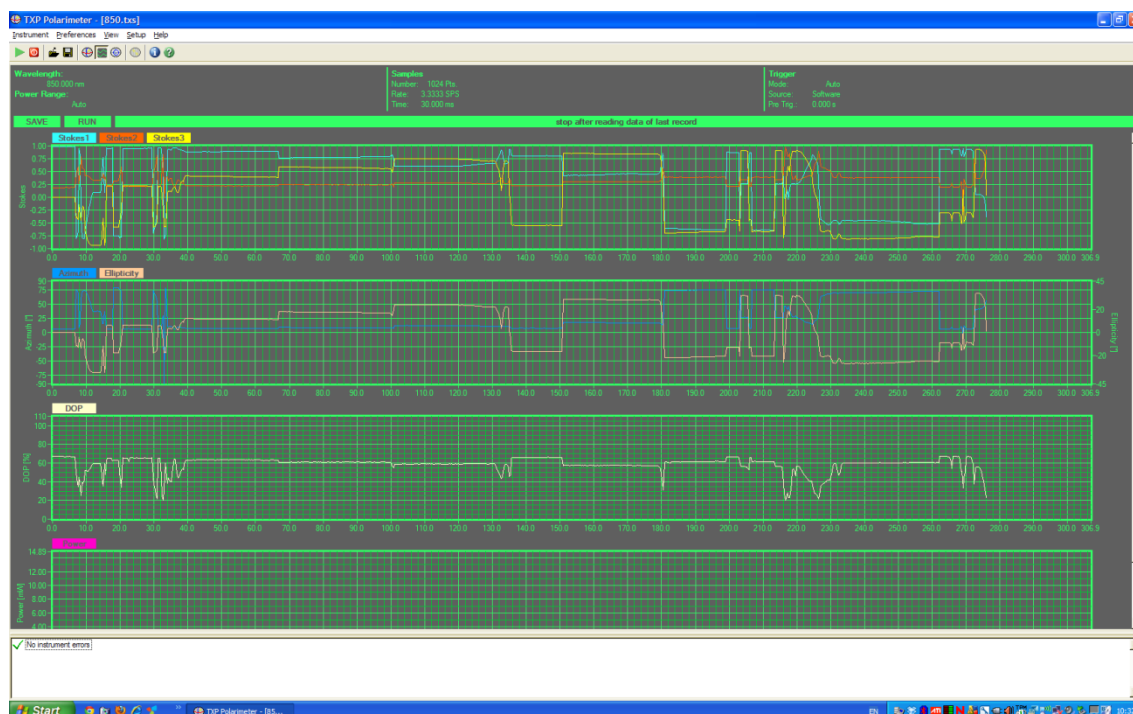
Stejně jako nevyužíváme pro obě vlnové délky stejný dělič svazku, není možné použít stejný detektor pro všechny tři měřicí přístroje. Je nutné využít senzorů vhodných pro detekci požadované vlnové délky. Při odstupu měřených vlnových délek o 720 nm z oblasti viditelného do infračerveného spektra je to přiměřená nutnost. Řešením by bylo vytvořit nestandardní senzory, které pracují právě v rozmezí těchto vlnových délek.



Obrázek 29 Současné zobrazení měřeného spektra a výkonu na PC. Měření je prováděno na vlnové délce 830 nm.

Na obrázku 29 je současné zobrazení optického výkonu a spektra. V horní části obrázku lze vidět průběh výkonu v závislosti na čase. V dolní části je zobrazeno okamžité spektrum. Prostřední graf představuje referenční spektrum analyzátoru. Dara jsou zaznamenána pro měření krychlového děliče svazku v čisté atmosféře. Protože oba dva programy podporují kontinuální režim měření, můžeme použít program sloužící k záznamu videa z plochy PC a z něj zpětně vyhodnotit naměřené změny. Například změna výkonu se projeví poklesem na čáře záznamu v programu StarLab a my v té samé chvíli můžeme vidět změny ve spektru.

Obdobně si můžeme dohledat i změny polarizace. Grafický výstup polarimetru je zobrazen na obrázku 30. K záznamu tohoto videa použijeme např. program CamStudio. Přesnějším způsobem vyhodnocení dat je jejich uložení a pozdější zpracování.



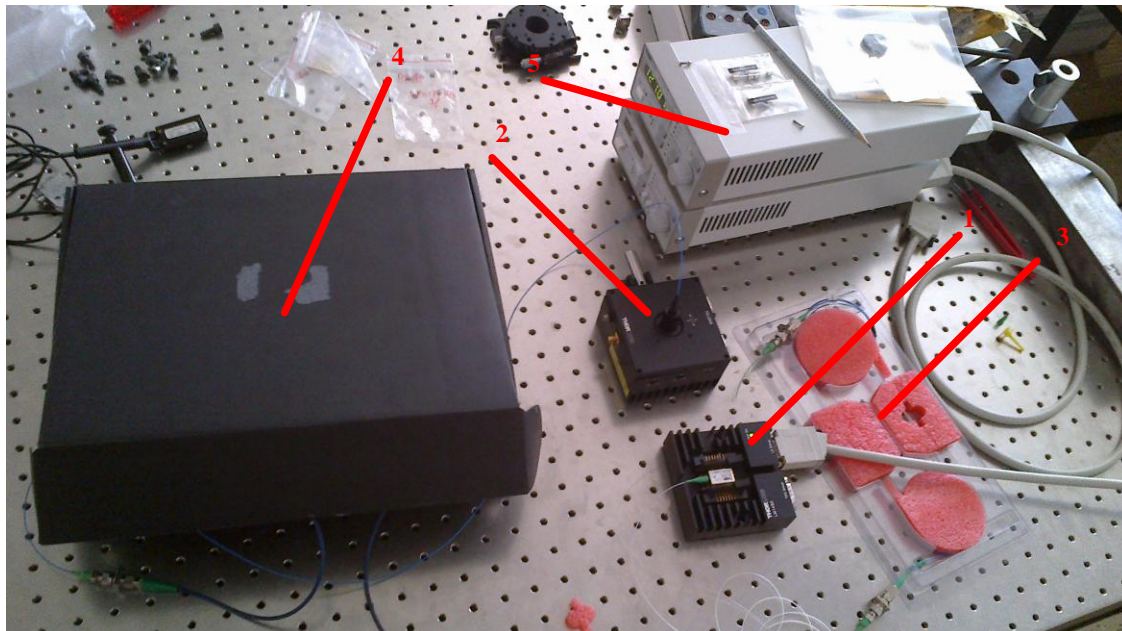
Obrázek 30 Grafický výstup programu TXP5000 (polarimetr). Grafy sestupně shora představují průběh Stokesových parametrů, azimut a elipticitu a stupeň polarizaci DOP. Všechny parametry jsou zobrazeny v závislosti na čase pro vlnovou délku 850 nm.

Na obrázku 31 je zobrazeno vysílací část měřicího řetězce. Čísly jsou označeny jednotlivé prvky vláknového spoje:

- 1 – laser LPSC - 1550- FC, $\lambda = 1550$ nm,
- 2 – laser LP830-SF30, $\lambda = 830$ nm,
- 3 – izolátor s pásmem propustnosti 1550 nm,
- 4 – izolátor s pásmem propustnosti 830 nm,
- 4 – budič laserů.

Ve vysílací části je použita čistě vláknová technologie. Zapojení je realizováno podle blokového schématu na obrázku 14. Polovodičové lasery jsou chlazeny pouze pasivně, nedochází k aktivní teplotní regulaci. Aby při delších měřeních nebylo nebezpečí teplotního poškození laseru, necháváme lasery pracovat na nižších výkonech – do 10mW. Největší útlum vysílací části nastává na izolátoru a na spojkách.

Pro vylepšení výkonové bilance spoje je možné místo spojek FC/APC využít nerozebíratelného spojení vláken – svařování.



Obrázek 31 Vysilací část měřicího pracoviště

Pro otestování funkčnosti vytvořeného spoje jsme využili přípravku v laboratoři určeného pro vytvoření mlhy a turbulence v omezením prostoru. Na obrázku 32 je možné vidět mlhou ovlivněný úsek měřené atmosféry. Přijímací čočka je umístěna vně ovlivňované atmosféry, aby nedocházelo ke srážení vlhkosti na ploše čočky. Výstup WDM je umístěn v atmosféře ve vzdálenosti 42,9 cm od přijímací čočky. Problematika týkající se této vzdálenosti je popsána v kapitole 2.7. Mlhu generujeme pomocí ultrazvukového generátoru mlhy LF-030 a turbulence způsobujeme pomocí ventilátoru o průměru 140 mm s rychlosti otáček 1000 ot/min. Měření provádíme za definovaných atmosférických podmínek, které jsou stejné pro čistou atmosféru i pro atmosféru s mlhou (atmosféru se zhoršenou viditelností):

- teplota 23,9 °C,
- tlak 1016,1 hPa.

Veličiny vlhkost a dohlednost jsou pro čistou atmosféru a atmosféru s rozdílnou viditelností různé:

- vlhkost čisté atmosféry – 38%,
- vlhkost zamlžené atmosféry – 98 %,
- dohlednost čisté atmosféry $V > 50$ km,
- dohlednost zamlžené atmosféry $V < 10$ m.

Podle vztahu (11) určíme útlum optického signálu v závislosti na dohlednosti a vlnové délce:

- pro čistou atmosféru:

$$\begin{aligned} \alpha_0(\lambda = 830 \text{ nm}) &= \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550}\right)^{-q} = \frac{3,91}{50000} \cdot \left(\frac{830}{550}\right)^{-1,6} = \\ &= 4,05 \cdot 10^{-5} [\text{m}^{-1}] \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \alpha_0(\lambda = 1550 \text{ nm}) &= \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550}\right)^{-q} = \frac{3,91}{50000} \cdot \left(\frac{1550}{550}\right)^{-1,6} = \\ &= 1,49 \cdot 10^{-5} [\text{m}^{-1}] \end{aligned} \quad (42)$$

- pro zamlženou atmosféru

$$\begin{aligned} \alpha_0(\lambda = 830 \text{ nm}) &= \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550}\right)^{-q} = \frac{3,91}{1} \cdot \left(\frac{830}{550}\right)^{-0} = \\ &= 0,391 [\text{m}^{-1}] \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \alpha_0(\lambda = 1550 \text{ nm}) &= \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550}\right)^{-q} = \frac{3,91}{1} \cdot \left(\frac{1550}{550}\right)^{-0} = \\ &= 0,391 [\text{m}^{-1}] \end{aligned} \quad (44)$$

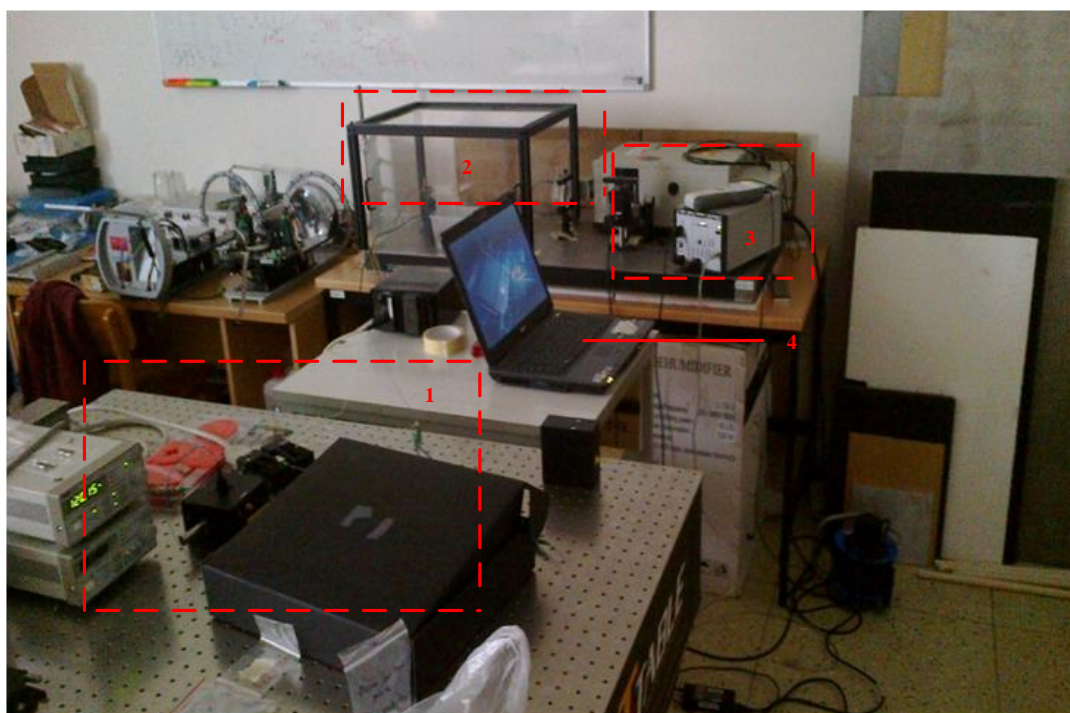
Dohlednost menší než 10 m nebyla v České republice v atmosférickém prostředí naměřena, nejmenší reálné dohlednosti se pohybují okolo 20m.



Obrázek 32 Měřená atmosféra v omezeném prostoru

Celkový pohled na testovací spoj sestavený v laboratoři PA – 639 je na obrázku 33. Na obrázku jsou vyznačeny některé stěžejní části měřicího spoje:

- 1 – vysílací část,
- 2 – omezená část měřené atmosféry,
- 3 – přijímací část obsahující měřicí přístroje,
- 4 – PC pro zaznamenání naměřených hodnot.

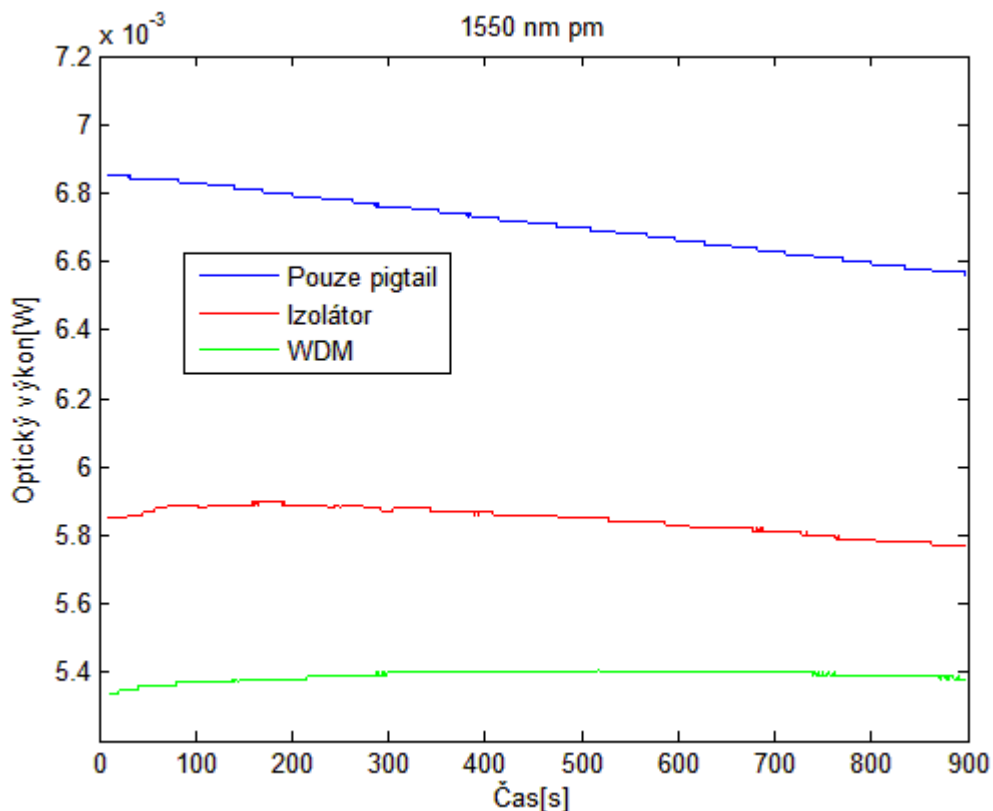


Obrázek 33 Celkový pohled na měřicí řetězec.

3.1.2 Měření výkonu

Připojení měřicího přístroje Ophir Vega k PC a zapnutí programu StarLab 2.40 způsobí deaktivaci tlačítek na tomto přístroji. Jakékoliv ovládání je možné už pouze přes tento program. Pro korektní měření je důležité především nastavit měřenou vlnovou délku. Tuto vlnovou délku zjistíme z informací o laseru nebo změříme pomocí spektrálního analyzátoru. Program umožňuje ukládání kontinuální naměřených dat do textového souboru pro jejich další zpracování. Doba nejrychlejšího záznamu dat je omezena na 0,0625 s. Jedná se o interval mezi odečtením dvou hodnot. Tento časový úsek již není možné zmenšit. Výkonové změny, jejichž trvání bude kratší než 0,0625 s, na tomto přístroji nezachytíme. Toto omezení je způsobeno zpracováním signálu v měřicím přístroji a následnou komunikací s PC.

Přesnost přístroje Ophir VEGA je po výrobcem po více než jednom roce udávána $\pm 0,5 \% \pm 50\text{pA}$.

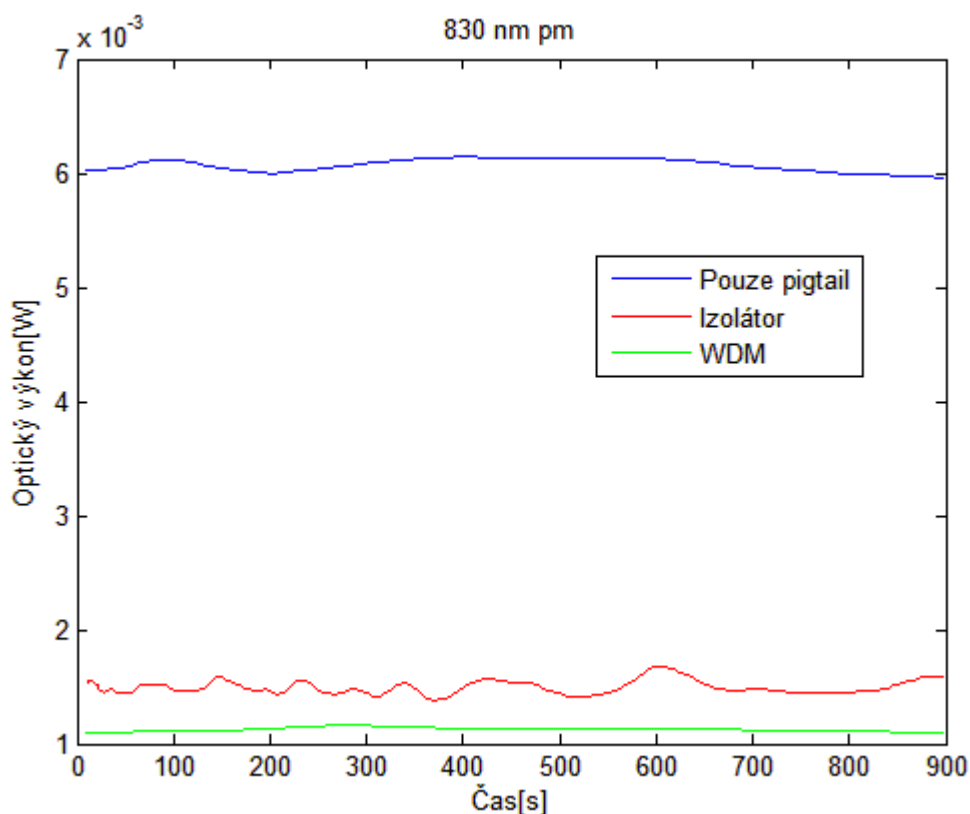


Obrázek 34 Průběh výkonu v různých částech fotonického spoje v závislosti na čase na vlnové délce 1550 nm.

Na obrázku 34 je zobrazen průběh výkonu pro vlnovou délku 1550 nm v delším časovém úseku. Měření je prováděno na ve spojích vláknového vysílače. Modrá křivka představuje optický výkon zjištěný na výstupu laseru s pigtailem.

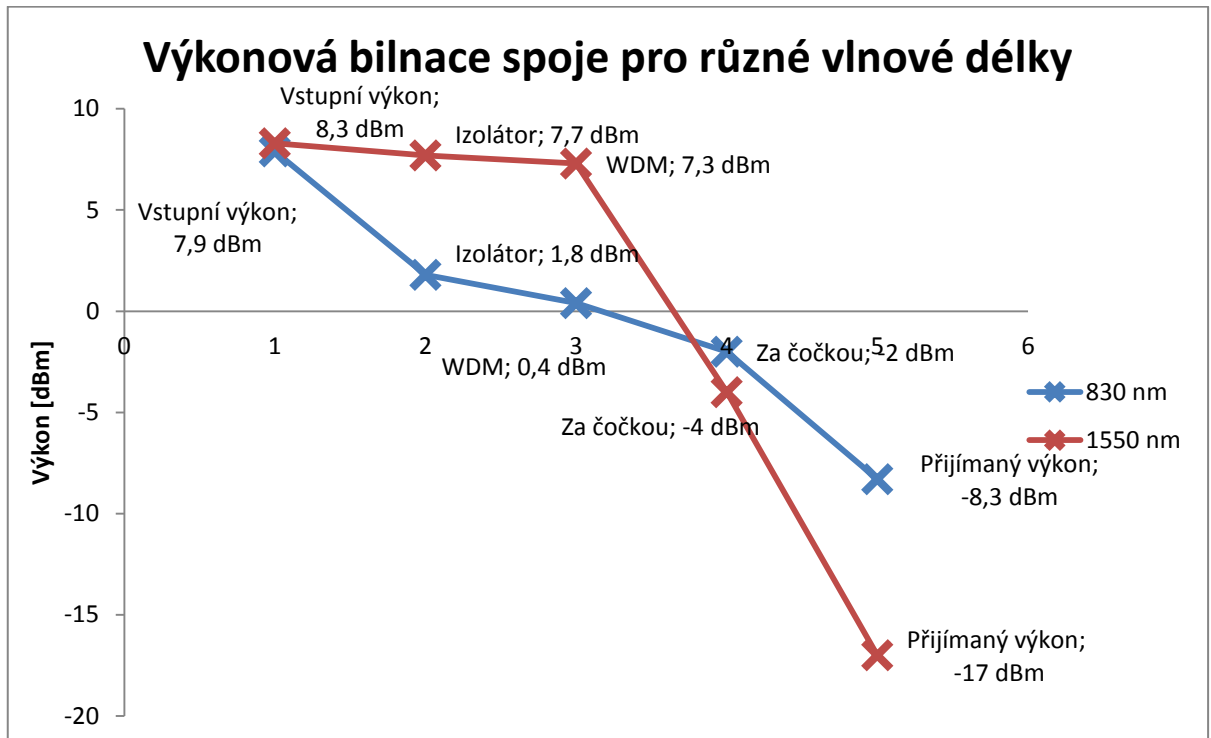
Červená křivka udává výkon změřený po připojení izolátoru k laseru. Optický výkon zaznamenaný po připojení WDM je zobrazen zelenou křivkou. Jedná se o měření na jednotlivých částech fotonického spoje v úseku 15 minut. Při tomto měření pozorujeme změny vysílaného výkonu v závislosti na čase. Nevyužíváme celý měřicí řetězec, ale výkon měříme postupně přímo na výstupu z FC/APC konektoru jednotlivých vláknových prvků. V tomto měření odpadá jakýkoliv vliv atmosféry. Měřené hodnoty ukládáme jednou za sekundu. Obdobně postupujeme i na vlnové délce 830 nm. Získané výsledky jsou zpracovány v obrázku 35.

Celková výkonová bilance spoje i s přijímací částí je uvedena do obrázku 36. Z výkonového pohledu se zabýváme pouze tou částí svazku, která směřuje do měřiče výkonu. Výkonové úrovně svazků jdoucích do spektrálního analyzátoru a polarimetru neměříme. Z obrázku 36 je vidět, že lepší prostupnost v daném fotonickém uspořádání testovacího spoje má vlnová délka 1550 nm. Tato vlnová délka má ale mnohem větší ztráty na použité přijímací čočce a za děličem svazku. U vlnové délky 830 nm je tomu přesně naopak.



Obrázek 35 Průběh výkonu v různých částech fotonického spoje v závislosti na čase na vlnové délce 830 nm. Modrá křivka představuje optický výkon zjištěný na výstupu laseru s pigtailem. Červená křivka udává výkon změřený po připojení izolátoru k laseru.

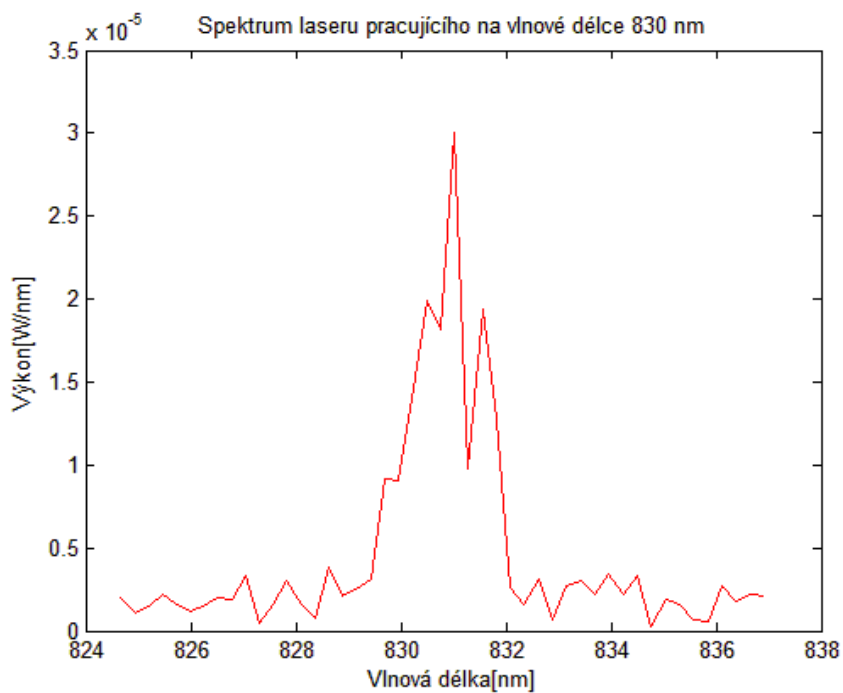
Optický výkon zaznamenaný po připojení WDM je zobrazen zelenou křivkou.



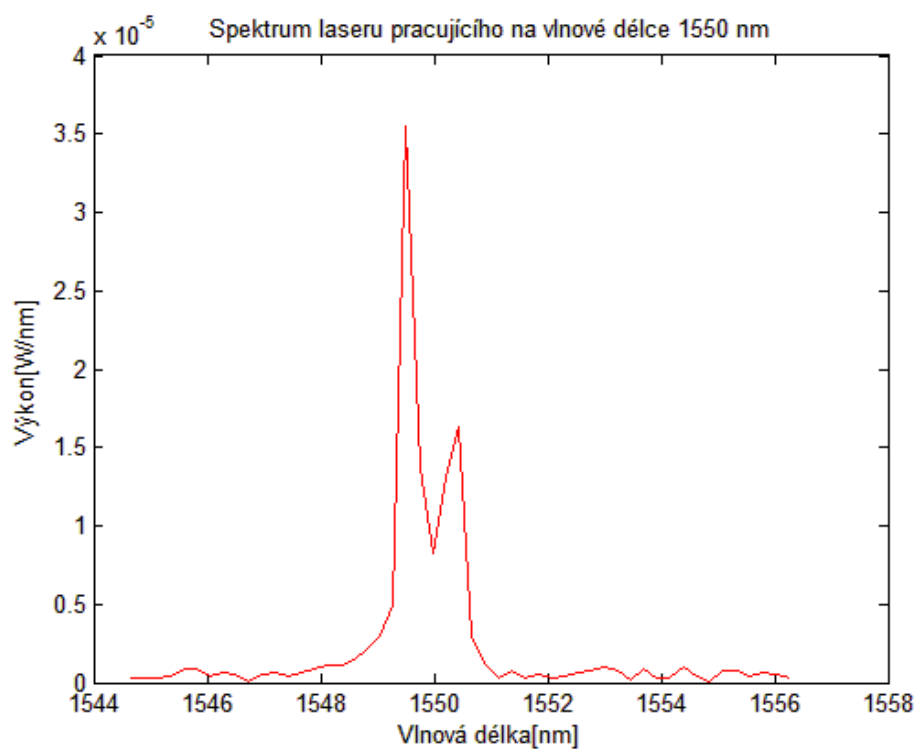
Obrázek 36 Výkonová bilance spoje pro různé vlnové délky a čistou atmosféru.

3.1.3 Měření spektra

Optický spektrální analyzátor Mir 8025 komunikuje s PC pomocí programu Mirmat8025 1.0. Jedná se o program vytvořený firmou Oriel založený na prostředí a technologii programu Matlab. Umožňuje také velmi dobrý export výsledků do tohoto programu. Mimo kontinuálního režimu podporuje program Mirmat8025 1.0 zachycení jednoho vzorku a také průměrování přes definovaný počet vzorků. Pro zachycení měřeného spektra používáme silikonový detektor 80019 pro viditelné spektrum a taktéž silikonový detektor 80020 pro infračervené spektrum. Pro obě měřené vlnové délky nastavíme stejné rozlišení zobrazení - 4x převzorkování, rychlost skenovacího zrcátka 25 000 Hz a rozlišení 0,2 nm. Přístroj dovoluje i lepší rozlišení, ale pro větší počet vzorků má PC problém s udržením komunikace, protože rostou výpočetní nároky vyplývající ze zpracování většího množství vzorků. Vlnové délky obou laserů jsou mírně posunuty oproti výrobcem deklarovaným hodnotám. Laser LP830-SF30 má vrchol ve spektru na 831 nm a laser LPSC - 1550- FC má vrchol na 1549 nm.



Obrázek 37 Zachycené spektrum měřeného laseru o vlnové délce 830 nm při využití kontinuálního režimu snímání.

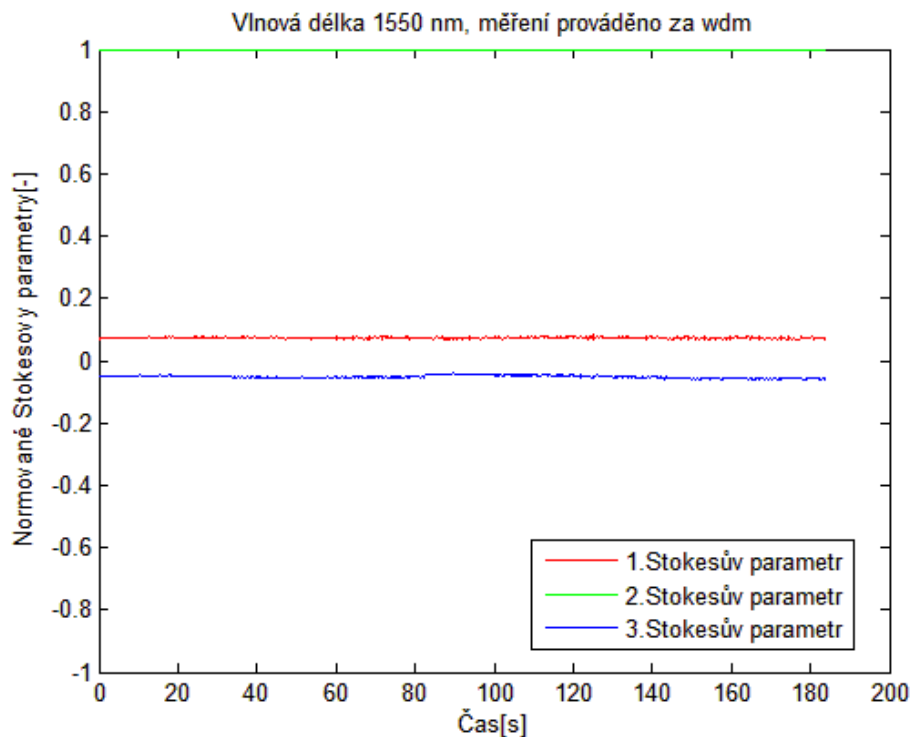


Obrázek 38 Zachycené spektrum měřeného svazku o vlnové délce 1550 nm při kontinuálním režimu snímání.

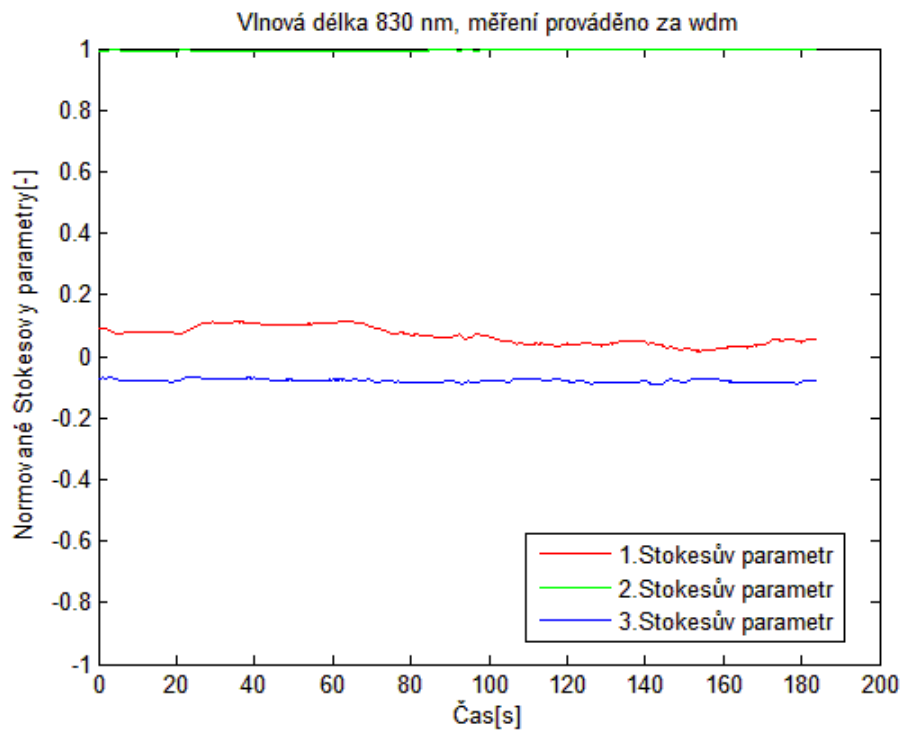
3.1.4 Měření polarizace

Použitý měřič polarizace Thorlabs PAX5700 využívá pro komunikaci s PC program TXP 5000 ve verzi 2.9. Podrobnější popis sensorů, které jsme použili, je v kapitole 2.4.2. Vstupní výkon tohoto přístroje se pohybuje v rozsahu 10 dBm až -60 dBm. Přesnost určení normovaných Stokesových parametrů $s_1, s_2, s_3 < 0,005$. K měření na vlnové délce 830 nm využíváme sensor označený IR1 a na vlnové délce 1550 nm sensor IR4. Oba senzory mají stejné parametry, pouze pracují na jiných vlnových délkách. Měření provádíme v časovém úseku 180 s. Za tento časový úsek získáme 1024 vzorků.

Na obrázcích 39 a 40 jsou výsledky měření normovaných Stokesových parametrů na výstupu WDM pro různé vlnové délky. Z grafů je vidět, že stav polarizace je stabilnější pro vlnovou délku 1550 nm. Pro vlnovou délku 830 nm dochází ke změnám o $\pm 0,05\%$ 1. Stokesova parametru. Stav polarizace vycházející z této větve není po celou dobu měření konstantní.

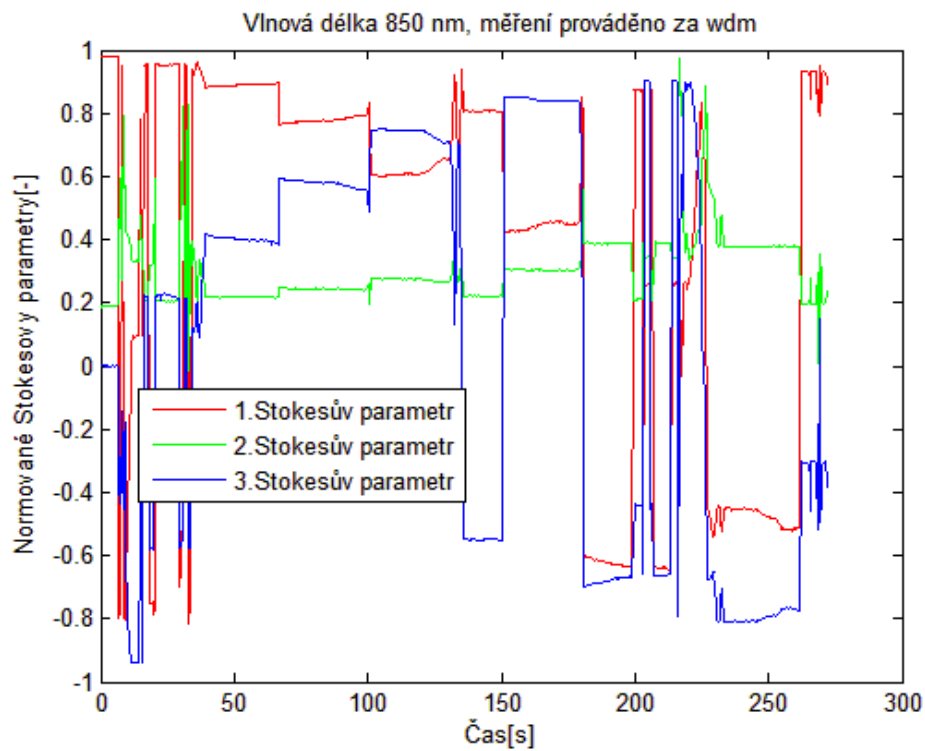


Obrázek 39 Graf Stokesových parametrů na výstupu WDM pro vlnovou délku 1550 nm.

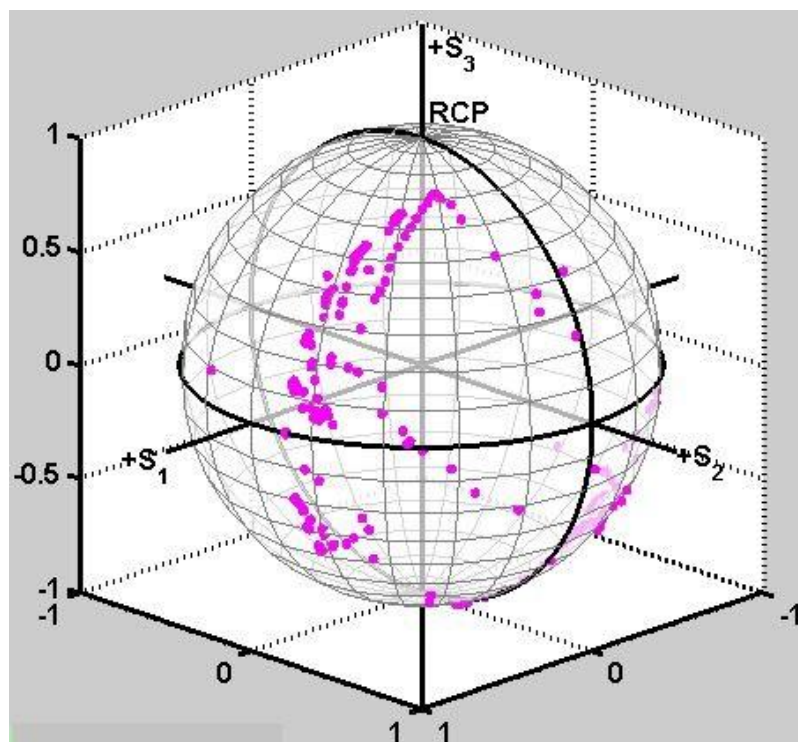


Obrázek 40 Graf Stokesových parametrů na výstupu WDM pro vlnovou délku 830 nm.

Při experimentální práci bylo ověřeno, že vysílací vláknovou část spoje je vhodné konstruovat pouze z jednoho typu vláken – použít pouze polarizaci zachovávající nebo polarizaci nezachovávající vlákna. Kombinace těchto vláken není vhodná a vede k náhodným průběhům stavu polarizace. Stokesovy parametry a jejich zobrazení v Poincarého sféře pro případ spojení polarizaci nezachovávajícího izolátoru a polarizaci zachovávajícího WDM je na obrázcích 41 a 42.



Obrázek 41 Výstupní polarizace za WDM. (Vlákna izolátoru a výstupní pigtail laseru je polarizaci nezachovávající, WDM polarizaci zachovává. V čase je zachycen průběh Stokesových parametrů.)



Obrázek 42 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 52) v Poincarého sféře.

3.2 Testovací měření vlivu mlhy na optický svazek

V předchozích kapitolách jsou popsány jednotlivé typy měření a použitý testovací spoj. V této kapitole je popsáno měření vlivu mlhy na optický svazek.

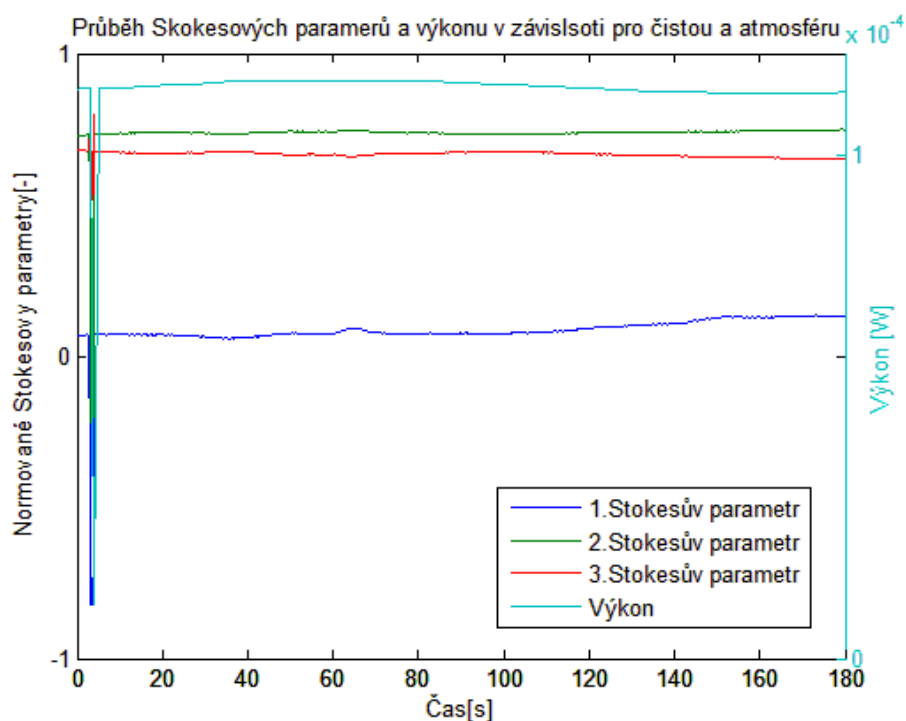
Všechna měření parametrů je nutné synchronizovat. Záznam dat ze všech tří programů není možné pustit ve stejný čas, proto jsme zvolili synchronizaci pomocí významného impulsu, který bude v datech jasně čitelný. Nejprve bylo nutné spustit postupně všechna tři záznamová zařízení. Poté jsme na krátký čas postavili paprsku do cesty neprostupnou zábranu. Po celou dobu je záznam všech tří parametrů spuštěn. Po uplynutí zvoleného času a ukončení měření jsme změřená data zpracovali v programu Matlab. Cílem bylo posunout data tak, aby měla synchronizaci podle sestupné hrany uměle vytvořeného impulsu.

Vypnutí a zapnutí laseru pro vytvoření synchronizačního pulzu je také možnost, avšak náročnější. Při ručním vypnutí a zapnutí budiče by bylo nutné část měřených dat po znovuspuštění zahodit, protože by byla ovlivněna nestabilitou výkonu při znovuspuštění laseru. Tuto metodu je možné použít na konci měřicího cyklu a využít všechna data, která byla uložena před synchronizačním pulzem. My využíváme data, která byla změřena za synchronizačním pulzem. Pro odstranění nestability výkonu po spuštění je možné využít speciální budič s velmi krátkou dobou vypnutí a zapnutí. Tato metoda přináší nový problém. Doba mezi jednotlivými vzorky všech tří měřících přístrojů musí být kratší než doba vypnutí a zapnutí laseru. Při příliš krátkém intervalu vypnutí a zapnutí v opačném případě nemusí dojít k zachycení synchronizačního pulzu.

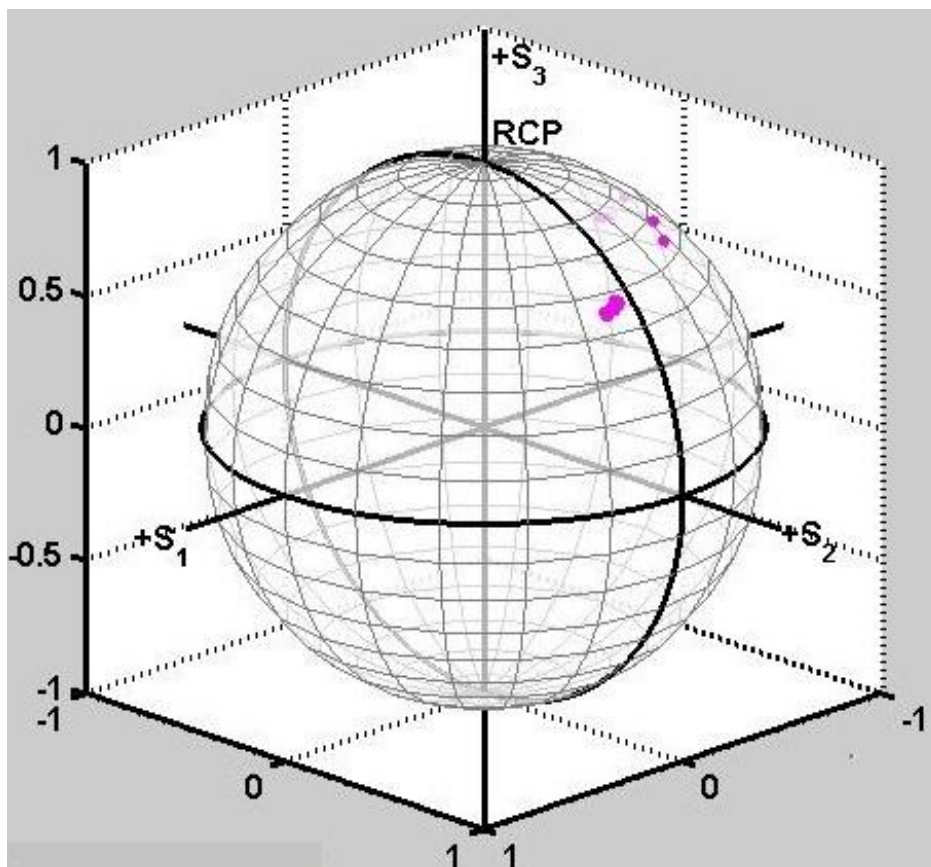
Veličinou, která se neměnila při změně atmosféry svoji velikost, byla vlnová délka. Spektrum jednotlivých laserů je na obrázcích 37 a 38. Vrchol spektrální čáry zůstával po celou dobu měření na stejné vlnové délce. S poklesem výkonu při průchodu optického svazku atmosférou klesal i výkon vyzářený do spektrálního analyzátoru. Pro maximálně zamlženou měřicí komoru byl vysílaný výkon na úrovni šumu spektrálního analyzátoru a nebylo jej možné od šumu odlišit. Při vyšší dohlednosti zůstávala vlnová délka vrcholu spektrální čáry na stejném místě pro daný laser. Comptonův jev, popsaný v kapitole 1.10, může ovlivnit spektrum a vlnovou délku. Je podmíněn vysokou hodnotou výkonu vyslaného do atmosféry (100keV až 1MeV), malou velikostí částic a malou vlnovou délkou (0,1 - 0,01 nm). Námi použitými prostředky (lasery a generátorem mlhy) se vlnová délka vysílaného záření nezmění.

Oproti vlnové délce se hodnoty výkonu a Stokesovy parametry v čase a vlivem atmosféry měnily. V grafu na obrázku 43 jsou zaznamenány Stokesovy parametry a přijatý výkon na spoji s čistou atmosférou a vlnovou délkou 830 nm. Na obrázku 41 je

možné dobře vidět výrazný synchronizační pulz, pomocí jehož sestupné hrany jsou data uspořádána. Z dat na obrázku 43 je vytvořen i obrázek 44. Na obrázku 44 je ze Stokesových parametrů zakreslen výsledný bod v Poincarého sféře. Ve zpracovaných datech je zahrnut i synchronizační impuls, ze kterého je spočteno několik odchylojící se bodů na Poincarého sféře. Většina bodů je na obrázku 44 soustředěna ve velmi malé oblasti. Výstupní výkon mírně v čase kolísá, obdobně jako na obrázku 35 při měření výkonu na výstupu z WDM za vláknovou částí optického spoje. S tím mírně kolísají normované Stokesovy parametry, které se ale mění všechny tři. Výsledný bod v Poincarého sféře zůstává na místě a můžeme z něj vyčíst eliptickou levotočivou polarizaci°. Změna polarizace působením atmosféry směrem k vertikálnímu natočení je vidět na obrázcích 49 a 50.



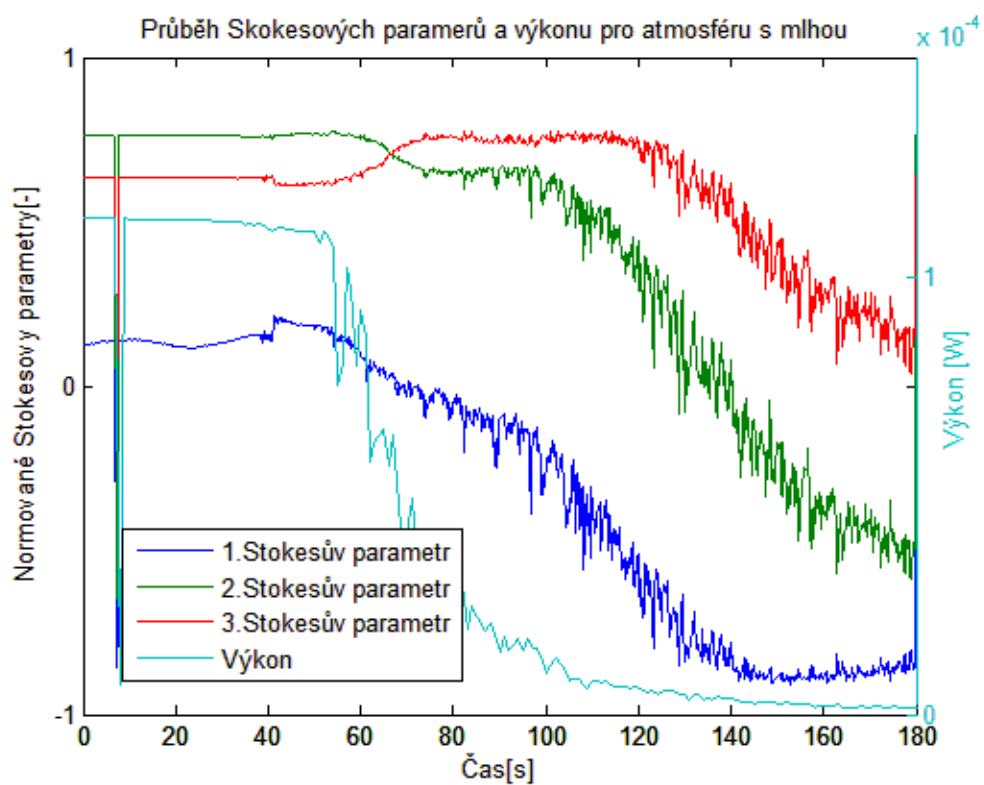
Obrázek 43 Průběh Stokesových parametrů pro $\lambda = 830$ nm a čistou atmosféru.



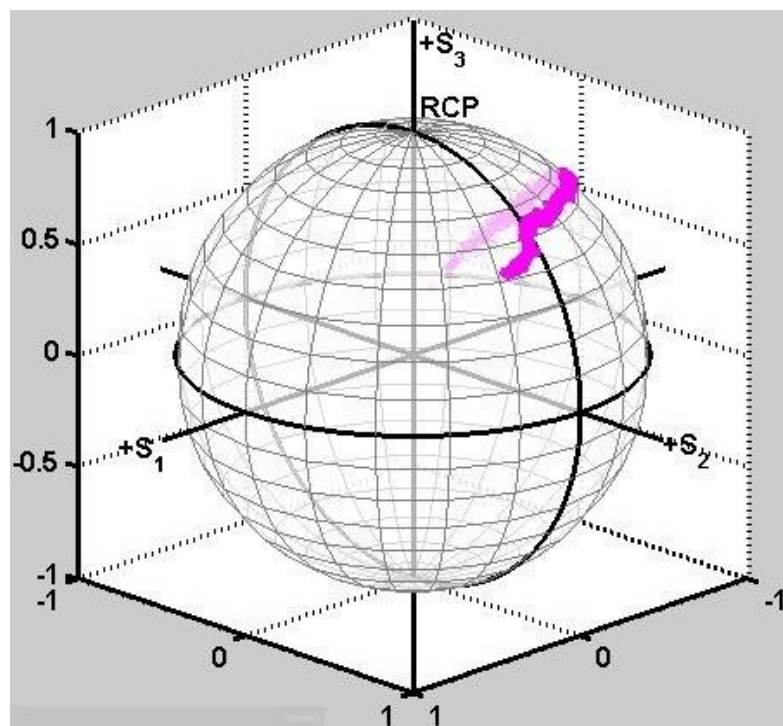
Obrázek 44 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 41) v Poincarého sféře.

Při spuštění generátoru mlhy dojde k záměně pozic 2. a 3. Stokesova parametru. Se snížením výkonu v důsledku působení mlhy dojde k otáčení polarizace v pravotočivém směru a polarizace se stane čistě vertikální. Hodnoty Stokesových parametrů jsou normované a na celkovém přijatém výkonu nejsou závislé. Zatímco výkon měřený na měřiči Ophir Vega dosahuje velmi malých hodnot, polarizace svazku se v závislosti na množství mlhy začne stáčet stále více doprava. Generátor mlhy necháváme pracovat celou dobu bez omezení, množství mlhy se v omezeném prostoru kumuluje.

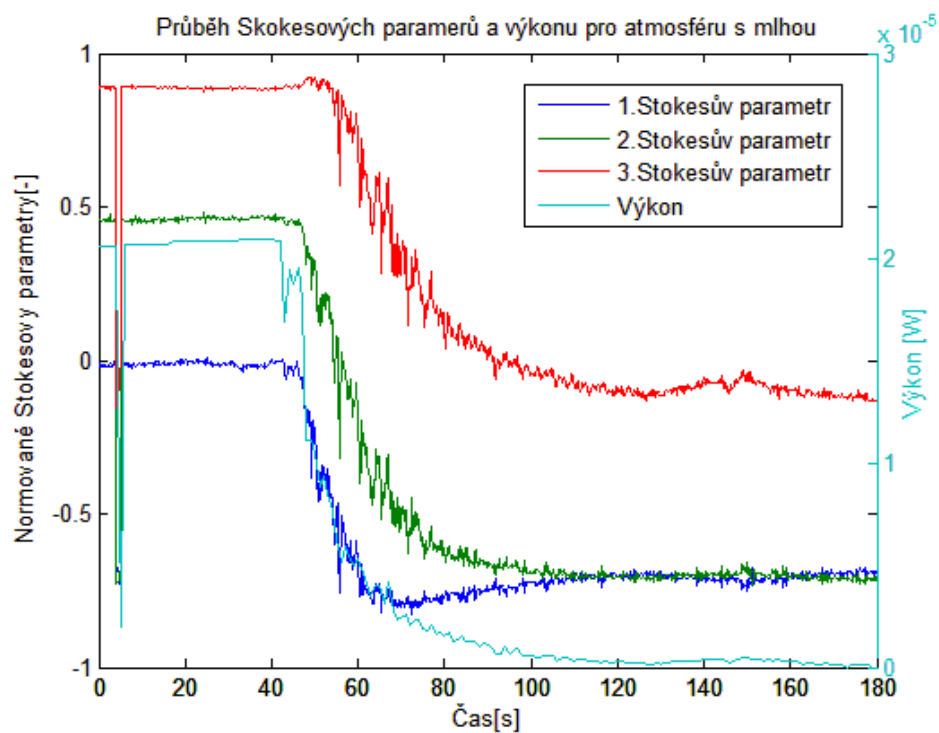
Obdobně se chová spoj s omezeným výkonem na $20\mu\text{W}$ na měřiči výkonu. Toto měření jsme provedli, abychom mohli porovnat různé vlnové délky při stejných výkonech. Polarizace se na této vlnové délce podobají. Stav polarizace není závislý na výkonu. To můžeme potvrdit podobností obrázků 46 a 48.



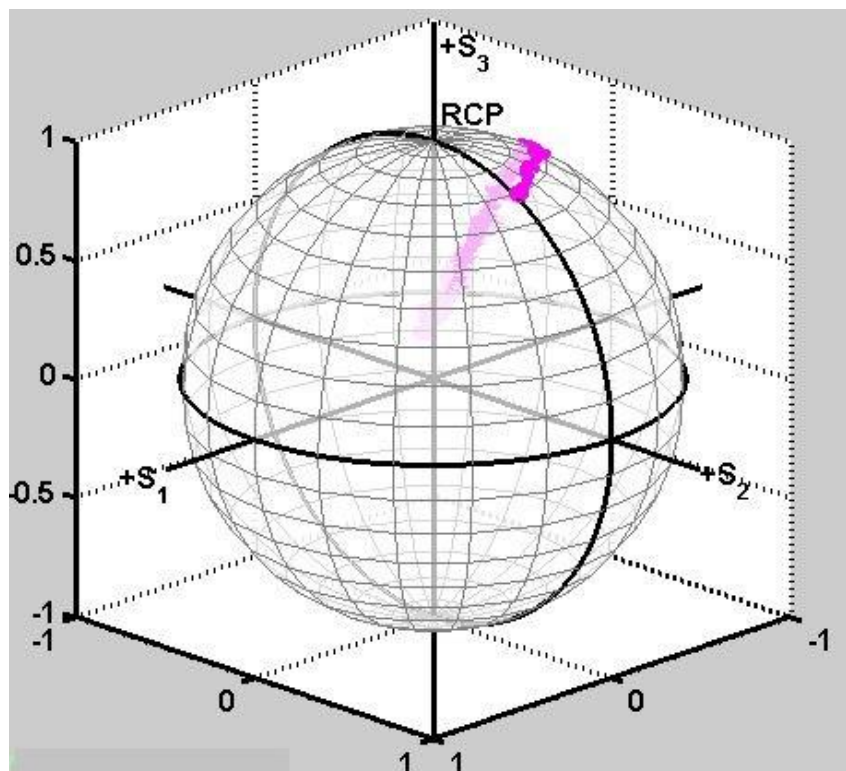
Obrázek 45 Průběh Stokesových parametřů při maximálním dosaženém výkonu pro $\lambda = 830$ nm a zamlženou atmosféru.



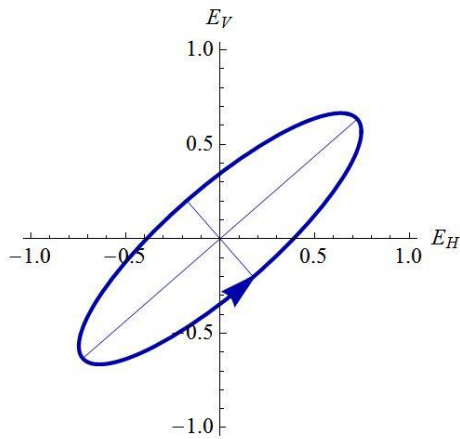
Obrázek 46 Zobrazení Stokesových parametřů (viz obrázek 43) v Poincarého sféře.



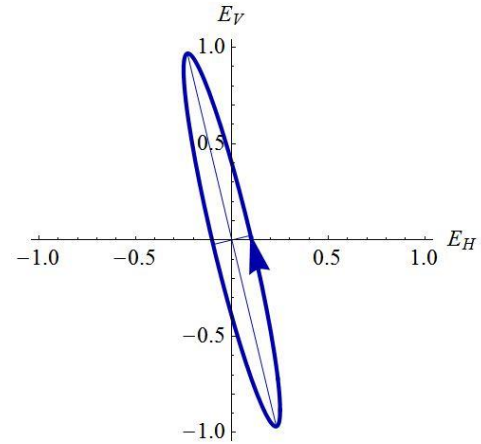
Obrázek 47 Průběh Stokesových parametrů pro $\lambda = 830$ nm a výkon na měřiči omezený na $20\mu\text{W}$ - zamlženou atmosféru (stejná hodnota jako je výkon pro $\lambda = 1550$ nm).



Obrázek 48 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 45) v Poincarého sféře.

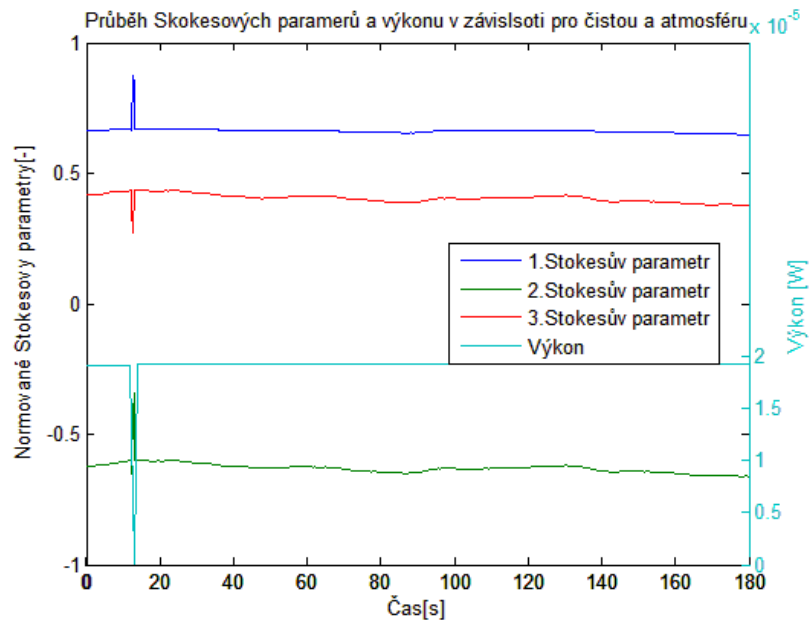


Obrázek 49 Polarizační elipsa svazku pro čistou atmosféru a $\lambda=830$ nm.

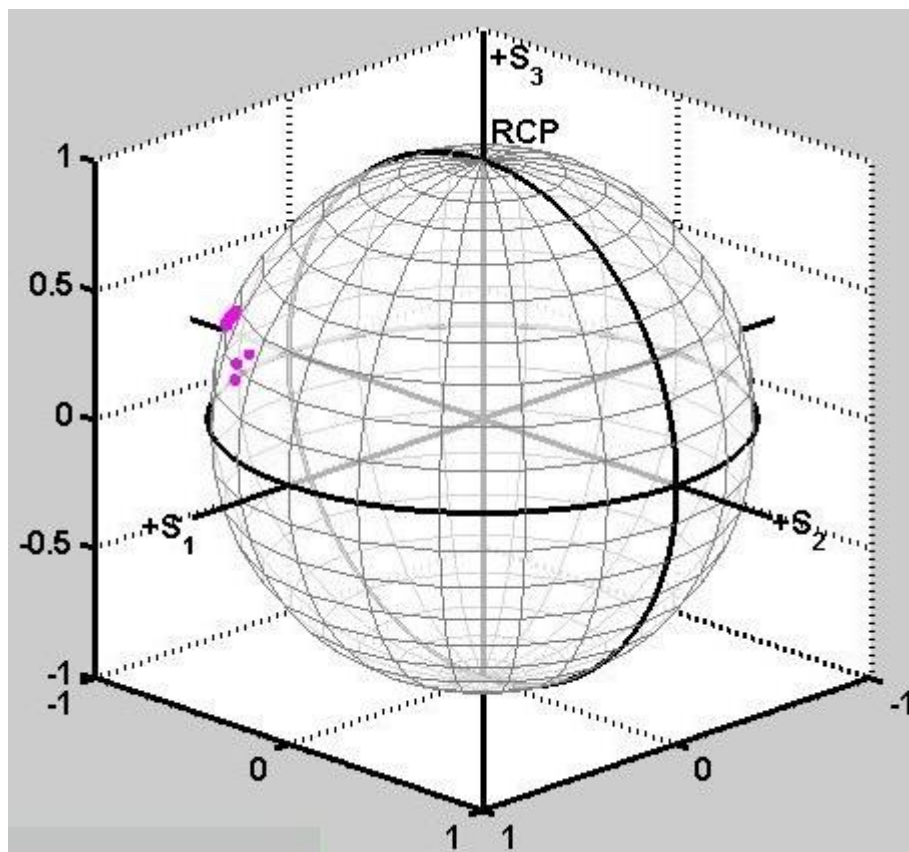


Obrázek 50 Polarizační elipsa pro zamlženou atmosféru a $\lambda=830$ nm.

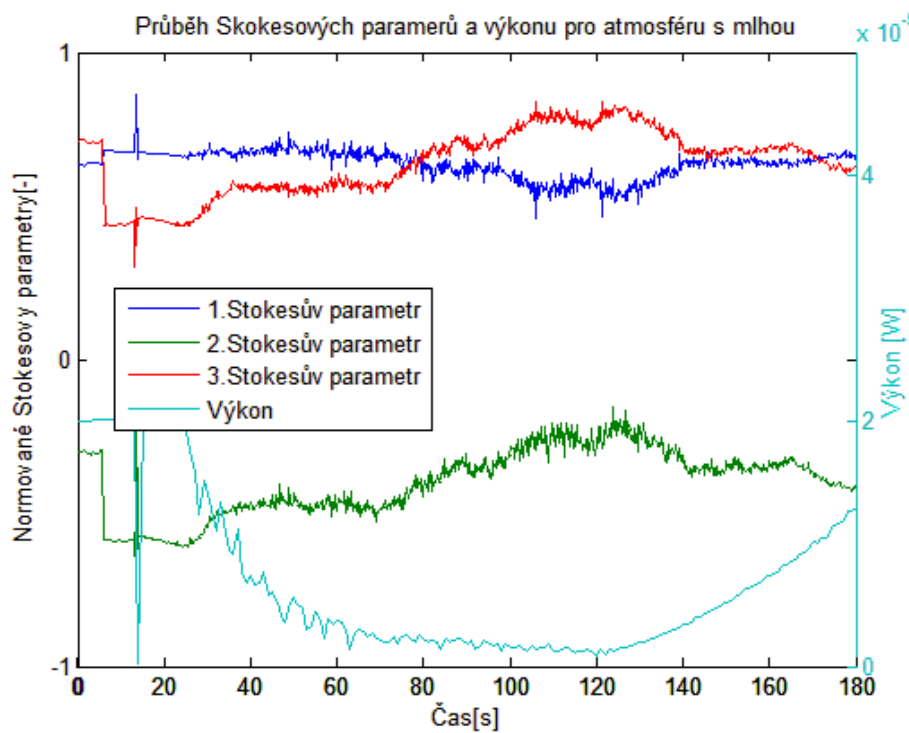
Obdobně jako pro vlnovou délku 830 nm provedeme stejné měření pro vlnovou délku 1550 nm. Na obrázcích 51 a 52 jsou změřené parametry pro čistou atmosféru a na obrázcích 53 a 54 je průběh Stokesových parametrů a výkonu pro zamlženou atmosféru. Polarizace v čisté atmosféře je po celou dobu poměrně konstantní a má eliptický charakter. S přispěním mlhy se tato polarizace začne stáčet doleva (viz obrázek 56).



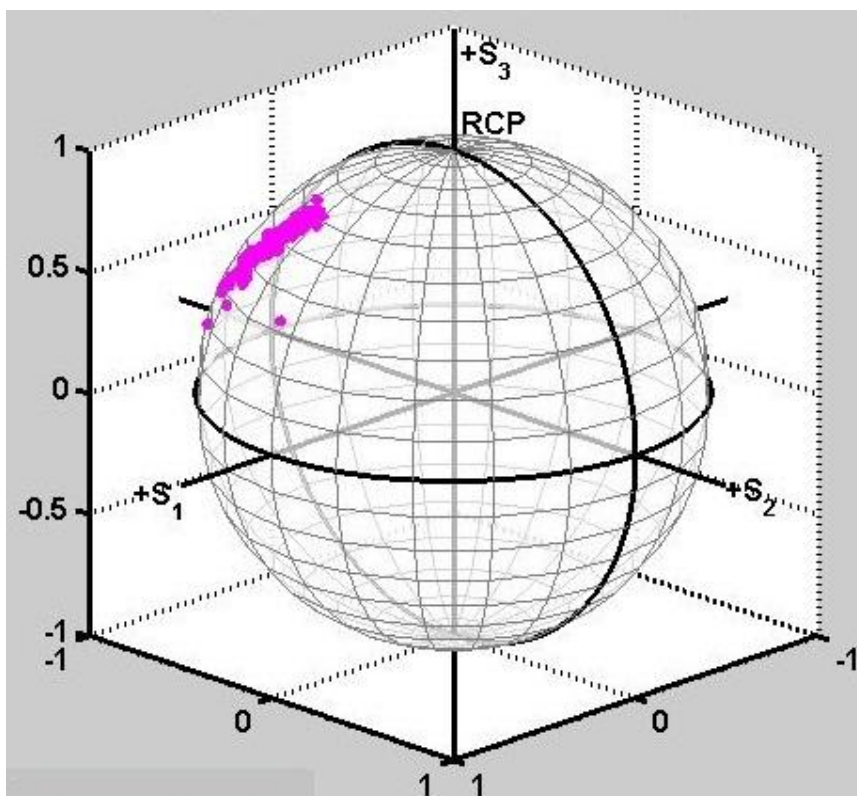
Obrázek 51 Průběh Stokesových parametrů pro $\lambda = 1550$ nm a čistou atmosféru.



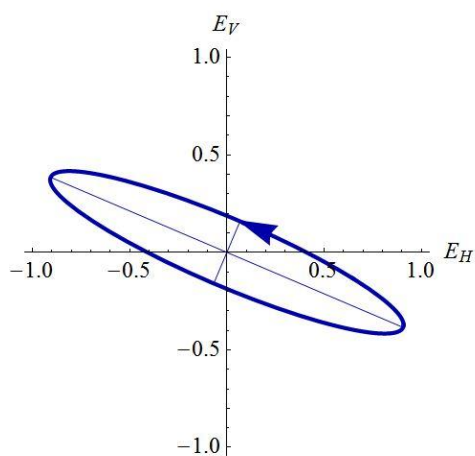
Obrázek 52 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 47) v Poincarého sféře.



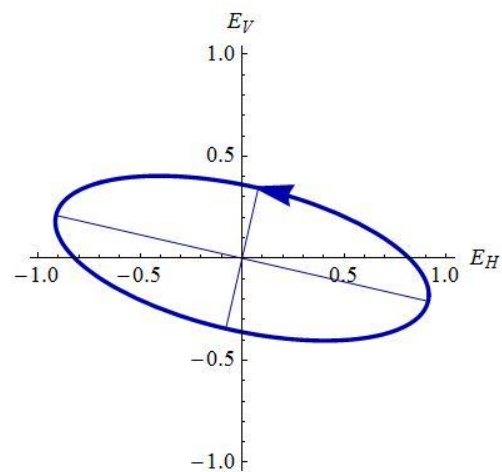
Obrázek 53 Průběh Stokesových parametrů a výkonu pro $\lambda = 1550$ nm a zamlženou atmosféru.



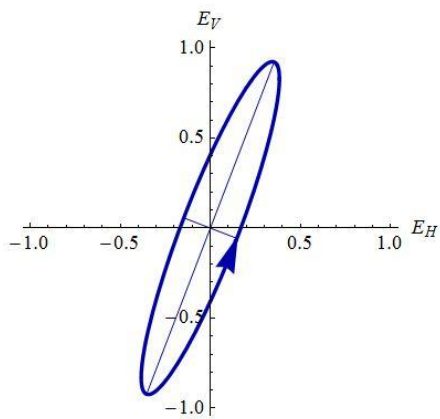
Obrázek 54 Zobrazení Stokesových parametrů (viz obrázek 49) v Poincarého sféře.



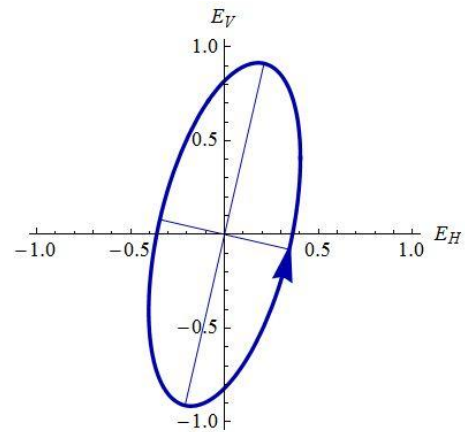
Obrázek 55 Polarizační elipsa svazku pro čistou atmosféru a $\lambda = 1550$ nm.



Obrázek 56 Polarizační elipsa svazku pro zamlženou atmosféru a $\lambda = 1550$ nm.



Obrázek 57 Polarizační elipsa pro čistou atmosféru a $\lambda = 1550$ nm. Elipsa zohledňuje vliv polarizačního polopropustného zrcadla (otočení o 90°).



Obrázek 58 Polarizační elipsa pro atmosféru s mlhou a $\lambda = 1550$ nm. Elipsa zohledňuje vliv polarizačního polopropustného zrcadla (otočení o 90°).

4 ZÁVĚR

Cílem této práce byl návrh optického testovacího spoje určeného pro studium vlivu atmosféry na optický svazek v pásmech 850 nm a 1550 nm. V první kapitole práce je rozebrána teorie týkající se technologie vlnově děleného multiplexu a laserového svazku v zemské atmosféře. Vysílací a přijímací část spoje je popsána v kapitole 2. V téže kapitole jsou rozebrány problémy měření jednotlivých zkoumaných parametrů – spektra, výkonu a polarizace. Ve třetí kapitole je popsán návrh a realizace testovacího spoje, způsob ukládání a zpracování změřených dat. V téže kapitole je uvedeno vlastní měření, ve kterém je prezentováno současné sledování parametrů čisté atmosféry a atmosféry obsahující mlhu.

Vysílací vláknová část optického spoje vykazovala na svém výstupu drobné výkonové fluktuace, které bylo možné naměřit přímo na výstupu laseru. Tyto fluktuace způsobovaly velmi malé kolísání výkonu na přijímací části testovacího spoje a hraničily s chybou metody měření. Simulovaná mlha způsobovala změny výkonu výrazněji a to v rozsahu 100 % maximální hodnoty výkonu. Metodu měření je možno zlepšit použitím stabilnějších laserů nebo zahřátím laseru nikoliv v řádu desítek minut, ale hodin, a až poté provádět měření.

Měřená vlnová délka byla pro oba lasery konstantní po celou dobu měření. Při testování atmosféry s mlhou bylo při relativně velkých hustotách mlhy (stav atmosféry s nízkou dohledností) obtížné změřit vlnovou délku. Hodnota přijímaného výkonu byla velmi nízká a spektrální analyzátor měl problémy ji rozlišit od šumů. Tak nízká dohlednost, jakou jsme simulovali, ale v zemské atmosféře nastane jen obtížně. Způsob měření by bylo možné vylepšit kvalitnějším děličem svazku, který by měl menší útlum současně pro obě vlnové délky. Následně by se zlepšila výkonová bilance celého spoje a měřicí rozsah všech přístrojů by byl lépe využit.

Měřič polarizace nám dával velmi dobré informace o polarizaci na jednotlivých vlnových délkách. Na vlnových délkách 830 nm i 1550 nm měl spoj eliptickou levotočivou polarizaci. U svazku s délkou vlny 1550 nm je tato polarizace pootočena o 90° působením polarizujícího polopropustného zrcadla. Pootočení jsme při zpracování výsledků zohlednili. Při simulaci mlhy se na obou vlnových délkách úhel sklonu polarizační elipsy začal stáčet doleva směrem k ose vertikální polarizace.

Navrhnutý testovací spoj slouží ke studiu vlivu atmosféry na optický svazek. Pomocí testovacího spoje jsme zachytili účinky atmosféry současně na tři parametry optického svazku a to na vlnovou délku, polarizaci a výkon.

LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [2] WILFERT, Otakar. *Fotonika a optické komunikace: přednášky*. Vyd. 1. Brno: VUT FEKT, ústav radioelektroniky, 2007, 128 s. ISBN 978-80-214-3537-7.
- [3] DVORÁK, Petr. Světlo XII: Optické vlákno. *Jihlavská astronomická společnost* [online]. 27.8.2012 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z: <http://www.jiast.cz/clanky/svetlo-xii-opticke-vlakno>
- [4] Optická vlákna. *Fyzmatik.píše* [online]. 1.4.2011 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/133937-opticka-vlakna.html>
- [5] BOHÁČ, Leoš. ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky. *Útlum*. Praha, 2012. Dostupné z: www.comtel.cz/files/download.php?id=2325
- [6] Šíření elektromagnetického vlnění. *Rádia* [online]. 2004 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: http://www.elnika.sweb.cz/radia/el_vlny.html
- [7] LÁTAL, Jan, Petr KOUDELKA a Jan VITÁSEK. Měření vlivu velikosti překážek na přenos optickým pojítkem. *Sdělovací technika*. 2011, č. 7. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/cti/st-cervenec-2011/#/zvacseni/7/>
- [8] KŘIVÁK, Petr. *Optické bezkabelové spoje velkého dosahu* [online]. Brno, 2007 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20416. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] Čočka. *CoJeCo - Vaše encyklopedie* [online]. 11.7.2006 [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=27895&title=Fresnelova%20%E8o%20%E8ka&s_lang=2
- [10] *Optoelektronika* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta.pdf>
- [11] DERIKSON, Dennis. *Fiber Optic Test and Measurement*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. ISBN 01-353-4330-5.
- [12] *Optical Measurement Techniques and Applications*. Editor Pramod K Rastogi. Boston: Artech House, 1997, 433 s. ISBN 08-900-6516-0.
- [13] LAFATA, P. Pasivní optické sítě WDM-PON. *Access server* [online]. 2009, 24.05.2009 [cit. 2012-11-27]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050004>
- [14] *Thorlabs* [online]. 2012, 15.11.2012 [cit. 2012-11-27]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/>
- [15] VAN DER POL, Edwin. *Infrared spectroscopy* [online]. 2012 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://physics.schooltool.nl/irspectroscopy/index.php>

- [16] KOECHNER, Walter a Michael BASS. *Solid-state lasers: a graduate text*. New York: Springer, c2003, xi, 409 p. ISBN 03-879-5590-9.
- [17] NEWPORT CORPORATION. *FT-IR Spectroscopy*. Stratford, CT, 2012. Dostupné z: http://www.newport.com/MIR8025-Modular-IR-Fourier-Spectrometers/378421/1033/info.aspx#tab_Literature
- [18] Polarizační filtr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Polariza%C4%8Dn%C3%AD_filtr
- [19] EKSPLA. *NT340 SERIES: Tunable Wavelength Lasers*. Vilnius, 2011. Dostupné z: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/nt340-series-tunable-wavelength-lasers.pdf>
- [20] Couplery/splittery. *Optické kabely* [online]. 2011 [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: <http://www.optickekabely.cz/prislusenstvi/couplerysplittery>
- [21] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd edition., 2002. 576 s. ISBN 0-471-21571-b.
- [22] MACHAČ, Ivan. *POLARIZAČNÍ STAV OPTICKÉ VLNY* [online]. Brno : VUT Brno, 2008. 81 s. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [23] BOUCHET, Olivier. *Free-space optics: propagation and communication*. 1st pub. London: ISTE, 2006, 219 s. ISBN 19-052-0902-9.
- [24] THORLABS, Inc. *Polarization Analyzing System: Operation Manual*. Munich, 2008. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/Thorcat/12900/PAX5710IR3-T-Manual.pdf>
- [25] PICKOVA, Veronika. Comptonův rozptyl - teorie. <i>ČVUT</i> [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://xuv.kfe.fjfi.cvut.cz/fyzika-a-technika-rtg-zareni/comptonuv-rozptyl>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|--------------|---|
| WDM | vlnově dělený multiplex |
| WWDM | široký vlnový multiplex |
| DWDM | hustý vlnový multiplex |
| CWDM | hrubý vlnový multiplex |
| LED | dioda emitující světlo |
| λ | vlnová délka |
| I | optická intenzita |
| n | index lomu prostředí |
| φ | úhel, pod kterým dopadá optický paprsek |
| α | útlum |
| P | výkon |
| t | časový úsek |
| T | světelná propustnost prostředí |
| h | Planckova konstanta |
| q | náboj elektronu |
| f | frekvence |
| D | průměr čočky |
| l | délka |
| η | účinnost |
| U | napětí |
| A | plocha (vstupu vlákna, výstupu diody) |
| θ | úhlová šířka svazku |
| d | divergence optického svazku |
| P_{NEP} | výkon šumu |
| A_x, A_y | amplitudy vektoru \mathbf{E} |
| \mathbf{E} | vektor elektrického pole |
| v_{min} | rozlišení optického analyzátoru |
| F | ohnisko čočky |
| V | dohlednost |
| q | koeficient pro Kimův vzorec (11) |

SEZNAM PŘÍLOH

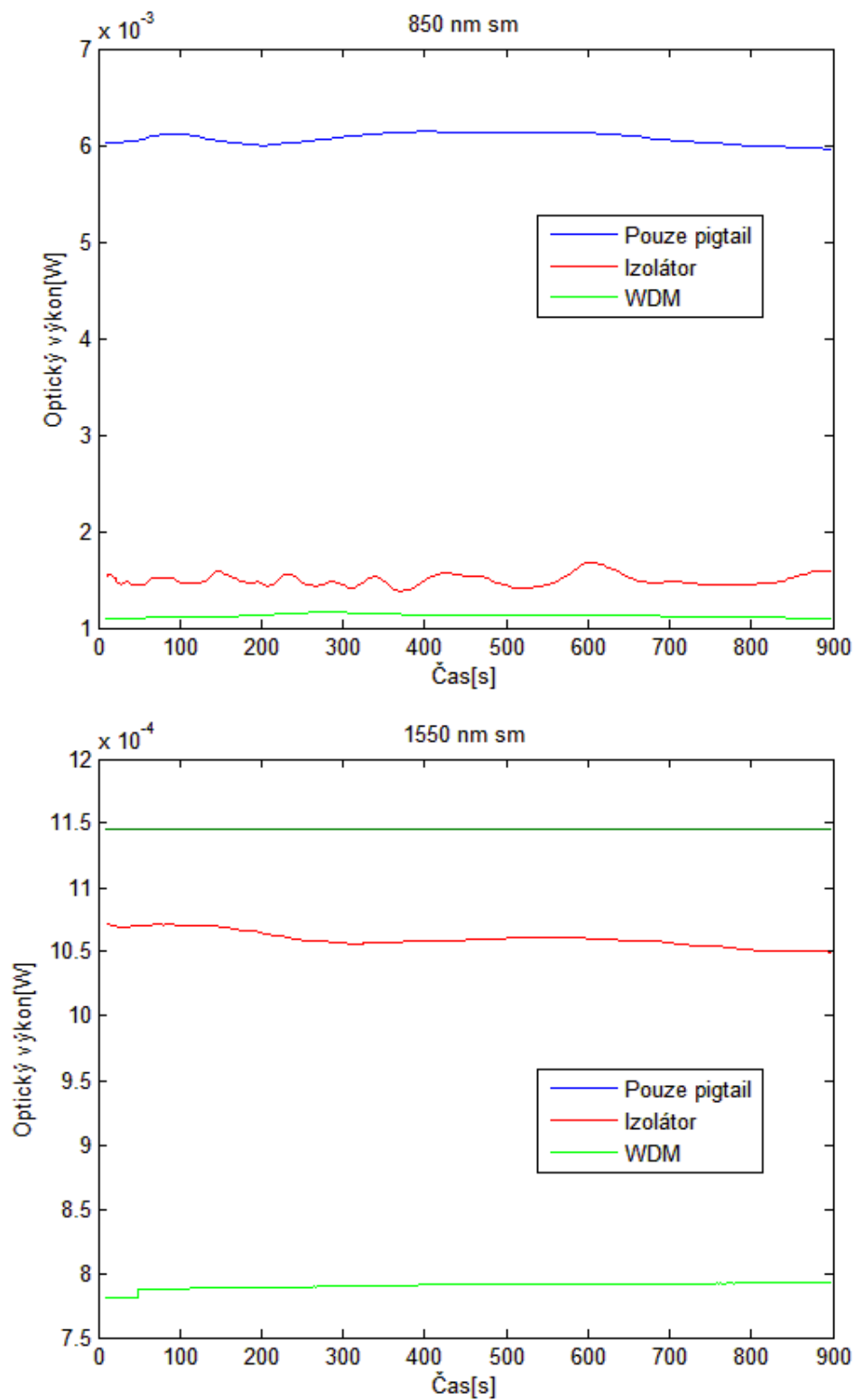
Příloha 1: Průběh optického výkonu v různých částech fotonického spoje pro vlnové délky 850 nm a 1550 nm.

Příloha 2: Měření polarizace pro vlnovou délku 1550 nm v různých částech fotonického spoje.

Příloha 3 Měření polarizace pro vlnovou délku 830 nm v různých částech fotonického spoje.

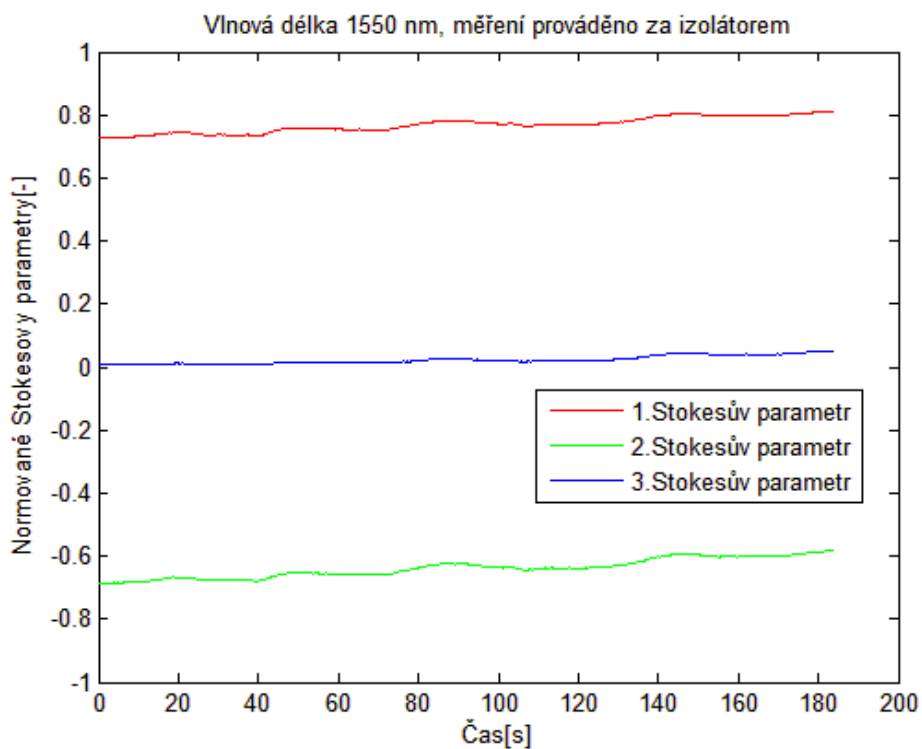
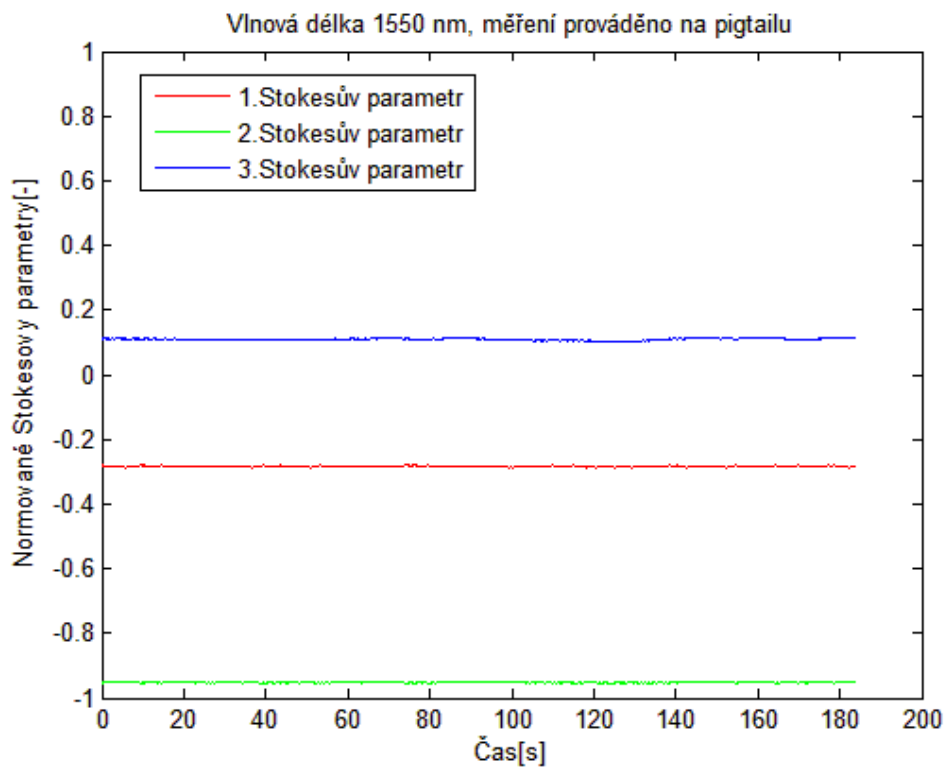
Příloha 1:

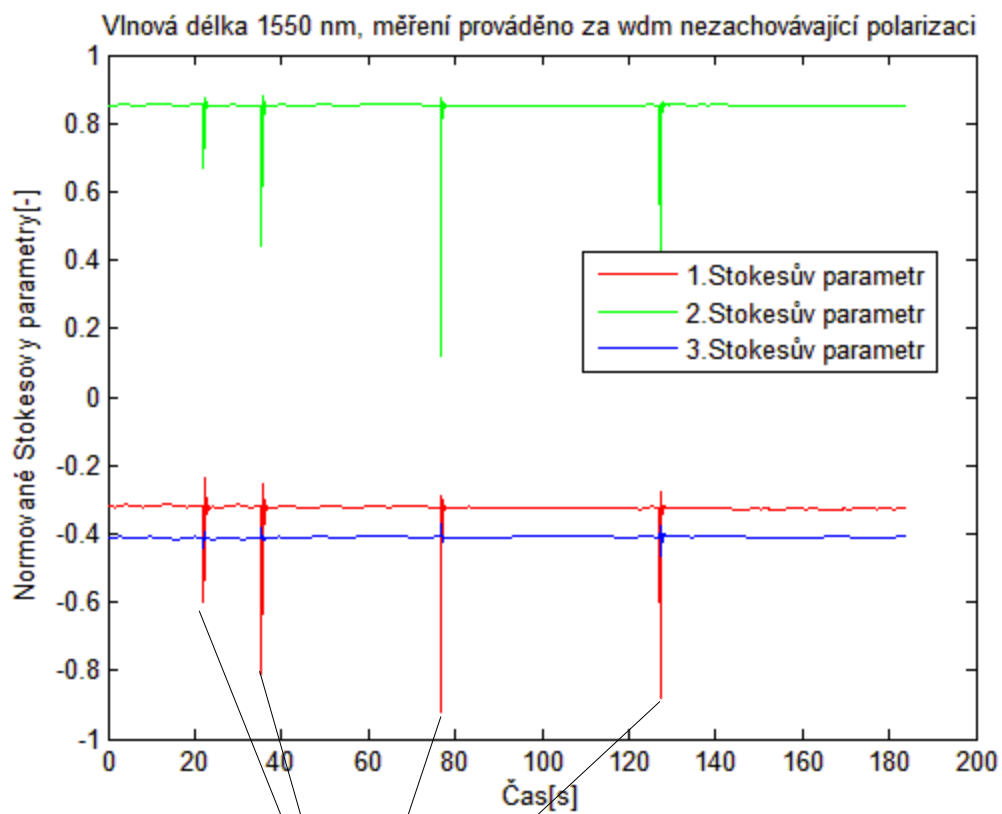
Průběh optického výkonu v různých částech fotonického spoje pro vlnové délky 850 nm a 1550 nm. Při měření jsou použity vlákna, která nezachovávají polarizaci.



Příloha 2:

Měření polarizace pro vlnovou délku 1550 nm v různých částech fotonického spoje.





Dotyk obsluhy optických vláken – vliv fyzického pohybu vlákna na polarizaci

Příloha 3 :

Měření polarizace pro vlnovou délku 830 nm v různých částech fotonického spoje.

