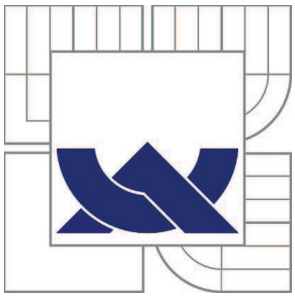
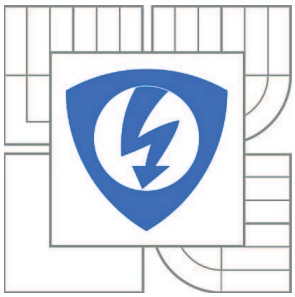


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VYUŽITÍ OPTICKÉHO VLÁKNA JAKO SENZORU PRO LOKALIZACI MECHANICKÉHO CHVĚNÍ

OPTICAL FIBRE UTILIZATION FOR LOCALIZATION OF MECHANICAL VIBRATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

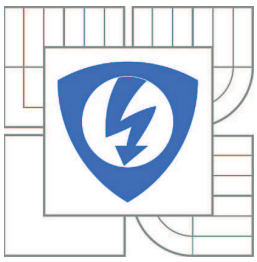
AUTOR PRÁCE — Bc. JIŘÍ PARDUBA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. VÍT NOVOTNÝ, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jiří Parduba ***ID:*** 106693
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Využití optického vlákna jako senzoru pro lokalizaci mechanického chvění

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s fyzikálními principy přenosu signálů po optických vláknech a jevy, které přenos ovlivňují. Zaměřte se na vliv mechanického chvění v okolí optického vlákna na přenosové parametry a prostudujte metody umožňující detekci a lokalizaci zdroje chvění podél vlákna i na vzdálenosti řádově desítky km. Vyberte nejvhodnější metodu a navrhněte pracoviště na její otestování. V rámci možností realizujte měření a získaná data zpracujte za účelem detekce a lokalizace zdroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Filka,M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Miloslav Filka, ISBN 978-80-86785-14-1, ČR, 2009
[2] Wilfert, O. Optoelektronika I. VUT Brno, ISBN 80-214-0551-1, ČR 1993

Termín zadání: 11.2.2013 ***Termín odevzdání:*** 29.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
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 studiem fyzikálních principů přenosu signálu po optickém vlákně a jevy, které tento přenos ovlivňují. Získání těchto znalostí probíhá s přihlédnutím na budoucí využití optického vlákna jako senzoru pro detekci a lokalizaci mechanického vlnění. Následně je využito těchto poznatků a jsou nastudovány a uvedeny metody, které umožňují detekci mechanického chvění na řádově desítky kilometrů. V závěru této práce je navrženo laboratorní řešení umožňující detekci a lokalizaci na velké vzdálenosti s možností reálného testování v praxi. Na testovacích zapojeních poté probíhá samotné měření, kde jsou výsledky měření zpracovány za účelem detekce a lokalizace zdroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

anti-Stokes, stimulovaný Brillouinův rozptyl, detekce a lokalizace mechanického chvění, jednovidové optické vlákno

ABSTRACT

The thesis is focused on physical principles of signal transmission by optical fiber and effects that may have influence on such transmission. This knowledge is acquired with regard to future usage of optical fiber as a sensor for detection and localization of mechanical vibration. In the thesis, mentioned knowledge is taken in account and also there are described methods, which allow mechanical vibration for dozens of km. At the conclusion the laboratory sollution is suggested, allowing detection and localization in vast distance with possibility of real test in practice.The testing curcuits are used for measurement and results are processed for purpose of detection and localization of source. The measurement itself was made by testing curcuits and results were processed for purpose of detection and localization of source.

KEYWORDS

anti-Stokes, stimulated Brillouin scattering, detection and localization of mechanical vibrations, single-mode optical fiber

PARDUBA, J. *Využití optického vlákna jako senzoru pro lokalizaci mechanického chvění.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Využití optického vlákna jako senzoru pro lokalizaci mechanického chvění jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vítu Novotnému, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne ....

(podpis autora)

SIX research centre
sensor, information and communication systems

Faculty of Electrical Engineering
and Communication

Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno, Czechia

http://www.six.feec.vutbr.cz

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

2007–13
OP Výzkum a vývoj pro inovace

OBSAH

Seznam obrázků **viii**

Seznam tabulek **x**

Úvod **1**

1 Přenosové vlastnosti optických vláken **2**

1.1 Útlum optických vláken ... 2

1.1.1 Lineární jevy při optickém přenosu ... 3

1.1.2 Nelineární jevy při optickém přenosu ... 3

1.2 Disperze u optických vláken ... 4

1.3 Okna ... 6

1.4 Stokesův posun ... 7

2 Zdroje světla **8**

2.1 Luminiscenční diody ... 9

2.2 Laserové diody ... 9

3 Modulace a detekce světla v optických vláknech **10**

3.1 Modulace ... 10

3.2 Modulační vlastnosti Laserových diod ... 10

3.3 Modulační vlastnosti LED diod ... 11

3.4 Detekce světla ... 11

4 Metody umožňující detekci zdroje chvění v okolí optického vlákna **13**

4.1 SUB-LOOP ... 13

4.2 DTS (Distributed Temperature Sensing system) ... 13

4.3 Stimulovaný Brillouinův rozptyl ... 16

4.4 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) ... 17

4.5 Stimulovaný Brillouinův rozptyl ve vláknech malého průměru ... 19

4.6 BOTDR pro až 150 km ... 21

4.7 Detekce založena na Braggově mřížce ... 22

4.8 Lokalizace a analýza založena na Jonesově matici ... 23

4.9 Korelace založena na kontinuální vlnové technice ... 24

4.10 Vlnková analýza optického signálu získaná z optického vlákna pomocí Fabry-Perotova interferometru 25

5 Součástky pro optické telekomunikační systémy použitelné pro námi navrhované řešení 28

5.1 Optické vlákno 28

5.2 Laserové diody 28

5.3 Modulátory 29

5.4 Optické zesilovače 29

5.4.1 EDFA zesilovače 29

5.4.2 PDFA a TDFA zesilovače 31

5.4.3 Ramanovské optické zesilovače 32

5.5 Optické cirkulátory 33

5.6 Optické izolátory 34

5.7 Interferometry 35

5.8 Optické filtry 36

6 Navrhované řešení 38

6.1 Realizovaná měření pro jednotlivé prvky zapojení 41

6.1.1 Měření šířky spektra DFB laseru 41

6.1.2 Měření šířky spektra laditelného laseru – ITLA 42

6.1.3 Měření Fabry-Parotova laseru 43

6.1.4 Měření velikosti útlumů v Cirkulátoru 43

6.1.5 Měření optického izolátoru 44

6.1.6 Měření AWG filtru 45

6.1.7 Shrnutí 45

6.2 Realizovaná měření pro zkušební zapojení 46

6.2.1 Měření při použití kontinuálního světla 46

6.2.2 Stimulovaný Brillouinův rozptyl 47

6.2.3 Měření při použití modulátoru 48

6.2.4 Měření v časové oblasti 51

7 Závěr 54

Literatura 55

Seznam zkratek 58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Rozptýlené záření Rayleigho, Brillouinova a Ramanova spektra 4
Obr. 1.2: Stokesův posuv 7
Obr. 2.1: Směrové charakteristiky LED a Laserové diody 8
Obr. 4.1: Blokové schéma Omoriho sub-loop systému 13
Obr. 4.2: Vnitřní schéma DTS systému využívající OFDR reflektometr 15
Obr. 4.3: Blokové schéma pro měření stimulovaného Brillouinova rozptylu 16
Obr. 4.4: Blokové schéma CATV s využitím SBS 17
Obr. 4.5: Ilustrace prostředí pro ochranu hraničního území 18
Obr. 4.6: Blokové schéma využívající k detekci Rayleighova rozptylu 19
Obr. 4.7: Blokové schéma pro využití cutback techniky 21
Obr. 4.8: Blokové schéma pro detekci chvějí, využívající Braggovu mřížku 23
Obr. 4.9: Blokové schéma, využívající pro detekci chvění Jonesovu matici 24
Obr. 4.10: Blokové schéma využívající korelace k detekci mechanického chvění 25
Obr. 4.11: Blokové schéma pro využití vlnkové analýzy 27
Obr. 5.1: Blokové schéma principu EDFA zesilovače 30
Obr. 5.2: Blokové schéma principu Ramanovského zesilovače 32
Obr. 5.3: Schématická značka cirkulátoru 33
Obr. 5.4: Schématická značka optického izolátoru 35
Obr. 6.1: Blokové schéma navrženého řešení 38
Obr. 6.2: Čas mezi jednotlivými impulzy 39
Obr. 6.3: Požadovaná číška spektra laserové diody 39
Obr. 6.4: Naměřené spektrum DFB laseru 41
Obr. 6.5: Optický cirkulátor v závěrném směru port 2 → 1 44
Obr. 6.6: Spektrum optického izolátoru v propustném směru 44
Obr. 6.7: Spektrum optického izolátoru v závěrném směru 45
Obr. 6.8: Spektrum AWG filtru 45
Obr. 6.9: Blokové schéma pro měření s použitím kontinuálního světla 46
Obr. 6.10: Měření na výstupu OSA1 46
Obr. 6.11: Měření na výstupu OSA2 47
Obr. 6.12: Blokové schéma pro měření stimulovaného Brillouinova rozptylu 47

Obr. 6.13: Spektrum stimulovaného Brillouinova rozptylu s nárustem výkonu o 2 dB. 48
Obr. 6.14:Blokové schéma s použitým modulátorem..... 48
Obr. 6.15: Rayleighův a Brillouinův rozptyl při použití modulátoru 49
Obr. 6.16: Závislost přijatého výkonu na modulačním kmitočtu (τ = 35 ns) 49
Obr. 6.17: Závislost přijatého výkonu na modulačním kmitočtu (τ = 35 ns) 50
Obr. 6.18: Závislost přijatého výkonu na šířce modulačního pulzu (f = 1 kHz) 50
Obr. 6.19: Měření v časové oblastí 51
Obr. 6.20: Fourierova transformace časových odezev 52
Obr. 6.21: Fourierova transformace časových odezev, které jsou normovány¨ 52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Okna pro jednovidová optická vlákna 6
Tab. 4.1: Cutback technika pro vybraná vlákna 20
Tab. 6.1: Naměřené hodnoty pro DFB laser 41
Tab. 6.2: Naměřené hodnoty pro laditelný laser – ITLA 42
Tab. 6.3:Spektru laditelného laseru – ITLA 42
Tab. 6.4:Spektrum optického cirkulátoru v propustném směru port 1 → 2 43
Tab. 6.5: Naměřené hodnoty pro optický izolátor 44
Tab. 6.6: Závislost přijatého výkonu na šířce modulačního pulzu (f = 1 kHz) 50

ÚVOD

V současné době je optický přenos nejrychlejší a nejspolehlivější přenos dat. Toho všeho se dosahuje díky tomu, že v optickém vláknu prakticky nedochází k žádnému rušení, dá se použít široké spektrum frekvencí pro přenos a energetická náročnost není velká. Problémem dnešní bezdrátové doby je při zavádění tohoto přenosu nutnost umístit kabel do země.

I když, jak je výše uvedeno, je optické vlákno (kabel) odolné proti rušení vnějších vlivů, je v této práci ukázáno, jak se dá využít vlivů mechanického vlnění na toto přenosové médium. Mechanické vlnění bude využito tak, že optické vlákno bude použito jako senzor detekce a lokalizace tohoto zdroje vlnění. To může najít uplatnění při ochraně velkého pozemku, státní hranice atd.

V první části se práce bude zabývat fyzikálními principy přenosu signálu po optických vláknech a jevy, které tento přenos ovlivňují. Tato část je nutná pro pochopení následujícího studia metod umožňujících detekci a lokalizaci zdroje chvění podél vlákna, kterými se zabývá druhá část práce. Přesněji je práce orientována tak, aby se detekce a lokalizace dalo dosahovat na vzdálenosti řádově desítky kilometrů. Představeno je okolo 10 metod tykajících se detekce a lokalizace.

V poslední části bylo vybráno řešení kombinující více představených metod a pečlivě prostudovány součástky vhodné pro použití a navržení pracoviště pro testování této metody. Nakonec bylo přistoupeno k částečné realizaci měření, kde výsledky měření byly zpracovány za účelem detekce a lokalizace zdroje.

1 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN

V následujícím textu je čtenář seznámen s důležitými přenosovými vlastnostmi optických vláken.

1.1 Útlum optických vláken

Útlumy u optických vláken se projevují hlavně ztrátami, které jsou způsobovány třemi základními jevy. Těmi jsou **absorbování** materiálu, **vyzařování** z materiálu a **rozptyl** na nehomogenitách materiálu, příměsí a nečistot [1].

Stručně řečeno, je **absorpce** způsobena přechody mezi úrovněmi základního materiálu. Pokud se bude jednat o infračervenou oblast, je to přechod mezi molekulárními úrovněmi a pokud o oblast viditelnou a ultrafialovou, jedná se o přechod mezi úrovněmi atomárními. Nejvíce tyto přechody ovlivňují rezonance kovů na určitých kmitočtech, kde dochází k tepelným ztrátám. Těmito kovy jsou především Fe (Železo), Cu (Měď), Cr (Chrom) [1].

Pokud se na rozhraní dvou dielektrických prostředí, které mají rozdílné vlastnosti, lámou šířící se paprsky, proniká část energie ven z jádra, což se nazývá ztráta **vyzařováním** [1].

Ke ztrátám **rozptylem** může docházet nedokonalou geometrií a nedodržením hranice rozměru mezi jádrem a pláštěm. Dále k rozptylu dochází kvůli mikronehomogenitám materiálu, které jsou způsobeny náhodně rozloženými molekulami v amorfním materiálu. Pokud je však vlnová délka signálu větší než velikost „nehomogenit“, nazývají se vznikající rozptylové ztráty Rayleighovy. Svou úlohu pro rozptyl můžou sehrát také malé trhliny v materiálu a dále také mikroohyby, které způsobují poruchu přímočarosti osy světlovodu, což bude zahrnuto do zapracování na vyřešení problematiky zadání této práce [1].

1.1.1 Lineární jevy při optickém přenosu

-Rayleighův rozptyl

Jako hlavní charakteristika Rayleighova rozptylu je všesměrovost, která dominuje, v přenosových oknech optické komunikace. K tomuto jevu dochází, pokud v krystalické mřížce vznikají tepelné kmity. Tomuto jevu se dá částečně zamezit tak, že se pracovní frekvence posune do infračervené oblasti [1] [7].

-Mieův rozptyl

Tento rozptyl je poměrně úhlově závislý a jeho příčinou jsou mikroskopické trhliny a napětí ve vlákně, změna průměru jádra, nedokonalá struktura vlnovodu, nečistoty ve vlákně. Všechny tyto ovlivňující aspekty mají srovnatelnou velikost s vlnovou délkou [1] [7].

1.1.2 Nelineární jevy při optickém přenosu

-Brillouinův rozptyl

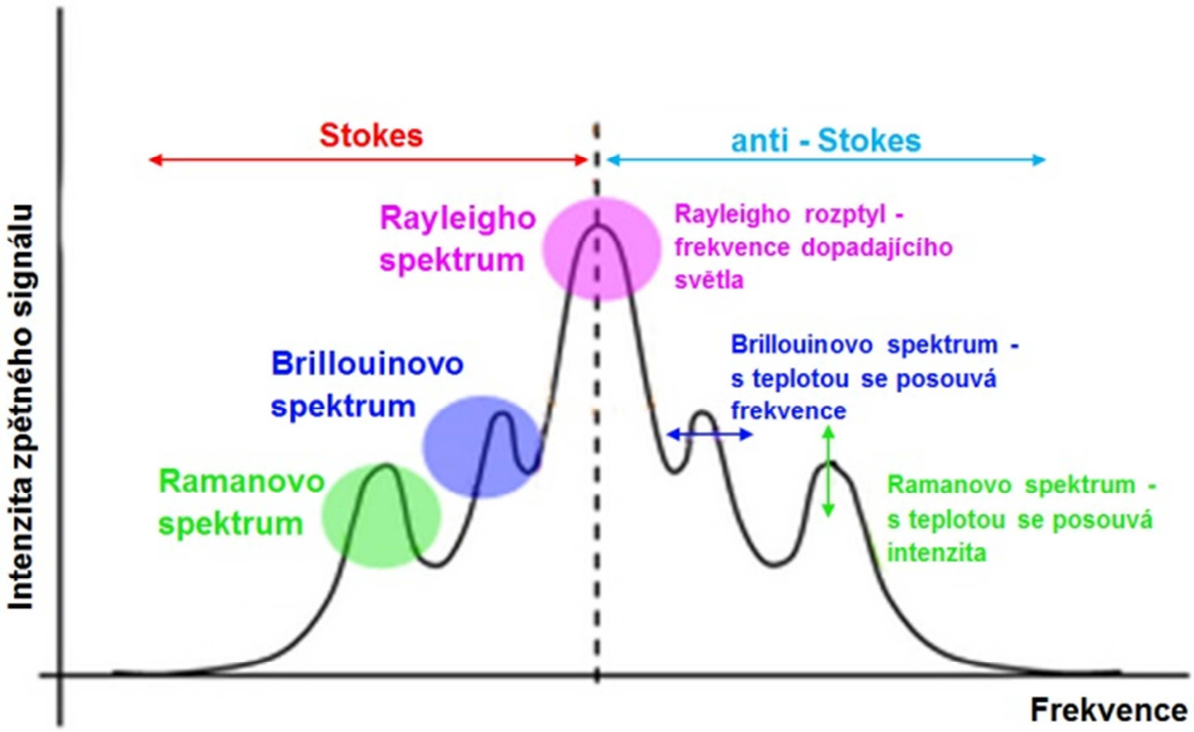
K Brillouinovu rozptylu dochází, když je světlo v médiu (jako je vzduch, voda, nebo krystal) ovlivněno časově-závislými optickými změnami hustoty, frekvence a trasy. Tato rozdílná hustota může být vztažena k akustickému režimu jako například fotony, magnetické režimy (magnony), nebo teplotní gradienty. Stejně, jako je popsáno v klasické fyzice, pokud je médium komprimováno, mění se index lomu. Část procházejícího světla, ovlivňující periodické změny indexu lomu, je vychýlena do trojrozměrné difrakční mřížky. Vzhledem k procházející akustické vlně je světlo podrobeno Dopplerovu jevu tak, že se jeho frekvence změní. [1] [5] [6] [7].

Z kvantového hlediska je Brillouinův rozptyl vyjádřen vzájemným působením mezi elektromagnetickou vlnou a hustotou vlny (Fotono-Fononového jevu), magnetické rotační vlny (Fotono-Magnonového jevu) nebo další nízké, kvazičástečné frekvence. Brillouinův rozptyl je nepružný, to znamená, že foton může ztratit energii k vytvoření kvazičástečného řešení (Stokesův jev) nebo nabít energii při destrukci (anti-Stokesův jev). Posun frekvence fotonu je znám také jako Brillouinův posun. Tento posun je obvykle měřen použitím Brillouinova spektrometru založeném na Fabry-Perotovu interferometru. [3] [4]

-Ramanův rozptyl

Je to nepružný rozptyl fotonu. Když jsou fotony rozptýleny z atomu nebo molekuly, je většina fotonů rozptýlena pružně, to znamená, že rozptýlené fotony mají stejnou kinetickou energii (frekvenci a šířku pásma) jako ovlivněný foton. Avšak malá část rozptýlených fotonů, přibližně 1 z 10 milionů, je excitačně rozptýlena, to znamená, že má rozdílnou frekvenci, obvykle menší od ovlivněného fotonu [1] [5] [6] [7].

Je také možné objevit molekulární vibrace pomocí nepružného rozptylu. V nepružném rozptylu je absorbující foton znovu vyzařován s nižší energií. Energetické rozdíly mezi absorbujícími a znovu vyzařovanými fotony v Ramanově rozptylu korespondují s energetickými požadavky vybudit molekuly do vyššího vibračního módu [1] [5] [6] [7].



Obr. 1.1: Rozptýlené záření Rayleigho, Brillouinova a Ramanova spektra

1.2 Disperze u optických vláken

Pokud dojde ke zkreslení signálu v optickém vlákně, příčinou je většinou disperze vln. Jeho definicí je rozdíl v polovině výšky impulzu jak na konci, tak na začátku optického vlákna. Pokud dojde k materiálové disperzi, je příčinou této disperze kmitočtová

závislost indexu lomu. Tato závislost vyvolává kmitočtovou závislost fázové a skupinové rychlosti šíření vlny v materiálu [1].

Pokud dojde ke geometrickým změnám vidu, způsobí to kombinaci materiálové a vlnovodové disperze, tím se při změně kmitočtu změní podélné skupinové i fázové rychlosti šíření. Tato kombinace disperzí se nazývá **chromatická** disperze [1].

Pokud je signál, který je šířen v optickém vlákně, rozdělen do vidů, je ve vlákně kromě chromatické disperze navíc i disperze vidová, která je způsobena rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů [1].

Z tohoto textu vychází, že disperze je jedním z nejdůležitějších parametrů optického přenosu, jelikož určuje šířku přenášeného pásma, na něm je závislá i přenosová rychlost na přenosové rychlosti.

-materiálová disperze

Pokud dojde k rozdílným rychlostem šíření paprsků a zároveň různých vlnových délek, je to způsobeno nelinearitou kmitočtového průběhu indexu lomu, čemuž říkáme materiálová disperze [1].

-vlnovodná disperze

Tato disperze se uvažuje hlavně u jednovidových vláken, podstatně se totiž podílí na celkové disperzi vlákna. Zanedbat se může u mnohovidových vláken. Změna kmitočtu způsobuje změnu rychlosti. K té dochází tak, že je konstanta šíření jiná pro každý vid. Zároveň tato disperze způsobuje rozšiřování impulzů, které se přenáší ve vlákně [1].

-vidová disperze

Oproti vlnové disperzi, která se projevuje hlavně u jednovidových vláken, se týká tato disperze hlavně mnohavidových vláken, kde je homogenní jádro, u kterého dochází k omezení šířky přenášeného pásma. Vlnová disperze je toho hlavním činitelem. Tato disperze se vysvětluje hlavně pomocí názorné metody geometrické optiky [1].

-chromatická disperze

jak již bylo uvedeno výše, k chromatické disperzi dochází při geometrických změnách vidu, což je způsobeno kombinací materiálové a vlnové disperze, proto se tato

disperze uvažuje především u jednovidových vláken. Tato disperze se začala měřit s příchodem systémů, které využívají hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex [1], vzorec pro výpočet chromatické disperse je následující:

$$D_{chr} = c_0 \cdot f \cdot \frac{\mathrm{d}t_s}{\mathrm{d}f}. \tag{1.1}$$

-polarizační vidová disperze

Disperze je polarizační vidová a to z toho důvodu, protože se uvádí, že tento jev se zhoršuje při kruhových nesymetriích, kterými jsou například mikro ohyby vlákna při montáži, špatném uložení nebo také při výrobě. Jelikož se vid šířený v optickém vlákně šíří ve dvou vzájemně na sebe kolmých polarizačních rovinách, mají na něj vliv výše uvedené neduhy. To může způsobit, že se tyto polarizace šíří jinou rychlostí a tím se výstupní signál zkresluje nebo se rozšiřuje impulz [1].

1.3 Okna

U námi požadovaného běžného křemenného optického vlákna, jsou v různých použitých vlnových délkách rozdíly v útlumových charakteristikách. Podle Mezinárodní telekomunikační unie zaměřené na telekomunikace (ITU-T), byla pro jednovidová optická vlákna definována tato okna [1] [12].

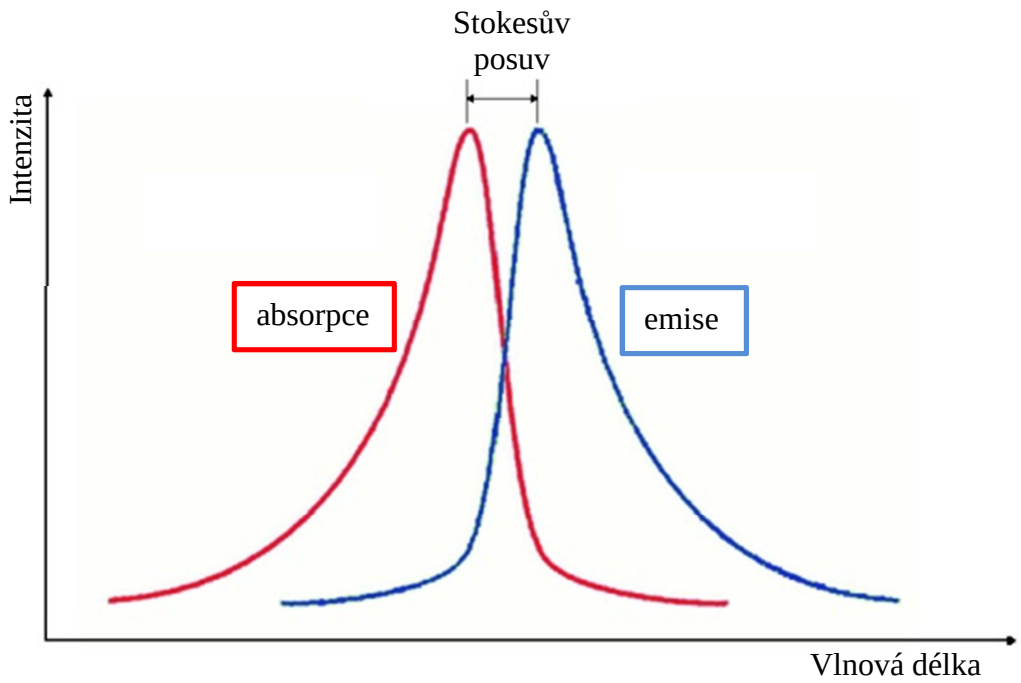
Pásmo	Název	Rozsah [nm]
O	Original	1260-1360
E	Extended	1360-1460
S	Short wavelength	1460-1530
C	Conventional	1530-1565
L	Long wavelength	1565-1625
U	Ultralong wavelength	1625-1675

Tab. 1.1: Okna pro jednovidová optická vlákna

1.4 Stokesův posun

Je to rozdíl mezi maximem absorpce a emise spektra stejného elektronického přechodu. To je udáváno v jednotkách vlnové délky nebo frekvence. Pokud se absorbují fotony, zvyšuje se energie a systém vstupuje do excitovaného stavu. Jednou z metod, jak uvolnit systém, je emitování fotonu, který ztrácí energii. Pokud má emitovaný foton méně energie než absorbující foton, nazývá se tento energetický rozdíl Stokesův (Stokes) posun. Pokud má emitovaný foton více energie než absorbující foton, pak se tento jev nazývá anti-Stokesův (anti-Stokes) posun. Tato energie přichází z tepelných fotonů v krystalové mřížce [32].

Pro anti-Stokes je běžnou látkou v průmyslovém použití Yttrium oxysulfidové dopované Gadoliniuem oxysulfídovým. To absorbuje v blízkosti infračervené oblasti a emituje ve viditelné části spektra. Dalším typem anti-Stokesové emise je konverze fotonů. Tam dochází k postupné absorpci dvou a více fotonů a to vede k emisi světla v kratší vlnové délce [32].

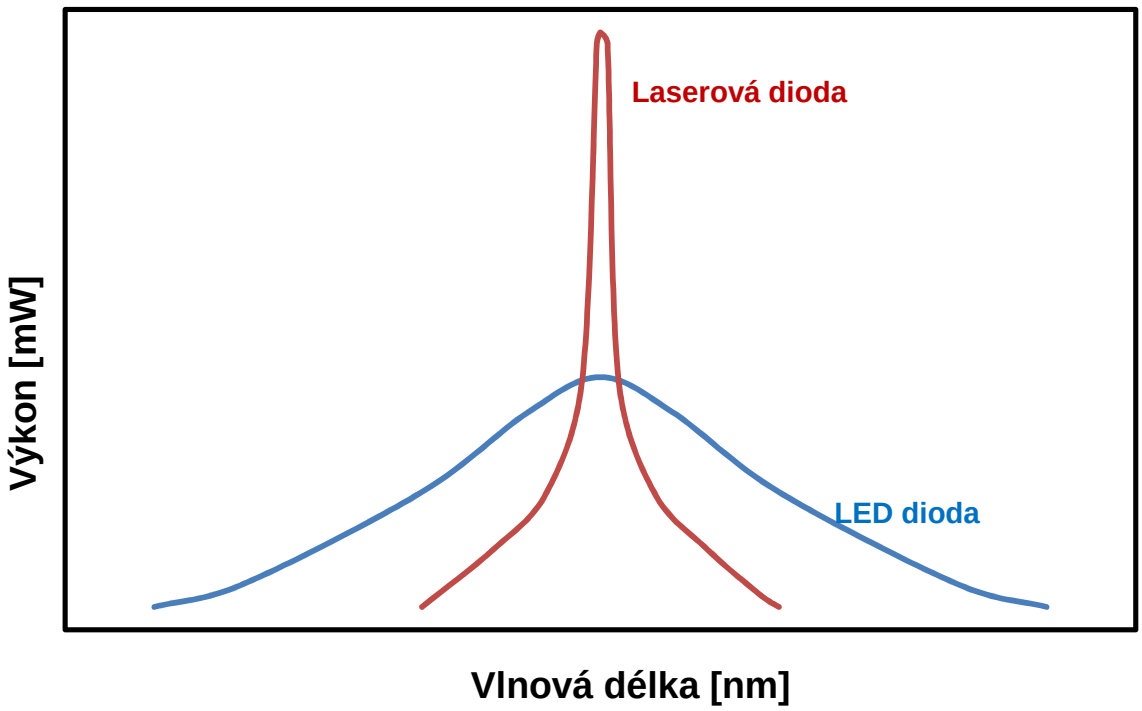


Obr. 1.2: Stokesův posuv

2 ZDROJE SVĚTLA

Jednou z nejzákladnějších částí optického spoje je zdroj záření. V dnešní době je nejvhodnějším zdrojem záření polovodičový zdroj, z důvodu generace světla při pokojové teplotě. Mezi nejdůležitější zdroje patří hlavně luminiscenční (nekoherentní zdroj záření) a laserové (koherentní zdroj záření) diody. Tyto prvky mají malé rozměry, snadné navázání paprsku na optická vlákna a snadnou modulovatelnost.

Hlavními požadavky na optické zdroje světla je vysoká účinnost převodu elektrické energie na světelnou energii, záření světelného zdroje na vlnové délce do optických oken s co nejmenším útlumem, vysoká životnost a spolehlivost, možnost modulovat pomocí injekčního proudu v širokém rozsahu, vysoká koherentnost záření, úzká směrová charakteristika a další.



Obr. 2.1: Směrové charakteristiky LED a Laserové diody

2.1 Luminiscenční diody

Tyto diody jsou velice levné a dostupné, s dlouhou životností a snadnou modulací. Nevýhodou však je velká divergence výstupního svazku a vyzařování relativně nízkého výkonu na vlnových délkách použitelných pro telekomunikace. LED diody jsou dobře použitelné pro krátké vzdálenosti, kde není požadavek na dodržení směrovosti optického svazku. Z tohoto důvodu je již jasné, že pro naše požadavky není LED dioda použitelná [1].

2.2 Laserové diody

Tyto diody mají oproti LED diodám vyšší vyzařovací výkon s menší šířkou spektra, vysokou účinností vazby na vlákno a výhodou modulace vyšších frekvencí. Nevýhodou je požadavek většího napájení, stabilizace teploty a o něco vyšší ceny. Laserové diody jsou dobře použitelné pro velké vzdálenosti s potřebou vyzařování úzkého svazku a přenášení více vlnových délek (WDM – vlnový multiplex) [1].

Laserová dioda je založena, jak již vyplývá z názvu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Diode), na zesílení světla stimulovanou emisí záření. Základní částí laserové diody je zesilovač světelné vlny a zpětnovazební rezonátor. Mezi základním a excitovaným stavem vznikají interakcí elektromagnetického pole tři základní druhy přechodů. Tím je absorpce záření a dva druhy emise (spontánní a stimulovaná). Emise spontánní vzniká náhodně a samovolně za nějaký čas od excitace (cca 100 ns) [1]. Emise stimulovaná je pak vyvolána přímou interakcí s přítomným elektromagnetickým polem. Pokud tento typ přechodů převládá u prvku optického záření, je způsobeno, že bude záření koherentní. Z toho vychází, že je nutné zabezpečit stav, při kterém bude větší počet aktivních atomů v excitovaném stavu. Pokud tedy převládá stimulovaná emise, je optické záření, které se šíří touto oblastí, zesíleno (nazývá se taky inverze populace). Proto také musí být rychlost emisních přechodů větší než přechod absorpce [1] [9].

V praktickém využití se k dosažení směrovosti používá jednostranně polopropustný rezonátor. Pro dosažení inverze populace je nejjednodušší metodou injekce na P-N přechodu. Lasery založené na dvojitém hetero-přechodu se využívají v praxi. Nutností

je efektivní soustředěnost minoritních nositelů a optického pole do velmi úzké aktivní oblasti. Proto se také Fabryho-Perotův rezonátor nahrazuje lepším, jako je tomu u DFB (Distributed feedback) laserů nebo u laserů s Braggovým odrazem (Distributed Bragg). Světelné záření laserových diod je vhodné pro telekomunikace, protože pokrývá požadovanou vlnovou délku a disponuje úzkou šířkou pásma [1] [9] [10].

3 MODULACE A DETEKCE SVĚTLA V OPTICKÝCH VLÁKNECH

Jako u každého přenosu informací po určitých médiích se používá systém modulace a demodulace přenášeného signálu i u přenosu na optickém vlákně. U zdroje signálu je nutno převést elektrický signál na optický pomocí modulátoru a naopak na straně přijímače je použit detektor záření, kde se převede optický signál zpět na elektrický. U optického vlákna se však budou uvažovat hlavně modulační vlastnosti použitého zdroje záření, což jsou především LED a laserové diody.

3.1 Modulace

Nejvíce známé metody z dalších technologií jsou použity i u přenosu na optickém vlákně. Těmito metodami jsou amplitudová, frekvenční a fázová modulace. Pokud je u přenosu převáděn analogový signál, využije se modulace amplitudová, kde se přímo moduluje i intenzita záření zdroje anebo také modulace frekvence, kde se využívá nosné frekvence.

3.2 Modulační vlastnosti Laserových diod

Díky tomu, že se používá polovodičová technologie, je možné k modulaci přímo využít konstantního injekčního proudu, jímž se nastavuje na výstupní charakteristice pracovní bod. Pokud se používá modulace analogová, doporučuje se nastavit předpětí těsně nad prahový proud.

- impulzní modulace

Pro pracovní režim laserové diody se jeví tato modulace jako nejvhodnější. Avšak i tato metoda má určitá omezení při vyšší přenosové rychlosti. Jednou z příčin je zpožděný výstupní signál za výstupní impulzní modulací a možnost vzniku relaxačních kmitů, které kvůli své frekvenci mohou ovlivňovat modulační frekvence. Z toho vyplývá, že nejdůležitější je předem nastavit co nejvhodnější pracovní podmínky a tím potlačit co nejvíce uvedené parazitní jevy a dosáhnout tak teplotní a časové stability provozu. Dále je potřeba vybrat lineární část charakteristiky pro pracovní oblast laseru.

3.3 Modulační vlastnosti LED diod

I u této diody se využívá modulace injekčním proudem a nejvíce se využívá lineární statické modulační charakteristiky. Ta má výhodu v tom, že k zakřivení dochází až při vyšších hodnotách proudu. Jelikož LED dioda disponuje dynamickými vlastnostmi, dochází ke zpoždění odezvy diody. Za účelem zkrácení doby zpoždění se polarizuje LED dioda napětím, které se blíží napětí difúznímu. Zároveň se docílí vyšších modulačních hranic, co se týče impulzní modulace. Konstrukce LED však také ovlivňuje modulační vlastnosti, proto je nutno počítat i s tímto [1].

3.4 Detekce světla

Detektory záření, jak se nazývají prvky pro detekci světla pro demodulaci optického signálu, musí disponovat parametry, které budou slučitelné s ostatními prvky optoelektronického systému. Nejpoužívanějšími jsou polovodičové detektory, PIN fotodiody a lavinové fotodiody (APD – Avalanche-Photodiode). Stejně jako prvky pro generování světelného záření, musí splňovat i detektory, které světlo budou přijímat, podobné požadavky. Musí mít vysokou citlivost na vlnových délkách použitých pro telekomunikace (0,8-1,55 μm), rychlou časovou odezvu, malý vlastní šum, dostatečnou šířku přenášeného kmitočtového pásma, odolnost proti změnám teploty a napájecího napětí. U těchto součástek je také využíváno P-N přechodů. Základním principem je oddělování párů nosičů náboje, což vzniká pohlcováním světelného záření detektorem. Pro pohlcování světelného záření jsou použity materiály Ge, Si, GaAs, InGaAsp,

InGaAs, protože mají dostatečnou pohltivost světla v námi požadovaném pásmu vlnových délek [1].

Princip PIN diody je založen na třívrstvém polovodiči, kde se nachází vrstvy P a N, které jsou silně legované a slabě legovaná střední vrstva *i* s vodivostí typu P, nebo N. Vlivem napětí se vytváří ve vrstvě *i* intenzita elektrického pole a tím se dioda polarizuje v závěrném směru. Tam, kde se stýkají vrstvy P a *i*, respektive vrstvy *i* a N, vznikají přechody. Nejdůležitějším parametrem je šířka *i* oblasti s požadavkem, aby obě navazující (sousední) oblasti byly co nejužší. To z důvodu zajištění co nejvyšší účinnosti generování párů díra – elektron. Ty se mohou vytvářet ve všech uvedených oblastech diody. Tyto fotodiody jsou velmi rozšířené, mají nízkou odezvu a kvantový výtěžek 60 – 80%. Pokud nám to použité vlnové délky umožňují, je nejvýhodnější použít křemíkovou fotodiodu z důvodu menší teplotní závislosti a možnosti využití menšího proudu při tmavém prostředí [1].

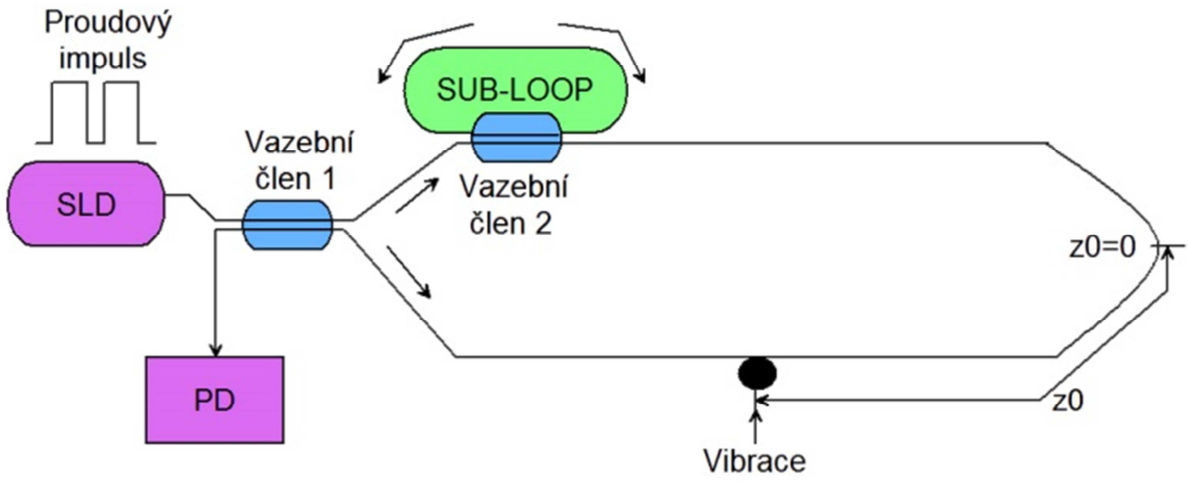
Další používanou fotodiodou je lavinová fotodioda. Navzdory tomu, že je tato fotodioda finančně nákladnější, složitější na výrobu a vyžaduje předpětí, je díky její větší citlivosti prakticky použitelnější. Tato dioda je založena na procesu multiplikace volných nosičů na základě ionizace v silném elektrickém poli, to však zároveň způsobuje vyšší úroveň napětí šumu [1].

Jak již bylo uvedeno, jedním z nejdůležitějších parametrů je kvantová účinnost. Ta je definována jako absorbovaná část dopadajícího toku fotonů, při které se sbírají vytvářené nosiče proudu podél přechodu P-N. Dalšími důležitými parametry jsou frekvenční vlastnosti, impedance a časové konstanty, spektrální citlivost, proud za tmy a teplotní závislost detektorů [1].

4 METODY UMOŽŇUJÍCÍ DETEKCI ZDROJE CHVĚNÍ V OKOLÍ OPTICKÉHO VLÁKNA

4.1 SUB-LOOP

V Omoriho systému na obrázku 4. 1. níže, prochází světlo detekčním vláknem po směru a proti směru hodinových ručiček a sub-loop (oddělenou smyčkou) vláknem předtím, než se vzájemně ruší. Tímto způsobem může být systém rozložen do několika ekvivalentních Sagnacových interferometrů podle optických tras sub-loopu. Ekvivalentní Sagnacovy interferometry se liší v optické dráze, která odpovídá otočenému světlu v sub-loopu [18].



Obr. 4.1: Blokové schéma Omoriho sub-loop systému

4.2 DTS (Distributed Temperature Sensing system)

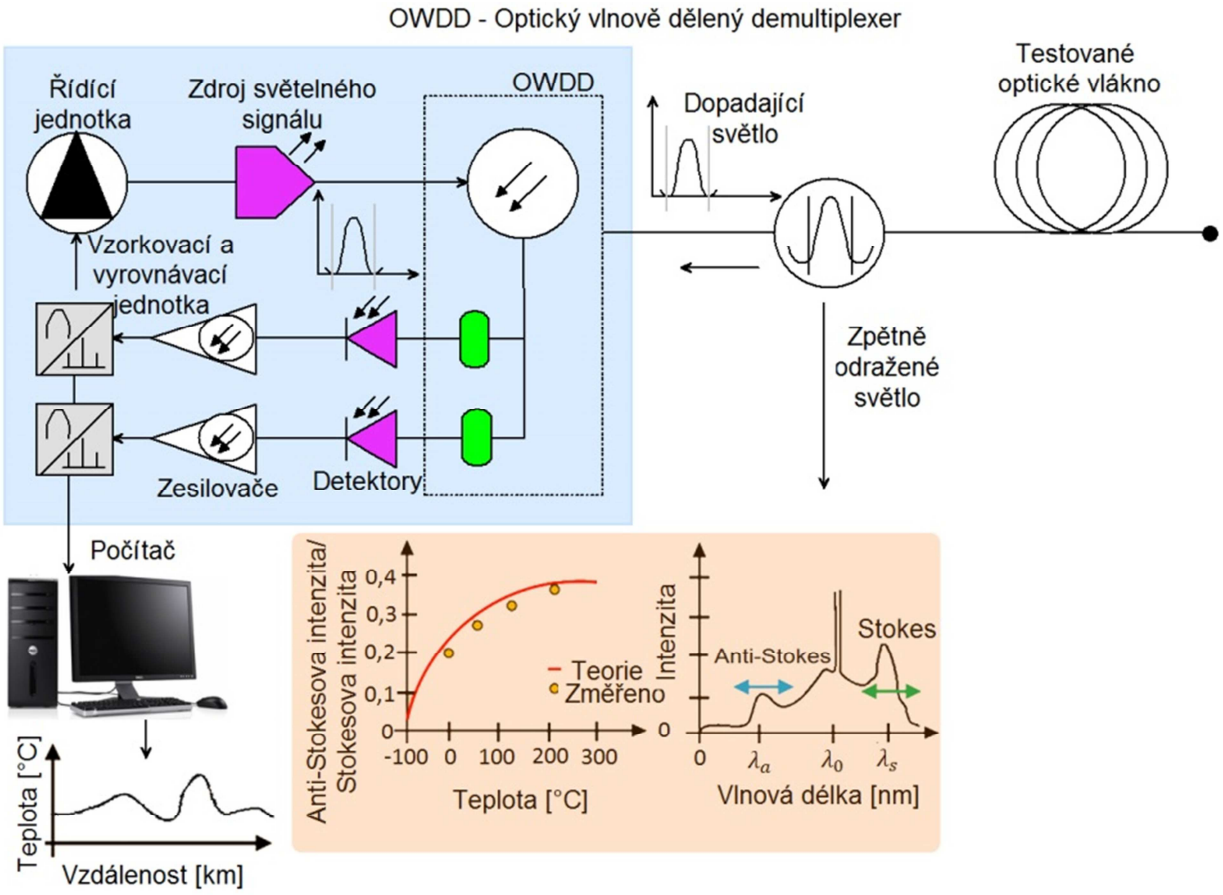
DTS se chová jako lineární senzor, který měří teplotu nebo mechanické napětí na optickém vlákně. Můžeme si představit tisíce senzorů, které nám budou poskytovat informace o tlaku nebo teplotě na délce celého vlákna. U tohoto systému se využívá výhod optického vlákna, čímž je například elektromagnetická odolnost, jednoduchá

instalace a údržba (téměř žádná). Dále použití v nebezpečných prostorech, možnost okamžité lokalizace změn námi sledovaného parametru. Při použití Ramanova rozptylu je možné použít vlákna o délce do 10km. Pokud bude DTS založeno na Brillouinově rozptylu, je možné použít vlákno o délce 30km [7].

Základním principem optovláknových distribuovaných systémů jsou optické reflektometry. Impulz o vlnové délce 1064 nm, velikosti menší než je 1 mW a době 10 ns, se posílá do vlákna, odkud se specifická část vrátí zpět na detektor systému DTS. Nejčastěji se využívá OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), tedy optické reflektometrie v časové oblasti nebo OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) optické reflektometrie ve frekvenční oblasti. Pokud dochází k nelineárním jevům, kvůli kterým se část světelného impulzu vrací zpět na detektor, nazývají se tyto jevy stimulovaný Ramanův a Brillouinův rozptyl. Z důvodu poměrně malé velikosti odraženého Ramanova rozptylu se používá mnohavidové optické vlákno, kde je velká hodnota numerické apertury. Jelikož mnohavidové vlákno má vyšší útlumovou charakteristiku, je dosah DTS, založeném na Ramanově rozptylu, omezen na délku optického vlákna cca 8 – 10 km. Jelikož při Brillouinově rozptylu se využívá jednovidové optické vlákno, kde je útlumová charakteristika naopak nižší, zvyšuje se dosah u DTS, založeném na Brillouinově rozptylu, na 30 km. Využívá se vlákna s průměrem jádra 9 μm a průměrem pláště 125 μm, což odpovídá ITU G.652. Přesnost tohoto systému je na 1m ± 1 °C s rozlišením 0,01 °C. To dokazuje, že tyto měřící systémy jsou velice přesné [7].

U distribuovaných systémů pro optická vlákna s využitím Ramanova nebo Brillouinova rozptylu je nejdůležitější anti-Stokesová část spektra. Ta mění intenzitu (Ramanův rozptyl) nebo frekvenci (Brillouinův rozptyl) na základě změny teploty podél optického vlákna. Principem DTS je tedy porovnání intenzity či frekvence anti-Stokes ke Stokesově části spektra [7].

Princip optovláknových distribuovaných systémů je založen na metodě zpětného rozptylu, což je obdobné jako u OFDR nebo OTDR metrů. Při OFDR se využívá Rayleighova rozptylového jevu, který je dominantní a Frenselova odrazů [7].



Obr. 4.2: Vnitřní schéma DTS systému využívající OFDR reflektometr

U této metody se na měřeném vlákně vyhodnocuje časová závislost zpětně rozptýlené optické energie při šíření úzkého optického impulzu. Touto metodou je možné měřit i homogenitu, útlum a to jak na délce celého kabelu, tak i na určitých částech, svárech, konektorech atd [7].

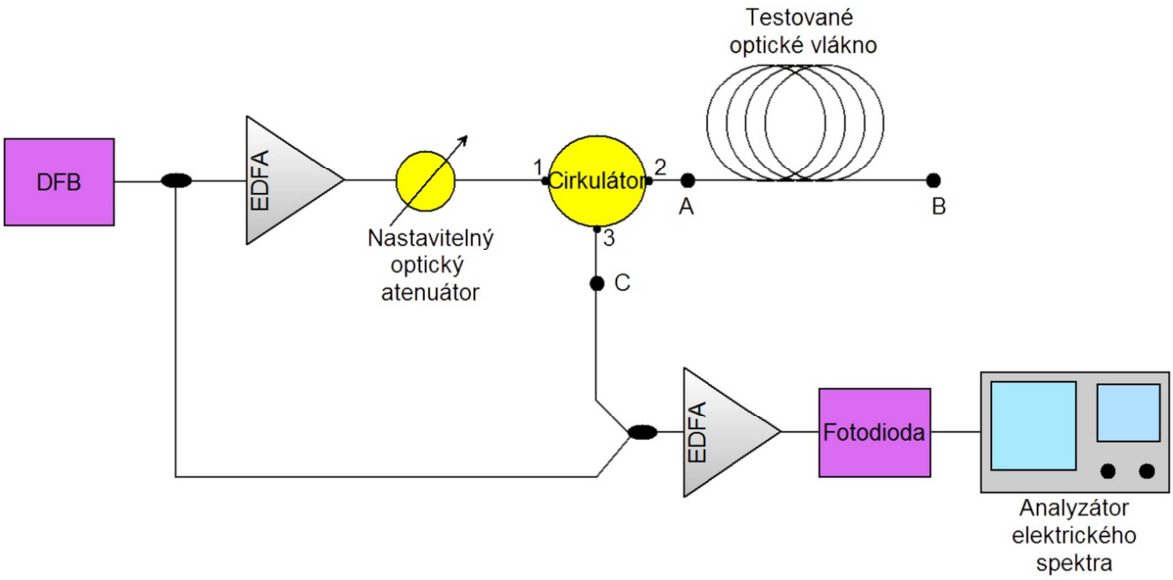
Princip OTDR reflektometru

Z injekčního laseru, který může být použit pro vyslání optického impulzu, se generují úzké optické impulzy, kde položířka je desítky až tisíce nanosekund s opakovací frekvencí několik kHz. Ty se přes zapojený vazební článek, optický dělič nebo vazební optiku, která je doplněná polopropustnými zrcátky, vysílají do optického vlákna používané jako senzor. Záření, které se zpětně odrazí nebo rozptýlí, je vedeno přes stejný optický dělič k detektoru záření, čímž může být lavinová fotodioda. Protože má signál velmi malou úroveň a je zatížen šumem, je signál veden do integrátoru. Signál se zprůměruje a získá se z něj užitečný signál bez přebytečného šumu, který je připraven k dalšímu zpracování. Tento signál je pak veden do logaritmického zesilovače

anebo se provede logaritmování digitálně pro získání hodnot v dB. Naměřené hodnoty jsou pak zobrazeny na displeji [7].

4.3 Stimulovaný Brillouinův rozptyl

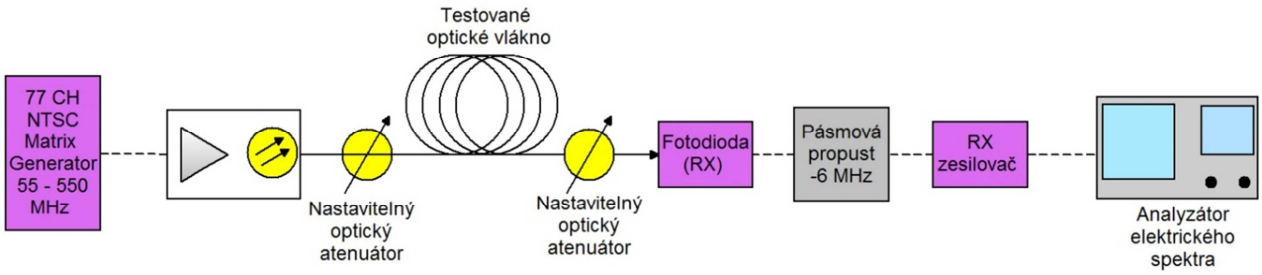
Typickými hodnotami pro frekvenci Brillouinova posunu v optickém vlákně jsou vlnová délka 1550 nm s přibližným rozsahem 9 – 12 GHz. SBS power měření je jeden z nejběžnějších a nejjednodušších prostředků ke kvantifikaci prahové hodnoty. Na blokovém schématu obr. 4.3 je znázorněn laserový zdroj s úzkou šířkou pásma a dostatečným výkonem (případně se může zesílit). Prvky k měření a ovládání výstupního signálu s optickým cirkulátorem jsou vyžadovány k celkovému měření. Dále je vyžadovaná kalibrace nastavitelného optického atenuátoru, aby energie v bodě A byla vždy známá. Funkce optického cirkulátoru je popsána v kapitole 5.5. V bodě B a C je možné měřit vysílaný nebo odražený optický signál za účelem změřit SBS prahovou hodnotu. Další demonstrace jsou uvedeny v čerpaném zdroji [17].



Obr. 4.3: Blokové schéma pro měření stimulovaného Brillouinova rozptylu

Pro demonstraci je možné si i ukázat zapojení pro měření analogového video signálu. Analogové optické systémy (HFC/CATV) jsou u SBS náchylné zejména na vyvolané ztráty. Tyto ztráty způsobují znehodnocení přenosu. Vyžadují při spuštění vysoký výkon pro udržení přijatelné úrovně kvality signálu na přijímači. Výkon analogového optického komunikačního systému je obvykle charakterizován pomocí poměru nosná-

šum. Každý prvek přenosového spojení může přispět k celkovému šumu spektra tak, že akumulativní účinek zatíží fotodetektor [17].



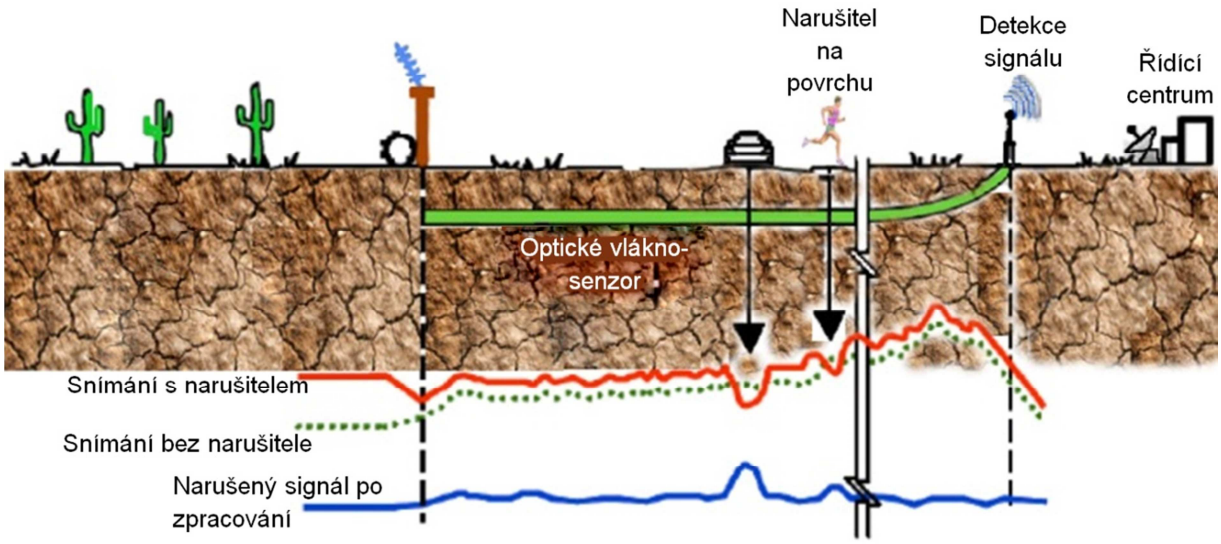
Obr. 4.4: Blokové schéma CATV s využitím SBS

NTSC generátor vysílá nositele signálu, analogový vysílač vysílá SBS prahovou hodnotu 18 dBm. Nastavitelný optický atenuátor umístěný za EDFA zesilovačem s hodnotami 27 dBm a NF=6 dB slouží k postupnému měnění výstupního výkonu vysílače k širšímu rozsahu před tím, než je připojeno testované optické vlákno. Druhý nastavitelný atenuátor na výstupu z vlákna slouží k udržení konstantního výkonu přicházejícího do fotodetektoru bez ohledu na velikost energie puštěné do vlákna. Dále je optický signál převeden na elektrický pro následnou analýzu [17].

4.4 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry)

Využití OTDR při ochraně státní hranice

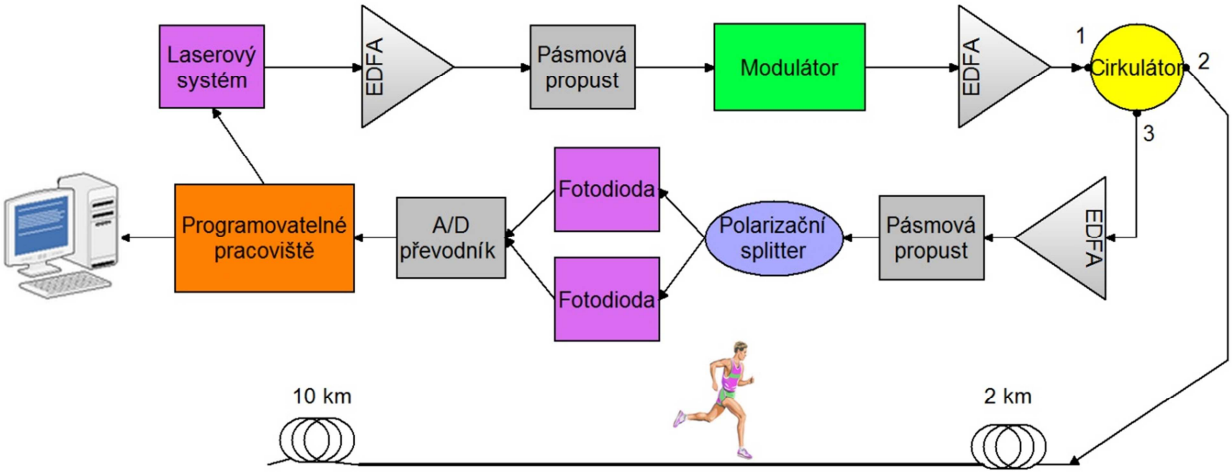
Hranice Spojených států amerických a Mexika měří cca 3141 km a v roce 2004 bylo podél této hranice 1,1 milionů ohrožení. Podle statistiky pohraniční policie je na hranicích zadržen pouze 1 z 5 lidí, kteří se pokouší dostat na území USA. Jelikož je hranice dlouhá, využije se optické vlákno jako nízko nákladový sensor pro monitorování hranice. V případě tohoto návrhu se využívá analýzy a detekce Rayleighova zpětného rozptylu z optického impulzu poslaného v optickém vlákně, které je umístěno v zemi. Fázově citlivý reflektometr optické časové oblasti (Φ-OTDR), který byl vyvinut v Texas A&M University, snímá změny optické fáze světla zpětného rozptylu. Tlak a seismické vlny, způsobené narušitelem pohybujícím se v blízkosti zakopaného vlákna, mění dráhu optického záření, pro které je Φ-OTDR velmi citlivý [23].



Obr. 4.5: Ilustrace prostředí pro ochranu hraničního území

OTDR bylo poprvé demonstrováno pro použití v optických vláknech před více než 30 lety [23]. Světelné pulzy z polovodičového laseru jsou vysílány do vlákna a Rayleighův zpětný rozptyl je detekován fotodetektorem. Měření změny fáze u Φ-OTDR je oproti změnám útlumu daleko citlivější k odchylkám podél vlákna. S Φ-OTDR je nezbytné použít laser s úzkou šířkou pásma. Poruchy na vlákně jsou detekovány porovnáním po sobě jdoucích pulzů. Lokalizace narušení se vzdáleností je úměrná časovému zpoždění [23].

Blokové schéma pro Φ-OTDR systém je na obrázku Obr. 4.6. V tomto zapojení je použit vysoce koherentní laser k zavedení světelných pulzů do optického vlákna. Perioda pulzu musí být vybrána delší, než je čas optického pulzu ve vlákně, tak aby mohl být kompletně detekován Rayleighův rozptyl a data ve vlákně se nepřekrývala. V tomto zapojení je použito 12 km optického vlákna, což vyžaduje 120 μs pro kompletní detekci, takže pro jednu periodu bylo použito 150 μs. Protože je jednotlivý pulz zaváděn i monitorován na stejném konci vlákna, použije se cirkulátor pro rozdělení signálu. Dále je použit polarizační splitter na konci přijímače pro optimalizace pravděpodobnosti detekce přes dva kanály. Sběr a zpracování dat jsou řešeny prostřednictvím National Instruments PCI-7831R kartou (programovatelné pracoviště) [23].



Obr. 4.6: Blokové schéma využívající k detekci Rayleighova rozptylu

Lokalizace narušení je možná, pokud známe čas periody, jejíž rozdíl v po sobě jdoucích pulzech je lokalizován. Tím, že známe rychlost světla ve vlákně a čas periody po sobě jdoucích pulzů, je možné převést jednotky času na jednotky vzdálenosti. Jelikož detekujeme zpětně odražený signál, je nezbytné počítat s dvojnásobným časem. Světelný impulz musí projít délku vlákna dvakrát – optický pulz do místa narušení a poté Rayleighův zpětný rozptyl zpět na detektor [23].

4.5 Stimulovaný Brillouinův rozptyl ve vláknech malého průměru

U tohoto článku byly studovány čtyři rozdílná optická vlákna na vlnové délce 1550 nm. Na těchto vláknech bylo prováděno měření cutback technikou, které spočívá ve stanovení některých přenosových vlastností optických vláken, jako je útlum a šířka pásma. Tohle měření se skládá z požadovaného měření na dlouhém testovacím vlákně, řezání testovaného vlákna v blízkosti konce spuštění, opakování měření na krátkém vlákně a odečtení výsledků získaných z krátkého vlákna k určení výsledků pro zbytek dlouhého vlákna [16] [17].

Řez by měl být veden tak, aby zůstal 1 m nebo více optického vlákna za účelem vytvoření rovnovážných podmínek distribučního režimu pro další měření. V mnohavidovém vlákně může absence rovnovážných podmínek způsobovat chyby

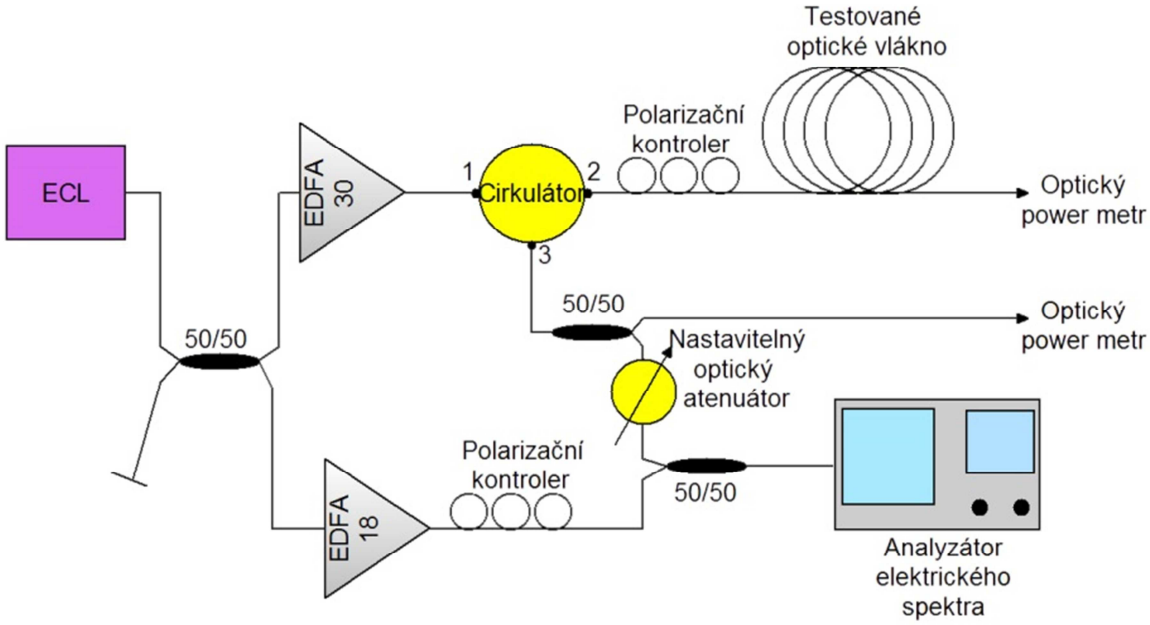
v měření z důvodu použití výstupní spojky. V jednovidovém vlákně může měření cutbacku na krátkém vlákně způsobit přenos okolních jevů a zkreslit tak měření. Zavedené chyby by způsobily vyšší ztráty na přenosu a nižší šířku pásma, než kdyby se použilo rovnovážných podmínek. Parametry v tabulce Tab.2 ukazují měření cutback technikou na určitých vláknech [16].

Vlákno [-]	d_c [μm]	α [μm/km]	L [m]	L_{eff} [m]	$A^{opt\ core}$ [μm2]	$A^{opt\ eff}$ [μm2]	$A^{ao\ eff}$ [μm2]	$P^{opt\ th}$ [dBm]	$P^{ao\ th}$ [dBm]
RB61	8	2	495	443	50,26	45,6	113	16,4	20,3
PC421	5,2	3	500	423	21,24	17,5	112	12,4	20,5
RB65	3,55	19,4	400	187	9,89	10,3	45,5	13,6	20,1
CF	1,7	71	390	61	2,27	4	21,6	14,4	21,7

Tab. 4.1: Cutback technika pro vybraná vlákna

U tohoto měření bylo pro měření Brillouinova rozptylu použito vlastní oscilační techniky. Signál z externího laseru (ECL – External Cavity Laser) je rozdělen 3 dB vazebním členem a poté zesílen 30dB optickým zesilovačem (EDFA model EAD-1-C). Poté signál pokračuje do cirkulátoru (funkce vysvětlena v kapitole 4.5), dále je signál přiveden do polarizačního kontroléru (PC) a nakonec do testovaného vlákna. Druhá polovina signálu, která je použita jako lokální oscilátor, je zesílena a sloučena se Stokesovým zpětným rozptylem pro oscilační detekci. Spektrum zpětného rozptylu je zaznamenáno použitím elektrického spektrálního analyzátoru (ESA) a jeho energie simultánně měřena optickým power metrem [16].

Stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS) je obvykle charakterizován prahovou hodnotou Brillouinova posunu a velikostí Stokese nebo zpětným rozptylem. Záleží také na specificky působících akustických vlnách. V současných studiích jsou zaznamenány experimentální výsledky s SBS se snižující se velikostí jádra [16].



Obr. 4.7: Blokové schéma pro využití cutback techniky

4.6 BOTDR pro až 150 km

Pro použití, které je delší než 10 km, jsou dány dvě omezující podmínky. První je, že energie špičky pulzu z pumpu musí být nižší než prahová hodnota stimulovaného Brillouinova rozptylu (SBS). Druhá je, že konečná energie pump impulzů se může vyčerpat, což vede k nerovnoměrnému zisku podél vlákna použitého pro detekci. K nadměrnému vyčerpání dochází již na začátku. V režimu Brillouinových ztrát je spojitá vlna použita jako sonda, proto dochází ke ztrátám podél vlákna, ve kterém se frekvenční rozdíly laseru shodují s místní Brillouinovou frekvencí vlákna [3].

Spontánní a stimulovaný Brillouinův rozptyl

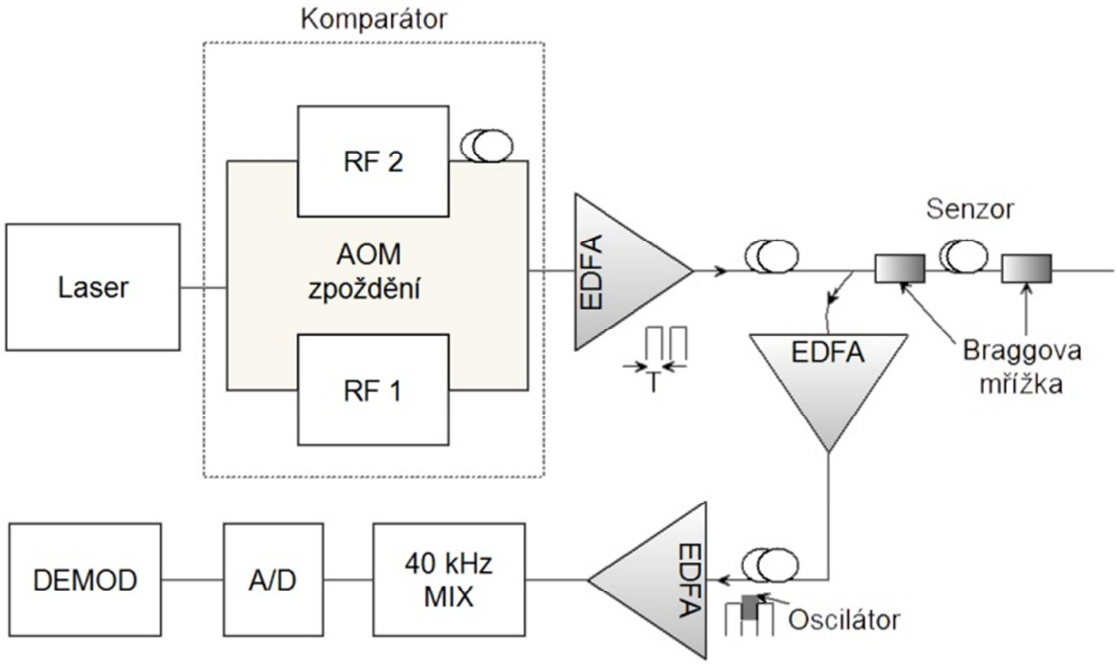
Vláknové senzory založené na Brillouinově rozptylu využívají faktu, že Brillouinova frekvence je úměrná vlastnostem materiálů a jeho termodynamickým vlastnostem, jako je rychlost zvuku, fáze indexu lomu, které závisí na lokální teplotě a pnutí. Přes poměrně velký rozsah teplot a napětí je Brillouinův frekvenční posuv většiny vláken úměrný místním změnám teploty a napětí [3].

Dále platí, že je vyžadován vysoký optický výkon pro obě vlny (pump a sondu) k překonání ztrát na vlákně. To však může vést k nerovnoměrnému zesílení podél

optického vlákna. K návrhu perspektivního senzoru je požadován nízký odstup signál šum, čehož se dosáhne nízkým ziskem přes celou senzorovou délku. Určitým kompromisem nízko ziskového systému přes celou délku snímání je, že odpovídajícím způsobem je i nízký odstup signál šum spojen s malými úseky vláken v porovnání s krátkými snímacími délkami. Proto je prostorové rozlišení nebo rozlišení teploty (napětí na vlákně) kompromisem pro dlouhou délku snímání [3].

4.7 Detekce založena na Braggově mřížce

Senzory popsány v tomto článku jsou interferometrické a jsou použity jako jedno rameno Michelsonova interferometru. Dotazovací systém je založen na metodě oscilačního diferenciálního zpoždění. Jednokanálový systém je ukázán na obr. 4.8 níže. Jako zdroj světla je použit vláknový DFB laser, který je navázán do vyrovnávacího interferometru. U něj se délka obou stran liší dvakrát k délce vlákna na každé čidlo. Světlo v každém rameni interferometru prochází přes akustooptický modulátor (AOM), který zabezpečuje frekvenční posuv a vyzařování pulzů. Oba AOM jsou řízeny frekvencemi, které se liší o 40 kHz. Proto interferometr vytváří dva optické pulzy, které jsou prostřednictvím senzoru dočasně oddělené dvojnásobkem vysílacího času s frekvenčním rozdílem 40 kHz. Optické pulzy mohou být před vysláním zesíleny pomocí EDFA. Před a za každým senzorem je ve vlákně Braggova mřížka. Časový odstup mezi impulzy zajišťuje, že odraz prvního impulzu od mřížky **za** senzorem, se vrátí zpět do dotazovacího systému ve stejný čas jako odraz druhého impulzu od mřížky **před** senzorem. Spojením těchto dvou optických impulzů vznikne 40 kHz nosný signál, který je fázově modulován bez signálu působícího na senzor. Vracející se optický impulz je smíchán se 40 kHz referenčním signálem a uzavřená fáze pokračuje do AOM řidiče signálu k získání sinus a cosinus fáze signálu. Metodou arctangens se pak získává informace o fázovém akustickém signálu a krajní čítače monitorují fázové přechody vyšší než 2π. Systém je v současné době schopen měřit frekvence v rozpětí 1 Hz – 10 kHz [19].



Obr. 4.8: Blokové schéma pro detekci chvějí, využívající Braggovu mřížku

4.8 Lokalizace a analýza založena na Jonesově matici

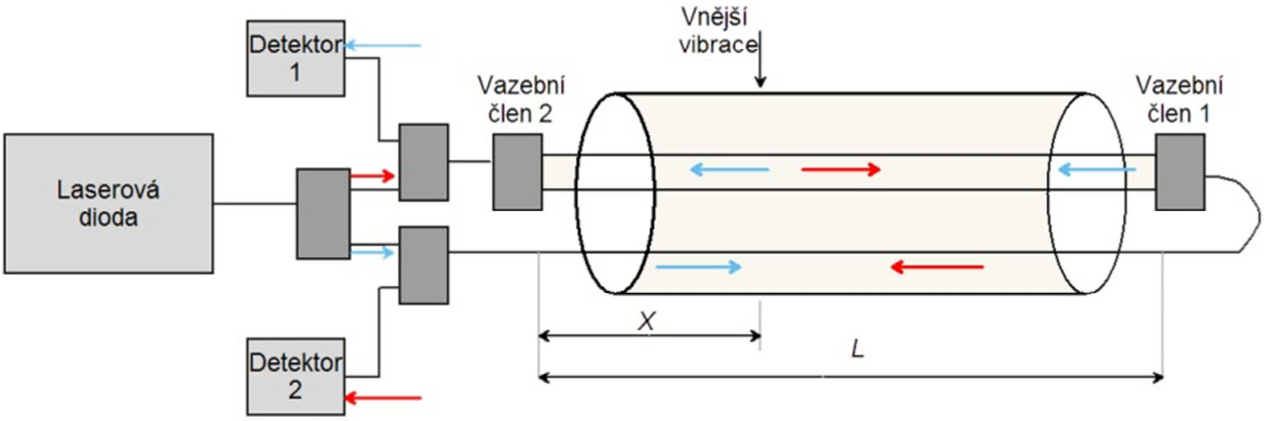
Tento systém pro jednovidová optická vlákna je založen na dvojlomové Jonesově matici. Jako první je vytvořena optická trasa polarizačního modelu Jonesovy matice a poté jsou teoreticky analyzovány velké chyby pomocí modelu níže. Ležící optický kabel podél trubky je tvořen třemi jednovidovými vlákny a použit jako senzor vibrací. Detekce je založena na principu Mach-Zehnderova optovláknového interferometru. Když snímací optické vlákno detekuje vibrace, dva kanály světelné vlny jsou rušeny ve vazebním členu 1 a 2 odděleně. Rušené signály ve vazebním členu 2 se vrací zpět na začátek přes vysílací vlákno. Poté co jsou dva rušené signály převedeny na elektrický signál a následně převedeny na digitální signál, jsou vedeny do počítače pro další analýzu a zpracování. Vzorec pro lokalizaci je následující: [20]

$$x = \frac{L - v\left(\Delta t - \frac{L}{v}\right)}{2}, \tag{4.1}$$

kde v je rychlost světelné vlny v optickém vlákně, Δt je časový rozdíl dvou rušených signálů, který můžeme dostat korelační funkcí,

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t) x_2(t+\tau) \mathrm{d}t. \tag{4.2}$$

Pro použití korelační funkce k vypočítání časového rozdílu je požadováno, aby proměnné signály $x_1(t)$ a $x_2(t)$ bylo možné korelovat [20].

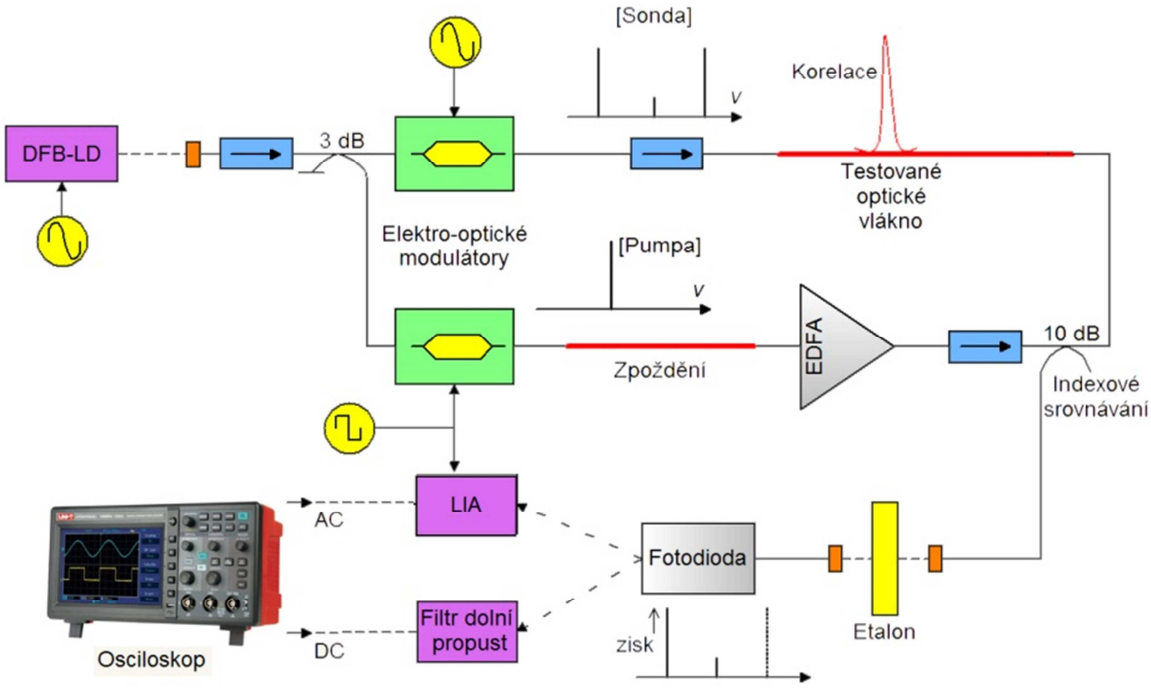


Obr. 4.9: Blokové schéma, využívající pro detekci chvění Jonesovu matici

4.9 Korelace založena na kontinuální vlnové technice

Korelace založena na kontinuální vlnové technice poskytuje vysoké rozlišení pro distribuované optovláknové snímání.

Stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS) může být myšlen jako difrakce světla na základě změny indexu lomu v požadovaném médiu, zapříčiněna působením akustické vlny. Pro spuštění SBS je pumpováno médium, v našem případě optické vlákno s paprskem, dále je sondován proti-proudný druhý paprsek. Pumpovaná vlna generuje zisk pro sondu se střední frekvencí posunutou o 11 GHz z pumpy. Tento frekvenční posun je známý jako Brillouinova frekvence. Podélné napětí nebo změny teploty podél vlákna mění Brillouinovu frekvenci. Například změna o 500 MHz odpovídá 1% napětí. Stimulovaná vlna prochází přes zesílení vybraného frekvenčního pásma známé jako Brillouinův spektrální zisk (BGS). Pokud je měřeno BGS v různých místech podél vlákna, je možné použít k získání Brillouinova frekvenčního posunu a tím i změny napětí nebo teploty. Pro generování Brillouinova rozptylu musí být šířka světelné vlny užší než BGS. Jinak by bylo obtížné přesně určit střed spektra. Typická hodnota šířky BGS je 30 MHz [21].



Obr. 4.10: Blokové schéma využívající korelace k detekci mechanického chvění

Světlo z DFB (Distributed Feedback) laserové diody je pomocí vazebního členu rozděleno na světelnou vlnu – pumpu a sondu, které jsou elektro-opticky modulovány. Pumpa je zesílena EDFA zesilovačem a vpuštěna do vlákna. Ostatní paprsky jsou modulovány k vytvoření postranních pásem okolo původní frekvence. První nižší postranní pásmo pracuje jako protijdoucí paprsek sondy. Rušení mezi optickou vlnou pumpy a sondy spouští SBS v místě, kde je vyvoláno napětí. Pokud je zjištěna vysoká korelace mezi světelnými vlnami, je možné určit, kde je podél vlákna generováno SBS [21].

4.10 Vlnková analýza optického signálu získaná z optického vlákna pomocí Fabry-Perotova interferometru

Konfigurace vibračního senzoru používajícího dutinu externího Fabry-Perotva interferometru (EFPI) je sestavena ze dvou na sebe rovnoběžných vysoce reflektivních ploch s proměnnou vzdáleností. Tato bezkontaktní technika sledování vibrací je založena na přechodném měření z Fabry-Perotova interferometrckého (FPI) senzoru, používajícího jednovidové optické vlákno. Oba z navržených konceptů a experimentálních výsledků prokázaly jedinečnou metodu okrajové diskriminace.

Pracovní rozsah vibrací je více než 13,26 μm. Tato demonstrace pracuje tak, že je světlo odražené od GRIN čoček, které jsou koherentně spojeny s fázově modulovaným zářením z pohyblivého reflektometru, který slouží k produkci interferenčních proužků [22].

V běžném odrazovém FPI senzoru je v dutině, která zajišťuje referenční signál, staticky vložené zrcadlo, další zrcadlo zajišťuje fázově modulovaný signál, které je přiloženo do sledovaného vibračního prostředí. Jeden okraj odpovídá změně rozdílu optické trasy o jedné vlnové délce. Odpovídající výchylka je zaznamenána FPI senzorem, ve vzduchu (n=1) je to půlka vlnové délky. Výchylka D vibračního povrchu je dána vztahem [22]:

$$D = \frac{N \cdot \lambda_0}{2}, \tag{4.3}$$

kde N je číslo okrajů a λ_0 je šířící se vlnová délka

Změna trasy l mezi signály, které jsou vráceny z prvního a druhého reflektoru, je rovna $2d$. Konfigurace založena na dvouvlnném interferometru má výstupní intenzitu I, ta může být vyjádřena [22]:

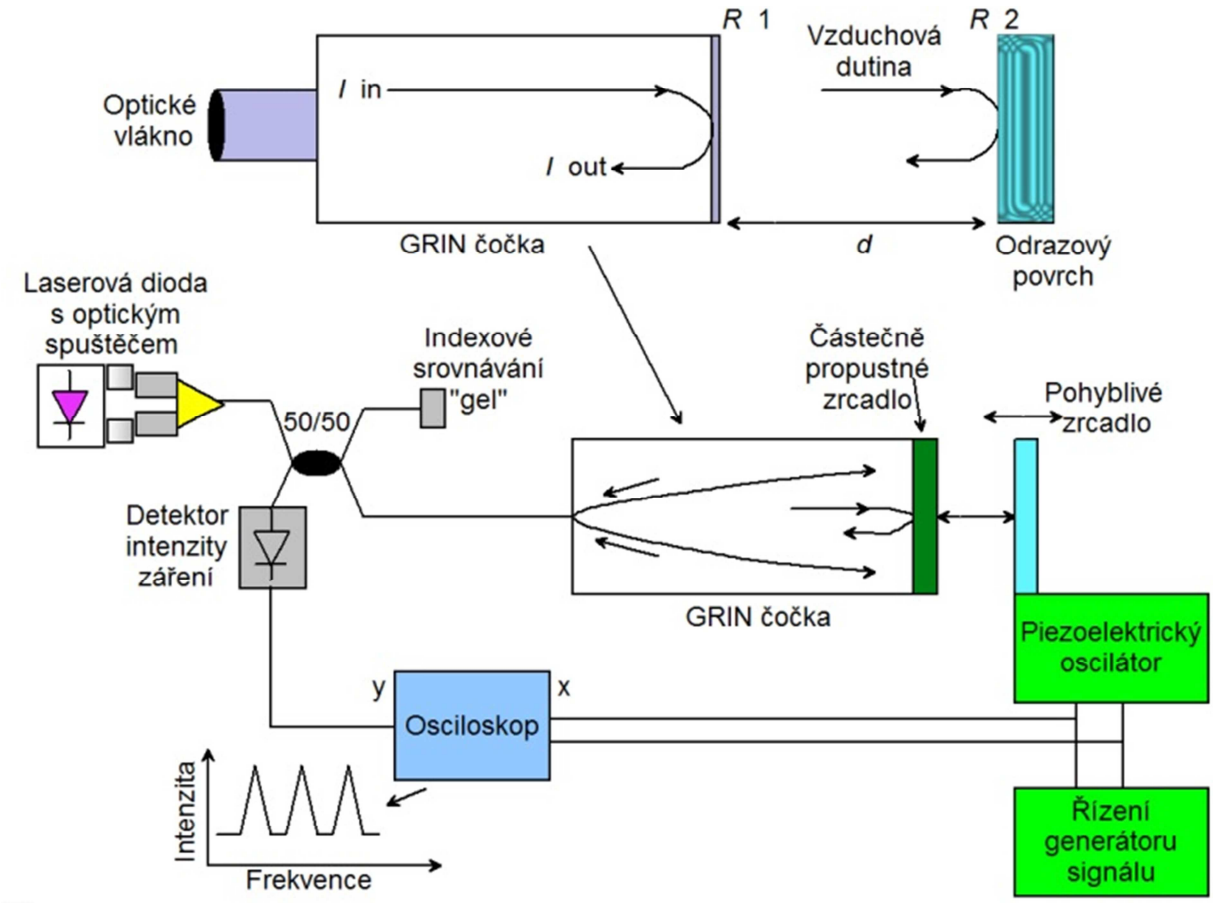
$$I = I_0(1 + V\cos\varphi), \tag{4.4}$$

kde I_0 vyjadřuje intenzitu okraje, V je viditelnost okraje a φ je fázové zpoždění mezi snímaným a referenčním signálem. Pokud EFPI má trasu s délkou l, pak φ může být vyjádřeno [22]:

$$\varphi = \frac{2\pi n l}{\lambda_0}, \tag{4.3}$$

kde n je index lomu uvnitř EFPI.

Když se rozdíl optické trasy mění v rovnoběžném směru pomocí zrcadla č. 2, je intenzita světelných cyklů ve vlnové délce λ_0 a vytváří oscilační sinusové vlny. Viditelnost okrajových interferencí je rozdíl intenzit mezi horní a dolní špičkou vlny v interferenčním schématu rozdělený mezi jejich součet. V dokonale koherentním světelném paprsku je viditelnost jednotná, i když je rozdíl optické trasy velký [22].



Obr. 4.11: Blokové schéma pro využití vlnkové analýzy

5 SOUČÁSTKY PRO OPTICKÉ TELEKOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY POUŽITELNÉ PRO NÁMI NAVRHOVANÉ ŘEŠENÍ

5.1 Optické vlákno

Vyžadované parametry pro navrhovanou metodu detekce a lokalizace mechanického chvění:

Jak již bylo uvedeno výše, jako nejvhodnější se jeví pracovní vlnová délka okolo 1550 nm. Použito by mělo být obyčejné telekomunikační vlákno z důvodu ceny a dostupnosti, jelikož by tato vlákna měla být nerozšířenější, a proto by měla být námi zkoumaná metoda detekce nejpoužitelnější. Tímto vláknem je jednovidové vlákno s průměrem jádra 9 μm a průměrem pláště 125 μm, což odpovídá vláknu G.652 dle ITU-T. Toto vlákno je vyrobeno z křemičitého skla [1].

5.2 Laserové diody

Vyžadované parametry pro navrhovanou metodu detekce a lokalizace mechanického chvění:

Jelikož Brillouinův rozptyl má úzkou frekvenční šířku, budeme potřebovat laserovou diodu, která vyzařuje šířku spektra >0,1nm. Pokud by byla šířka vyšší, překrylo by vyzařování laseru tento jev a námi požadované měření by nebylo možné uskutečnit. Dalším požadavkem je co nejvyšší výkon. Běžnou laserovou diodou pro vlnovou délku 1550nm jsou, diody o výkonu 300mW. [27]

5.3 Modulátory

Optický modulátor je zařízení, které se používá k modulování světelného paprsku. Paprsek může být nesen volným prostorem nebo optickým vlnovodem. Nejjednodušší cesta jak modulovat intenzitu světelného paprsku, je modulovat řídící proud světelného zdroje, kterým je například laserová dioda. Tento druh modulace se nazývá přímá modulace, která se na rozdíl od externí modulace provádí pomocí modulace světla. To je důvodem použití světelné modulace v optických vláknech a ty se nazývají externí světelné modulace. V laserových diodách, kde je vyžadována úzká šířka pásma, je přímá modulace vyloučena, protože „přeblikávání“ mezi aplikováním a vypnutím proudu do laseru, způsobuje vysokou šířku pásma [28].

Modulátory jsou rozděleny do dvou kategorií podle vlastností materiálu použitého k modulaci světelného paprsku. Těmi jsou absorpční modulátory, kde se mění absorpční koeficient materiálu a refrakční modulátory, kde se mění refrakční index materiálu [28].

5.4 Optické zesilovače

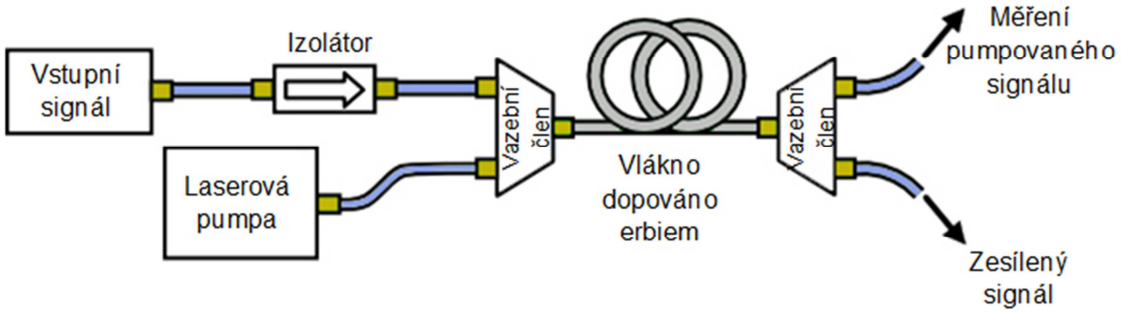
Optický zesilovač je zařízení, které přímo zesiluje optický signál bez potřeby předem převádět tento signál na elektrický signál. Tyto zesilovače se dělí podle principu. Prvním jsou zesilovače, které uvnitř zesilovače používají optické vlákno, takzvané typy xDFA (Doped Fiber Amplifier) a dále Ramanovské zesilovače, které používají k zesílení vlastní přenosovou trasu optického vlákna. Mezi nejznámější zesilovače patří typ EDFA, který je dopován erbiem, anebo erbiem s yterbiem pro zesilování v pásmu C a L. Dalšími variantami jsou vlákna dopována praseodymem (PDFA), který zesiluje v pásmu O (1280-1320 nm) a vlákna dopována thuliem (TDFA), kde je však vlákno speciální, fluoridové a zesiluje v pásmu S (1460-1490 nm) [14].

5.4.1 EDFA zesilovače

Jelikož naše zapojení bude pracovat na vlnové délce 1550 nm, jako nejpoužitelnější se zdá zesilovač EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers). Tento zesilovač se skládá z optického vlákna, ve kterém jsou desítky metrů optického vlákna, které je dopováno zeminou s erbiem (Er^{+3}). Tento způsob zesilování začal být použitelný v době, kdy

klesly finanční náklady na laserový přenos v optických vláknech. Díky tomuto zesilovači se téměř kompletně změnil typ optických systémů a to i díky schopnosti tohoto zesilovače zesilovat optický signál na různých vlnových délkách. Díky tomuto systému se začalo předpokládat zvýšení kapacity přenosu po optickém vlákně a to díky zvýšení počtu vlnových délek, které se budou přenášet po jednovidovém optickém vlákně. Díky EDFA zesilovačům se pomocí jednoho vlákna dosahuje rychlostí v terabitech za sekundu [14].

S příchodem zesilovačů EDFA se začala více projevovat chromatická disperze (kapitola Disperze u optických vláken). Tento nepříznivý jev se dá kompenzovat určitými technikami. Jednou z nich je použití externích modulátorů s EDFA zesilovači, kde se využívá přenosu v oblasti 1550 nm. To umožnilo dosáhnout na jednovidovém vlákně mezi zesilovači přenosové rychlosti 2,5 Gb/s na 600 km. Sice to nebyla tak vysoká hodnota terabitů za sekundu, ale s rozvojem dalších technik se rychlost zvyšuje.



Obr. 5.1: Blokové schéma principu EDFA zesilovače

Na obrázku výše je zobrazen princip EDFA zesilovače s optickým izolátorem, který slouží k zabránění zpětných odrazů již zesíleného signálu. Hlavní částí zesilovače je dopované optické vlákno ionty erbia (desítky metrů vlákna) Er^{+3}. Vlivem absorpce fotonů z laserové pumpy do dopovaného optického vlákna dochází k excitaci atomů dopovaného prvku do vyšší energetické hladiny. U 980 nm přechází foton velmi rychle do metastabilního stavu h2, stejně jako při čerpání na 1480 nm. V této hladině foton setrvá přibližně 10 ms a dočasně se v něm uloží získaná energie ze záření laserové pumpy. Při přítomnosti přenášeného signálu způsobí jeho energie stimulovanou emisi záření o stejné vlnové délce a fázi jako má přenášený signál a dochází tak k uvolnění získané energie ze záření laserové pumpy. Při převaze stimulované emise nad absorpcí

fotonů dochází ke koherentnímu zesílení fotonu optického signálu.[14]

Vyššího zesílení se dosahuje při použití laserové pumpy o vlnové délce 1480 nm, avšak za přítomnosti vyššího šumu. Proto se může využít dvoustupňového EDFA zesilovače, kde v prvním stupni je použito pumpy o vlnové délce 980 nm, kde se zajistí přijatelné zesílení s nízkým šumem. Ve druhém stupni zesilovače se využije pumpy o vlnové délce 1480 nm. Touto kombinací je zajištěn nízký šum a vysoký výstupní výkon tohoto zesilovače. Výhodou dvoustupňového zesilovače je také „záloha zesílení“, v případě dočasné nefunkčnosti jedné z pump zajistí ta druhá alespoň základní „životní funkce“ celého systémů. Mezi obě vlákna je doporučeno vložit ztrátový prvek (ASE filtr, disperzní filtr) pro vylepšení vlastností zesilovače [14].

Pro námi vyžadovanou vlnovou délku 1550 nm jsou vhodnější zesilovače, kde místo křemíkového vlákna je použito vlákno fluoridové. Ty se pak nazývají EDFFA (Erbium Doped Fluoride Fiber Amplifiers). Tyto zesilovače pak dosahují daleko vyrovnanější křivky zesílení v oblasti okolo 1550 nm. Tohle zapojení má několik nevýhod. Z důvodu použití fluoridového vlákna může být tento zesilovač vybaven pouze pumpami o vlnové délce 1480 nm, není jednoduché propojit tento systém s křemíkovými vlákny, a jelikož jsou fluoridová vlákna křehká, není snadné s nimi manipulovat. Kromě použití zapojení s fluoridovým vláknem je možné použít uvnitř EDFA zesilovače filtry, ty omezí špičku zesílení okolo vlnové délky 1532 nm [14].

Zesilovače zvyšují úroveň signálu až od 50 dB v pásmu C. Výhodou je, že nejsou závislé na polarizaci signálu, mají nízké šumové číslo a nejsou náchylné na přeslechy mezi jednotlivými kanály. Nevýhodou však je komplikovaná miniaturizace a použitelnost pouze v pásmech C a L. Pro další pásma je nutné využití EDFFA nebo ramanovského zesilovače [14].

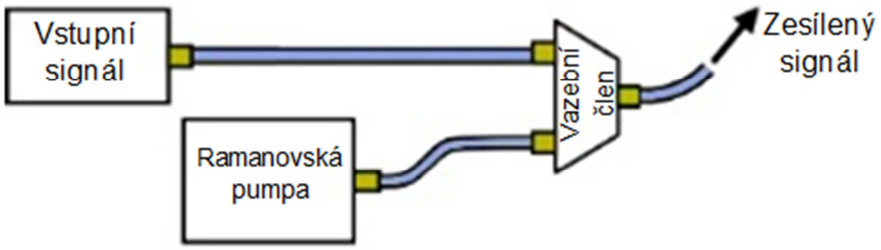
5.4.2 PDFA a TDFA zesilovače

TDFA (Thulium Doped Fiber Amplifiers) zesilovač pracuje v pásmu S (1460-1490 nm), fluoridové vlákno je dopováno thuliem Tm^{+3}. PDFA (Praseodymum Doped Fiber Amplifiers) zesilovač pracuje v pásmu O (1280-1320 nm), v porovnání s EDFA zesilovačem neumožňuje tak velké zesílení malých signálů a pomocí experimentálního měření byla zjištěna velká závislost PDFA zesílení na vlnové délce výstupního signálu.

Jinak jsou tyto zesilovače analogické k EDFA zesilovačům kromě použitého druhu zeminy pro dopování vlákna. U PDFA nejvyššímu zesílení dochází v okolí vlnové délky 1300 nm a od vlnové délky 1320 nm už zesílení značně klesá. Tato zařízení nejsou použitelná při vlnové délce 1550 nm, avšak kombinací těchto zesilovačů je možné dosáhnout kvalitního zesílení optického širokospektrálního signálu v pásmu 1280-1610 nm [29].

5.4.3 Ramanovské optické zesilovače

Tyto zesilovače používají k zesílení optického signálu Ramanův rozptyl. Tento typ zesilovače je dnes používán na nových dálkových trasách. Jde o laserový zdroj záření připojený k optické trase. Aby bylo dosaženo zesílení optického signálu, je využito Ramanova rozptylu na částicích materiálu vlnovodu. To je jev, kdy se excitují vyšší vibrační módy molekul SiO_2 světelné vlny a ta se liší o energii vibračního přechodu. Tato hodnota pro křemenné sklo je 13,2 THz. U tohoto systému se zesiluje signál tak, že se přesouvá energie z nižších vlnových délek na vyšší a tak dochází k zesílení signálu přímo ve vlastním optickém vlákně a není nutné použití speciálního vlákna. Nevýhodou Ramanovských zesilovačů je, že nedosahují tak vysokých hodnot zesílení jako EDFA zesilovače (dosahují zesílení o zhruba 15-20dB). Výhodou však je to, že je tento zesilovač možné využít pro jakoukoliv vlnovou délku. Nutné však je vhodně zvolit vlnovou délku laserového zdroje (například 1450 nm vlnové délky laserového zdroje pro dosažení 1550 nm) [30].



Obr. 5.2: Blokové schéma principu Ramanovského zesilovače

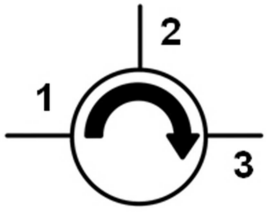
Vyžadované parametry pro navrhovanou metodu detekce a lokalizace mechanického chvění:

Po studiu optických zesilovačů je zřejmé, že v navrhovaném řešení bude potřeba EDFA zesilovače, který dosahuje nejvyrovnanější křivky ve vlnové délce 1550 nm. Dále také dosahují nejvyššího zesílení, které je až 50 dB.

5.5 Optické cirkulátory

Optický cirkulátor je speciální optoelektronická součástka, která slouží k oddělení optických signálů přenášených v opačném směru v optickém vlákně. Optický cirkulátor je minimálně 3 portové zařízení navrženo tak, že světlo vstupující na jakýkoliv port vystupuje z následujícího. To znamená, že pokud světlo prochází portem 1, je propuštěno do portu 2, ale pokud se nějaké světlo odrazí zpět do cirkulátoru, port 1 jej zpět již nepropustí a místo toho projde portem 3. Cirkulátor může být použit k dosažení obousměrného přenosu pomocí jednovidového optického vlákna. Vzhledem k vysoké izolaci vstupu, odražených optických energií a nízkého vloženého útlumu jsou optické cirkulátory široce rozšířeny v moderních komunikačních systémech a senzorově-optických aplikacích [11].

Optické cirkulátory nejsou opticky reciproční, což znamená, že změny ve vlastnostech světla procházejícího zařízením nejsou vráceny, když je světlo procházející v opačném směru. To se může stát jedině, pokud je narušena vyváženost systému, například externím magnetickým polem [11].



Obr. 5.3: Schématická značka cirkulátoru

Vyžadované parametry pro navrhovanou metodu detekce a lokalizace mechanického chvění:

Nejdůležitějším parametrem je pro nás hodnota isolačního útlumu mezi porty, kam

nechceme, aby byl signál propuštěn. Hodnota u běžně dostupných cirkulátorů je 40 až ≥ 50 dB. Čím větší útlum, tím lépe pro naše zapojení. Dalšími parametry, které potřebujeme, aby cirkulátor zvládl, je co nevětší výkon, běžně jsou to cirkulátory s 300-500 mW, ale dostupné jsou i pro více jak 1000 mW [13]. Opět platí, že čím vyšší hodnota, tím lépe, protože tak budeme moci posílat signál do větší vzdálenosti, avšak vyšší hodnota jak 1000 mW, už nemá smysl, protože by samotné vlákno vyšší výkon nezvládlo. V neposlední řadě potřebujeme, aby náš cirkulátor zvládal vlnovou délku 1550 nm.

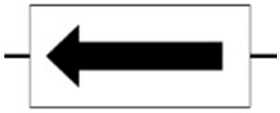
5.6 Optické izolátory

Optický izolátor je prvek, který povoluje průchod světla pouze v jednom směru, proto se mu říká také optická dioda. Využívá se, aby se předešlo vrácení signálu do optického oscilátoru nebo laserového systému a tak celkové stabilizaci systému. Funkčnost izolátoru je závislá na Faradayově efektu, což je jev, ke kterému dochází v době, kdy prochází polarizované světlo zmagnetizovaným plazmatem. Tento jev je použit v nejdůležitější součástce optického izolátoru, kterou je Faradayův rotátor [24].

Optické izolátory se dělí na dvě skupiny, první je polarizačně závislý izolátor a druhým je polarizačně nezávislý izolátor. Polarizační izolátor se skládá ze tří částí, čímž jsou vstupní polarizátor (vertikálně polarizovaný), Faradayův rotátor a výstupní polarizátor, kterému se říká analyzátor (polarizován na 45°). Prakticky fungují tak, že světelný signál, který přichází na vstupní polarizátor je vertikálně polarizováno, poté jej Faradayův polarizátor otočí o 45° a analyzátor tak světlo propustí ven. Pokud světelný signál vchází ze strany analyzátoru je polarizováno 45° a Faradayův rotátor jej polarizuje znovu o 45°, což ve výsledku znamená horizontální polarizaci a světlo procházející na vstupní, vertikálně polarizovaný polarizátor tak není propuštěno [24].

Polarizačně nezávislý izolátor se skládá ze tří částí, těmi jsou vstupní dvojlomný klín (s běžnou **vertikální** polarizací a výjimečnou **horizontální** polarizací), Faradayův rotátor a výstupní dvojlomný klín (s běžnou 45° polarizací a výjimečnou -45° polarizací). Prakticky fungují tak, že přicházející světelný signál je rozdělen vstupním dvojlomným klínem na vertikální (0°) o-ray (běžná polarizace) a horizontální (90°) - e-ray (výjimečná polarizace) signály. Faradayův rotátor otočí oba tyto signály o 45°, takže

o-ray je polarizován na 45° a e-ray na -45°. Výstupní dvojlomný klín potom přeskupí tyto dva signály. Světelný signál, který vchází ze strany výstupního dvojlomného klínu, je rozdělen tímto prvkem na o-ray s hodnotou 45° a e-ray s -45°. Faradayův rotátor pak oba signály znovu otočí o 45° a o-ray dostane polarizaci 90°a e-ray polarizaci 0°. Světelný signál pak tedy není propuštěn [24].



Obr. 5.4: Schématická značka optického izolátoru

Vyžadované parametry pro navrhovanou metodu detekce a lokalizace mechanického chvění:

Požadavky na optický izolátor jsou prakticky stejné, jako jsou kladeny na optický cirkulátor. Pravidlem je, že u polarizačně závislých izolátorů se s velikostí izolace zmenšuje výkon vysílaného signálu. Například pro izolaci 36 – 40 dB je propustnost 95%, u izolace 60 dB pak 85%, proto je nutné vybrat kompromis [25]. Hodnoty u polarizačně závislých izolátorů dosahují pro izolaci [26].

5.7 Interferometry

Pokud je vyžadováno velmi přesné měření, umožní nám jej právě interferometr, který je založen na interferenci světla. Pokud se interferometrem určují spektrální čáry, jsou nazývány interferenční spektroskopy, pokud pak určujeme index lomů kapalin nebo plynů, jsou to interferenční komparátory [31].

Fabry-Perotův interferometr

Tento interferometr patří do třídy interferenčních spektroskopů. Tvoří jej dvě skleněné desky s mírně klínovitým profilem a tenkou vzduchovou mezerou mezi nimi. Pokud těmito deskami prochází monochromatické světlo, vytváří se interferenční kroužky. Na těchto kroužcích je velmi dobře viditelné jemné dělení [31].

Michelsonův interferometr

Také tento interferometr patří do třídy interferenčních spektroskopů a tvoří jej stupňová mřížka o asi 40 k sobě rovnoběžných destičkách. Tyto destičky jsou průhledné

a o naprosto stejné tloušťce, avšak mají rozdílné délky. Ty pak spojením vytváří malé schody, které slouží k rozptýlení rovnoběžných paprsků procházejícího monochromatického světla. Tyto paprsky pak spolu interferují a díky nim vznikají interferenční obrazce na stínítku [31].

Mach-Zenderův interferometr

Na dvou k sobě rovnoběžných deskách je odrážen a lámán svazek rovnoběžných paprsků. Tvoří jej dvě trubice, jedna s plynem, u které se zjišťuje index lomu a druhá trubice, ve které je vakuum a index lomu roven 1. Paprsky procházející trubicemi potom při měření porovnáváme [31].

5.8 Optické filtry

Optické filtry pro optická vlákna slouží pro výběr určitých vlnových délek. Je možné nechat projít pouze vlnovou délku, která bude využita a ostatní nenechat projít. Nejvíce se filtry používají v DWDM systémech, oddělení signálů u DWDM, sledování optického výkonu, filtrování šumu u laditelného optického pole, potlačení šumu u optických zesilovačů. Principem filtru je změna spektrálního rozložení energie světla procházejícího určitým prostředím anebo záměrné zeslabení určité šířky spektra. Tak jak jsou filtry známy z elektrotechniky, existují i v optice filtry typu dolní a horní propust, pásmová zádrž a propust [1].

Princip založen na interferenčním filtru

Tyto filtry jsou vhodné pro odstranění opravdu úzké části spektra. Filtrace je založena na interferenci, kdy dochází mezi polopropustnými vrstvami k vícenásobným odrazům. Tloušťkou mezivrstvy, která je umístěna mezi dvě na skleněnou desku nanesené polopropustné vrstvy, je určena vlnová délka, kde k maximální propustnosti dochází, pokud je rovina kolmá k rovině dopadu. Jiné hodnoty odrazivosti a propustnosti však dostaneme, pokud záření dopadá jiným než kolmým úhlem. Pokud je možné volit šířku vrstev, dostaneme se na další možné kombinace filtrů. Dalšími důležitými parametry pro vlastnosti flitru, které pak ovlivňují index lomu, jsou materiál, šířka a počet jednotlivých vrstev. Dále také, čím je větší počet vrstev, tím více narůstá

odrazivost a strmost charakteristik až ke 100% [1] při základní vlnové délce a v blízkém okolí této vlnové délky. Ke každému filtru bývají graficky uvedeny charakteristiky a také je možné si nechat vyrobit filtr přímo na zakázku dle našich požadavků. Dělí se podle použití, základního materiálu, šířky pásma a podle rozměrů a daných parametrů. Filtry mají standardní rozměry, kterými jsou průměr 12, 15, 25 a 50 nm, s tloušťkou 3 – 9 nm [1].

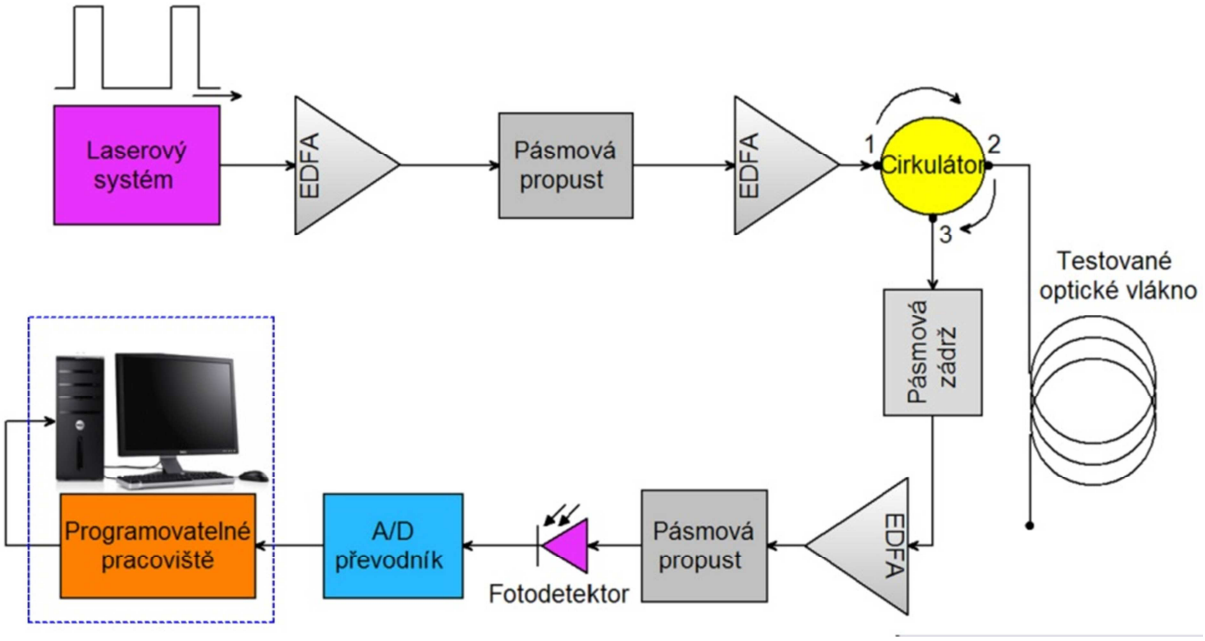
Vyžadované parametry pro navrhovanou metodu detekce a lokalizace mechanického chvění:

Požadavky pro tuto práci jsou, aby vždy filtr propustil jen požadovanou šířku spektra. Největší problémy nastávají právě u laserových diod, u kterých mohou přebývat postranní složky, kromě koherentního paprsku, který vyžadujeme a dále pak u zesilovačů, které si často se zesíleným signálem nesou šum.

6 NAVRHOVANÉ ŘEŠENÍ

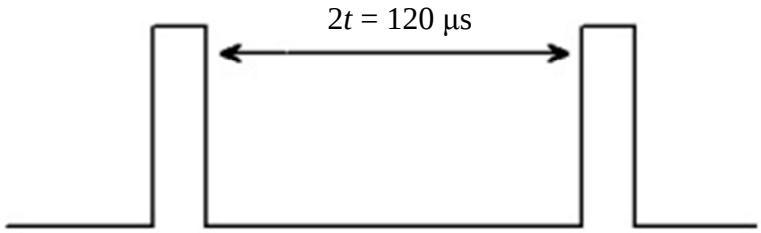
Navrhované řešení je založeno na Brillouinově zpětném rozptylu a to z důvodu, že ze všech prozkoumaných řešení a v zadání stanovených požadavků splňoval pouze tento možnost detekce signálu na délku až desítky kilometrů. Možnost, aby se signál ve vlákně zkoumal napřímo, kdy by se v jednom kabelu vyhradila dvě vlákna, byla vyloučena, protože by signál na stejném kabelu byl ovlivňován vždy dvakrát a to by tedy zhoršovalo možnost detekce vibrací. Z důvodu efektivity řešení bylo také zavrženo detekování na druhém konci optického vlákna, protože pokud by se měla budovat například ochrana hraničního přechodu do vzdáleného místa, musela by se vybudovat další stanice, kde by docházelo k detekování a to by také nebylo ekonomicky nejvýhodnější. Proto toto navrhované řešení se zdá nejzajímavější a prakticky nejvyužitelnější a nejuniverzálnější.

V předchozí kapitole byly popsány jednotlivé prvky zapojení a námi požadované parametry pro navrhované zapojení. Proto již bude popsáno pouze samotné zapojení s požadovanými parametry a stavy, ke kterým v zapojení dochází. Na obrázku obr. 6.1 níže je navržené blokové schéma

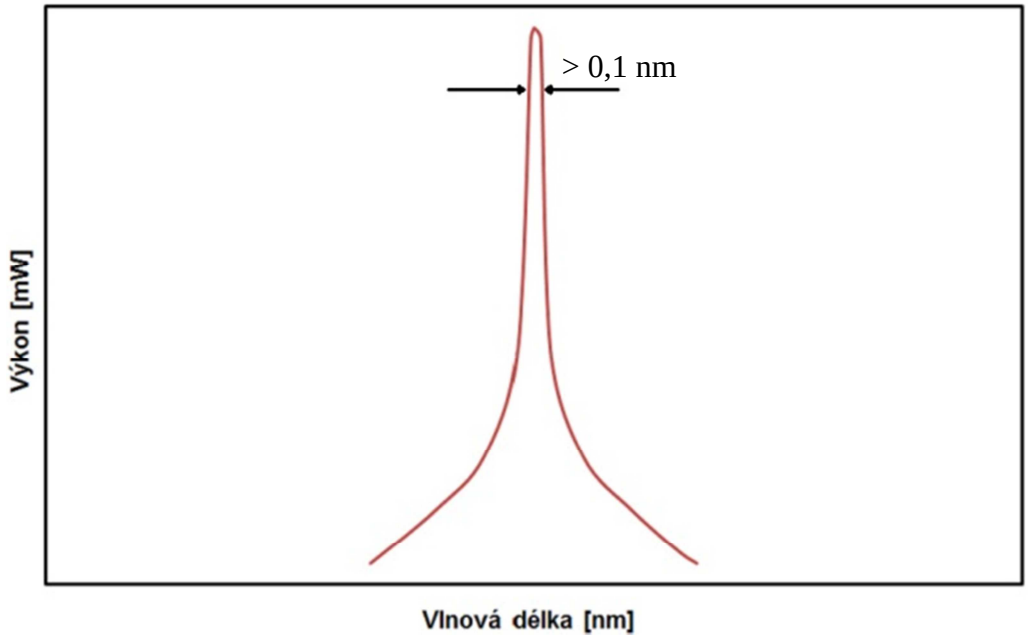


Obr. 6.1: Blokové schéma navrženého řešení

Laserovým systémem jsou vpouštěny každých 120 µs impulzy o vlnové délce 1550 nm a šířce spektra > 0,1 nm. Důvod této šířky spektra je uveden v kapitole výše.



Obr. 6.2: Čas mezi jednotlivými impulzy



Obr. 6.3: Požadovaná číška spektra laserové diody

Čas mezi jednotlivými vpuštěnými impulzy je volen z důvodu délky optického vlákna. Vše vychází z rovnice:

$$t = \frac{v}{l}, \tag{6.1}$$

pokud počítáme rychlost světla ve vlákně 200 000 km/s a délku optického vlákna 10 km, vychází čas 50 µs, to je nutné násobit 2 z důvodu zpětného rozptylu signálu. Dalších 20 µs je přidáno z důvodu rezervy, aby nedocházelo k překrytí signálů.

Jelikož většinou laserové diody nedosahují takového výkonu, aby bylo možné

naplno vytížit optické vlákno, je do schématu zařazen EDFA zesilovač, který zesílí signál na maximum optického vlákna (až 1 W). Následuje pásmová propust, která odstraní případné postranní složky laseru, abychom dostali čisté koherentní spektrum laserové diody. Signál před samotným vpuštěním do cirkulátoru ještě zesílíme, aby bylo vlákno vytíženo opravdu na maximum. Pro 10 km optického vlákna je potřeba vlákno vytěžovat na maximum, vše je navrženo z důvodu univerzálnosti pro delší vlákna. Z cirkulátoru prochází optické záření do jednovidového optického vlákna. Použito je tedy vlákno obyčejně používané v telekomunikacích opět proto, aby byla možnost využití prakticky kdekoliv.

Z cirkulátoru se pak na pásmovou zádrž dostává odražený signál optického vlákna, díky které je možné odstranit Rayleighův zpětný odraz a zůstanou nám tak jen nelineární složky, které potřebujeme ke zkoumání a možné lokalizaci chvění. Jelikož je signál již velmi slabý, je nutné jej opět zesílit na co největší hodnotu, aby bylo možné odečítat změny v signálu. Pásmovou propustí si vyfiltrujeme pouze Brillouinovo spektrum a vše se dále pošle na fotodetektor, kterým by měla být lavinová fotodioda z důvodu citlivosti. Díky tomu dostaneme co nejčistší elektrický signál. A/D převodníkem už jen signál zdigitalizujeme a na PC vše analyzujeme.

Tím, že známe rychlost světla ve vlákně a čas periody, můžeme lokalizovat a detekovat místo mechanického chvění. Provede se to tak, že po sobě procházející impulzy mohou být převedeny na jednotky vzdálenosti. Jelikož detekujeme zpětně odražený signál, je nutné počítat s faktorem jedné poloviny. Světelný signál prochází délkou vlákna dvakrát – do místa kde dochází k mechanickému chvění a poté Brillouinův zpětný rozptyl zpět na detektor

$$d = \frac{v \cdot t}{2}. \qquad (6.2)$$

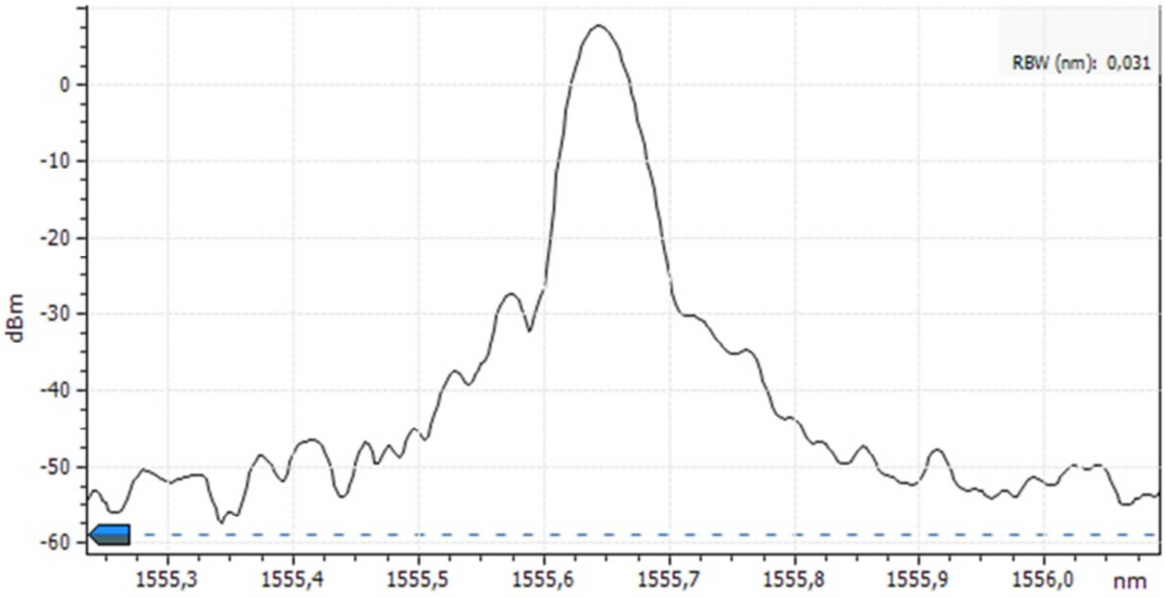
6.1 Realizovaná měření pro jednotlivé prvky zapojení

Pod vedením vedoucího mé práce doc. Ing. Víta Novotného byla na sestavených testovacích zapojeních realizována měření, která slouží pro budoucí rozšíření a lokalizace zdroje mechanického vlnění.

6.1.1 Měření šířky spektra DFB laseru

DFB (I[mA])	λ [nm]	Výkon [dBm]	OSNR [dB]	BW (-3dB) [nm]
20	1555,505	-2,36	46,43	0,029
30	1555,518	2,29	49,64	0,029
40	1555,539	4,41	51,1	0,028
50	1555,568	5,96	51,77	0,029
60	1555,604	7,01	52,72	0,029
70	**1555,604**	**7,82**	**52,19**	**0,029**
72	1555,654	7,95	52,81	0,029

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty pro DFB laser

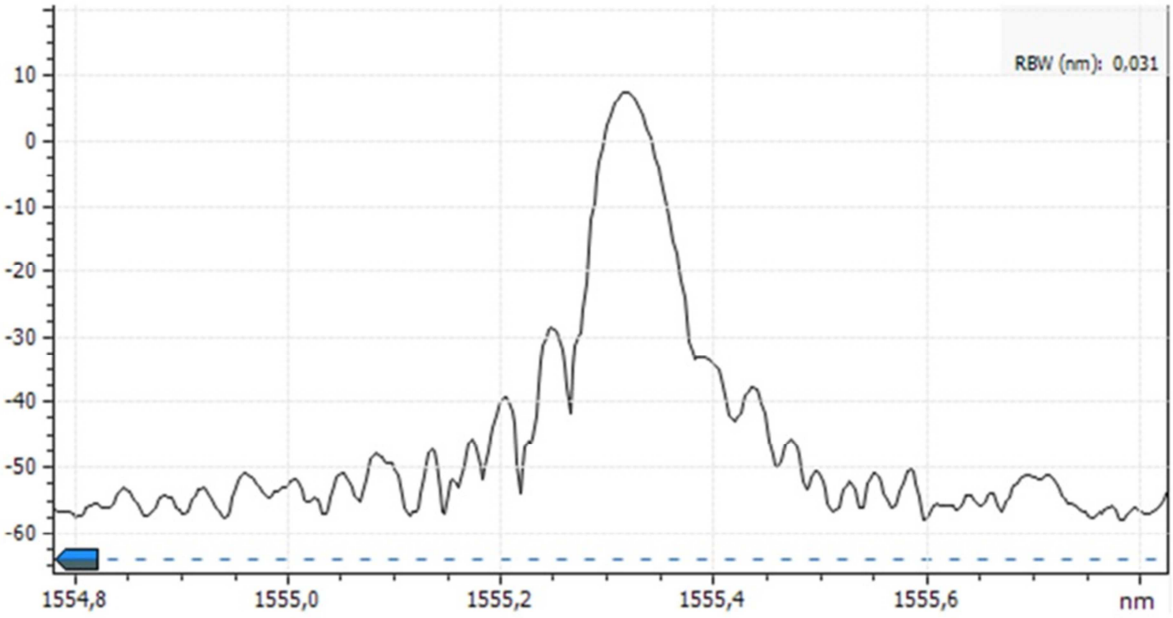


Obr. 6.4: Naměřené spektrum DFB laseru

6.1.2 Měření šířky spektra laditelného laseru – ITLA

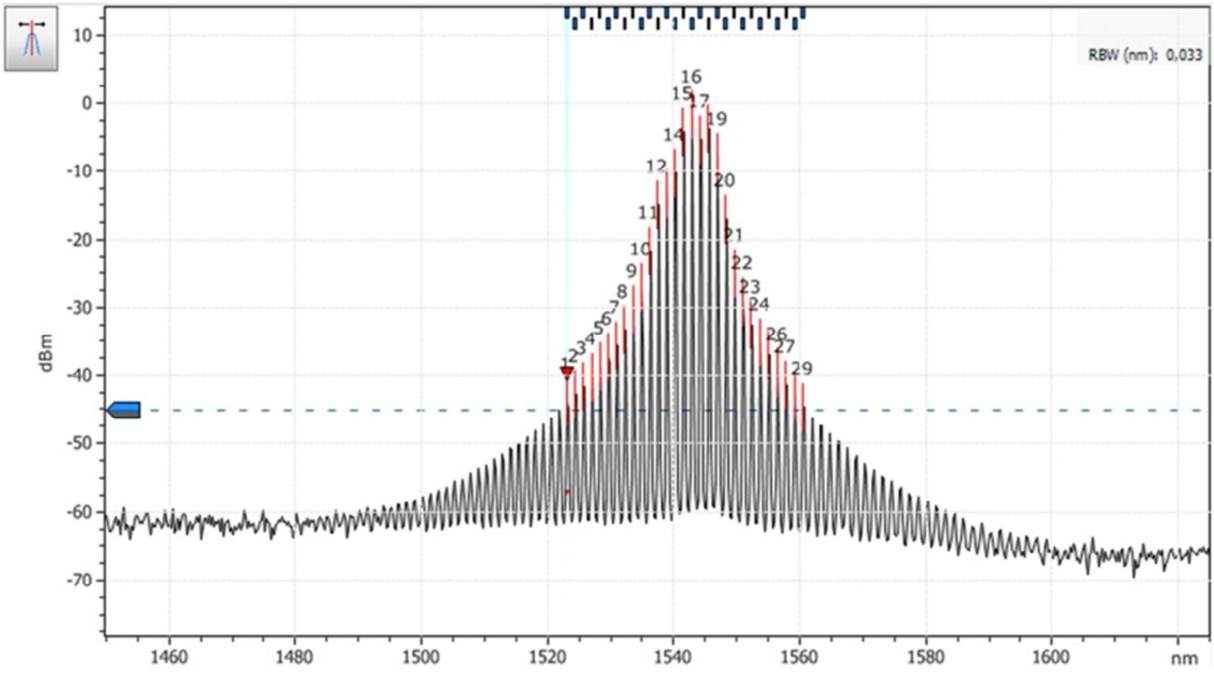
Kanál č.	λ [nm]	Výkon [dB]	Nastavený výkon [dBm]	OSNR [dB]	BW (-3 dB) [nm]
30	1555,318	7,31	13	56,67	0,028
31	1554,921	7,51	13	55,15	0,029
Δ	0,397	0,2	0	1,52	0,001

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty pro laditelný laser – ITLA

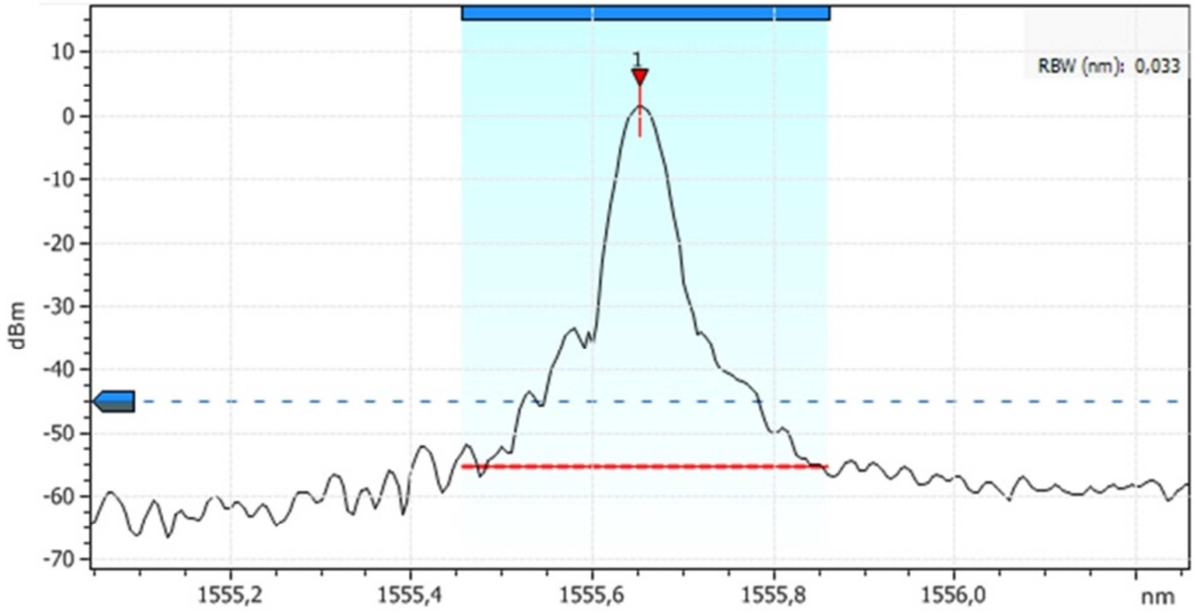


Tab. 6.3:Spektru laditelného laseru – ITLA

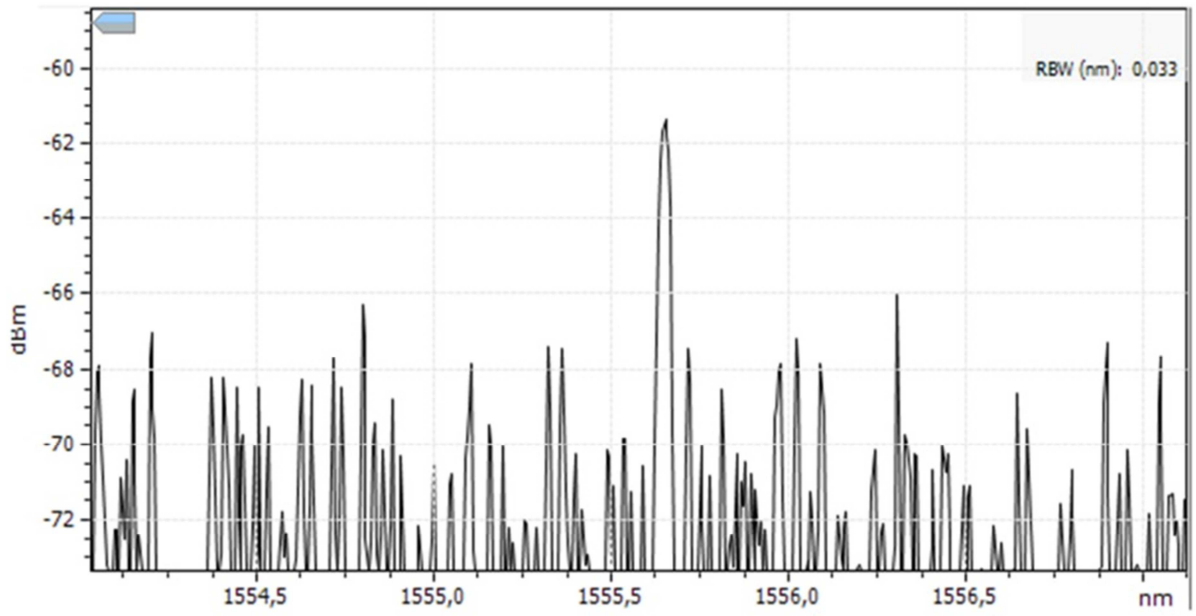
6.1.3 Měření Fabry-Parotova laseru



6.1.4 Měření velikosti útlumů v Cirkulátoru



Tab. 6.4:Spektrum optického cirkulátoru v propustném směru port 1 → 2

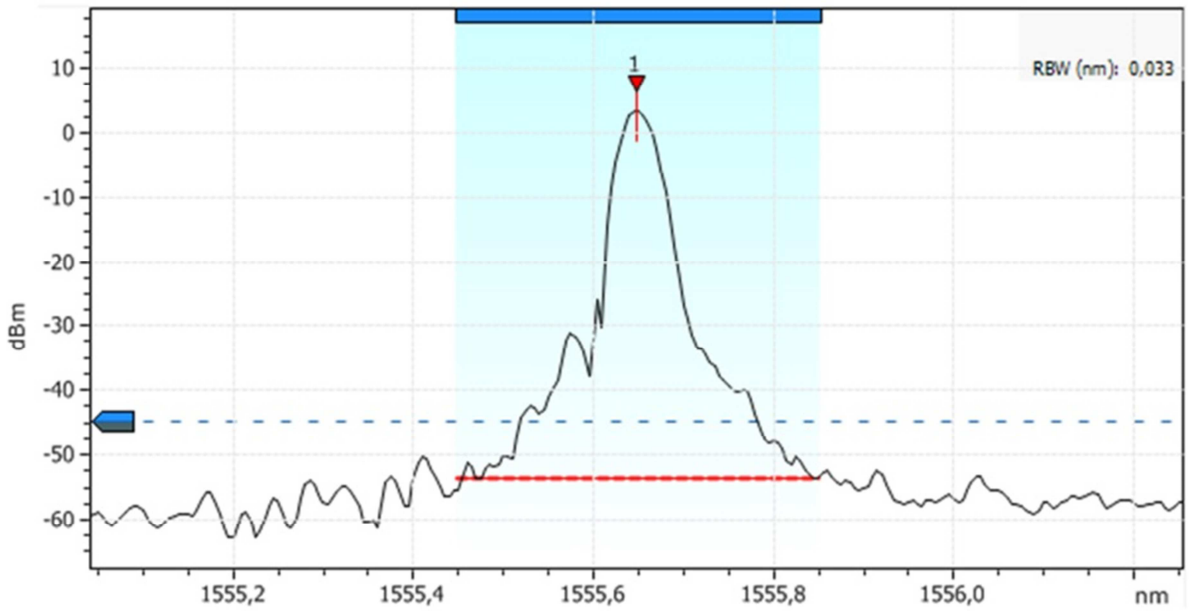


Obr. 6.5: Optický cirkulátor v závěrném směru port 2 → 1

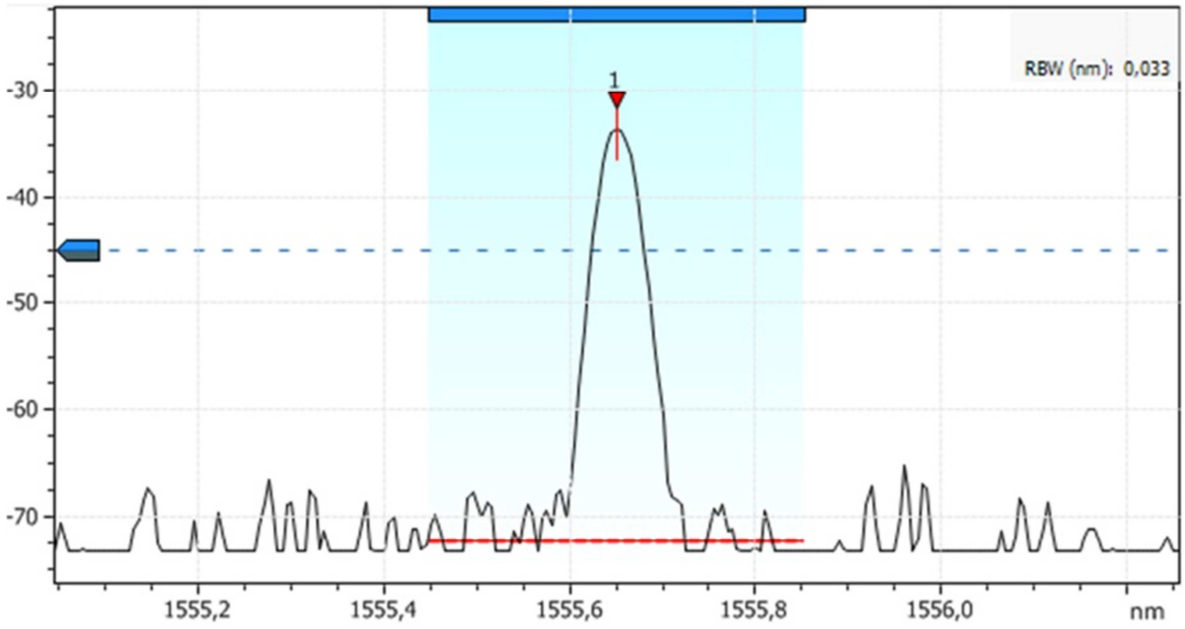
6.1.5 Měření optického izolátoru

Směr	λ [nm]	Výkon [dBm]
Propustný	1555,649	3,71
Závěrný	1555,651	-33,38

Tab. 6.5: Naměřené hodnoty pro optický izolátor

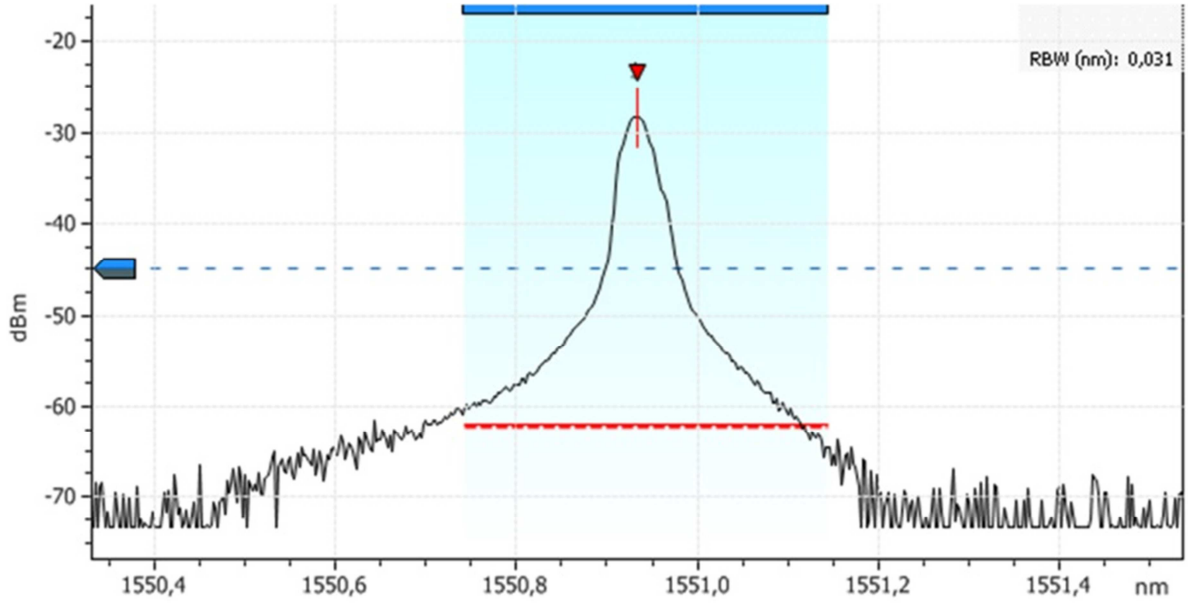


Obr. 6.6: Spektrum optického izolátoru v propustném směru



Obr. 6.7: Spektrum optického izolátoru v závěrném směru

6.1.6 Měření AWG filtru



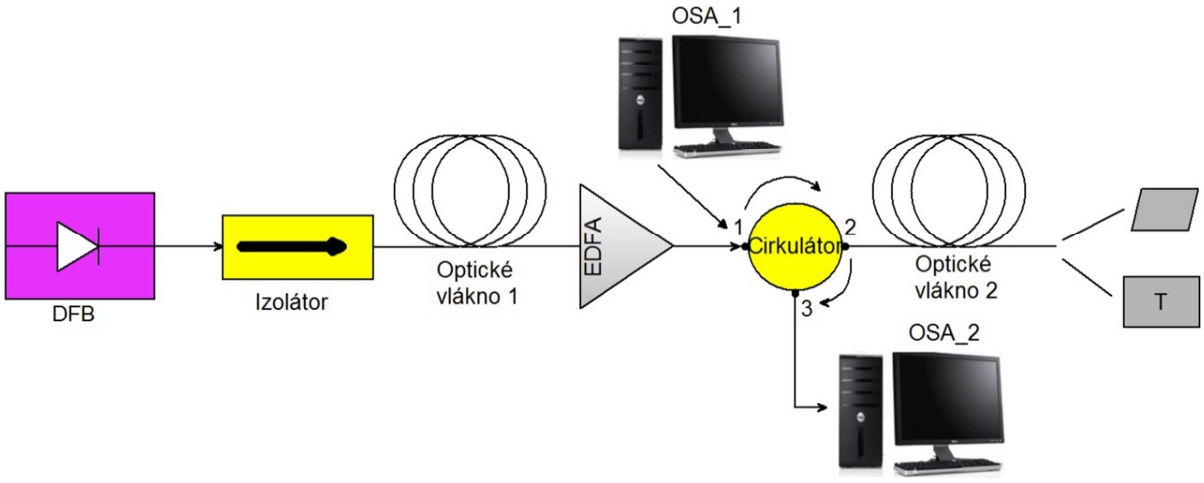
Obr. 6.8: Spektrum AWG filtru

6.1.7 Shrnutí

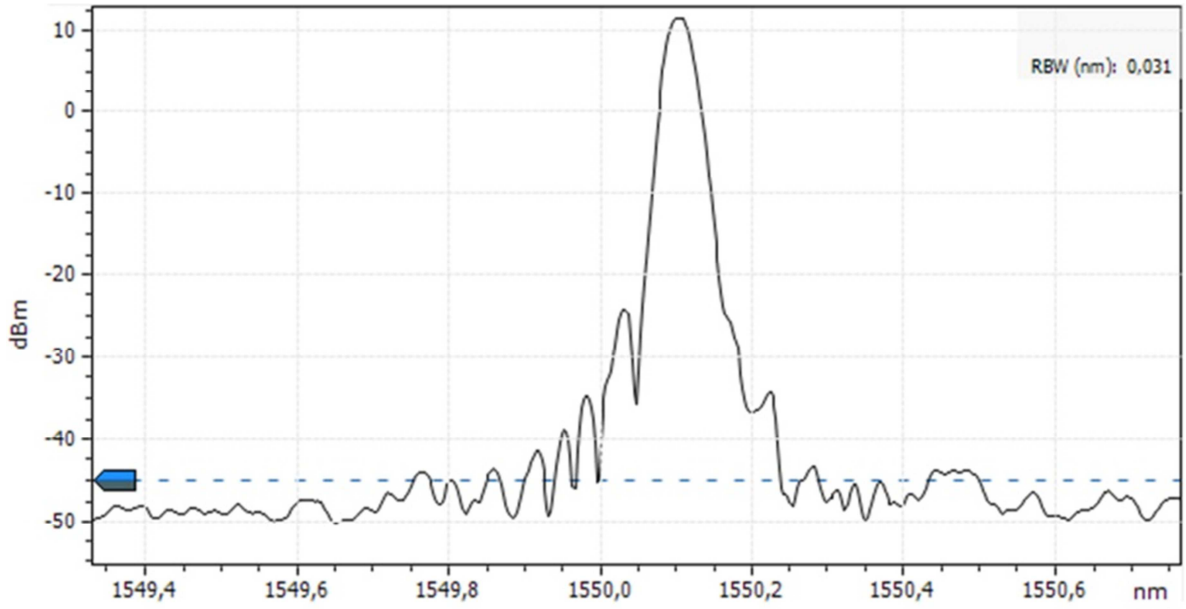
Podle vložených grafů jednotlivě měřených optických prvků, je vidět, že všechny odpovídají požadavkům stanovených v kapitole 5.

6.2 Realizovaná měření pro zkušební zapojení

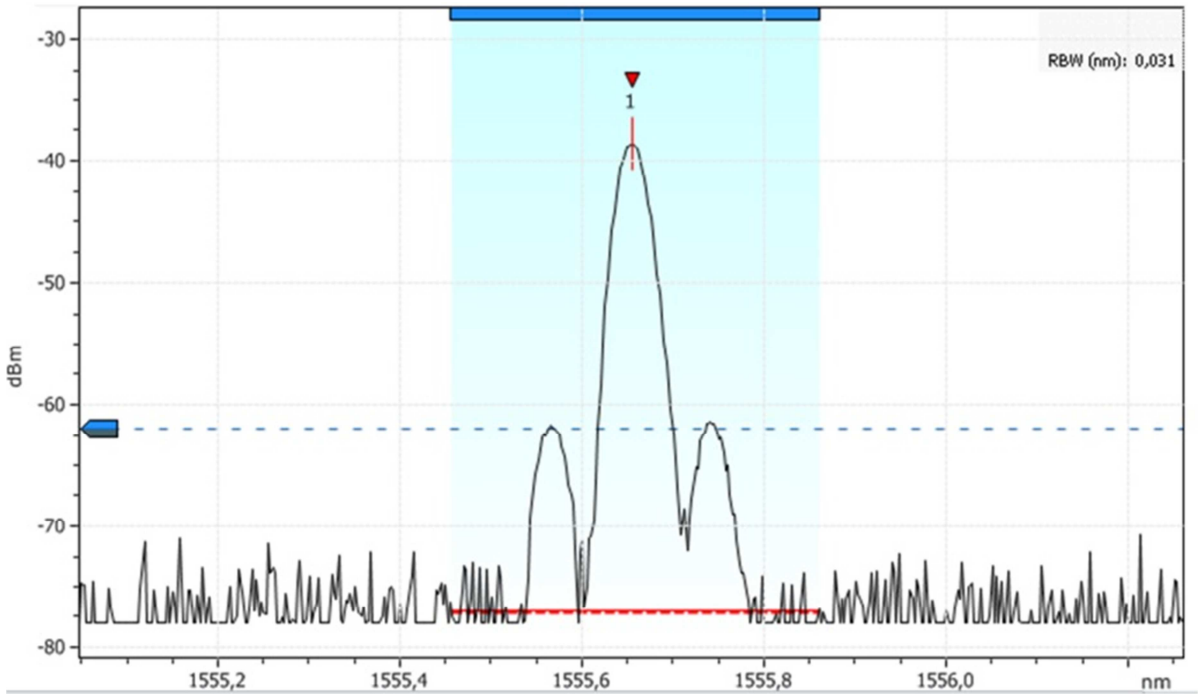
6.2.1 Měření při použití kontinuálního světla



Obr. 6.9: Blokové schéma pro měření s použitím kontinuálního světla

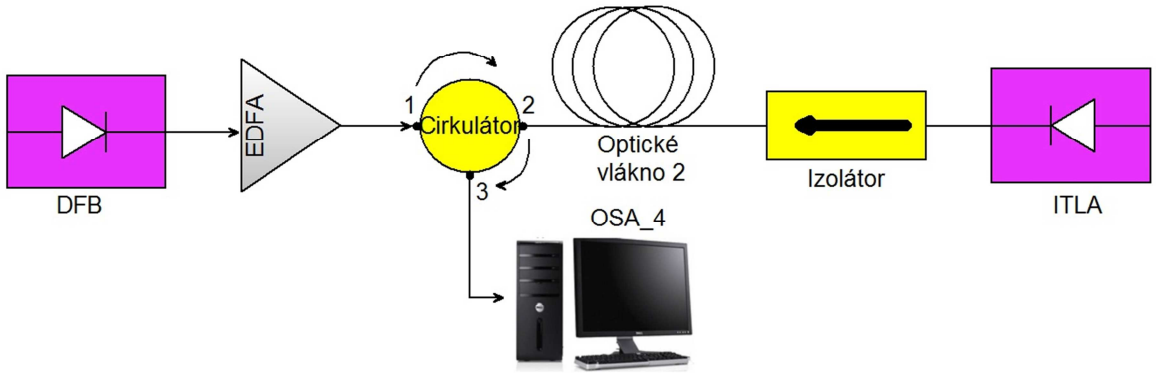


Obr. 6.10: Měření na výstupu OSA1

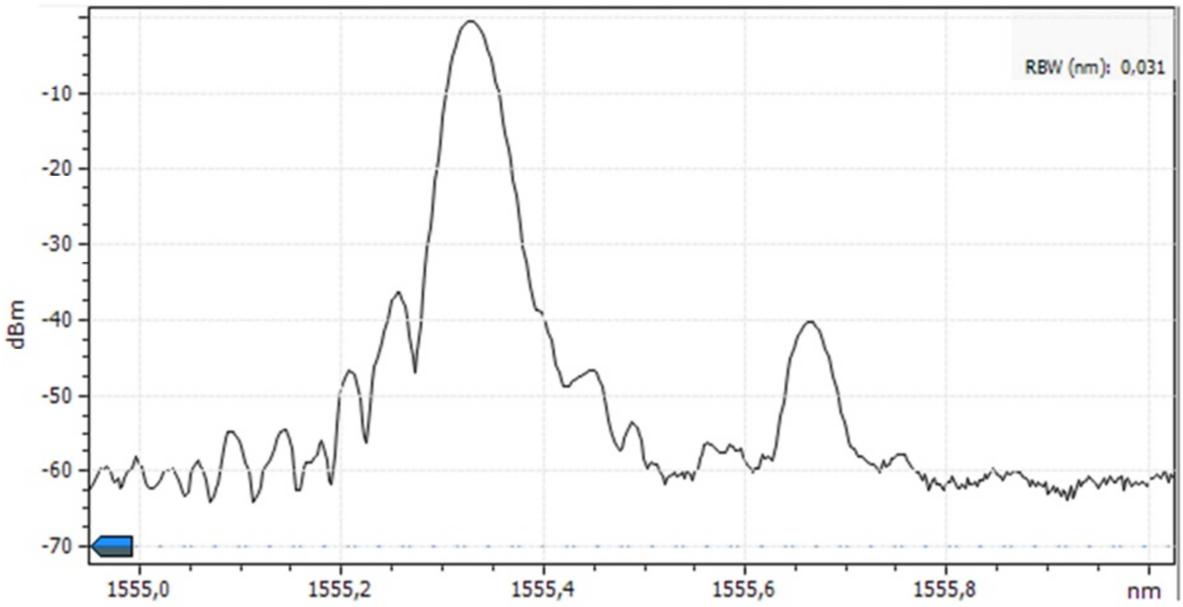


Obr. 6.11: Měření na výstupu OSA2

6.2.2 Stimulovaný Brillouinův rozptyl

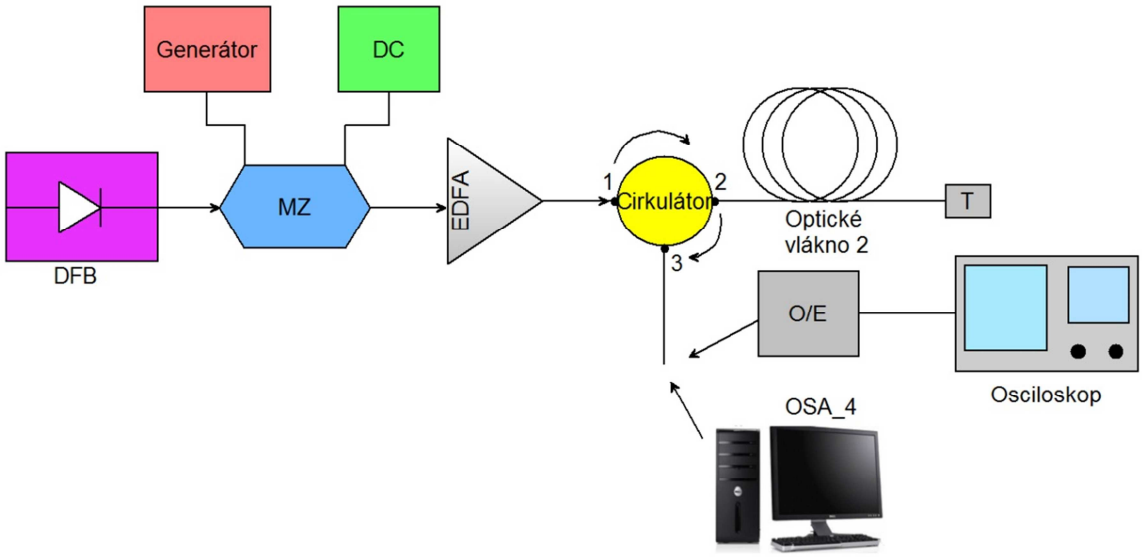


Obr. 6.12: Blokové schéma pro měření stimulovaného Brillouinova rozptylu

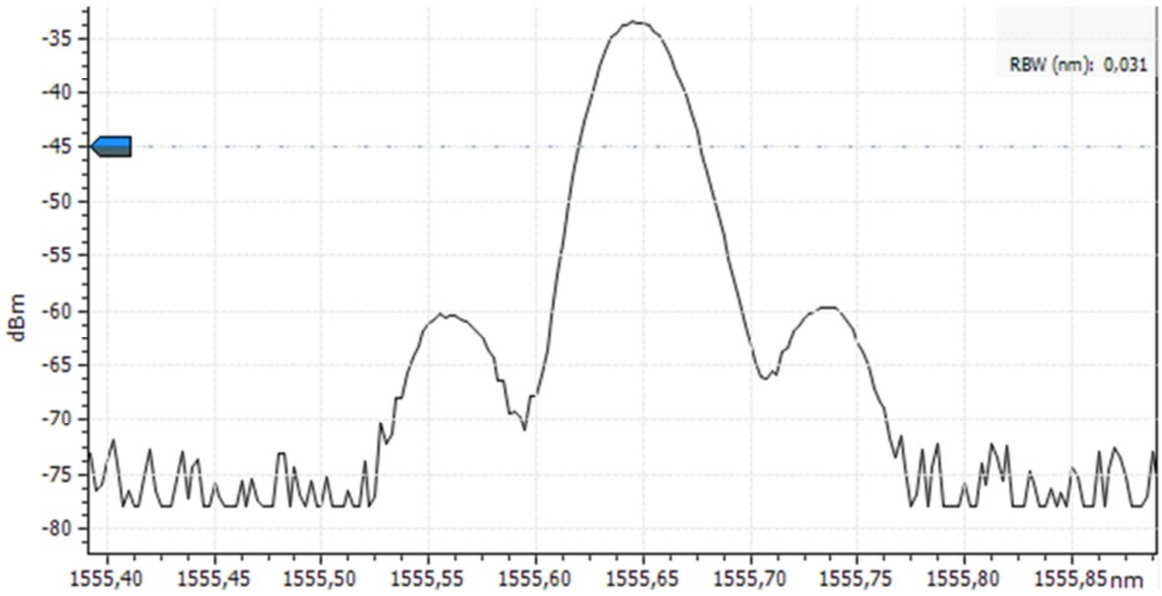


Obr. 6.13: Spektrum stimulovaného Brillouinova rozptylu s nárustem výkonu o 2 dB

6.2.3 Měření při použití modulátoru



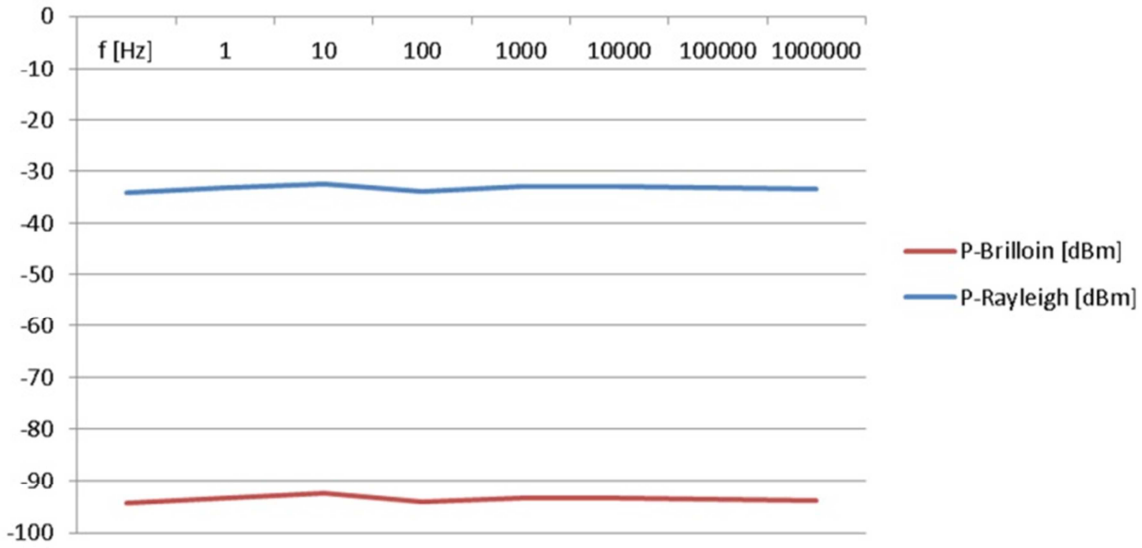
Obr. 6.14:Blokové schéma s použitým modulátorem



Obr. 6.15: Rayleighův a Brillouinův rozptyl při použití modulátoru

f [Hz]	P-Rayleigh [dBm]	P-Brillouin [dBm]
1	-34,13	-60,16
10	-33,18	-60,13
100	-32,41	-60,09
1000	-33,93	-60,16
10000	-32,99	-60,25
100000	-33,05	-60,17
1000000	-33,25	-60,21
10000000	-33,47	-60,29

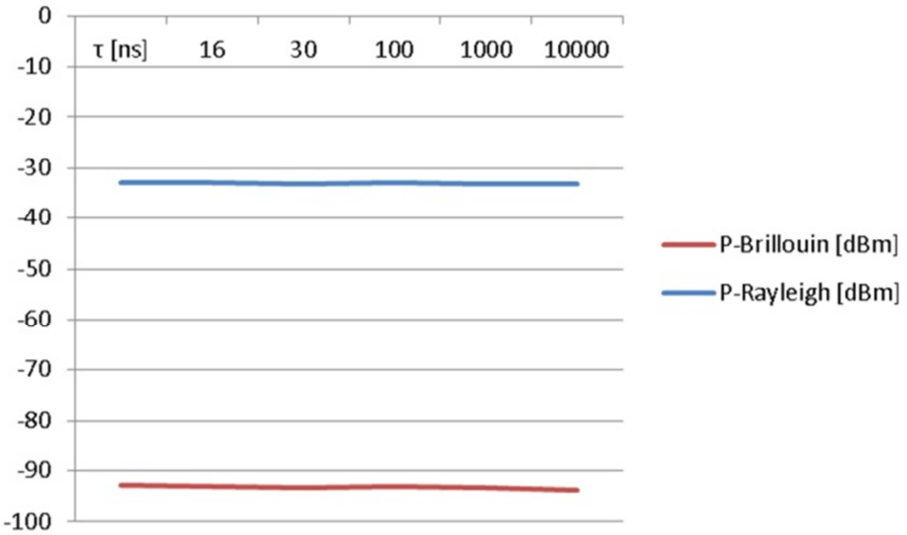
Obr. 6.16: Závislost přijatého výkonu na modulačním kmitočtu (τ = 35 ns)



Obr. 6.17: Závislost přijatého výkonu na modulačním kmitočtu (τ = 35 ns)

τ [ns]	P-Rayleigh [dBm]	P-Brillouin [dBm]
16	-32,97	-60
30	-33	-60,12
100	-33,08	-60,15
1000	-33,01	-59,97
10000	-33,12	-60,13
100000	-33,25	-60,68

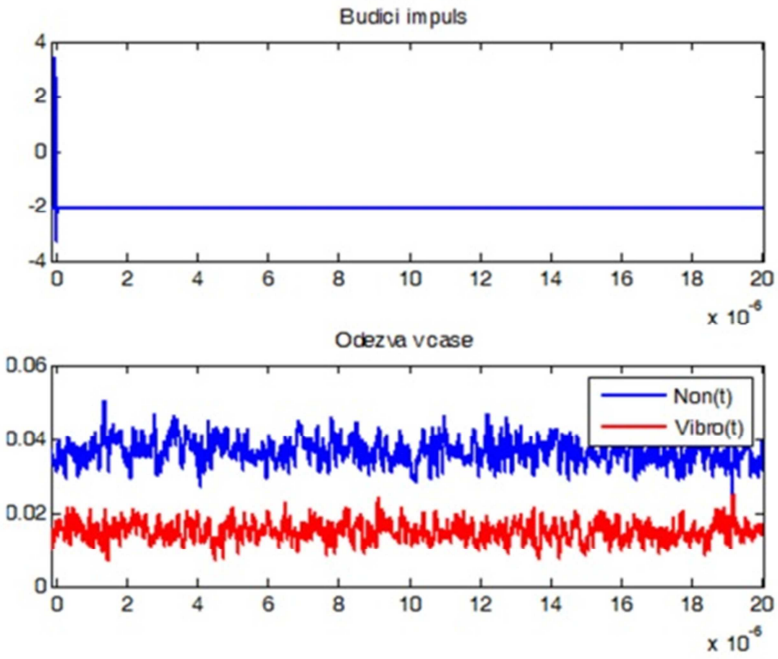
Tab. 6.6: Závislost přijatého výkonu na šířce modulačního pulzu (f = 1 kHz)



Obr. 6.18: Závislost přijatého výkonu na šířce modulačního pulzu (f = 1 kHz)

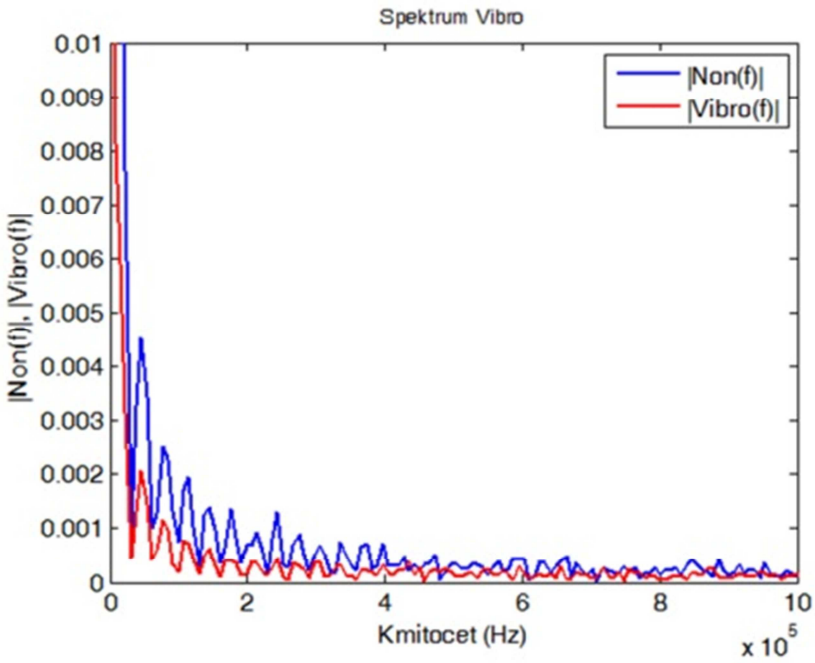
6.2.4 Měření v časové oblasti

Na prvním grafu je zobrazen časový průběh vstupního impulzu, kterým je modelován optický signál. V dalším grafu je zobrazen časový průběh odezvy vlákna, kde modrá barva zobrazuje signál bez vibrací, který byl měřen jako první. Červená barva pak zobrazuje signál se stálými vibracemi na část vlákna ve vzdálenosti, která zatím nejde určit z těchto průběhů. Proto tuto vzdálenost můžeme považovat za neznámou. V průběhu druhého měření vlákna s vibracemi došlo k poklesu výkonu laseru, a proto jsou vůči sobě posunuty průběhy v čase.

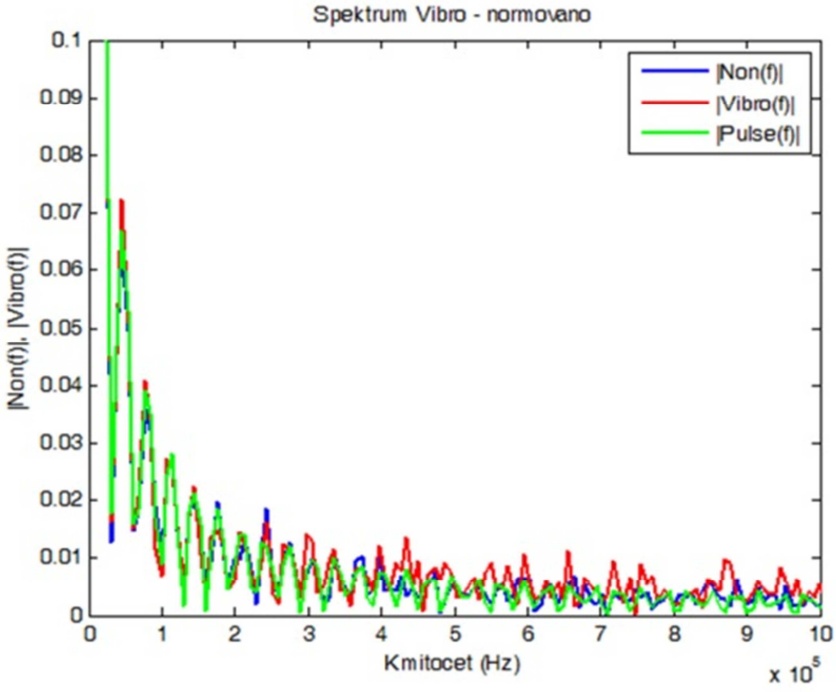


Obr. 6.19: Měření v časové oblastí

Dále byly tyto časové odezvy podrobeny Fourierově transformaci.



Obr. 6.20: Fourierova transformace časových odezev



Obr. 6.21: Fourierova transformace časových odezev, které jsou normovány¨

Díky Fourierově transformaci odezev, které jsou normovány, byl potlačen vliv poklesu výkonu EDFA zesilovače. Na obr.6.21 je zelenou barvou vyznačeno spektrum

pulzu, který vstupuje do optického vlákna, modře vyznačen je průběh , který je na výstupu tohoto vlákna. Jak je vidět, rozdíl mezi zeleným a modrým průběhem je minimální. Při vybuzení mechanického chvění na optické vlákno je možné pozorovat rozdíl až od kmitočtové oblasti přibližně od 4,5 MHz, kde je možné pozorovat několik dominantnějších spektrálních složek. V dalším měření, které už se bohužel z časových důvodů neuskutečnilo, se bude pokračovat mimo tuto práci. Pro zajištění viditelných dominantních složek ve frekvencích pod 5 MHz bude použit silnější zdroj vibrací s větší délkou vstupního impulzu. Tímto zdrojem budou reproduktory připojené na konstantní zdroj frekvence.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout pracoviště pro detekci a lokalizaci zdroje chvění podél optického vlákna a následně realizovat měření za účelem možnosti tento zdroj detekovat a lokalizovat. Tomuto návrhu předcházelo studium fyzikálních principů přenosu signálů a jevů po optických vláknech zaměřené na ovlivňování tohoto přenosu. Dále bylo nutné prostudovat metody, které umožňují detekci a lokalizaci zdroje mechanického chvění podél testovaného vlákna na řádově desítky kilometrů.

První část práce seznamuje s fyzikálními principy přenosu signálů a jevů po optických vláknech, které bylo nutné znát pro následné studium metod pro detekci a lokalizaci zdroje mechanického chvění. Tato část byla poměrně časově náročná vzhledem k množství studovaných článků, ty byly většinou jen demonstrační a teoretické bez bližších specifických údajů. Zde se využilo předem nastudovaných fyzikálních principů a jevů pro přenos optického signálu. Všechny tyto články bylo nutné analyzovat a srovnávat výhody a nevýhody daných zapojení a metod bez možného ověření, jestli jsou data v článcích pravdivá.

Po nastudování metod pro detekci a lokalizaci zdroje mechanického chvění bylo sestaveno zapojení, které tyto požadavky splňuje. U sestavování se přihlíželo na jednoduchost a efektivitu zapojení. Po pečlivé analýze, byl pro detekci a lokalizaci vybrán Brillouinův zpětný rozptyl, který zajišťuje možnost detekovat na vzdálenosti i více jak 100 km při použití běžného jednovidového optického vlákna. Následně bylo nutné vybrat součástky, které budou maximálně efektivní pro celé zapojení a předejde se tak tomu, aby jedna součástka omezovala dosah možné detekce a lokalizace.

V poslední části se přistupovalo k samotnému měření. Jako první proběhlo měření samostatných prvků, jako jsou laserové diody, u kterých bylo nutné zjistit šířku spektra. Dále měření útlumu na optickém cirkulátoru a optickém izolátoru a nakonec měření optického filtru. Poté byly sestaveny zkušební zapojení na, kterých byly měřeny spektra zpětných rozptylů. Jako nejpřesnější se jevilo spektrum na zkušebním zapojení s modulátorem, u kterého proběhlo měření v časové oblasti. Na tohle měření byla aplikována Fourierova transformace. Výsledky měření byly zpracovány za účelem detekce a lokalizace zdroje.

LITERATURA

[1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. první vydání. Brno: doc. Ing. Miloslav Filka CSc., 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] WILFERT, Otokar. VUT BRNO. *Optoelektronika I.* ČR: VUT Brno, 1993. ISBN 80-214-0551-1.

[3] BAO, Xiaoyi a Liang CHEN. Recent Progress in Brillouin Scattering Based Fiber Sensors. *Recent Progress in Brillouin Scattering Based Fiber Sensors* [PDF]. Physics Department, University of Ottawa, 2011, s. 36, 2011-03-25 [cit. 2013-05-26]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: www.mdpi.com/journal/sensors

[4] SINGH, R. . *Raman and the Discovery of the Raman Effect: Physics in Perspective*. [PDF]. 2002, s. 399-420 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1007/s000160200002.

[5] MEASURES, Raymond M. *Structural monitoring with fiber optic technology*. San Diego, Calif.: Academic, c2001. ISBN 0124874304.

[6] GUO, Y.L., K.C. KAO, H.E. LI a K.S. CHINAG. *Non-linear Photonics*. New York: Springer, 2003.

[7] LÁTAL, Jan, Petr KOUDELKA a František HANÁČEK. Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty. *Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty* [online]. VŠB-TU Ostrava, FEI, 2010 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010030001

[8] SCHROFFEL, J. a K. NOVOTNÝ. *Optické vlnovody*. Praha: SNTL, 1986..

[9] LUKÁŠ, Michal. INFINEON TECHNOLOGIES TRUTNOV. *Laserové diody: Část 2. Funkce a základní parametry* [online]. 2005 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34933

[10] JUAREZ, J.C., E.W. MAIER, Nam Choi KYOO a H.F. TAYLOR. DEPT. OF ELECTR. ENG., Texas A&M Univ., College Station, TX, USA. *Distributed fiber-optic intrusion sensor system*. Texas: Lightwave Technology, Journal of (Volume:23 , Issue: 6), 2005. ISSN: 0733-8724.

[11] Optical circulator. AU-YEUNG, Vincent, Qing-Dong GUO a Wei-Zhong LI. *Optical circulator*[online]. USA, 1999 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.google.com/patents/US5909310

[12] Fiber-Optic Cable. SHELDON, Tom. BIG SUR MULTIMEDIA. *Fiber-Optic Cable* [online]. 2001 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.linktionary.com/f/fiber-optic.html

[13] Polarization Independent Circulator. [online]. [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.optolinkcorp.com/Circulator_PI.htm

[14] Sestava EDFA zesilovač a vláknový laser. [online]. 27-7-2011 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.safibra.cz/ampli-kit

[15] Optical fiber measurments. [online]. [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://electron9.phys.utk.edu/optics421/modules/m9/optical_fiber_measurements.htm

[16] MCELHENNY, John E.c, Radha K. PATTNAIK, Jean TOULOUSE, Kunimasa SAITOH

a Masanori KOSHIBA. DEPARTMENT OF PHYSICS, Lehigh University, Bethlehem. *Unique characteristic features of stimulated Brillouin scattering in small-core photonic crystal fibers*. [PDF]. Pennsylvania 18015, USA, 2008 [cit. 2013-05-26]. OCIS codes: 290.5830, 060.5295.

[17] RUFFIN, A.Boh. CORNING, Inc., 1 Science Dr. *Stimulated Brillouin Scattering: An Overview of Measurements, System Impairments, and Applications*. [PDF]. New York: Corning, Inc., 2004 [cit. 2013-05-26].

[18] CHEN, Weimin, Yuanyuan XIE, Peng ZHANG a Lei LIN. THE KEY LABORATORY FOR OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY & SYSTEMS, Ministry of Education of China. *Localization theory of distributed f iber vibration sensor*. [PDF]. Chongqing, China: Chinese optics letters / Vol. 7, No. 3, 2009 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.3788/COL20090703.0186.

[19] WOOLER, John P.F. a Roger I. CRICKMORE. Fibre optic sensors for seismic intruder detection. *Fibre optic sensors for seismic intruder detection* [PDF]. [cit. 2013-05-26].

[20] FENG, Hao, Lin ZHU, Shijiu JIN, Yan ZHOU, Zhoumo ZENG a Jingchang ZHUGE. STATE KEY LABORATORY OF PRECISION MEASURING TECHNOLOGY & INSTRUMENTS, Tianjin University, China. *Modeling of Pipeline Leakage Detection and Prewarning System for Locating Error Analysis Based on Jones Matrix*. [PDF]. Tianjin, China, 2008 [cit. 2013-05-26].

[21] HOTATE, Kazuo a Masato TANKA. Correlation-based continuous-wave techniques provide high spatial resolution for distributed fiber-optic sensing. *Correlation-based continuous-wave techniques provide high spatial resolution for distributed fiber-optic sensing* [PDF]. Oemagazine, 2001 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1117/2.500111.0007.

[22] GANGOPADHYAY, Tarun Kumar, Sivaji CHAKRAVORTI, Kesab BHATTACHARYA a Saibal CHATTERJEE. CENTRAL GLASS AND CERAMIC RESEARCH INSTITUTE. *Wavelet analysis of optical signal extracted from a non-contact fibre-optic vibration sensor using an extrinsic Fabry–Perot interferometer*. [online]. Kalkata, India, 2005 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1088/0957-0233/16/5/005.

[23] SNIDER, William T,, Christi K. MADSEN, Robert A. ATKINS a John C. SIMCIK. DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, Texas A&M University. *Border Security Utilizing a Distributed Fiber Optic Intrusion Sensor*. [PDF]. [cit. 2013-05-27].

[24] FDK. *Optical Isolators* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.fdk.co.jp/laboratory/hikariai-e.html

[25] Thorlabs. *IR Free-Space Isolators (1120 - 2100 nm)* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.thorlabs.com/search/searchQuickLook.cfm?usegroup_id=4916&search=isolator&oID=3008&sgname=1550%20nm%20Polarization-Dependent%20Isolators

[26] Thorlab. *IR Fiber Optic Isolators with SM Fiber (1290 - 2010 nm)* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=6178&pn=IO-K-1550

[27] Thorlab. *NIR Laser Diodes: Center Wavelengths from 805 nm to 2000 nm* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=4737&pn=FPL1055T

[28] Timbercon. *Optical Modulator* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.timbercon.com/Optical-Modulator.html

[29] Safibra. *Zesilovače pro O- a S- pásmo* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z:

http://www.safibra.cz/pdffa-zesilovace

[30] Safibra. *Ramanovské zesilovače* [online]. 27-7-2011 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.safibra.cz/ramanovske-zesilovace

[31] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. FYZIKÁLNÍ KOMPENDIUM PRO VYSOKÉ ŠKOLY. *Optika a atomová fyzika: I. Optika*. Praha: Státní pedagogické nákladatelství, 1961.

[32] Anti-Stokes Emission Always Outputs More Energy than the Operator Inputs. *OCEANS OF FREE ENERGY* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.cheniere.org/misc/antistokes.htm

SEZNAM ZKRATEK

DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex, hustý vlnový multiplex
ITU	International Telecommunication Union, Mezinárodní telekomunikační unie
LED	Light Emitting Diode, svítivá dioda
WDM	Wavelength Division Multiplex, vlnový multiplex
LD	Laser diode, laserová dioda
DFB	Distributed feedback laser, laser s rozprostřenou zpětnou vazbou
APD	Avalanche-Photodiode, lavinová fotodioda
DTS	Distributed Temperature Sensing system, distribuovaný teplotní senzorový systém
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry, optická reflektometrie v časové oblasti
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry, optická reflektometrie ve frekvenční oblasti
OWDD	optical wavelength,optický vlnově dělený demultiplexer
SBS	Stimulated Brillouin scattering, stimulovaný Brillouinův rozptyl
NTSC	National Television System(s) Committee, komise pro národní televizní systém
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier, zesilovač s erbiem dopovaným vláknem
ECL	External Cavity Laser, laser s externím rezonátorem
PC	Polarization controler, polarizační kontrolér
ESA	
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, Brillouinova optická reflektometrie v časové oblast
AOM	Acusto-optical atenuátor, akutsto-optický atenuátor
BGS	Brillouin gain spectrum, Brillouinovo ziskové spektrum
EFPI	External Fabry-Perot interferometer, externí Fabry-Perotův interferometr
FPI	Fabry-Perot interferometer, Fabry-Perotův interferometr
TDFA	Thulium Doped Fiber Amplifiers, zesilovač s thuliem dopovaným vláknem
PDFA	Praseodymum Doped Fiber Amplifiers, zesilovač s praseodymem dopovaným vláknem
EDFFA	Erbium Doped Fluoride Fiber Amplifiers, zesilovač s erbiem dopovaným fluoridovým vláknem
o-ray	ordinary ray, běžný paprsek
e-ray	extraordinary ray, vyjímečný paprsek
A/D	Analog-to-Digital converter, převodník z analogového na digitální signál
OSNR	Optical Signal-To-Noise Ratio, optický odstup signál-šum
BW	Bandwidth, šířka pásma

ITLA	Integrable Tunable Laser Assembly, integrovatelný laditelný laser
AWG	Arrayed waveguide grating, uspořádaná vlnovodná mřížka